

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



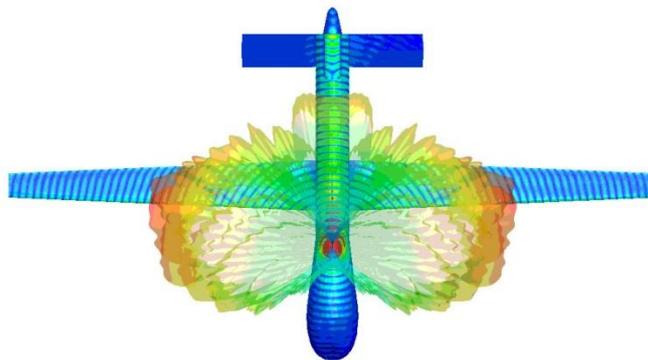
*Université SAAD DAHLEB de Blida 1  
Institut d'aéronautique et des études spatiales  
Département de la navigation aérienne*



MEMOIRE DE FIN D'ETUDE  
EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER 02 EN  
AERONAUTIQUE  
Option : CNS/ATM

**Thème :**

*Conception et réalisation d'un nouveau design  
d'antenne imprimée pour le système radio  
altimètre*



**Réalisé par :**

SEKIMI Hadjira

BERRACHICHE Nesrine

**Encadré par :**

D<sup>r</sup> HAMOUDA Zahir

Mr BOULENOUAR Kouider Elouahed

**Promotion 2018**

## REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier avant tout "**ALLAH**" le **Tout Puissant** de nous avoir donné le courage, la volonté et la patience.

Toute œuvre qui résulte d'un effort humain est explicitement ou implicitement toujours le fruit d'une vaste collaboration. Ainsi, que tous ceux qui de près ou de loin ont pris une part active dans la réalisation de ce mémoire puissent trouver dans ces lignes l'expression de notre profonde gratitude. En nous exprimant de la sorte, nous pensons tout particulièrement à notre Encadreur, le Docteur **HAMOUDA Zahir**, qui a bien voulu accepter de diriger ce travail. Nous lui remercions vivement pour sa disponibilité, ses orientations son éclairage tout au long de l'élaboration de ce mémoire, et M<sup>elle</sup> **NADJI Fatin**, M<sup>elle</sup> **SAIB Sabah**, ainsi tout l'ensemble d'équipe de laboratoire de l'ESTA, pour leurs contribution importante et leur personne de modestie. Nos remerciements s'adressent également aux membres de jury qui ont accepté de juger notre travail. Le même sentiment de reconnaissance est aussi exprimé à l'endroit de tout le corps enseignant et administratif de l'Institut d'Aéronautique et des Etudes Spatiales de Blida, pour la qualité des enseignements et la circulation de l'information en particulier notre Co-promoteur Mr. **Boulenouar KOUIDER EI WAHED** pour son aide et ses conseils. Nous ne saurons épuiser ces remerciements sans féliciter nos parents, pour l'affection et le soutien financier. Notre pensée va aussi droit vers tous les étudiants de notre promotion.

### **III.5 Conclusion**

Ce chapitre a été consacré à l'étude des antennes Vivaldi, nous avons montré la faisabilité de conception des nouvelles antennes essayant de répondre aux exigences des antennes en aéronautique en terme de gain et adaptées à la fréquence 4,5 GHz du radioaltimètre. Nous avons pu déterminer l'influence de la géométrie du patch, et nous en déduisons ensuite les règles de comportement .cette étude est alors exploitée pour réaliser une antenne Vivaldi répondant au cahier des charges, et avec une large bande de fréquence qui nous donne l'opportunité d'en profiter pour d'autre application et systèmes de communications.

### **Conclusion générale**

La conception d'une antenne patch nous a été très utile et très enrichissante, ça nous a permis d'approfondir nos connaissances pour le module antenne et d'appliquer ces connaissances. Il nous a offert également l'opportunité d'apprendre travailler sur un nouveau logiciel électromagnétique HFSS, qui, de sa part nous a aidé d'être plus proche de l'aspect pratique des notions électroniques en particulier d'hyperfréquence et de nous familiariser ainsi avec une situation réelle de projet qui donne sur une porte ouverte vers d'autre perspectives liés au monde industrielle purement concret .

Dans ce travail, on a proposé une antenne patch Vivaldi en réseau destinée à remplacer l'antenne du radioaltimètre et à opérer dans les super hautes fréquences (SHF) et plus précisément à la fréquence de 4.5GHz, La conception de cette antenne est réalisé avec le logiciel de conception et de simulation HFSS « High Frequency Structure Simulator » L'antenne proposée est avantageuse pour plusieurs applications, car elle est caractérisée par une taille très réduite, une large bande passante et un fort gain, ce qui la rend propice et très convenable pour établir une communication fiable.

L'antenne Vivaldi, avec son poids léger, ses petites dimensions et par contraintes aérodynamiques est devenu un choix inévitable plutôt indispensable et une solution prometteuse, non seulement pour sa taille mais aussi pour ses performances et son couts.

Cette antenne qui n'est qu'un des types d'antennes ULB , avec sa large bande de fréquence ULB promet de nouvelles possibilités et un potentiel important dont pourront bénéficier de nombreux domaines d'application , comme par exemples ,l'antenne Wi-Fi qui exerce à la fréquence 2.4 GHz, l'antenne .....etc.

Cette thèse présente un cas concret de réalisation. Nous sommes amenés à concevoir, simuler, réaliser une antenne de type Vivaldi ; nous sommes parvenu à l'étape de réalisation et pour l'étape de mesure qui s'effectue dans des laboratoires spéciaux dans des chambres anéchoïques, nous avons été pris par le temps, et arrêté finalement à ce stade.

## ملخص:

يقدم هذا المشروع تصميم الهوائيات المطبوعة و كذا هوائي فيفالدي إما بعنصر مشع واحد و إما بشكل شبكي، بحيث يمكن استعماله لاستبدال هوائي مقياس الارتفاع المثبت في الجزء السفلي للطائرة، و الذي يملك خصائص هامة من حيث الكسب و الاتجاه ، و لكن مع عيوب مثل الوزن و الحجم المعتبر. الهوائي المقترح موجه للعمل في نطاق الترددات الأكثر من عالية جدا و بصورة أدق تحت تردد 4.5 جيجا هرتز تم إجراء المحاكاة بواسطة المنصة الكهرومغناطيسية (HFSS).

**كلمة مفتاحية :** الهوائيات المطبوعة ، هوائيات فيفالدي، سماحية العازل، معامل الانعكاس

## Résumé :

Ce projet présente la conception des antennes imprimées patch et Vivaldi à un seul élément rayonnant et en réseau que l'on peut y servir pour remplacer l'antenne du radioaltimètre qui se trouve sous le fuselage d'un avion, qui possède des caractéristiques importantes pour son gain, sa directivité mais avec des inconvénients comme son poids et sa taille. La simulation a été réalisée sous la plate-forme électromagnétique HFSS. L'antenne proposée est destinée à fonctionner à la bande de fréquence SHF et plus précisément à la fréquence 4.5GHz

**Mots clés:** Antenne imprimée, Antenne Vivaldi, permittivité diélectrique, coefficient de réflexion, HFSS-Ansoft.

## Abstract:

This project presents the design of patch and Vivaldi antennas with a single radiating and network element that can be used to replace the radio altimeter antenna that is located under the fuselage of an aircraft, which has important features for its gain, its directivity but with disadvantages such as its weight and size. The simulation was performed under the HFSS electromagnetic platform. The proposed antenna is intended to operate at the SHF frequency band and more precisely at the frequency 4.5GHz

**Keywords:** patch Antenna, Vivaldi antenna, dielectric permittivity Reflection coefficient, HFSS-Ansoft.

## REMERCIEMENTS

*Nous tenons à remercier avant tout "ALLAH" le Tout Puissant de nous avoir donné le courage, la volonté et la patience.*

*Toute œuvre qui résulte d'un effort humain est explicitement ou implicitement toujours le fruit d'une vaste collaboration. Ainsi, que tous ceux qui de près ou de loin ont pris une part active dans la réalisation de ce mémoire puissent trouver dans ces lignes l'expression de notre profonde gratitude. En nous exprimant de la sorte, nous pensons tout particulièrement à notre Encadreur, le Docteur **HAMOUDA Zahir**, qui a bien voulu accepter de diriger ce travail. Nous lui remercions vivement pour sa disponibilité, ses orientations son éclairage tout au long de l'élaboration de ce mémoire, et M<sup>lle</sup> **NADJI Fatim**, M<sup>lle</sup> **SAIB Sabah**, ainsi tout l'ensemble d'équipe de laboratoire de l'ESTA, pour leurs contribution importante et leur personne de modestie. Nos remerciements s'adressent également aux membres de jury qui ont accepté de juger notre travail. Le même sentiment de reconnaissance est aussi exprimé à l'endroit de tout le corps enseignant et administratif de l'Institut d'Aéronautique et des Etudes Spatiales de Blida, pour la qualité des enseignements et la circulation de l'information en particulier notre Co-promoteur le Docteur **KOUIDER El Wahed** pour son aide et ses conseils. Nous ne saurons épuiser ces remerciements sans féliciter nos parents, pour l'affection et le soutien financier. Notre pensée va aussi droit vers tous les étudiants de notre promotion.*

# *Dédicace*

*A mes très chers parents*

*Pour tous ceux qui m'ont soutenu.*

*Sekimi Hadjira*

# *Dédicace*

*A mes chers parents, Pour la vie et l'éducation données :*

*A mes proches, pour leurs soutient ;*

*A mes amis, pour la valeur qu'ils ont ajoutée dans ma vie ;*

*A tous ceux qui me sont chers.*

*BERRACHICHE Nesrine*



RESUME .....	I
REMERCIEMENT .....	II
DEDICACES .....	III
TABLE DES MATIERES .....	IV
LISTE DES ABRIVIATIONS .....	VI
LISTE DES FIGURES .....	IX
LISTE DES TABLEAUX .....	XI
INTRODUCTION GENERALE .....	1

## TABLE DES MATIERES

### CHAPITRE I : Généralité sur les antennes

I.1 Introduction .....	3
I.2 Antenne et aeronef.....	3
I.2.1. Les types d'antennes utilisées en aéronautique .....	5
I.2.2. Antenne du Radioaltimètre.....	7
I.2.2.1. Principe de fonctionnement .....	8
I.2.2.2. Description de l'antenne radioaltimètre .....	9
I.3. Caractéristiques fondamentaux d'une antenne.....	10
I.3.1. Puissance rayonnée par une antenne .....	10
I.3.2. Le coefficient de réflexion. ....	11
I.3.3. Adaptation et condition d'adaptation .....	11
I.3.4. Le taux d'onde stationnaire.....	12
I.3.5. Bande passante et facteur de qualité.....	12
I.3.6. Diagramme de rayonnement.....	13
I.3.7. Angle d'ouverture.....	15
I.3.8. Gain, Directivité et rendement d'une antenne.....	15
I.3.9. Lien entre gain et angle d'ouverture.....	16
I.3.10. Puissance isotrope rayonnée équivalente (PIRE) .....	16
I.3.11. Modèle électrique et comportement fréquentiel.....	16
I.3.11.1 Modèle électrique d'une antenne.....	17
I.3.11.2. Résistance de rayonnement .....	18

I.3.12. Polarisation d'une antenne – Perte de polarisation.....	18
I.3.13. Les différentes zones de rayonnement .....	20
I.3.14. Bilan de liaison.....	21
I.4. Conclusion.....	22

## **CHAPITRE II :Optimisation d'antenne patch et reseau d'antenne patch pour le système radio altimetre**

II.1. Introduction .....	23
II.2. Choix de la technologie des antennes imprimées .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b> 23
II.3. Structure générale d'une antenne patch .....	24
II.3.1. Les différents types d'élément rayonnant .....	25
II.3.2.Critères de choix du substrat.....	26
II.3.3.Dimensionnement d'une antenne patch rectangulaire.....	27
II.4 Mécanismes d'alimentation.....	28
II.5. Le choix de l'alimentation .....	30
II.5.1. L'alimentation coaxiale .....	30
II.6. Mécanisme de rayonnement .....	30
II.7. Conception d'une antenne patch rectangulaire.....	31
II.7.1. Définition du besoin.....	31
II.8. Modélisation par HFSS d'antenne patch.....	32
II.8.1. Choix de la forme.....	32
II.8.2. Présentation du Logiciel HFSS (ANSOFT) .....	33
II.8.3. Conception d'une antenne patch rectangulaire sous HFSS.....	34
II.9. Simulation et résultats.....	34
II.9.1. La modélisation géométrique Mesh(maillage) .....	34
II.9.2. Le coefficient de réflexion.....	35
II.9.3. Taux d'onde stationnaire .....	35
II.9.4. Impédance d'entrée .....	36
II.9.5. Le diagramme de rayonnement et gain.....	37
II.9.6. Les répartitions des champs.....	37
II.9.7. Vecteurs des champs .....	38
II.10.Antenne réseau patch .....	38
II.10.1. Présentation du concept .....	38
II.10.2. Couplage entre les antennes imprimées.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b> 40

II.10.3. Définition du couplage dans le plan E et le plan H.....	40
II.10.4.Choix de la forme.....	41
II.10.5.Conception d'une antenne patch réseau sous HFSS .....	42
II.10.6. Simulation et résultats.....	42
II.11.Conclusion .....	45

### **CHAPITRE III :Miniaturisation des antennes pour le système radio altimetre**

III.1. Introduction.....	46
III.2. Antenne Vivaldi à fente conique.....	46
III.2.1. Conception d'antennes Vivaldi à fente conique.....	48
III.2.2. Calcul des paramètres.....	49
III.3 Antenne Vivaldi antipodale.....	49
III.4. Antenne Vivaldi antipodale équilibrée.....	50
III.5. Etudes paramétriques.....	51
III.5.1. Influence du profil conique.....	52
III.5.2 Influence des paramètres de la ligne d'alimentation .....	53
III.5.3. Influence des paramètres du substrat .....	54
III.6. Conception Antenne Vivaldi optimisée.....	55
III.7 Simulation et resultats d'antenne vivaldi optimisée .....	56
III.8. Augmentions du gain d'une antenne Vivaldi.....	59
III.8.1. Lentilles diélectriques.....	59
III.8.2. Corrugation.....	61
III.8.3. Antenne Vivaldi en réseau.....	62
III.9. Simulation et résultats.....	63
III.10.Réalisation .....	65
III.11.Conclusion .....	70

### **LISTES DES ABRIVIATIONS**

**HF** : High Frequency.

**VHF**: Very high Frequency.

**HFSS**: High Frequency Structure Simulator.

**ROS**: Rapport d'Ondes Stationnaires.

**BW**: Band Width.

**GHz**: Giga Hertz.

**MMIC:** Monolithic Microwave Integrated Circuit.

**ULB:** Ultra Large Bande.

**3D:** 3 Dimensional.

**2D:** 2 Dimensional.

**TOS :** Taux d'Ondes Stationnaires.

**VSWR:** Voltage Standing Waves Ratio.

**MEMS:** Micro Electro Mechanical Systems.

**GSM:** Global System for Mobile communication.

**Wi-Fi :** Contraction de Wireless Fidelity.

**FEM :** Finite Element Method.

**RL :** Return loss.

**LTSA :**Linear Tapered Slot Antenna .

**CWSA:** Constant Width Slot Antenna.

**TSA:** Tapered Slot Antenna.

**ZIM:**Zero Index Metamaterials .

**SRR:**Split Ring Resonator.

**ILS:**Instrument landing System.

**RA:** Radar altimeter.

**DME:**Distance Measuring Equipment.

**UV:** Ultra Violet .

**PCB:** Printed Circuit Board.

## **LISTE DES FIGURES**

Figure I.1 : les différents emplacements des antennes dans un avion BOEING 787 .....	4
Figure I.2: Antenne fil .....	5
Figure I.3: Antenne cadre .....	5
Figure I.4: Antenne patch .....	6
Figure I.5: Antenne réseau .....	6
Figure I.6: Antenne a fente fermée .....	6
Figure I.7: Antennes de communications/navigations en aéronautique .....	7
Figure I.8 : principe de fonctionnement de la radio altimètre .....	8
Figure I.9 : photos prises de différents côtés d'une antenne cornet du radioaltimètre .....	9
Figure I.10: puissance rayonnée par une antenne dans une direction de l'espace .....	10
Figure I.11: Bande passante et coefficient de réflexion .....	13
Figure I.12: Représentation du diagramme de rayonnement d'une antenne. ....	14

Figure I.13: Exemple de Diagramme de rayonnement d'une antenne cornet.....	14
Figure I.14: Modèle d'impédance complexe d'une antenne .....	17
Figure I.15: Polarisation d'une antenne.....	19
Figure I.16: Pertes de polarisation.....	20
Figure I.17: Les zones de rayonnement d'une antenne. ....	21
Figure II.1: Structure d'une antenne patch rectangulaire. ....	25
Figure II.2: Les différentes formes de du patch. ....	26
FigureII.3: Alimentation par sonde coaxiale. ....	30
Figure II.4: Interface de logiciel HFSS. ....	34
Figure II.5: Structure antenne patch rectangulaire sous HFSS.....	34
Figure II.6: Modélisation géométrique d'une antenne patch rectangulaire. ....	35
FigureII.7: Coefficient de réflexion S11 d'une antenne patch. ....	35
Figure II.8: Le VSWR d'une antenne patch.....	36
Figure II.9: Représentation de la partie réelle de l'impédance d'entrée. ....	36
Figure II.10: Représentation de la partie imaginaire de l'impédance d'entrée. ....	37
Figure II.11: Diagramme de rayonnement et gain d'une antenne patch .....	37
Figure II.12: Répartition des champs E et H d'antenne patch.....	37
Figure II.13: Représentation des vecteurs des champs E et H d'une antenne patch. ....	38
Figure II.14: Schéma simplifié d'un réseau d'antenne.....	39
Figure II.15: Les configurations géométriques des réseaux d'antenne.....	40
Figure II.16: Couplage entre les antennes patch dans le plan E et H.....	41
Figure II.17: Structure réseau patch à 4 éléments sur HFSS.....	42
Figure II.18: Maillage antenne réseau.....	42
Figure II.19: Le coefficient de réflexion et la bande passante.....	43
Figure II.20: Taux d'onde stationnaire.....	43
Figure II.21: Diagramme de rayonnement et gain pour l'antenne réseau.....	44
Figure II.22: Les répartitions des champs E/H d'un réseau patch.....	44
Figure II.23: Les répartitions des vecteurs champs E/H d'un réseau patch.....	45
Figure III.2: Les antennes TSA.....	48
Figure III.3: Antenne Vivaldi antipodale.....	50
Figure III.4: Antenne Vivaldi antipodale équilibrée.....	51
Figure III.5: Schéma de l'antenne Vivaldi avec les paramètres géométriques.....	52
Figure III.6: Coefficient de réflexion S11 pour différents profils.....	53
Figure III.7: Influence de la distance de la ligne d'alimentation.....	53
Figure III.8: Influence de l'angle du stub.....	53
Figure III.9: Influence de la largeur et la longueur du substrat l et w.....	54
FigureIII.10: Influence de l'épaisseur de substrat.....	55
Figure III.11: Antenne Vivaldi simulée sous HFSS.....	56
Figure III.7.1: La modélisation géométrique (Mesh ou maillage).....	56
Figure III.13: Paramètre S11 pour l'antenne optimisée.....	57
Figure III.14: Le TOS pour l'antenne Vivaldi optimisée.....	57
Figure III.15: Diagramme de rayonnement et gain.....	58
Figure III.16: Repartition des champs E/H d'une antenne Vivaldi.....	58

Figure III.17: Vecteur des champs électrique et magnétique d'une antenne Vivaldi.....	58
Figure III.18: Conception antenne Vivaldi avec lentille diélectrique sous HFSS.....	60
Figure III.19: Coefficient de réflexion.. .....	60
Figure III.20: Gain pour l'antenne Vivaldi avec lentille diélectrique. ....	60
Figure III.21: Antenne Vivaldi avec des fentes rectangulaires sous HFSS.....	61
Figure III.22: Paramètre S11 après corrugation.. .....	61
Figure III.23: Gain pour l'antenne Vivaldi avec des fentes rectangulaires.. .....	63
Figure III.25: Modélisation géométrique d'un réseau Vivaldi.....	63
Figure III.26: Le coefficient de réflexion et la bande passante d'antenne réseau Vivaldi..	64
Figure III.27: Diagramme de rayonnement et gain d'une antenne Vivaldi réseau.....	64
Figure III.28: La répartition des champs E/H d'une antenne réseau Vivaldi.....	65
Figure III.29: Répartition des vecteurs de champ E /H d'une antenne réseau vivaldi.....	65
Figure III.30: Motif imprimé sur transparent via PCB Layout.....	66
Figure III.31: Exposition de la plaquette aux UV.....	67
Figure III.32: plaquette noyée dans une baignoire d'un dissolvant chimique.....	67
Figure III.33: La machine de gravure chimique.....	68
Figure III.34: Issue de la gravure d'antenne.....	69

### **Liste des tableaux**

Tableau II.1: Avantages et inconvénients des différentes méthodes d'alimentation.....	29
Tableau II.2: Définition des besoins d'une antenne désirée .....	31
Tableau II.3: Choix de la forme d'une antenne patch rectangulaire .....	32
Tableau II.4: Avantages & Inconvénients de la méthode des éléments finis.....	34
Tableau II.5: Choix de la forme d'une antenne réseau ptach.....	41
Tableau III.1:Recapitulatif des dimentions de l'antenne optimisée.....	56

### Introduction générale

De nombreuses antennes sont placées sur le fuselage d'un avion, d'où l'utilisation des antennes miniatures est devenue primordiale. Afin de répondre aux besoins croissants d'équipements de CNS pour les applications aéronautiques, il est important de réduire, le plus possible, la taille et la masse de l'équipement des avions. Cela conduit à une réduction des coûts ou laisse la possibilité d'ajouter des équipements supplémentaires sur l'avion. Nous cherchons ici à réduire les dimensions, le volume et poids des composants radioélectriques, à savoir, l'antenne cornet du radioaltimètre, sans pour autant détériorer ses performances en rayonnement (directivité, polarisation, gain etc.). Les antennes cornets se révèlent meilleures, en terme de directivité ou réduction du niveau des lobes secondaires. S'il a été démontré dans la littérature scientifique que ces structures permettent d'obtenir des résultats très prometteurs en simulation et en mesure, l'inconvénient majeur de ce type d'antenne et sa taille considérable, son volume et son poids. L'apport principal de cette thèse a été de concevoir une nouvelle antenne du type imprimée qui sont à la base petit de taille en gardant les qualités principaux des antennes, soit la directivité, le diagramme de rayonnement ; et un gain important. de telle sorte qu'elle soit adaptée aux applications requise ; qui est dans notre étude l'antenne de radioaltimètre qui exerce à 4,5 GHz. Elle permet de les plus adaptées aux applications requises. Un prototype d'antenne Vivaldi a été conçu, fabriqué et mesuré grâce à logiciel HFSS(Hight Frequency Structure Similator). Les résultats obtenus démontrent l'intérêt, l'efficacité et le caractère général de la méthode proposée pour la conception de dispositifs hyperfréquences.

### Plan du manuscrit

Ce manuscrit comporte trois chapitres développant les divers aspects du sujet abordé, précédés par une introduction générale, et suivis par une conclusion générale.

Nous débutons le **premier chapitre** par un contexte général exposant l'objectif du travail mené. Ensuite, nous présentons des antennes en aéronautique. Enfin, un succinct rappel sur les caractéristiques fondamentales des antennes et les outils de simulation. Nous sommes également se basés sur l'antenne du radioaltimètre située dans la partie inférieure du fuselage qui est en forme cornet en démontrant ainsi l'inconvénient majeur de ce type d'antenne et en proposant comme solution, de remplacer cette antenne volumineuse par une antenne imprimée en gardant les mêmes performances et caractéristiques en terme de gain et coefficient de réflexion.

## INTRODUCTION GENERALE

---

Le **second chapitre** propose pour une première solution un passage de la 3D présenté par l'antenne classique cornet (volume) à la 2D (surface) présenté par l'antenne imprimée ;en commençant par une antenne à un seul élément rayonnant puis à plusieurs éléments rayonnante , dont le but et d'améliorer le gain ;le diagramme de rayonnement et le coefficient de réflexion. .

Le fonctionnement de deux structures sera bien expliqué, et leurs principales caractéristiques telle que le coefficient de réflexion, le diagramme de rayonnement, le gain .etc...seront présentées. Enfin, une analyse comparative entre eux, et son étude expérimentale sont présentées. Les résultats simulés obtenus moyennant les logiciels HFSS.

Le **troisième chapitre** vise à miniaturiser l'antenne, Nous avons étudié le cas d'une antenne Vivaldi ,en premier lieu nous avons conçu une antenne à un seule élément rayonnant, les résultats sont simulé sur HFSS, nous avons effectué plusieurs changements sur plusieurs paramètres, également la structures générale, le changement de distance du point d'alimentation , par fois par corrugation et d'autres plusieurs changements dont le but essentiel était d'avoir une antenne Vivaldi adaptée à la fréquence 4.5GHz avec efficace avec un gain plus de 10 dB.

Nous avons à la fin réussi à concevoir l'antenne adéquate à notre besoin ce qui nous a permis de passer à l'étape de la réalisation. Contrairement à beaucoup d'idées reçues, la réalisation d'antenne n'est pas si compliquée, il suffit de se familiariser avec les appareils et les différents outils nécessaires pour la réalisation d'antenne.

### I.1. Introduction

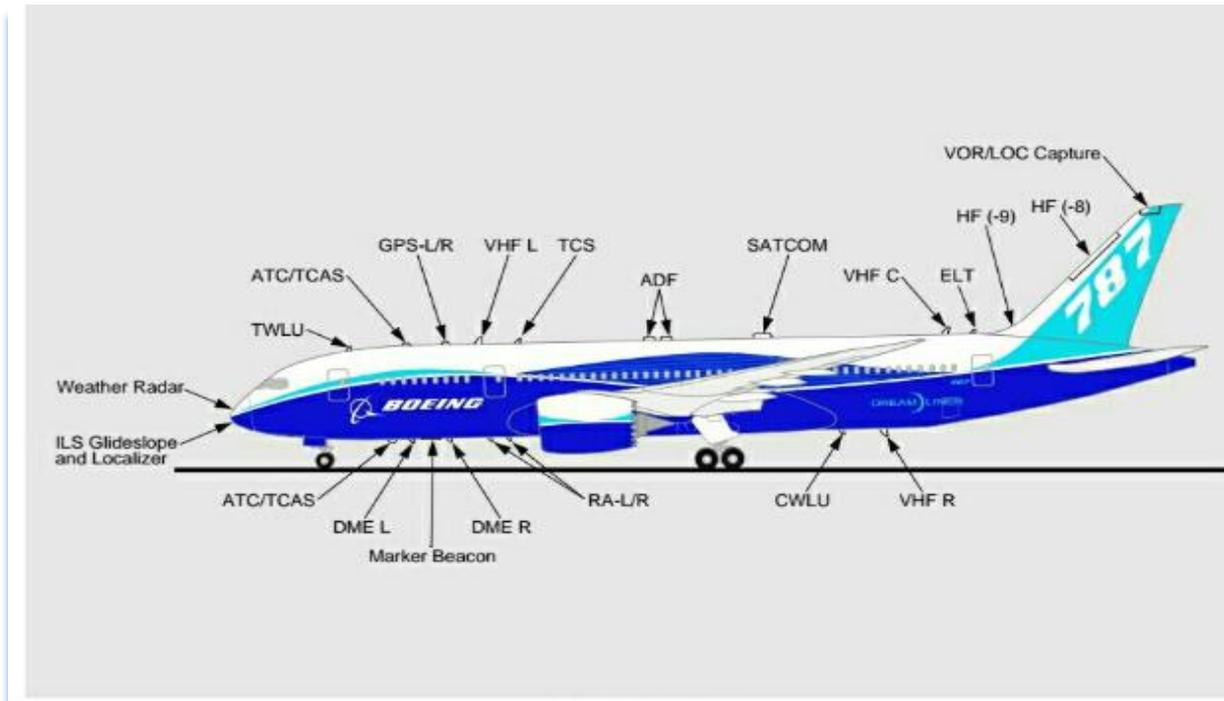
De nos jours, les réseaux sans fil ne cessent de se développer. Le support principal est l'onde électromagnétique au lieu des câbles et des liaisons filaires. La qualité de ces réseaux est totalement dépendantes des performances des éléments les constituant, en particulier : les équipements d'extrémité ou antennes. En effet, pour chaque application, une antenne spécifique est normalement nécessaire. Dans notre thèse on s'intéresse à l'antenne du radioaltimètre.

En fonction de la fréquence d'émission, du débit de données ou de la portée d'émission, plusieurs technologies d'antennes sont possibles. Les caractéristiques de celles-ci doivent donc être optimisées au cas par cas.

Nous débutons le premier chapitre par un aperçu général sur les différentes antennes usées sur un aéronef en exposant ainsi l'objectif du travail mené. Ce qui nous intéresse dans ce premier chapitre est le système radio altimètre qui exerce à la fréquence 4.5 GHz qui est en générale une antenne fondamentalement directive sous forme cornet situé à la partie inférieure du fuselage d'un aéronef, de façon à ce qu'elle puisse fournir des meilleures propriétés aérodynamiques, l'inconvénient majeur de cette antenne est son volume son poids et sa taille importante qui peut réduire les performances envisagés en terme aérodynamique. Et pour mieux comprendre nous allons par la suite entamer un rappel sur les antennes, leur principe de fonctionnement et leurs caractéristiques fondamentales.

### I.2. Antenne et aéronef:

Les systèmes de navigation et de communication avioniques comportent plusieurs bandes de fréquence à partir de 1 MHz jusqu'à 10 GHz. Chacun de ces systèmes ont des unités récepteur-transmetteur et des antennes associées situées à l'extérieur de l'aéronef. Plus de vingtaine antennes placées sur le fuselage d'un avion avec polarisation verticale.



**Figure I.1:** Les différents emplacements des antennes dans un avion (BOEING 787)

Les emplacements des antennes de navigation et de communication sont indiqués ci-dessus. Ce sont les systèmes <sup>[1]</sup>.

- ✓ Radar météorologique
- ✓ Système d'atterrissage (ILS)
- ✓ Terminal Wireless local area (TWLU)
- ✓ Local area Network (LAN)
- ✓ Distance Measuring Equipment (DME) (Équipement de mesure de distance)
- ✓ Air traffic control, traffic collision and avoidance system / contrôle de la circulation aérienne, système de collision et d'évitement de la circulation ATC/TCAS
- ✓ Balise lumineuse, marker beacon
- ✓ Radioaltimètre (Radio Altimètre) RA

Pour tous les systèmes de communication sans fil, un important facteur est la conception des antennes avec taille compacte souhaitée et caractéristiques de performance améliorées tels que la bande passante d'impédance adaptée, une meilleure efficacité et bon gain. Dans les avions, les antennes sont utilisées pour les communications ainsi que pour divers systèmes de navigation tels que pour le système de mesure de distance (DME), global système de positionnement (GPS), système d'atterrissage à micro-ondes (MLS) altimètre radar (Rad Alt), etc., couvrant la gamme de fréquences de 30 MHz à 4 GHz et plus <sup>[2]</sup>.

### I.2.1. Les types d'antennes utilisées en aéronautique

Il existe plusieurs types d'antennes différents. En aéronautique et en dehors des monopôles «ground plane» et des dipôles, qui sont les plus répandus, on rencontre assez souvent :

**L'antenne filaire:** Simple fil tendu, alimenté par une de ses extrémités. S'il est plus long qu'une demi-longueur d'onde, on parle de «long fil». Nécessite un système d'adaptation d'impédance (boite d'accord).

Ici, l'antenne HF d'un ancien liner. De nos jours l'antenne HF est une antenne raccourcie, Rigide logée dans le bord d'attaque du plan vertical, ou au sommet de ce dernier (parfois en bout d'aile, comme sur les anciens 747). On voit encore des antennes filaires sur certains avions, même et surtout les petits



**Figure I.2:** Antenne fil.

C'est alors l'antenne de «lever de doute», couplée à l'antenne cadre, que nous évoquons ci-après, et servant à l'ADF.

**L'antenne cadre:** Antenne très directive, plutôt sensible à la composante magnétique de

L'onde radio sur les avions, comme à terre  
C'est l'antenne typique de la radiogoniométrie.  
Encore exploitée pour certains ADF, elle est malgré tout, abandonnée de plus en plus au profit de systèmes plus modernes.



**Figure I.3:** Antenne cadre.

**L'antenne patch:** Conçue pour les fréquences très élevées (UHF et SHF), elle consiste à coller une plaque de cuivre (patch) sur l'une des faces d'un diélectrique, l'autre face étant appliquée sur une surface conductrice, qui sert de plan de masse.

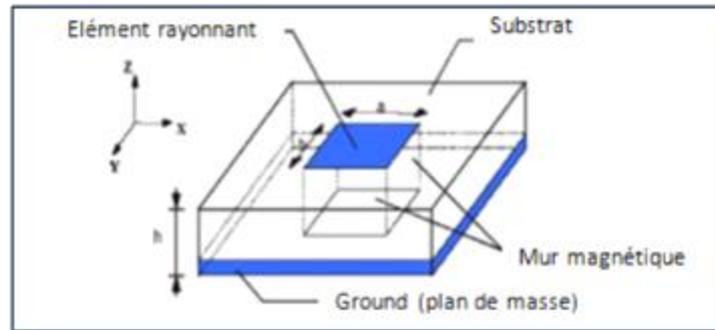


Figure I.4: l'antenne patch.

On peut placer plusieurs patches sur une même surface diélectrique, formant ainsi des réseaux. Ca ressemble alors beaucoup à un circuit imprimé.



Figure I.5: Antenne réseau.

**L'antenne à fente:** Egalement conçue et adaptée aux très hautes fréquences, il s'agit tout simplement et comme son nom l'indique, d'une fente, taillée dans un matériau conducteur. La longueur de la fente correspond soit à  $\lambda/4$  (fente ouverte) ou à  $\lambda/2$  (fente fermée).

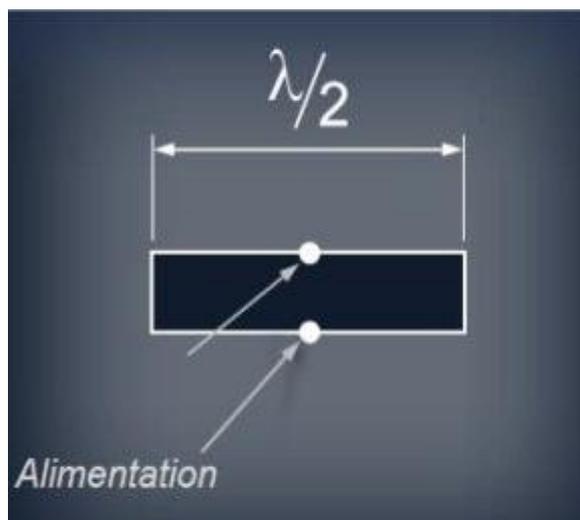


Figure I.6: Antenne a fente fermée.

La longueur d'une antenne «classique» détermine le sens de son champ électrique. Pour une antenne à fente, c'est celui du champ magnétique. On peut alimenter l'antenne à fente avec des conducteurs, aux points de contact tels que décrits sur la figure, mais aussi à une extrémité. On peut aussi réaliser une fente ouverte  $\lambda/4$ , alimentée à l'extrémité ouverte. Enfin et surtout, on peut pratiquer des fentes dans un guide d'onde.

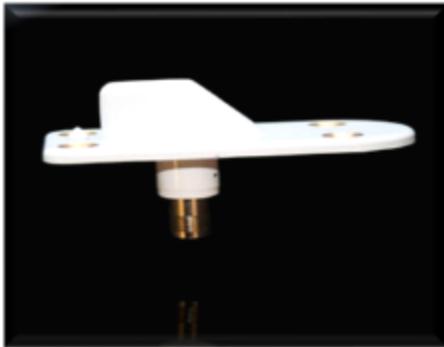
### Les antennes de communications et de radionavigations:



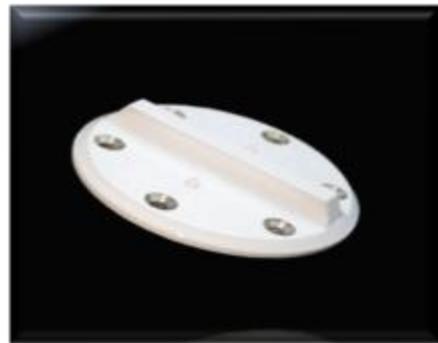
Antenne VHF/pour avion



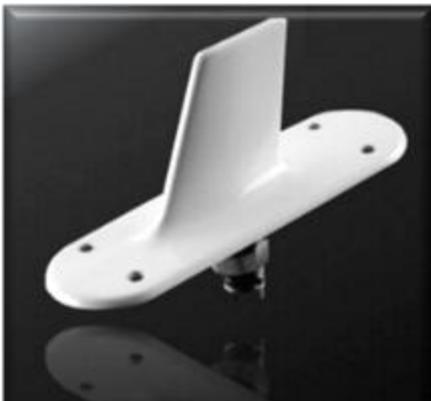
Antenne GPS/pour avion/pour avion



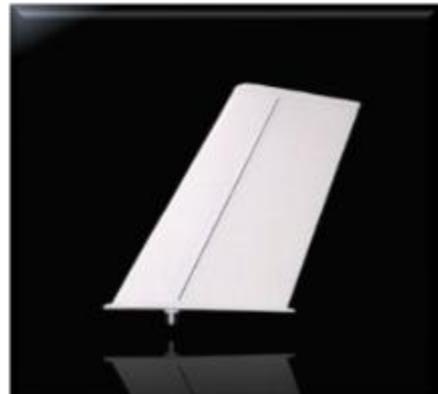
Antenne pour avion/Glide



Antenne pour avion/LOC



Antenne pour avion/avion



Antenne ELT/pour avion DME/TCAS

**Figure I.7:** Antennes de communications /navigations en aéronautique.

### I.2.2. Antenne du Radioaltimètre:

Le radioaltimètre, radar altimétrique ou altimètre radar est un appareil à bord d'un aéronef qui permet de mesurer sa hauteur par rapport au sol ou de l'eau. Le radioaltimètre peut être couplé à un système avertisseur de proximité du sol pour éviter les écrasements. Il

existe plusieurs types de tels les radars à modulation par impulsion. Ils utilisent une antenne qui émet de courtes impulsions micro-ondes vers le nadir et le système note le temps pris pour l'aller-retour ( $t_0$ ) afin de calculer cette hauteur.

### I.2.2.1. Principe de fonctionnement:

Le radioaltimètre mesure la hauteur vraie de l'avion en mesurant le temps de propagation de signaux radioélectrique émis à bord, et reçus après réflexion au sol.

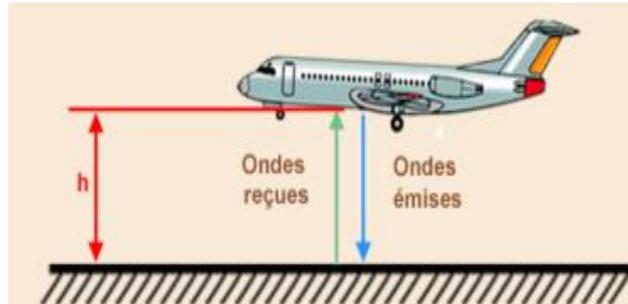


Figure I.8: Principe fonctionnement du radioaltimètre

$$t_0 = 2 \cdot h / C \quad (I.1)$$

$t_0$  = temps pris pour l'aller-retour

$h$  = hauteur au-dessus du sol

$C$  = vitesse de la lumière

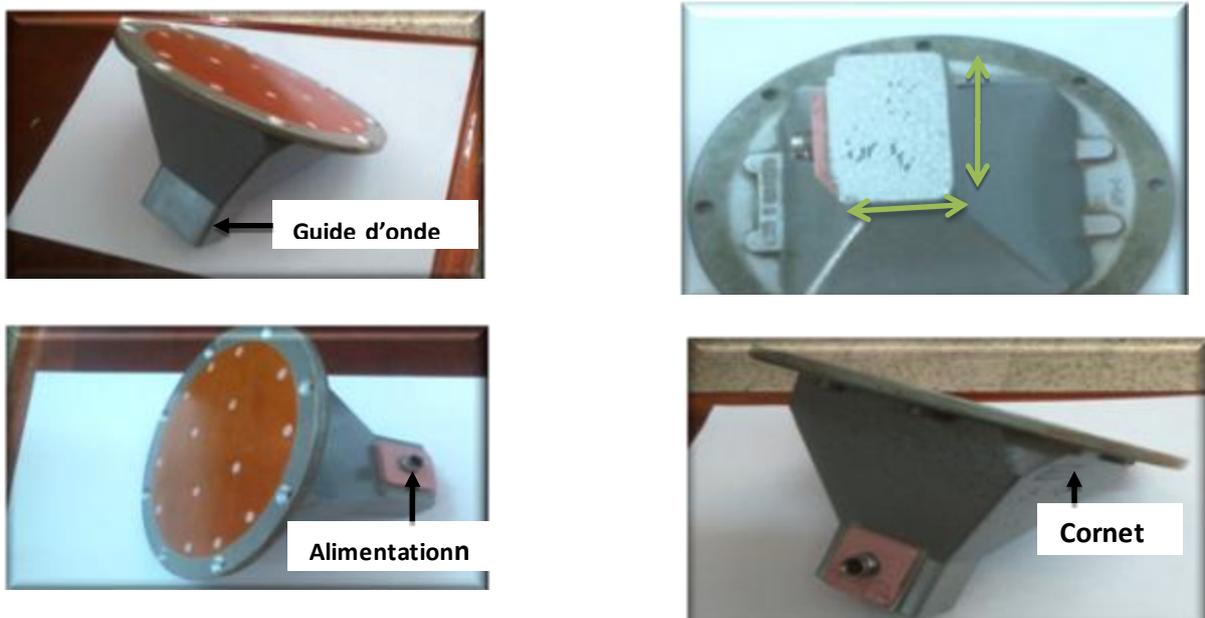
L'impulsion ayant une certaine largeur angulaire, la région illuminée augmente avec la distance au sol. Il s'agit d'un disque en expansion et donc l'énergie se répartie sur une surface de plus en plus grande jusqu'à ce qu'un anneau se forme à une certaine distance. Par la suite, cet anneau demeure constant en circonférence même si le disque continue son expansion. L'énergie rétrodiffusée augmente jusqu'à la formation de l'anneau puis se stabilise jusqu'à ce que l'anneau atteigne la largeur du faisceau et diminue ensuite. En aéronautique c'est un instrument d'aide au pilotage en particulier en vol sans visibilité. Il indique la hauteur de l'aéronef au-dessus du sol et non l'altitude barométrique. On retrouve également les altimètres radar:

- ✓ Dans les avions ou les satellites pour mesurer le relief à des fins de cartographie.
- ✓ Dans les avions ou les satellites pour mesurer la hauteur des vagues qui permet d'estimer la force du vent.

### I.2.2.2. Description de l'antenne radioaltimètre

Sa forme cornet lui permet de créer une surface d'émission plus grande et d'obtenir ainsi une directivité plus importante. Son gain peut aller jusqu'à 13dB. sa structure métallique lui permet de résister à des contraintes de températures extrêmes (-40°C à +70°C), elle résiste également à des contraintes de vibration et elle travaille dans un environnement électromagnétique très agressif. Elle a de nombreux avantages, en termes de qualité, de directivité et de puissance. Elle a une largeur de bande supérieure à celle des dipôles ou des antennes fentes.

Les antennes du système radioaltimètre présentent une bonne adaptation au guide d'onde en s'évasant lentement à partir de celui-ci. Leur rapport d'onde stationnaire (VSWR) est de l'ordre de 1,05 à 1,2<sup>[5]</sup>. Bien que cette antenne a pas mal d'avantage, ça ne la prive pas d'avoir des inconvénients aussi, l'inconvénient majeur de ce type d'antennes est leur poids (1/2 kg pour notre cas de radioaltimètre) leur volume et leur coût, car elles sont entièrement métalliques. L'antenne radioaltimètre est essentiellement de ce type et, dans ce cas, le poids est un inconvénient majeur qui est contrebalancé par la solidité et le gain de ces antennes. Ce sont aussi les antennes utilisées dans les systèmes radar en raison de la puissance élevée qu'elles supportent. Du fait de leur constitution métallique, elles présentent peu de pertes. Du fait de leur forme, elles sont très directives. Leur directivité peut varier d'une dizaine à une trentaine de décibels, selon leur forme.



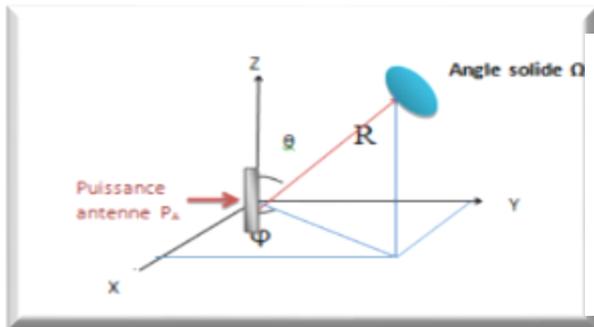
**Figure I.9:** Photos prises de différents côtés d'une antenne cornet du radioaltimètre.

L'antenne ci-dessus représente l'antenne cornet de radioaltimètre, son poids est plus de 1/2 kg, son diamètre est 20 cm ce qui est trop grand en comparant ça avec le nombre important des antennes installées sur le fuselage d'avion et qui atteint plus de 30 dispositifs antennaires dans certains aéronefs ça va sans doute altérer l'aspect aérodynamique et technique de ce dernier.

### I.3. Caractéristiques fondamentaux d'une antenne

#### I.3.1. Puissance rayonnée par une antenne <sup>[8]</sup>

Une antenne sert à convertir une puissance électrique en une puissance rayonnée, c'est-à-dire transportée par une onde électromagnétique, qui peut se propager dans toutes les directions de l'espace. Les directions dans lesquelles cette puissance va dépendre des caractéristiques de l'antenne. Commençons par exprimer la puissance rayonnée par une antenne quelconque, dont le centre est placé au centre d'un repère sphérique Figure I.11 et connectée à une source qui lui fournit une puissance électrique  $P_A$ . La puissance rayonnée dans une direction quelconque  $(\theta, \varphi)$  dans un angle solide (exprimé en stéradian sr) est donnée par l'équation I. 02. La puissance fournie à une surface élémentaire située à une distance R est donnée par l'équation I.03. La puissance rayonnée totale correspond à la somme des puissances rayonnées dans toutes les directions de l'espace (équation I.04).



$$P(\theta, \varphi) = \frac{P_A}{\Omega} \text{ (W ou W/sr)} \quad \text{(I.02)}$$

$$P(\theta, \varphi) = \frac{P_A}{\Omega R^2} \text{ (W/m}^2\text{)} \quad \text{(I.03)}$$

$$P_{\text{tot}} = \iint_{\theta, \varphi} P(\theta, \varphi) d\varphi d\theta \text{ (W/m}^2\text{)} \quad \text{(I.04)}$$

**Figure I.10:** puissance rayonnée par une antenne dans une direction de l'espace

Dans le cas d'une antenne sans pertes et d'une propagation dans un milieu homogène et isotrope, une antenne isotrope est une source ponctuelle qui rayonne une onde sphérique, c'est-à-dire de manière constante dans toutes les directions de l'espace la puissance  $P_A$  fournie par l'alimentation. Bien qu'une telle antenne n'ait pas de réalité physique, elle est considérée comme une antenne de référence.

Puissance rayonnée par unité d'angle solide:

$$P(\theta, \varphi) = \frac{P_A}{4\pi} \tag{I.05}$$

Puissance rayonnée par unité de surface:

$$P(R, \theta, \varphi) = \frac{P_A}{4\pi R^2} \tag{I.06}$$

A partir de la mesure de la puissance rayonnée, il est possible de déterminer la valeur du champ électrique. En espace libre et en champ lointain, la puissance transportée par l'onde est donnée par le vecteur de Poynting et les champs E et H sont perpendiculaires, en phase et reliés par l'impédance d'onde. On peut en déduire la relation suivante:

$$P = \frac{1}{2} \mathbf{E} \cdot \mathbf{H} = \frac{1}{2} \frac{E^2}{\eta} = \frac{P_A}{4\pi R^2} \tag{I.07}$$

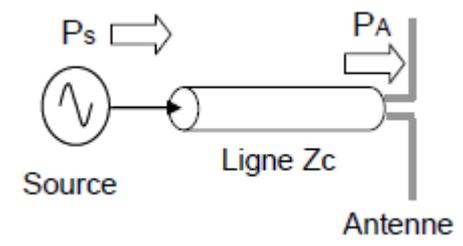
$$\longrightarrow E = \sqrt{\frac{P_A}{2\pi\eta R^2}} = \frac{\sqrt{60P}}{R} \text{ (espace libre et champ lointain)} \tag{I.08}$$

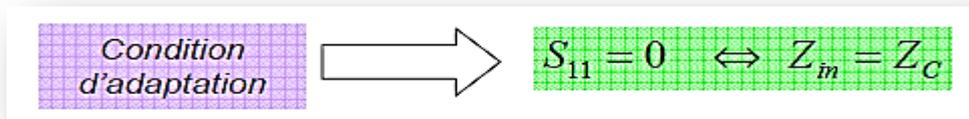
### I.3.2. Le coefficient de réflexion

Le coefficient de réflexion est le rapport entre l'onde réfléchie en entrée de l'antenne et l'onde incidente. Il dépend de l'impédance d'entrée de l'antenne et de l'impédance caractéristique.

$$S_{11} = \Gamma_{in} = \frac{Z_{in} - Z_c}{Z_{in} + Z_c} \tag{I.09}$$

### I.3.3. Adaptation et condition d'adaptation <sup>[8]</sup>

<p>Une antenne est reliée à la source par une ligne de transmission d'impédance caractéristique <math>Z_C</math> (en général, <math>Z_c = 50 \text{ Ohm}</math>)</p> <p>. Pour assurer un transfert maximal de puissance entre l'alimentation et l'antenne, il est nécessaire d'assurer une adaptation d'impédance. L'adaptation permet d'annuler le coefficient de réflexion <math>\Gamma_{in}</math> ou <math>S_{11}</math> en entrée de l'antenne</p>	 <p>The diagram shows a source on the left connected to a transmission line labeled 'Ligne Zc'. An arrow labeled 'Ps' points towards the line. The line is connected to an antenna on the right, with an arrow labeled 'PA' pointing away from it.</p>
--	--



Si l'adaptation n'est pas assurée, une partie de la puissance est renvoyée vers la source (ou re-rayonnée par l'antenne dans le cas de la réception), appelée en anglais mis match loss (pertes de désadaptation). En pratique, soit on cherchera à concevoir l'antenne de telle manière à ce qu'elle présente une impédance égale à  $Z_c$  à la fréquence de travail, soit on disposera en entrée de l'antenne un circuit de transformation d'impédance qui modifiera l'impédance d'entrée de l'antenne vue depuis la source et assurera l'adaptation d'impédance. Ce réseau est composé d'éléments passifs (filtres à base d'inductances et de capacités) ou de lignes de transmission (à haute fréquence).

### I.3.4. Le taux d'onde stationnaire

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

L'amplitude de cette onde stationnaire n'est pas constante le long de la ligne, il est maximale en certains endroits (ventres) et minimale à d'autres (nœuds). Le rapport d'onde stationnaire est le rapport entre l'amplitude maximale et l'amplitude minimale de cette onde stationnaire, et est lié au coefficient de réflexion par l'équation.

$$\text{VSWR} = \frac{V_{max}}{V_{min}} = \frac{1 + \Gamma_{in}}{1 - \Gamma_{in}} \quad (\text{I.10})$$

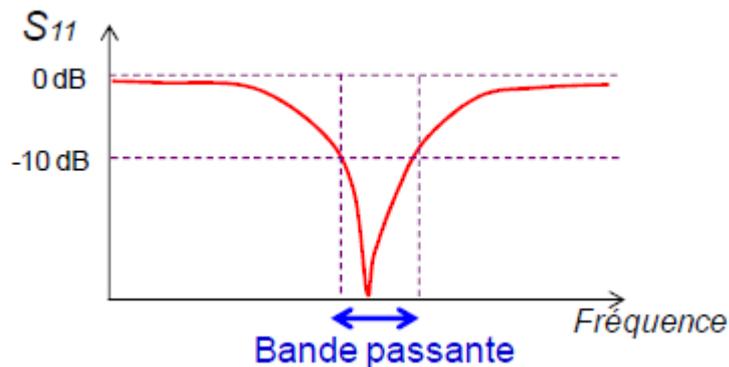
Le ROS indique donc directement à quel point l'adaptation d'impédance est bien faite ou non. Lorsque l'impédance est parfaitement adaptée, le coefficient de réflexion est nul et le ROS égal à 1. Au contraire, dans le cas où une impédance de charge donnerait un facteur de réflexion qui tendrait vers l'unité, ce qui signifierait que toute la puissance serait réfléchi, on mesurerait un ROS qui tendrait vers l'infini.

### I.3.5. Bande passante et facteur de qualité

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 maximale. La

bande passante peut être définie en fonction du coefficient de réflexion, à condition que le diagramme de rayonnement ne change pas sur cette bande. Il n'y a pas de critères précis pour la limite du coefficient de réflexion.

Un critère typique d'avoir un coefficient de réflexion inférieure à -10 dB sur la bande passante.



**Figure I.11:** Bande passante et coefficient de réflexion

D'un point de vue électrique, nous avons vu que l'antenne pouvait être vue comme un circuit résonant RLC. La bande passante BW (bande passante à 3 dB de la valeur du champ) est liée au facteur de qualité Q du circuit RLC à la fréquence de résonance  $f_{Res}$ . Le facteur de qualité représente la quantité de résistance présente lors de la résonance (pour un circuit résonant série équation I.11).

$$Q = \frac{f_{Res}}{BW} \quad (I.11)$$

$$\frac{1}{Q} = \frac{f_{ant}}{2\pi f_{Res} \cdot L_{ant}} \quad (I.12)$$

Une antenne avec un fort facteur de qualité rayonne très efficacement à la fréquence de rayonnement sur une bande de fréquence très étroite, ce qui peut limiter les interférences hors bande.

Cependant, si la bande passante est trop étroite, tout signal émis ou reçu près des bornes de la bande de fréquence de fonctionnement sera atténué. Une antenne avec un faible facteur de qualité est large bande mais collecte le bruit présent sur la bande de fonctionnement, dégradant ainsi la qualité du signal reçu

I.3.6. Diagramme de rayonnement

La représentation graphique de la fonction caractéristique de l'antenne porte le nom de « diagramme de rayonnement ». C'est une représentation du rayonnement en 2-D ou 3-D de la puissance, du gain ou du champ électrique rayonné à grande distance qui est en fonction de  $\theta$  (angle de Site : plan vertical) et  $\phi$  (angle d'Azimut : plan horizontal). Classiquement, on a pris l'habitude de représenter le diagramme de rayonnement dans deux plans perpendiculaires qui sont : le plan E et le plan H. Ceux sont respectivement les plans pour lesquels les champs électrique et magnétique atteignent leurs valeurs maximales. En réalité, l'énergie rayonnée par une antenne est répartie inégalement dans l'espace,

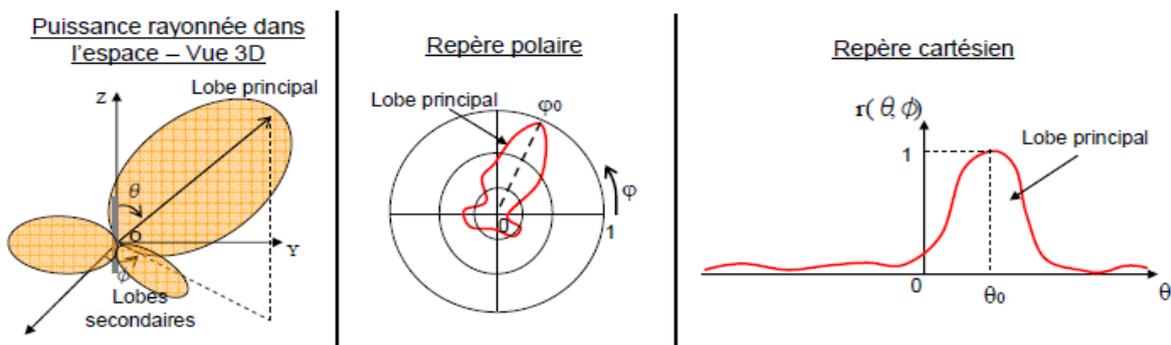


Figure I.12: Représentation du diagramme de rayonnement d'une antenne.

Certaines directions sont privilégiées: ce sont les lobes de rayonnement. Un type plus pratique est l'antenne directionnelle qui rayonne plus de puissance dans certaines directions et moins de puissance dans d'autres directions. Un cas particulier de l'antenne directionnelle est l'antenne omnidirectionnelle, dont le diagramme de rayonnement peut être constant dans un seul plan (plan E), et varie dans le plan orthogonal (plan H). Le diagramme de rayonnement de l'antenne directive est montré dans la figure suivante :

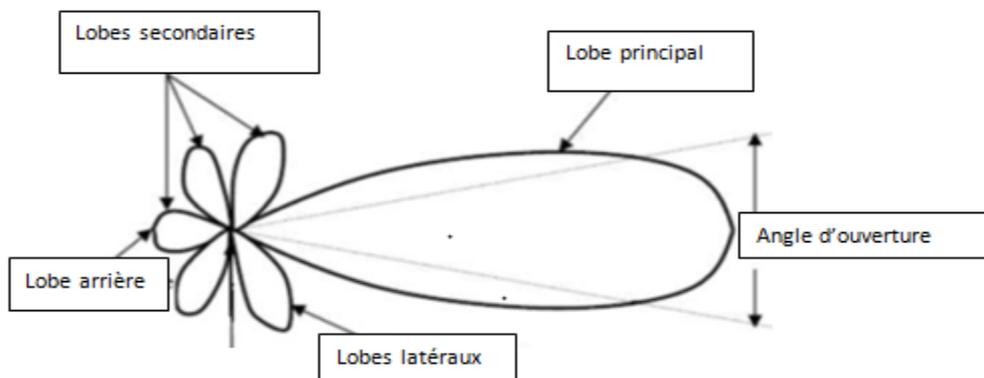


Figure I.13: Exemple de Diagramme de rayonnement d'une antenne cornet

**Lobe principal:** C'est le lobe de rayonnement contenant le maximum d'énergie et la direction du maximum de rayonnement

**Lobes secondaires:** Tous les autres lobes sont appelés lobes secondaires. Ils représentent le rayonnement de l'antenne dans les directions indésirables.

**Lobe arrière (rayonnement arrière):** C'est le lobe secondaire présent dans la direction opposée à  $180^\circ$  du lobe principal

Dans la plupart des systèmes antennaires, les lobes secondaires sont indésirables. Une bonne conception d'antenne doit permettre de minimiser les lobes secondaires

Pour que les lobes secondaires ne soient pas considérés comme gênants, on admet en pratique que le niveau du premier lobe secondaire doit être au moins 20 dB inférieur au niveau du lobe principal.

### I.3.7. Angle d'ouverture

L'angle d'ouverture (beamwidth) caractérise la largeur du lobe principal. L'angle d'ouverture à 3 dB représente la portion de l'espace dans lequel la majeure partie de la puissance est rayonnée.

Il s'agit de l'angle entre les 2 directions autour du lobe principal où la puissance rayonnée est égale à la moitié de la puissance rayonnée dans la direction de rayonnement maximal.

### I.3.8. Gain, Directivité et rendement d'une antenne

Ces trois grandeurs permettent de caractériser la façon dont une antenne convertit la puissance électrique incidente en puissance électromagnétique rayonnée dans une direction particulière. Le gain et la directivité permettent de comparer les performances d'une antenne par rapport à l'antenne de référence qu'est l'antenne isotrope

#### ✓ Gain

Le gain  $G(\theta, \varphi)$  d'une antenne dans une direction  $(\theta, \varphi)$  est le rapport entre la puissance rayonnée dans une direction donnée  $P(\theta, \varphi)$  sur la puissance que rayonnerait une antenne isotrope sans pertes.

$$G(\theta, \varphi) = 4\pi \frac{P(\theta, \varphi)}{P_A} \Rightarrow G = 4\pi \frac{P(\theta_0, \varphi_0)}{P_A} \quad (\text{I.13})$$

$P_A$ : Puissance d'antenne isotrope sans perte.

En général, le gain  $G$  correspond au gain dans la direction de rayonnement maximal  $(\theta_0, \varphi_0)$ . Cette propriété caractérise la capacité d'une antenne à focaliser la puissance rayonnée dans une direction.

#### ✓ Directivité

La directivité  $D(\theta, \varphi)$  d'une antenne dans une direction  $(\theta, \varphi)$  est le rapport entre la puissance rayonnée dans une direction donnée  $P(\theta, \varphi)$  et la puissance que rayonnerait une antenne isotrope

$$D(\theta, \varphi) = \frac{P(\theta, \varphi)}{\frac{P_R}{4\pi}} = 4\pi \frac{P(\theta, \varphi)}{P_R} \quad (\text{I.14})$$

✓ **Rendement**

Le rendement  $\eta$  d'une antenne traduit sa capacité à transmettre la puissance électrique en entrée  $P_A$  sous forme de puissance rayonnée  $P_R$ . On le définit comme le rapport entre la puissance totale rayonnée par une antenne et la puissance qui lui est fournie. Le rendement est lié aux pertes dans le réseau de polarisation et dans les éléments rayonnants. En comparant les équations 09 et 10, on voit que le rendement relie le gain et la directivité.

$$P_R = \eta \cdot P_A \Rightarrow G = \eta \cdot D \quad (\text{I.15})$$

**I.3.9. Lien entre gain et angle d'ouverture**

Intuitivement, on voit que le gain est dépendant de l'ouverture d'une antenne. Plus le gain d'une antenne n'est grand, plus l'angle d'ouverture du lobe principal est faible, ce que montre le résultat suivant:

$$G = \eta \cdot 4\pi \frac{P(\theta_0, \varphi_0)}{P_R} \quad \text{et} \quad P_R = \int_0^{4\pi} P(\theta, \varphi) d\Omega = \int_0^{4\pi} r(\theta, \varphi) P(\theta_0, \varphi_0) d\Omega$$

$$G = \eta \cdot \frac{4\pi}{\int_0^{4\pi} r(\theta, \varphi) d\Omega} \quad (\text{I.16})$$

**I.3.10. Puissance isotrope rayonnée équivalente (PIRE)<sup>[8]</sup>**

La puissance isotrope rayonnée équivalente d'une antenne (PIRE ou EIRP en anglais) est un terme souvent utilisé en télécommunications (principalement dans les bilans de liaison) qui définit, dans la direction de rayonnement maximal, la puissance électrique qu'il faudrait apporter à une antenne isotrope pour obtenir la même puissance rayonnée dans cette direction. Elle se calcule selon l'équation (I.17)

$$\text{PIRE} = G \times P_A \quad (\text{I.17})$$

**I.3.11. Modèle électrique et comportement fréquentiel<sup>[8]</sup>**

Une antenne rayonne efficacement sur une bande de fréquence étroite qui correspond à sa fréquence de résonance. Lorsqu'un signal variable excite une antenne, des charges sont mis en mouvement le long de l'antenne donnant naissance à un rayonnement. La résonance correspond à une situation où ces charges sont en oscillation permanente. Pour représenter ce

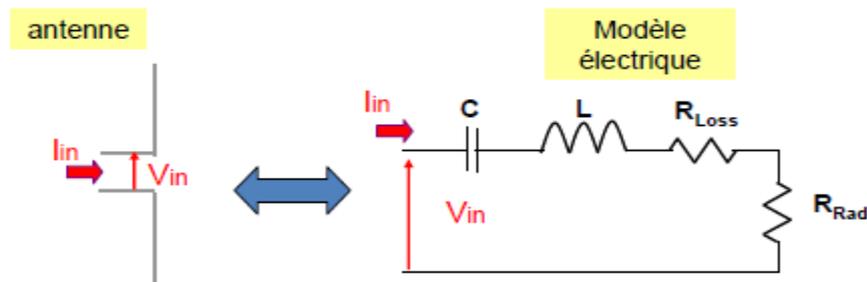
comportement résonant qui varie avec la fréquence, il est possible de modéliser l'antenne par un circuit passif RLC équivalent.

La connaissance de ce modèle est cruciale pour déterminer comment l'antenne va convertir la puissance électrique incidente en puissance rayonnée. Afin d'éviter toute perte liée à la désadaptation entre la source électrique et l'antenne, il est nécessaire d'assurer les conditions d'adaptation

**I.3.11.1 Modèle électrique d'une antenne**

On peut résumer le comportement de l'antenne passive (qui présente un comportement linéaire) ainsi : une antenne stocke des charges (comportement capacitif = stockage sous forme d'énergie électrique), s'oppose aux variations des courants qui y circulent (comportement inductif = stockage sous forme d'énergie magnétique) et dissipe une partie de l'énergie (pertes ohmiques et par rayonnement) [8].

D'un point de vue électrique, une antenne passive peut donc être modélisée par un circuit équivalent RLC Figure I.15, valable pour une antenne dipôle) et l'impédance  $Z_{in}$  vue à l'entrée de l'antenne est donnée par l'équation I.18.



**Figure I.14:** Modèle d'impédance complexe d'une antenne

$$Z_{in} = \frac{V_{in}}{I_{in}} = R_{in} + j \cdot X_{in} \tag{I.18}$$

Partie active

Partie réactive

$$R_{in} = R_{Rad} + R_{Loss} \quad X_{in} = iL\omega + \frac{1}{iC\omega}$$

Résistance de rayonnement

Résistance de pertes

Par exemple, prenons le cas d'une antenne dipôle. L'inductance et la capacité sont liées à la longueur de l'antenne. En basse fréquence, l'inductance est négligeable et l'antenne se contente de stocker des charges. Lorsque la fréquence augmente, l'effet de la capacité diminue alors que celui de l'inductance s'accroît et une partie de l'énergie est stockée sous forme d'énergie magnétique. A une fréquence particulière appelée fréquence de résonance, l'inductance et la capacité sont égales en magnitude et leurs effets s'annulent. L'antenne est alors équivalente à une résistance pure. Si les pertes ohmiques sont négligeables, la puissance fournie à l'antenne est alors entièrement rayonnée. Sa capacité à rayonner est alors liée à la résistance de rayonnement

### I.3.11.2. Résistance de rayonnement

Il ne s'agit pas de la résistance liée aux pertes ohmiques de l'antenne, mais de la perte de puissance liée à l'onde électromagnétique rayonnée par l'antenne. Il s'agit donc d'une puissance active<sup>[8]</sup>

Une grande résistance de rayonnement indique une forte capacité à convertir l'énergie électrique incidente (lié au courant qui «passe» dans la résistance de rayonnement) en énergie électromagnétique. En effet, la puissance électrique qui lui est fournie est une puissance égale à:

$$P_{\text{Rad}} = \frac{1}{2} R_{\text{Rad}} I_{\text{in}}^2 \quad (\text{rad: radiation= rayonnement}) \quad (\text{I.18})$$

### I.3.12. Polarisation d'une antenne – Perte de polarisation

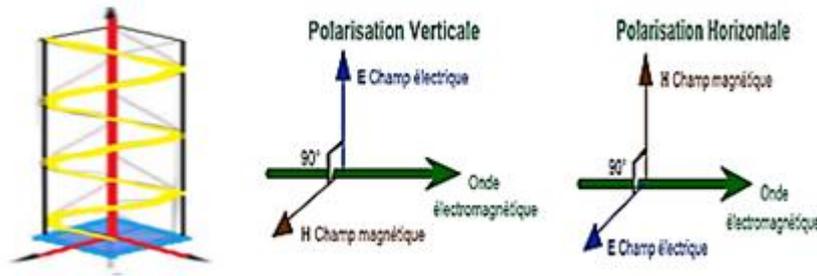
#### ✓ Polarisation d'une antenne

La polarisation d'une onde dépend de la géométrie et de la polarisation électrique de l'antenne émettrice.

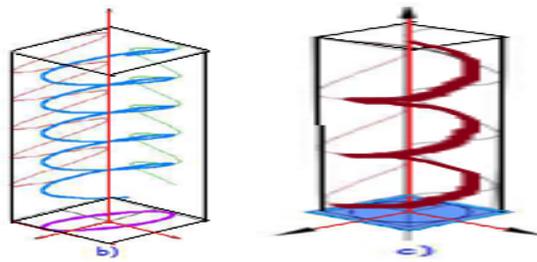
La polarisation d'une onde est une donnée fondamentale pour l'étude des antennes. En effet selon la constitution de l'antenne, elle ne recevra qu'une certaine forme de polarisation. Donc si la polarisation de l'antenne de réception n'est pas accordée sur la polarisation de l'antenne d'émission, la puissance reçue ne sera pas maximale. Nous rappelons ici les caractéristiques de l'onde électromagnétique pour sa polarisation. L'onde électromagnétique est rayonnée selon un plan de polarisation. Elle est composée de deux "vecteurs en quadrature" appelés "champ électrique" ou E et "champ magnétique" ou H. On dit qu'ils sont en quadrature lorsque qu'ils sont déphasés de 90° l'un par rapport à l'autre.

Par convention, le plan de polarisation est défini selon l'orientation du champ électrique. Lorsque la configuration de l'antenne place le champ électrique verticalement, on

dit que la polarisation est verticale. À l'inverse, lorsque la configuration de l'antenne place le champ électrique horizontalement, on dit que la polarisation est horizontale.



a) Polarisation rectiligne.



b) Polarisation elliptique.

c) Polarisation circulaire.

**Figure I.15:** Polarisation d'une antenne

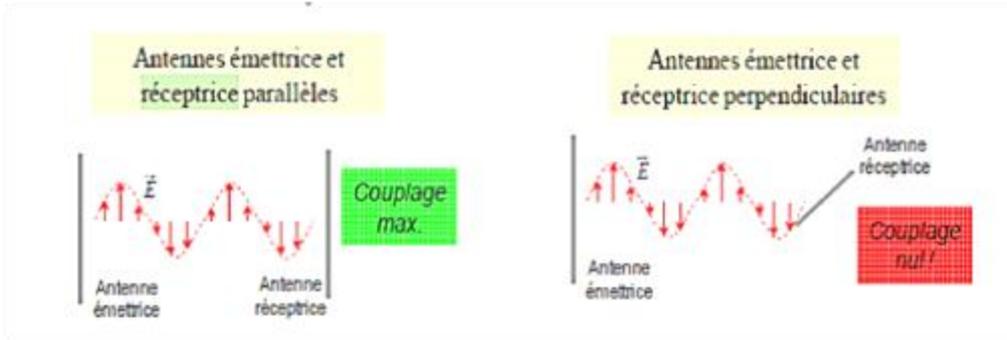
La plupart des antennes présentent des polarisations rectilignes. Dans une utilisation terrestre, les antennes peuvent être montées horizontalement ou verticalement, donnant à l'antenne une polarisation horizontale ou verticale. En termes d'installation et d'encombrement, une antenne verticale est meilleure. Cependant, le choix de la polarisation dépend surtout des conditions de propagation. Par exemple, la propagation d'une onde électromagnétique dans un environnement réel dépend de sa polarisation. L'utilisation conjointe des polarisations horizontales et verticales (diversité de polarisation) permet de compenser les effets parasites du canal de propagation. Cependant, dans le cas où la polarisation est imprévisible, il est intéressant d'employer une antenne de réception à polarisation circulaire. Par exemple, toute onde électromagnétique traversant l'ionosphère verra son plan de polarisation modifiée. L'utilisation d'une antenne de réception à polarisation circulaire permet d'éviter les pertes de polarisation aléatoire.

### ✓ Perte de polarisation <sup>[8]</sup>

Pour optimiser la réception d'un signal radioélectrique, la polarisation de l'onde électromagnétique et celle de l'antenne réceptrice doivent être les mêmes Figure 17. Dans le

cas d'une liaison entre 2 antennes à polarisation rectiligne, la perte de polarisation dépend de l'angle  $\alpha$  entre les 2 antennes qui représente la différence d'alignement

$$L_{pol} \text{ (dB)} = 20 \cdot \log (\cos (\alpha)) \tag{I.19}$$

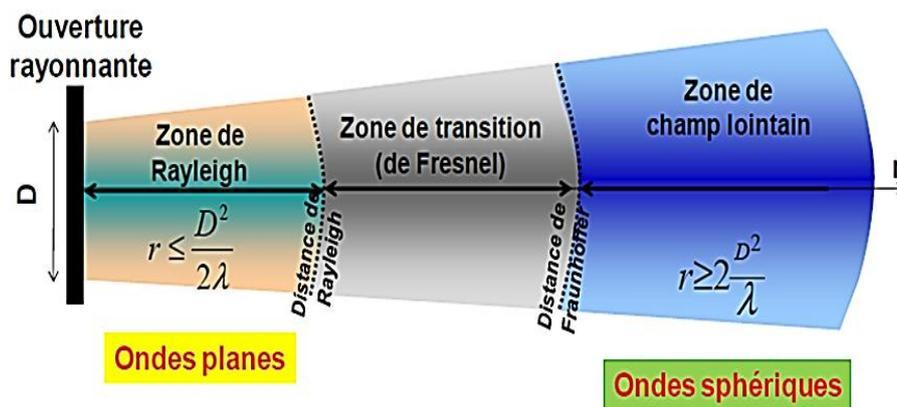


**Figure I.16:** Pertes de polarisation

**I.3.13. Les différentes zones de rayonnement**

Nous avons jusque-là traité des antennes en zone de champ lointain, c'est-à-dire lorsque la distance devenait suffisamment grande pour que les différences d'amplitude et de phase des contributions de chaque élément de l'antenne soit négligeable.

A proximité de l'ouverture rayonnante, l'onde est plane, les directions de propagation des ondes rayonnées par chaque source secondaire restent parallèles entre elles. Au-delà de la distance de Rayleigh, le faisceau émis par l'ouverture commence à diverger et l'onde devient peu à peu sphérique. La zone de champ lointain apparaît au-delà de la distance de Fraunhofer. Deux critères permettent de déterminer si on se situe en zone de champ lointain équation (I.20), la première condition étant adaptée aux petites ouvertures.



**Figure I.17:** Les zones de rayonnement d'une antenne

$$r > 10D \quad \text{ou} \quad r > 2 \frac{D^2}{\lambda} \tag{I.20}$$

- ✓ **Zone de Rayleigh ou zone proche:** C'est la zone la plus proche de l'antenne. Elle se situe à une distance de l'antenne comprise entre  $\lambda/2\pi$  et  $D^2/2\lambda$ , avec D la plus grande dimension de l'élément rayonnant et  $\lambda$  la longueur d'onde considérée. Dans cette partie la puissance par unité de surface décroît peu en fonction de la distance.
- ✓ **Zone de Fresnel :** Située au-delà de la zone de Rayleigh, à une distance inférieure à  $2D^2/\lambda$  se caractérise par d'importantes variations des champs, si l'antenne est de grande dimension. Les différentes parties de l'antenne supposées rayonner en phase à l'infini, ne respectent pas cette propriété dans cette zone. Associée à la zone de Rayleigh, ces deux zones constituent la zone du champ proche de l'antenne.
- ✓ **Zone de Fraunhofer ou zone lointaine :** Cette zone est définie à une distance supérieure à  $2D^2/\lambda$ . Dans cette zone, qui s'étend jusqu'à l'infini, on peut considérer que l'onde est plane, les champs décroissent en  $1/R$ , et on peut y mesurer le gain de l'antenne. Cette distance définissant la zone de champ lointain peut être très grande pour les antennes de grande dimension pour les trois zones les références <sup>[9][10]</sup>

### I.3.14. Bilan de liaison

Le bilan de liaison est un outil courant en télécommunication permettant d'estimer les puissances reçues dans une liaison entre un émetteur et un récepteur et la qualité du signal. Il permet de dimensionner l'émetteur, le récepteur et de déterminer les limites en terme de performance (couverture radio, puissance minimale, amplification nécessaire ...). Un bilan entre deux antennes permet notamment de :

- ✓ Déterminer la puissance reçue connaissant la puissance émise, les caractéristiques des antennes et la perte liée à la propagation de l'onde électromagnétique, et en déduire la qualité du signal reçu
- ✓ Déterminer la perte de propagation maximale connaissant la puissance émise, les caractéristiques des antennes, le seuil de réception et le modèle de propagation, et en déduire la couverture d'une antenne



La puissance reçue : 
$$Pr = Pe \cdot Ge \cdot Gr \cdot \left(\frac{\lambda}{4\pi R}\right)^2 \quad (I.21)$$

Bilan de liaison en dBm :  $P_{dBm} = 10 \log(P_{mW})$

$$Pr (dBm) = Pe (dBm) + Ge (dB) + Gr (dB) + \alpha P (dB) \quad (I.22)$$

### I.4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons parlé en général des antennes et leur contribution dans le domaine aéronautique, en évoquant les paramètres essentiels qui les modélisent tels que le gain, la directivité, le coefficient de réflexion, nous avons aussi parlé de l'antenne radioaltimètre en indiquant ses avantages en termes de directivité et de gain et ses inconvénients par rapport à son poids et ses dimensions.

Le chapitre qui suit nous allons proposer un autre type d'antenne pour remédier au problème de l'antenne radioaltimètre ordinaire en réduisant au maximum possible leurs tailles. Nous allons concevoir et étudier les performances de ces antennes en visualisant les résultats de simulation accompagnés par des commentaires.

### II.1. Introduction:

Dans les applications aéronautiques, spatiales, satellitaires et de missiles à haute performance, où la taille, le poids, le coût, la performance, la facilité d'installation et le profil aérodynamique sont des contraintes, des antennes à profil bas peuvent être requises. Actuellement, il y a beaucoup d'autres gouvernements et applications commerciales, telles que la radio mobile et les communications sans fil, qui spécifications similaires. Pour répondre à ces exigences, les antennes micro ruban peuvent être utilisées. Ces antennes sont profilées, s'adaptant aux surfaces planes et non-planaires, simple et peu coûteux à fabriquer en utilisant une technologie de circuit imprimé moderne, mécaniquement robuste lorsqu'il est monté sur des surfaces rigides, compatible avec les conceptions MMIC, et quand la forme de patch et le mode particulier sont sélectionnés, ils sont très polyvalents en termes de fréquence de résonance, de polarisation, de modèle et d'impédance. En outre, en ajoutant des charges entre le patch et le plan de masse, tels que des broches et varactor diodes, éléments adaptatifs à fréquence de résonance variable, impédance, polarisation, et le motif peut être conçu <sup>[7]</sup>.

Dans ce chapitre nous allons basculer vers un autre design d'antenne qui est de petit taille alors moins encombrant par rapport au cornet, que l'on appelle "l'antenne imprimée" qu'on souhaiterait même garder les mêmes performances d'une antenne cornet principalement une adaptation adéquate et un minimum coefficient de réflexion inférieur à -10dB.

Nous allons introduire cette antenne virtuellement pour la même fréquence de l'altimètre **4.5 GHz** sous logiciel HFSS (High Frequency Structure Simulator).

### II.2. Choix de la technologie des antennes imprimées

Actuellement, les antennes imprimées deviennent de plus en plus importantes en raison de la grande variété des formes géométriques qu'elles peuvent prendre et qui les rendent applicables aux différentes situations d'intégration <sup>[10], [3]</sup>.

Parmi les avantages de cette technologie d'antennes, on peut citer: le faible poids, leur volume réduit, la conformabilité et la possibilité d'intégrer les circuits micro-ondes au niveau des antennes <sup>[12]</sup>. Ajoutons que la simplicité de leurs structures fait que ce type d'antenne est adapté au faible coût de fabrication. Ceci est une propriété clé qui explique l'introduction des antennes imprimées dans les applications de la communication mobile. Parmi ces avantages, on peut citer: <sup>[1], [3], [9]</sup>.

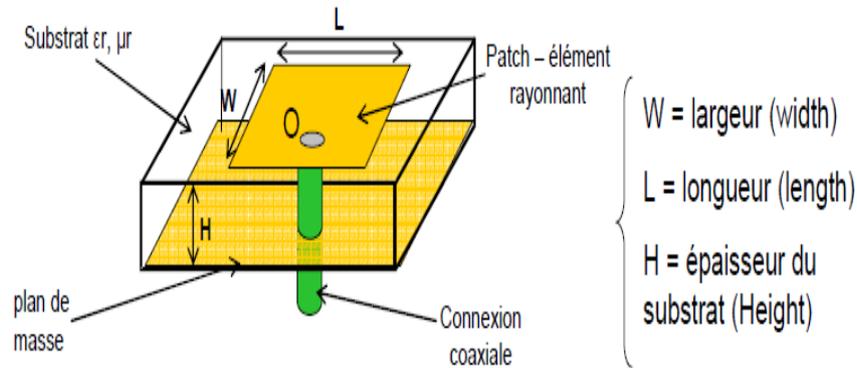
- ✓ Faible poids, petit volume, configuration planaire, faible épaisseur; et simplicité de leurs structure.
- ✓ Faible coût de fabrication, production en masse possible;
- ✓ Ces antennes peuvent être placées sur les missiles, les fusées et les satellites sans modifications importantes ;
- ✓ Les antennes ont de petites aires de rayonnement ;
- ✓ La polarisation linéaire comme pour le cas des antennes plaques rectangulaire et circulaire (gauche ou bien droite) est possible avec de légers changements dans la position de l'alimentation ;
- ✓ L'utilisation de deux fréquences de travail est possible;
- ✓ Les antennes microbandes sont compatibles avec les constructions modulaires (Composants monolithiques tels que les oscillateurs, les alternateurs variables, les interrupteurs, les modulateurs, les mélangeurs, les déphaseurs et peuvent être adaptées directement sur le substrat);
- ✓ Les lignes d'alimentation et les circuits d'adaptation d'impédance sont fabriqués simultanément avec la structure de l'antenne.

Comme les antennes microbandes ont des avantages; elles ont aussi quelques inconvénients comparées aux antennes micro-ondes classiques tels que:<sup>[16], [18]</sup>

- ✓ Bande passante étroite
- ✓ Gain plus faible dû aux pertes;
- ✓ Limitations pratiques sur le gain (au maximum à 20dB);
- ✓ La performance du rayonnement longitudinal est faible;
- ✓ L'isolation entre les éléments rayonnants et l'alimentation est faible;
- ✓ Possibilité d'excitation des ondes de surface;
- ✓ Capacité de manipulation à faible énergie.

### II.3. Structure générale d'une antenne patch

Dans sa structure de base, Une antenne patch consiste en un élément métallique habituellement de 17,5 à 35  $\mu\text{m}$  d'épaisseur en hyperfréquence de forme arbitraire (rectangulaire, circulaire, à fente, ou formes plus élaborées) déposé sur la surface d'un substrat diélectrique qui présente sur l'autre face un plan conducteur (plan de masse). Une antenne patch rectangulaire est l'antenne patch la plus courante, sa structure est détaillée ci-dessous.



**Figure II.1:** Structure d'une antenne patch rectangulaire

Les dimensions du patch sont généralement de l'ordre de la demi-longueur d'onde. Le choix de la longueur est guidé par la fréquence de résonance à donner à l'antenne. Le plan de masse ne pouvant pas être infini, il peut être égal à 3 ou quatre fois la longueur d'onde, ce qui représente parfois un encombrement trop important. Un plan de masse plus petit conduira à une modification des propriétés de l'antenne. Les caractéristiques du substrat influent sur celles de l'antenne. En général, sa permittivité doit être faible, il doit être d'épaisseur négligeable devant la longueur d'onde et présenter de faibles pertes (on caractérise les pertes d'un diélectrique par la tangente des pertes notée  $\tan \delta$ . Une valeur typique se situe aux alentours de  $10^{-3}$ ). Sur la Figure II.1, l'antenne est alimentée par une connexion coaxiale, le connecteur étant placé à l'intérieur de l'élément rayonnant.

L'alimentation peut être apportée par une ligne micro ruban connectée sur un côté de l'antenne. La position du point de l'alimentation aura un impact non négligeable sur l'impédance d'entrée de l'antenne et donc sur son adaptation. En outre, on peut trouver d'autres éléments gravés autour de l'élément rayonnant tels que des lignes d'alimentation, des structures d'adaptation, de contrôle de la phase.

### II.3.1. Les différents types d'élément rayonnant

La couche supérieure peut comporter un ou plusieurs éléments métalliques qui s'appellent éléments rayonnants ou patch en anglais, leur rôle principal consiste à rayonner l'énergie, physiquement le patch est un conducteur mince de cuivre, qui selon les applications peut prendre des formes carrée, rectangulaire, circulaire, elliptique ou encore d'autres formes plus complexes.

Les matériaux plus utilisés pour réaliser les patches et les plans de masse sont généralement le cuivre, l'argent et l'or, mais d'autres matériaux sont actuellement envisagés comme solution alternative.

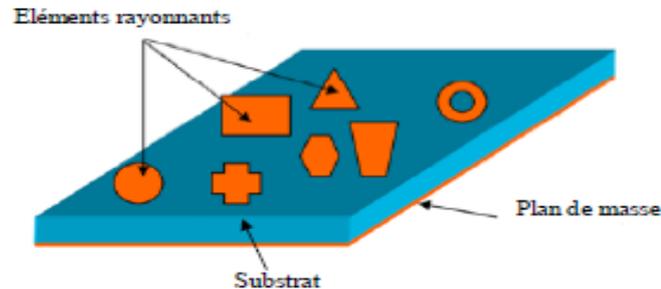


Figure II.2: Les différentes formes de du patch.

### II.3.2. Critères de choix du substrat

Le substrat diélectrique joue un rôle essentiel dans les performances de l'antenne patch. Typiquement, pour un bon compromis entre les dimensions du système et ses performances l'épaisseur du diélectrique est comprise entre 0,0030(c/f) et 0,050(c/f) et sa permittivité relative entre 2,2 et 12 à la fréquence de résonance. Par conséquent, la hauteur du substrat séparant l'élément rayonnant du plan de masse doit être comprise entre 90  $\mu\text{m}$  et 1,6 mm à 10 GHz. Dans une structure patch, le champ est confiné dans le substrat diélectrique. Les performances de l'antenne vont donc également dépendre des pertes diélectriques du substrat ( $\tan \alpha$ ).

Une solution pour diminuer l'influence des pertes est de réduire significativement l'épaisseur du diélectrique. Ceci a malheureusement pour effet de concentrer les lignes de champ dans le diélectrique et donc de diminuer l'efficacité et la bande passante de l'antenne. Une autre solution consiste à passer par une technologie membranaire. Ceci permet d'avoir un diélectrique de faible épaisseur (réduction de l'influence des pertes) tout en gardant une grande distance entre le plan de masse et le patch rayonnant grâce au gap d'air introduit. Ainsi, la bande passante et l'efficacité sont améliorées.

En résumé, pour la conception d'une antenne, il est important de connaître certaines caractéristiques du substrat diélectrique comme:

- ✓ Possibilité d'excitation par onde de surface,
- ✓ Effets de la constante et de la tangente de perte diélectrique sur la dispersion,
- ✓ Importance des pertes par diélectrique et par conducteur,

- ✓ Anisotropie dans le substrat,
- ✓ Effets de l'environnement tels que la température, l'humidité,
- ✓ Conditions mécaniques: Physiquement, le matériau doit résister aux contraintes mécaniques, conserver sa forme originale. Son facteur d'expansion doit être voisin de celui de la métallisation, car il est confronté à de fortes températures lors des soudures. Enfin, son état de surface doit être le plus parfait possible,
- ✓ Coût de fabrication.

Pour cela il est nécessaire de maîtriser sa fabrication et de déterminer ses propriétés diélectriques à la fréquence de travail de l'antenne.

### **II.3.3. Dimensionnement d'une antenne patch rectangulaire**

En guise de résumé, voici une procédure de conception d'une antenne patch rectangulaire. Celle-ci peut être utilisée pour un premier dimensionnement. L'optimisation peut être faite ensuite à l'aide d'un simulateur électromagnétique. Les données d'entrée sont : le substrat (permittivité électrique, tangente de pertes, épaisseur), la fréquence de fonctionnement. On considère un plan de masse parfait et infini. <sup>[07] [11][12]</sup>

#### **Etape 1: Calcul de la largeur W de l'antenne patch:**

$$W = \frac{\lambda_0}{2} \sqrt{\frac{2}{1 + \xi r}}, \quad \lambda_0 = \frac{c}{F_{res}}; \quad (II.01)$$

$\xi r$ : La permittivité relative ou la constante diélectrique.

#### **Etape 2: Calcul de la constante diélectrique effective $\xi_e$ et de la longueur d'onde effective $\lambda_e$ .**

$$\lambda_e = \frac{c}{f \sqrt{\xi_e}} \quad (II.02)$$

$\lambda_e$ : La longueur d'onde effective.

$$\xi_e = \frac{\xi r + 1}{2} + \frac{\xi r - 1}{2} \left(1 + \frac{12 h}{w}\right)^{-0.5}, \quad \frac{w}{h} \geq 1 \quad (II.03)$$

$\xi_e$ : La constante diélectrique effective.

#### **Etape 3: Calcul de l'extension de longueur du patch $\Delta L$ :**

$$\Delta L = 0.412 h \frac{(\xi e + 0.3) \frac{w}{h} + 0.264}{\xi e - 0.258} + \frac{\frac{w}{h} + 0.8}{\frac{w}{h} + 0.264} \quad (\text{II.04})$$

En pratique, on trouve  $0.005 \frac{\lambda_e}{2} \leq \Delta L \leq 0.01 \frac{\lambda_e}{2}$

**Étape 4: Calcul de la longueur du patch L:**

$$L = L_e - 2\Delta L = \frac{\lambda_e}{2} - 2\Delta L \quad (\text{II.05})$$

**Étape 5: Calcul de la position du point d'alimentation:**

$$R_{\text{pos}} = R_{\text{in}} \cos^2\left(\frac{\pi x}{L}\right) \leftrightarrow x = \frac{L}{\pi} \arccos\left(\sqrt{\frac{R_{\text{pos}}}{R_{\text{in}}}}\right) \quad (\text{II.06})$$

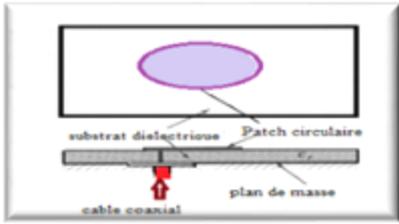
## II.4 Mécanismes d'alimentation

L'excitation est un point très important en étudiant des antennes imprimées. En effet, l'énergie est fournie à l'élément rayonnant d'une manière où on peut influencer directement sur son rayonnement et modifier ses performances. L'alimentation de l'antenne dépend de la manière dont l'antenne est intégrée dans le dispositif<sup>[13]</sup>.

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

- ✓ Les alimentations par contact (par sonde ou ligne micro ruban).
- ✓ Les alimentations par proximité (couplage électromagnétique par ligne ou fente).

Le tableau ci-dessous cite les différents types d'alimentation, leurs avantages ainsi que leurs inconvénients:

Méthodes	Avantages	Inconvénients
<p><b>A. Alimentation par contact</b>  <b>A.1. Sonde coaxial</b></p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Pas des pertes par rayonnement de ligne.</li> <li>-Sélection possible d'un mode privilégié.</li> <li>-Obtention de l'impédance d'entrée par positionnement de la sonde</li> <li>-Prédiction aisée de l'impédance d'entrée pour des substrats de faible hauteur</li> <li>-Technique de perçage simple jusqu' à 10Ghz</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Rayonnement parasite de la sonde de type mono polaire.</li> <li>-Partie selfique ramenée par l'âme du connecteur à prendre en compte.</li> <li>-Technique de perçage et de soudure plus délicate en millimétrique.</li> <li>-Rapidement cher et compliqué industriellement pour exciter chaque élément d'un réseau à forte directivité.</li> </ul>

## Chapitre II: Optimisation d'antenne patch et réseau d'antenne patch pour le système radioaltimètre

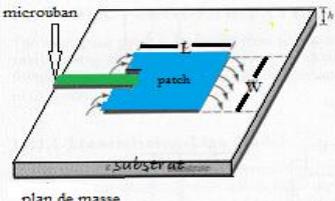
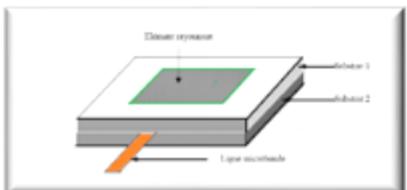
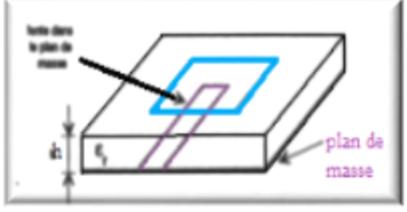
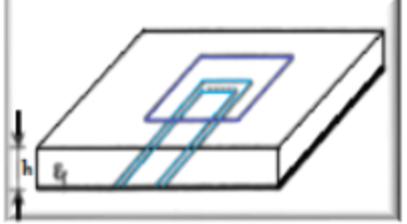
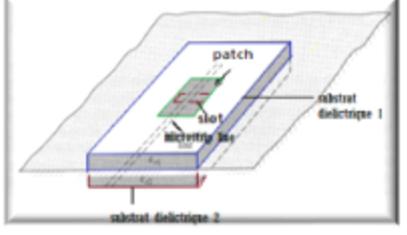
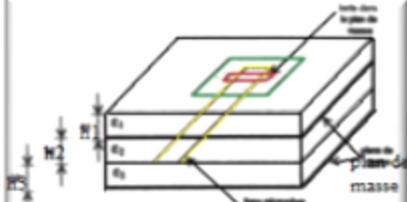
<p><b>A.2. Ligne microruban</b></p> 	<p>Procédé technologique plus simple par gravure sur la même face de l'antenne et du circuit d'alimentation.</p> <p>-Adaptation de l'aérien possible par contact pénétrant</p>	<p>-Rayonnement parasite de la discontinuité ligne aérienne.</p> <p>-Rayonnement parasite possible du circuit de distribution en millimétrique</p> <p>- Structure figée après gravure</p>
<p><b>B. Alimentation par proximité</b> <b>B.1. Ligne microstrip en sandwich</b></p> 	<p>Dessin du circuit d'alimentation modifiable par rapport aux aériens</p> <p>-Bande passante plus large par augmentation de la hauteur (<math>h_1+h_2&gt;h_1</math>)</p>	<p>Deux couches de substrat requises.</p> <p>-Difficulté pour l'intégration de dispositifs actifs et pour la dissipation de chaleur.</p>
<p><b>B.2. Ligne à fente</b></p> 	<p>Procédé technologique simple.</p> <p>-Facilités pour intégrer des dispositifs actifs et dissiper la chaleur résultante.</p>	<p>-Rayonnement arrière parasite possible de la fente</p> <p>-Transition fente-ligne de transmission</p>
<p><b>B.3. Guide d'onde coplanaire</b></p> 	<p>-Mêmes avantages que le cas de la ligne à fente.</p> <p>- Faible rayonnement arrière</p> <p>-Transitions simples pour l'intégration des dispositifs actifs et de circuit MMIC</p>	<p>-Génération de modes de propagation parasites sur les guides d'onde coplanaires</p>
<p><b>B.4. Couplage par fente</b></p> 	<p>-Réalisation du circuit de distribution et de l'aérien indépendante.</p> <p>-Séparation électromagnétique des deux couches.</p> <p>-Possibilité d'élargir la bande en associant la résonance de l'élément rayonnant à celle de la fente</p>	<p>-Technologie plus coûteuse et complexe (positionnement des deux couches, quatre faces de métallisation)</p> <p>-Intégration sur un support mécanique nécessitant des précautions</p> <p>-Rayonnement arrière parasite de la fente lorsque celle-ci résonne au voisinage de l'élément</p>
<p><b>B.5. Couplage par fente d'une ligne consacrée</b></p> 	<p>-Même avantages que le cas du couplage par fente</p> <p>- Rayonnement n'arrière nul</p>	<p>Technologie très coûteuse</p> <p>-Apparition possible de modes parasites microstrip de propagation entre le ruban conducteur et le plan de masse de la fente.</p>

Tableau II.1: Différents types d'alimentation d'une antenne patch <sup>[14]</sup>.

## II.5. Le choix de l'alimentation

### II.5.1. L'alimentation coaxiale

L'alimentation coaxiale ou l'alimentation de sonde est une technique très utilisée pour alimenter les antennes micro rubans Figure II.3 Dans ce cas le conducteur intérieur du connecteur coaxial traverse le diélectrique et est soudé au patch, alors que le conducteur externe est relié au plan de masse.

L'avantage principal de ce type d'alimentation est qu'elle peut être appliquée n'importe quel endroit choisi à l'intérieur du patch, avec une facilité de fabrication Cependant, cette méthode présente des inconvénients au niveau du diagramme de rayonnement. En effet, la connexion génère un pic de courant localisé au niveau de l'élément rayonnant qui peut induire une dissymétrie dans le diagramme de rayonnement. De plus, des pertes apparaissent avec le perçage du plan de masse, du diélectrique ainsi que de l'élément plaqué <sup>[15]</sup>.

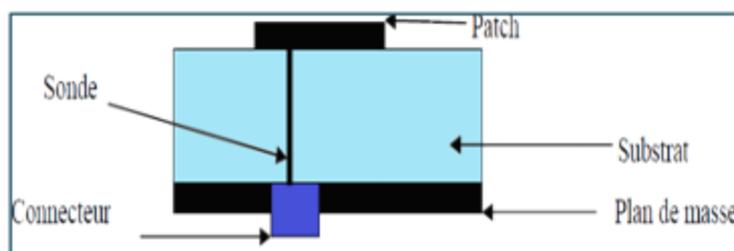


Figure II.3: Alimentation par sonde coaxiale

## II.6. Mécanisme de rayonnement

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

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

## **II.7. Conception d'une antenne patch rectangulaire**

La phase de conception d'une antenne, à l'aide d'un logiciel adapté, est une étape incontournable dans un souci de gain de temps et d'optimisation de structure aux paramètres désirés.

La conception permet également de prendre en compte les paramètres diélectrique et conducteurs des matériaux bas coût choisis, qui ne sont pas parfaits, et de nous rapprocher des futures antennes réalisées. Pour cela, il nous faut choisir un outil de simulation électromagnétique adéquat.

Ainsi, nous développerons dans ce chapitre la phase de conception en présentant le logiciel de simulation électromagnétique et ses différents étapes, puis une phase de pré-calculs et enfin les résultats de simulation pour des antennes à patch rectangulaire.

### **II.7.1. Définition du besoin**

Notre antenne doit répondre aux critères suivants:

<b>Généraux</b>	
Pondéral	le plus léger possible
Aérodynamique	faible prise au vent
Coût	bon marché
Conception	réalisation simple et installation aisée
<b>Radioélectrique</b>	
Fréquence centrale	4.5 GHz
Impédance caractéristique nominale	50 Ohms
R.O.S.	< 2 sur la bande
Directivité	directive
Polarisation	Rectiligne
Gain	Plus de 10 dB
Connecteur	SMA

**Tableau II.2:**Définition des besoins.

## II.8. Modélisation par HFSS d'antenne patch

### II.8.1. Choix de la forme

<b>Antenne</b>	Patch rectangulaire (4.5GHz)		
<b>Substrat Rogers RT/duroid 5880</b>			
Permittivité relative	Tangente des pertes	Epaisseur (mm)	
2.32	0.0009	1.6	
<b>Les dimensions de l'antenne (mm)</b>			
Lp	Wp	Ls	Ws
20.3mm	22mm	80mm	80mm
<b>Alimentation</b>	Câble coaxial		

**Tableau II.3:** Paramètres de conception de notre antenne patch.

On obtient les valeurs Lp,Wp,Ls et Ws à l'aide du Matlab en se basant sur les équations (II.01), (II.02), (II.03), (II.04),(II.05) on les introduit après sur HFSS qui va nous fournir la structure adéquate de l'antenne, comme suit:

```
function cal_patch
global k0 W L
f = input('input frequency f in Ghz:');
Er = input('input dielectric constant of the substrate Er');
h = input('input height of substrate h in mm:');
h=h/1000;%turns height to meters
f=f*1e9;% turn frequency to HZ
c = 3e8;% speed of light
k0=2*pi*f/c;%wave number
Rin = 50;%required input impedance of the antenna
% calculating Width and Length of the Patch
W =(c/( 2 * f ) ) * ( ( 2 / ( Er + 1 ) ) ^0.5);
Er_eff = (Er+1)/2 + (( Er-1 )/2)*(1/(sqrt(1+(12*(h/W)))));
L_eff = c/(2*f*sqrt(Er_eff));
a1 = ( Er_eff + 0.3 ) * ( ( W / h ) + 0.264 );
a2 = ( Er_eff-0.258 ) * ( ( W / h ) + 0.8 );
delta_L = (0.412 * ( a1 / a2 ) ) * h;
L = L_eff-2*delta_L;
% calculating the distance of the inset feed point
t = 0:pi;
g1(t);
I1 = quad(@g1,0,pi);
G1 = I1/(120*pi*pi);
g12(t);
I12 = quad(@g12,0,pi);
G12 = I12/(120*pi*pi);
yo = (L/pi)*(acos(sqrt(2*Rin*(G1+G12))));
lambdaeff=(c/f)*sqrt(Er_eff);
LGP = (lambdaeff/4)*2+L;
WGP = (lambdaeff/4)*2+W;
LGP1 = L+6*h;
WGP1 = W+6*h;
```

```
str=['width = ', num2str(W*1000), ' mm']
str=['length = ', num2str(L*1000), ' mm']
str=['the inset feed point distance = ', num2str(yo*1000), ' mm']
str=['minimum GP length = ', num2str(LGP*1000), ' mm']
str=['minimum GP width = ', num2str(WGP*1000), ' mm']
str=['minimum GP length = ', num2str(LGP1*1000), ' mm']
str=['minimum GP width = ', num2str(WGP1*1000), ' mm']
h=h/100;
%subfonctions
function [f] = g1(t)
global k0 W
f = ((sin(k0*W*0.5*cos(t))/cos(t)).^2*(sin(t).^3);
function [k] = g12(t)
global k0 W L
k=(((sin(k0*W*0.5*cos(t))/cos(t)).^2)*(sin(t).^3)).*besselj(0,k0*L*sin(t));
```

### II.8.2. Présentation du Logiciel HFSS(ANSOFT)

HFSS est un logiciel de simulation électromagnétique qui étudie des structures complexes en trois dimensions en simulant ces structures et en proposant des visualisations claires des résultats en 2D et en 3D.

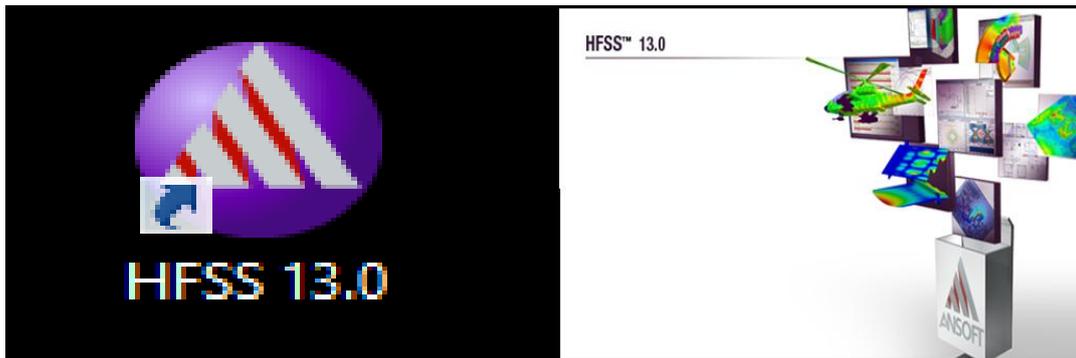


Figure II.4: Interface de logiciel HFSS.

HFSS est utilisé essentiellement pour les expérimentations et les études de systèmes fonctionnant en hautes fréquences, il est exploité notamment pour calculer les paramètres S, les fréquences de résonances ainsi que les champs électromagnétiques. HFSS s'appuie sur la méthode numérique fréquentielle des éléments finis (*FEM : FiniteElement Method*). Cette méthode effectue les tâches suivantes:

- ✓ Discrétisation de l'espace : HFSS est un simulateur interactif qui effectue un maillage en portions élémentaires pour surmonter les difficultés rencontrés avec des structures en 3D comportant des formes et des courbes inhabituelles.

## Chapitre II: Optimisation d'antenne patch et réseau d'antenne patch pour le système radioaltimètre

- ✓ Résolution des équations de Maxwell (équations différentielles) en un certain nombre de points discrets.
- ✓ Prise en compte des conditions aux limites

Le Tableau suivant résume les avantages et les inconvénients de cette méthode :

Avantages	Inconvénients
Etude de structures très complexes	Gourmande en ressources informatiques
Solutions exactes aux nœuds du maillage	Solutions approximées
Prise en compte simple de la dépendance fréquentielle ou temporelle	Erreurs de calculs numériques
	Difficultés pour modéliser l'espace libre

Tableau I.4: Avantages et inconvénients de la méthode des éléments finis.

### II.8.3. Conception d'une antenne patch rectangulaire sous HFSS

On introduisant  $L_p, W_p, L_s$  et  $W_s$ , HFSS nous a fourni la structure suivante :

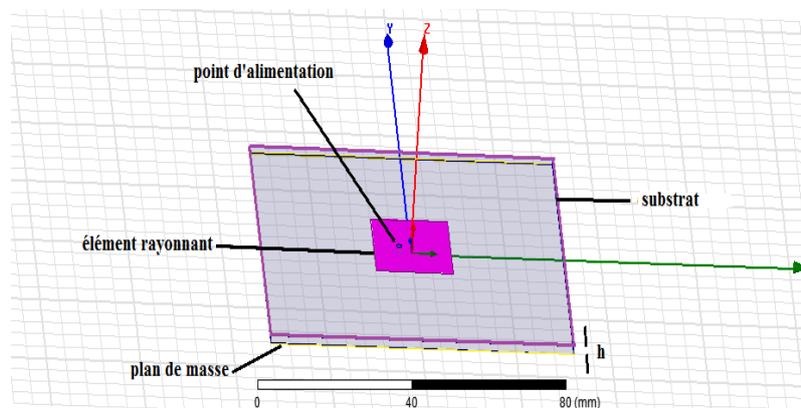


Figure II.5: Structure antenne patch rectangulaire sous HFSS.

### II.9. Simulation et résultats

Les résultats de simulation obtenus sont comme suit :

#### II.9.1. La modélisation géométrique Mesh(maillage):

L'objet d'un maillage est de procéder à une simplification d'un système par un modèle représentant ce système et éventuellement, son environnement (le milieu), dans l'optique de simulations de calculs ou de représentations graphiques. La géométrie des cellules est triangulaire.

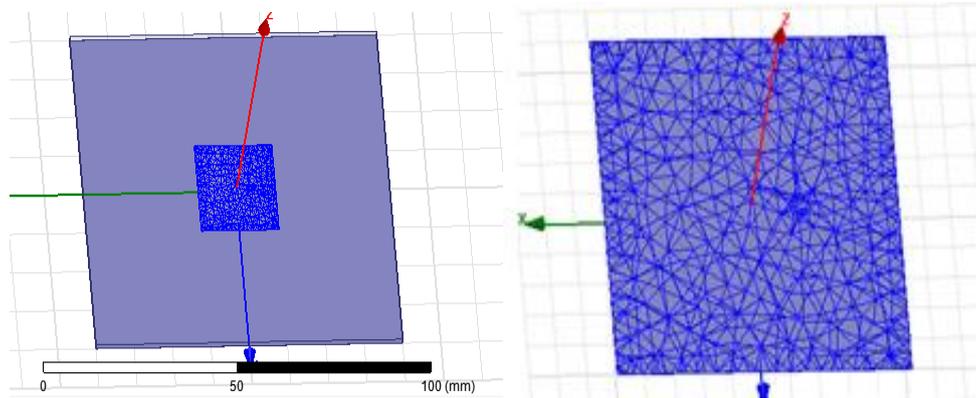


Figure II.6: Modélisation géométrique d'une antenne patch rectangulaire.

### II.9.2. Le coefficient de réflexion

La Figure II.7 donne le résultat obtenu par simulation tel que le coefficient de réflexion  $S_{11}$  à 4,5 GHz presque -50dB avec une bande passante très étroite

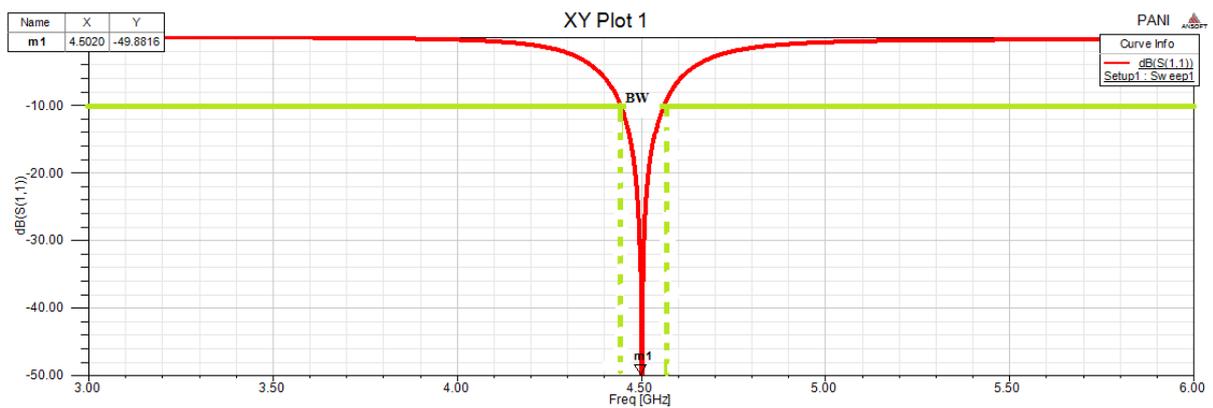


Figure II.7: Coefficient de réflexion  $S_{11}$  d'une antenne patch.

### II.9.3. Taux d'onde stationnaire

La Figure II.8 présente un pic à 4.5 GHz avec un VSWR de 0.0557, Le VSWR minimale correspond à une adaptation parfaite.



Figure II.8: Le VSWR d'une antenne patch

### II.9.4. Impédance d'entrée

Les figures suivantes montrent que l'impédance caractéristique nominale de notre antenne patch rectangulaire est de 50 ohms

#### ✓ Partie réelle

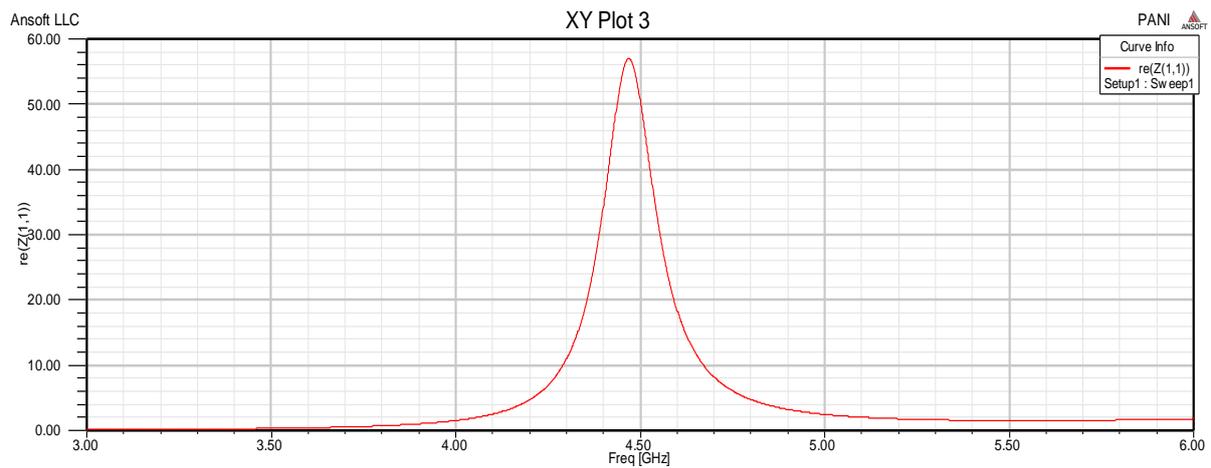
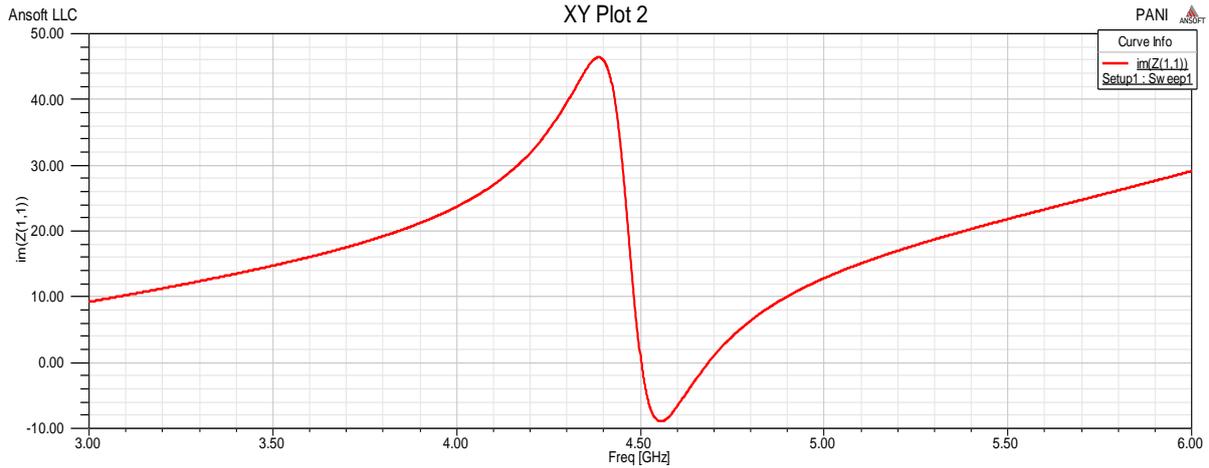


Figure II.9: Représentation de la partie réelle de l'impédance d'entrée.

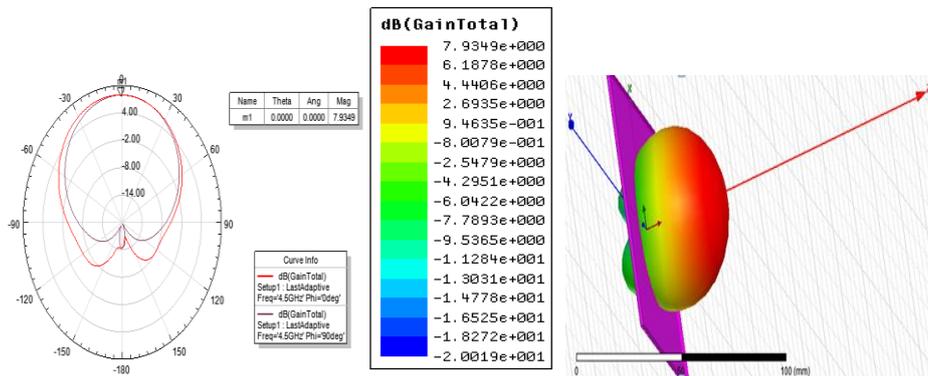
#### ✓ Partie imaginaire



**Figure II.10:** Représentation de la partie imaginaire de l'impédance d'entrée.

### II.9.5. Le diagramme de rayonnement et gain

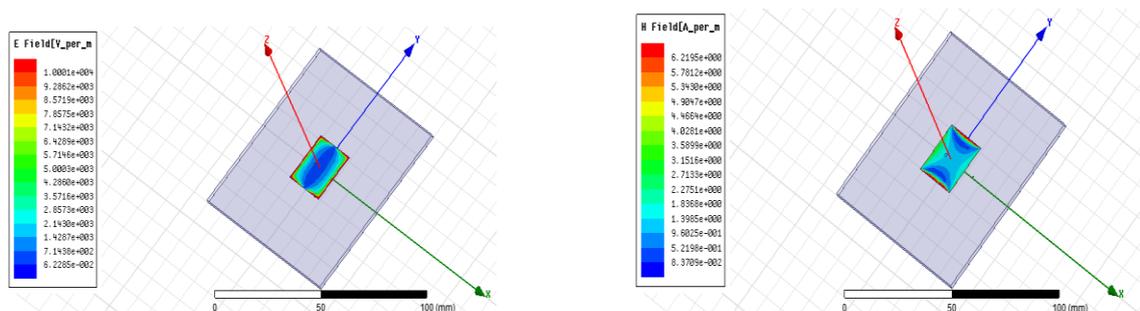
La figure ci-dessous représente le diagramme de rayonnement du patch rectangulaire dans les coordonnées polaires, suivant le plan H et le plan E avec un gain de 7.93 dB, que l'on considère faible par rapport à celui fourni par l'antenne cornet du radio altimètre.



**Figure II.11:** Diagramme de rayonnement et gain d'une antenne patch

### II.9.6. Les répartitions des champs

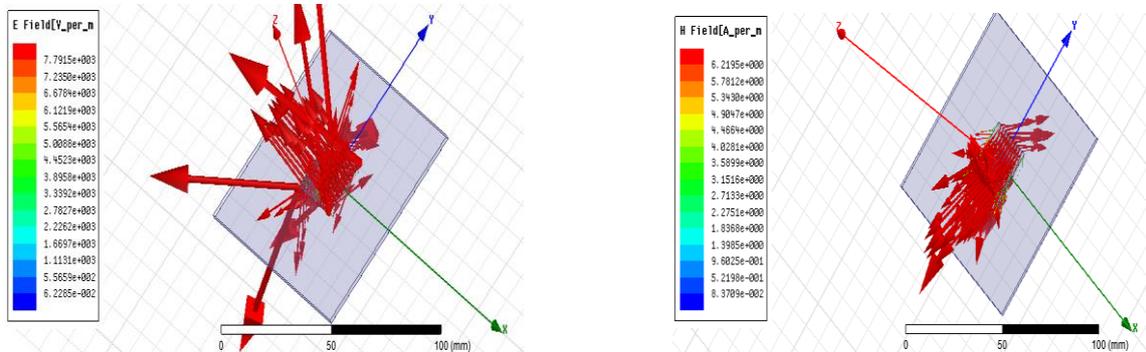
La Figure II.12 présente la répartition des champs E et H, tel que l'intensité des champs électrique et magnétique est concentrée à l'extrémité de l'élément rayonnant.



**Figure II.12:** Répartition des champs E et H d'antenne patch.

### II.9.7. Vecteurs des champs

Les vecteurs des champs électriques et magnétiques sont toujours perpendiculaires, comme montre les figures suivantes :



**Figure II.13:** Représentation des vecteurs des champs E et H d'une antenne patch.

Nous sommes parvenu à passer du 3D(volume) à la 2D(surface) et de répondre à tous les besoin sauf que La bande passante étroite et le gain insuffisant (à peine 7 dB) , Et Pour améliorer les performances de notre antenne patch, on propose d'associer plusieurs éléments rayonnants (Quatre(04) éléments) pour former un système appelé réseau, permettant de compenser les limitations des caractéristiques d'une antenne seule et jouer sur de nombreux facteurs (espacement et phase des patches et taille du plan de masse) pour avoir un gain plus élevé et un lobe principal conforme.

## II.10. Antenne réseau patch

### II.10.1. Présentation du concept

L'idée est de combiner le rayonnement de plusieurs éléments rayonnants afin d'accroître le rayonnement de l'antenne dans une ou plusieurs directions données, comme le montre la Figure II.14. En d'autres termes, il s'agit de créer une interférence constructive entre les ondes électromagnétiques issues de différentes sources. La combinaison de ces différentes ondes va dépendre de la disposition et de la séparation entre les éléments rayonnants, ainsi que des propriétés en amplitude et en phase de l'excitation. Le réseau d'antennes comprend les différents éléments rayonnants ainsi que les structures permettant de modifier l'excitation de chaque élément rayonnant. Les éléments peuvent être quelconques : dipôles, patches, fentes rayonnantes. L'unique condition est que la mise en réseau de ces éléments ne modifie pas leurs caractéristiques propres. Par rapport aux éléments rayonnants, le gain et l'angle d'ouverture du réseau d'antenne seront donc modifiés, Les antennes réseaux

## Chapitre II: Optimisation d'antenne patch et réseau d'antenne patch pour le système radioaltimètre

relèvent de l'association judicieuse de plusieurs antennes pour synthétiser une ouverture rayonnante.

Les antennes réseaux sont composées de  $N$  sources rayonnantes (dipôles, patches, cornets...) réparties dans l'espace. Les grandeurs électriques (signaux) injectées ou collectées sur l'accès de chacune de ces sources sont pondérées en amplitude et (ou) en phase avant d'être sommées entre elles. Un répartiteur de faisceaux permet de réaliser les sommations cohérentes et pondérées des signaux collectés par un système en réception, ce même répartiteur réalisera les signaux pondérés qui seront injectés sur chaque source de l'antenne d'émission.

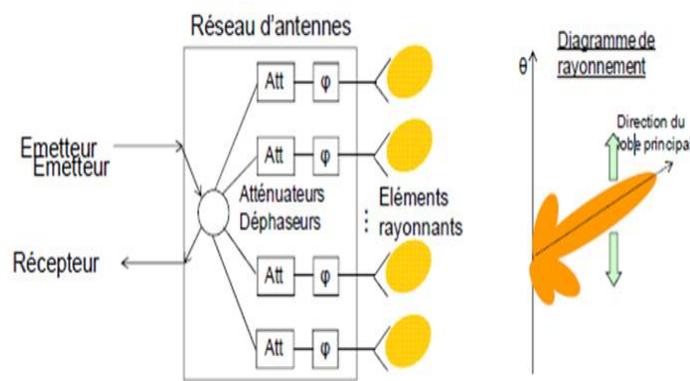


Figure II.14: Schéma simplifié d'un réseau d'antenne.

Grâce à ces pondérations, les antennes réseaux peuvent produire des diagrammes de rayonnement ayant la forme souhaitée. Il sera notamment possible de créer plusieurs lobes simultanément ou un lobe dans la direction du signal incident et un zéro dans la direction d'une interférence.

Les antennes réseaux peuvent avoir plusieurs configurations géométriques ; ces configurations sont d'une grande variété, mais on peut les grouper de la manière suivante :

### ✓ Les réseaux linéaires

Pour un réseau linéaire, les éléments rayonnants sont placés l'un après de l'autre par des déplacements parallèles sur une même droite Figure II.15 a.

### ✓ Les réseaux planaires

Pour un réseau plan, les éléments rayonnants se déduisent l'un de l'autre par des translations parallèles à un même plan Figure II.15 b.

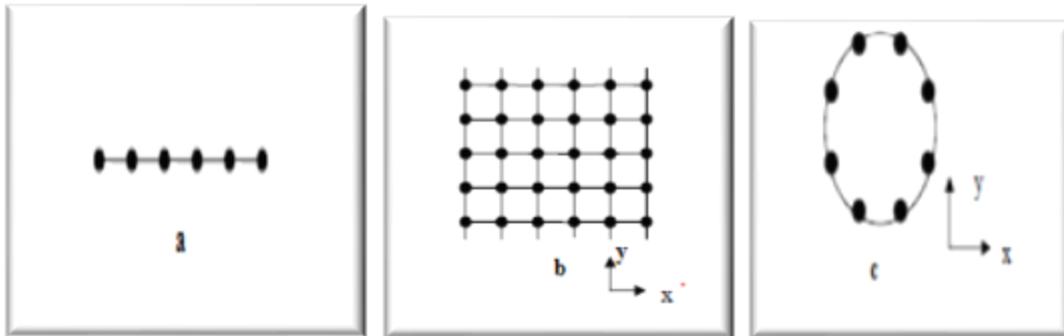
### ✓ Les réseaux circulaires

## Chapitre II: Optimisation d'antenne patch et réseau d'antenne patch pour le système radioaltimètre

Antenne constituée d'un groupement d'éléments rayonnants identiques dans lesquels chaque ensemble de points est placé sur un cercle Figure II.15 c.

### ✓ Les réseaux volumiques

Les sources sont réparties dans un volume.



**Figure II.15:** Les configurations géométriques des réseaux d'antenne.

Plusieurs facteurs contribuent à la formation du diagramme de rayonnement de réseau :

- ✓ Configuration géométrique (linéaire, circulaire, planaire, volumique),
- ✓ Espacement entre les sources,
- ✓ Amplitude d'excitation pour chaque élément,
- ✓ Phase d'excitation pour chaque élément,
- ✓ Polarisation de chaque élément,
- ✓ Diagramme élémentaire <sup>[20]</sup>

### II.10.2. Couplage entre les antennes imprimées

Les interférences électromagnétiques entre les éléments rayonnants dans un réseau d'antennes imprimées, s'expriment par la modification de la répartition des courants de surface. Ce phénomène dit couplage, dépend du type d'antenne et de la distance entre les éléments. Le couplage entre deux antennes imprimées périodiques est d'une grande importance dans la conception des antennes en réseaux, car il peut entraîner une variation de diagramme de rayonnement.

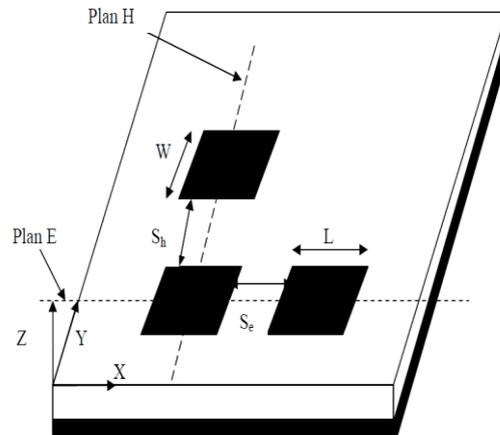
Dans ce qui suit, nous essayerons d'étudier l'influence du couplage sur le diagramme de rayonnement dans le cas d'un réseau d'antenne à 4 sources.

### II.10.3. Définition du couplage dans le plan E et le plan H

Les diagrammes de rayonnement sont généralement représentés dans deux plans orthogonaux "plan E et plan H", par rapport à la direction principale.

**Plan E:** lieu des points de l'espace où le champ électrique rayonné est contenu dans ce plan.

**Plan H:** lieu des points de l'espace où le champ magnétique rayonné est contenu dans ce plan<sup>[20]</sup>.



**Figure II.16:** Couplage entre les antennes patch dans le plan E et H.

**Couplage horizontal** ou couplage dans le plan E: c'est-à-dire le couplage entre deux éléments dans le même substrat, le long de la direction de x avec une séparation d'accouplement  $S_e$ , toutes les largeurs  $W$  des patches (dans la direction de y) ont les mêmes tailles

**Couplage vertical** ou couplage dans le plan H, le long de la direction de y avec une séparation d'accouplement  $S_h$ , les longueurs  $L$  des patches (dans la direction de x) sont les mêmes

#### II.10.4. Choix de la forme

<b>Antenne reseau patch rectangulaire (4.5 GHz)</b>			
<b>Nombre d'antenne couplés</b>		4 antennes patch rectungulaires	
<b>Configuration géométrique</b>		Réseaux planaire	
<b>Séparation d'accouplement</b>			
Couplage horizontal		Couplage vertical $S_h$	
<b>15.3 mm</b>		<b>17.4mm</b>	
<b>Les dimensions de l'antenne</b>			
$L_p$	$W_p$	$L_s$	$L_s$
21.2 mm	24 mm	140mm	140 mm

**Tableau II.5 :** Choix de la forme d'une antenne réseau patch

### II.10.5 Conception d'une antenne patch réseau sous HFSS

Après avoir introduire les valeurs du tableau II.5 dans le logiciel HFSS, ce dernier nous a fourni la structure suivante :

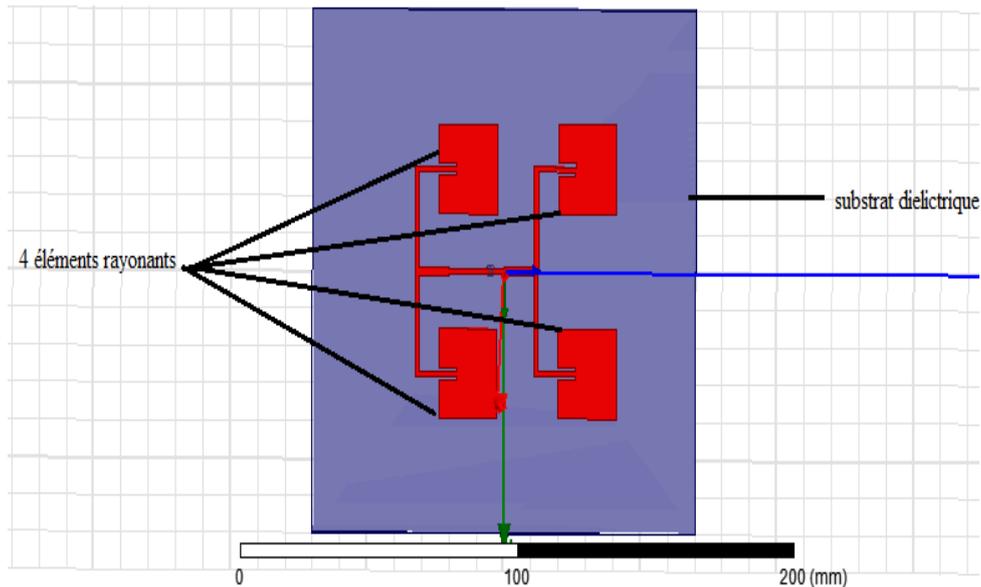


Figure II.17: Structure réseau patch à 4 éléments sur HFSS.

### II.10.6. Simulation et résultats

#### ➤ La modélisation géométrique (Mesh ou maillage)

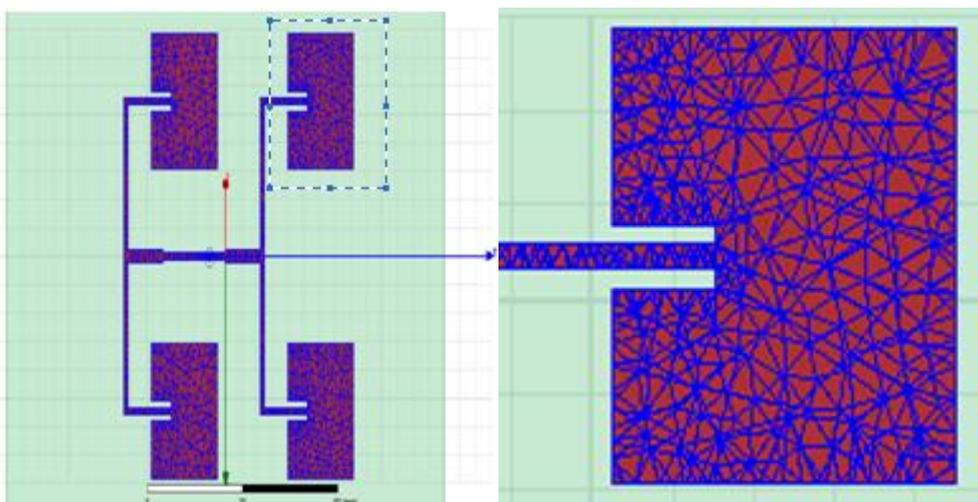
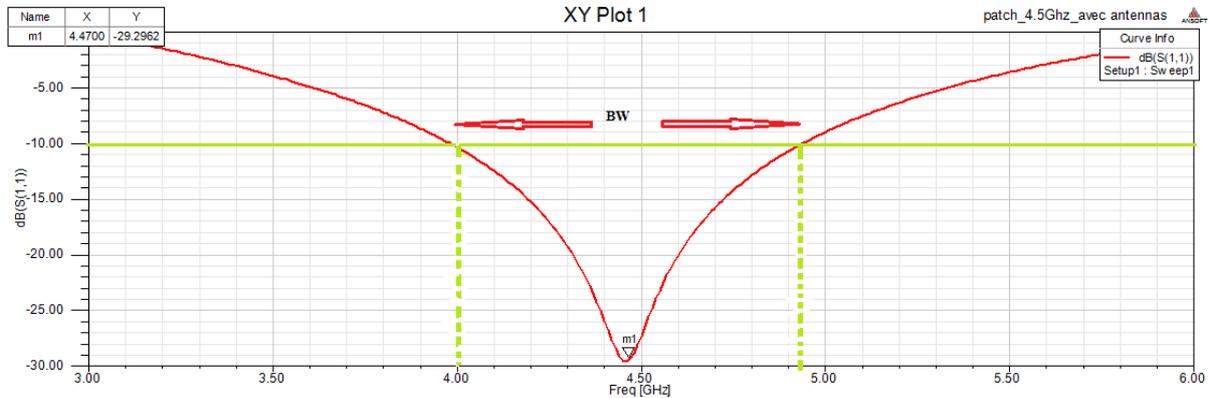


Figure II.18: Maillage antenne réseau

On remarque que plus on s'approche du pont et des extrémités du patch, plus le maillage est important, cela signifie que l'antenne rayonne le plus dans cette partie.

### ➤ Le coefficient de réflexion

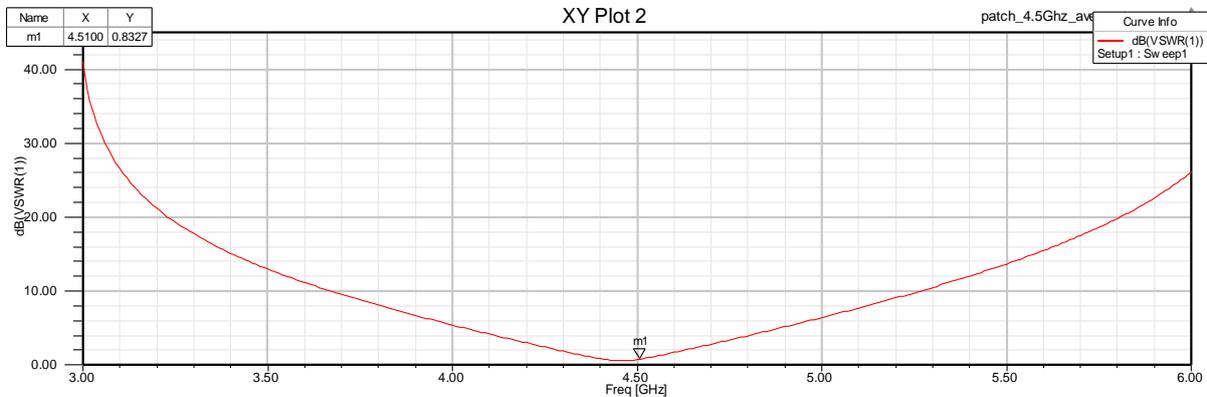
La Figure II.19 présente un pic de résonance à 4.47 GHz avec un coefficient de réflexion de -30 dB avec une bande passante [4 GHz\_4.93 GHz] améliorée par rapport à l'antenne patch.



**Figure II.19:** Le coefficient de réflexion et la bande passante.

### ➤ Taux d'onde stationnaire

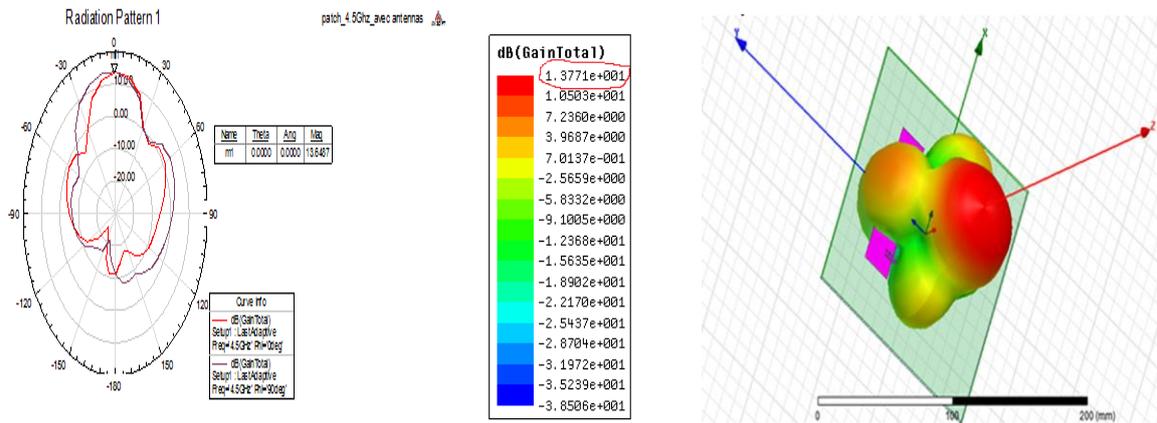
La Figure II.20 montre que nous avons une bonne adaptation dans la bande de fréquence visée tel que à 4.5 GHz le TOS est 0.8327.



**Figure II.20:** Taux d'onde stationnaire.

### ➤ Diagramme de rayonnement et gain

La figure ci-dessous représente le diagramme de rayonnement d'un réseau patch dans les coordonnées polaires, suivant le plan H (plan xOy correspondant à  $\theta = \pi/2$ ), et le plan E (plan yOz correspondant à  $\phi = \pi/2$ ) avec un gain de 13.77 dB alors qu'avant pour un seul élément rayonnant ce n'était que 7 dB; le gain est amélioré en combinaison de plusieurs éléments rayonnants

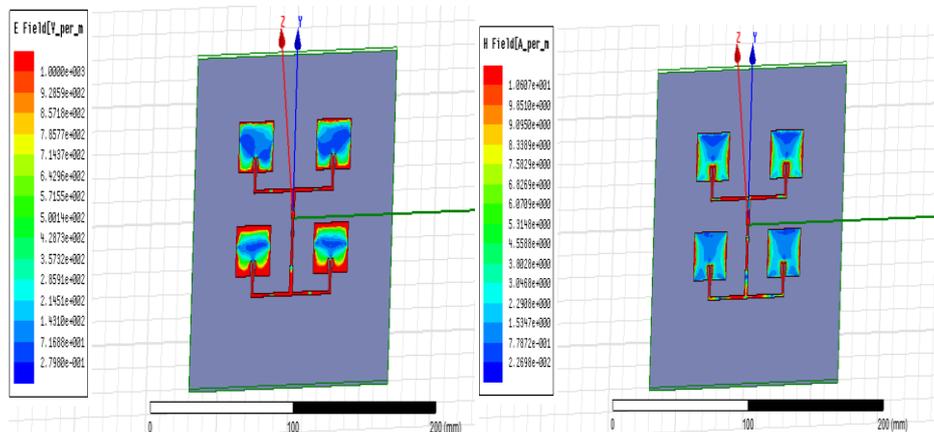


**Figure II.21:** Diagramme de rayonnement et gain pour l'antenne réseau.

D'après le résultat ci-dessus le gain atteint pour ce cas d'antenne réseau 13 dB alors qu'avant pour un seul élément rayonnant ce n'était que 7 dB ; le gain est amélioré en combinaison de plusieurs éléments rayonnants.

### ➤ Les répartitions des champs

La Figure II.22 montre l'ensemble des résultats de répartitions des champs électrique et magnétique présentés est référencés à l'aide d'une échelle de couleur qui permet de repérer les valeurs de l'intensité de ces champs.



**Figure II.22:** Les répartitions des champs E/H d'un réseau patch.

La couleur rouge dans la structure montre la partie dont laquelle l'intensité des champs électrique et magnétique est plus importante, on voit clairement que le champ se répartie essentiellement dans le pont et dans les extrémités de chaque élément rayonnant.

### ➤ Les répartitions des vecteurs des champs

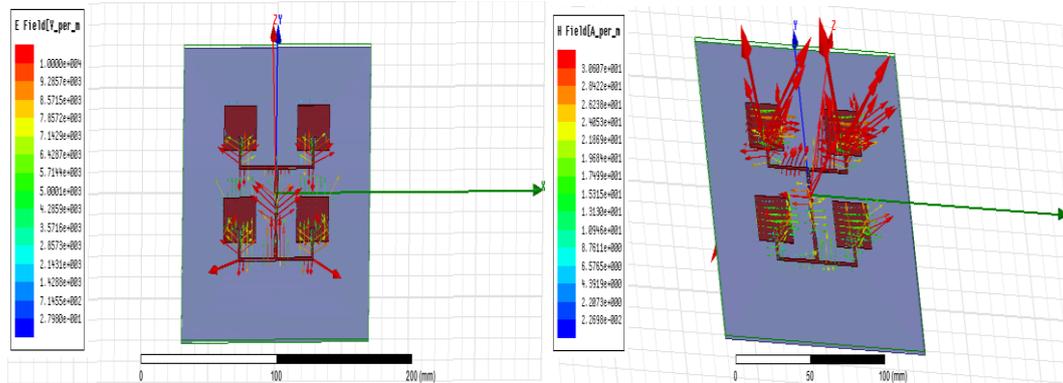


Figure II.23: Les répartitions des vecteurs champs E/H d'un réseau patch.

## II.11. Conclusion

Pour améliorer les performances des antennes patch, on associe les différents éléments rayonnants pour former un système appelé réseau, permettant de compenser les limitations des caractéristiques d'une antenne seule et jouer sur de nombreux facteurs (espacement et phase des patches et taille du plan de masse) pour avoir un gain plus élevé et un lobe principal conforme.

D'après les résultats obtenus, et en premier lieu, l'antenne patch à une seule élément rayonnant, s'avère bien évidemment loin d'être élue car elle ne répond en aucun cas au but visé que ce soit le gain qui est dans notre simulation inférieur à 10 dB, que ce soit le coefficient de réflexion qui est trop élevé; et pour première solution nous avons opté pour une autre antenne qui n'est que l'assemblage de plusieurs éléments rayonnants; le gain a été augmenté considérablement (plus de 13dB) avec une très bonne adaptation, du coup un autre souci est apparu, c'est les dimensions importantes de cette antenne, ce qui nous conduira à penser à une autre structure totalement différente qu'on va voir dans le chapitre qui suit.

### III.1. Introduction

L'antenne Vivaldi appartient à la famille des antennes TSA (*Tapered Slot Antenna*), elle est simplement un cas particulier d'une antenne à fente à onde progressive possédant un profil de type exponentielle.

Le principe des antennes Vivaldi est donc basé sur le principe de fonctionnement d'une antenne du type fente rayonnante qui est membre de la famille des antennes à onde progressive. Il existe trois types des antennes Vivaldi, qui peut être utilisée pour concevoir la structure rayonnante. Ces types sont:

- ✓ Antenne Vivaldi à fente conique (*Tapered slot Vivaldi Antenna*).
- ✓ Antenne Vivaldi Antipode (*Antipodal Vivaldi Antenna*).
- ✓ Antenne Vivaldi antipodale équilibrée (*Balanced Antipodal Vivaldi Antenna*)

### III.2. Antenne Vivaldi à fente conique

L'antenne Vivaldi à fente conique (*tapered slot Vivaldi antenna*) est le concept original mis en place par Gibson en 1979, Il s'agit essentiellement d'une ligne de fente évasée, fabriquée sur une couche de métallisation unique et appuyé sur un substrat diélectrique Figure III.1.

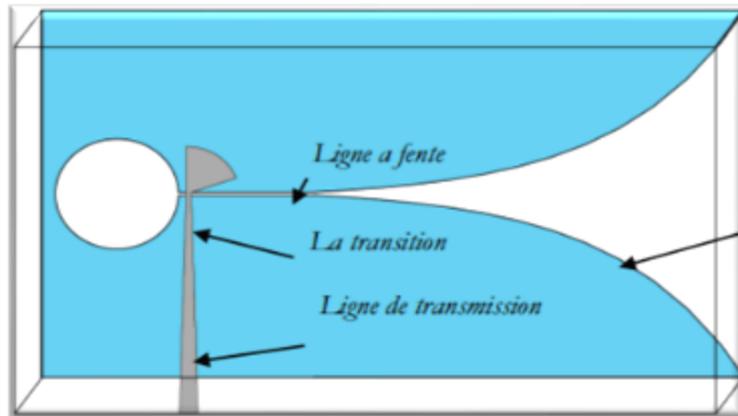
Le profil conique à une courbe exponentielle, l'évasement progressif d'une ligne à fente à la manière d'un cornet plat jusqu'à sa terminaison final (rupture de conducteur) à l'espace ouvert, suivant la règle pour le rayonnement des lignes à fente, cette structure présente deux limites pour la bande de fréquence de l'antenne, la ligne à fente commence à rayonner nettement sous la condition donnée par la formule:

$$S_w = \frac{\lambda_0}{2} \tag{III.01}$$

Où  $S_w$  est la largeur de la ligne à fente, par conséquent, l'extrémité large du cône exponentielle définit à peu près la fréquence la plus basse possible qui est rayonnée par la structure tandis que la largeur de la ligne à fente à la gorge conique est l'introduction de la fréquence de coupure la plus haute.

D'autres limitations sont livrées avec la ligne à fente est une ligne de transmission symétrique, donc il est nécessaire d'incorporer un transformateur symétrique (de transition), si la ligne d'alimentation doit être par ligne coaxiale, la conception d'un transformateur de

transition symétrique pour l'ultra large bande est une tâche très compliquée à faire. Ce qui rend cette solution inconvénient.



**Figure III.01:** Antenne Vivaldi à fente conique.

La transition de la ligne de transmission vers la fente, comme le montre la Figure III.01, est principalement utilisée pour les antennes Vivaldi à fente conique, il est possible de concevoir des transitions qui exploitent plus d'une décade d'une bande passante à l'aide des lignes à fente  $50\Omega$ , le problème, est due à la difficulté de leurs fabrication sur un substrat de faible épaisseur et de faible constante diélectrique, pour cela il sont remplacées par des lignes à haute impédance.

Comme toute structure à fente conique, utilisant une onde progressive qui se propage le long du cône avec la vitesse de phase  $v_{ph}$ , les antennes Vivaldi doivent tenir compte à la condition suivante:

$$v_{ph} \leq C \quad (III.02)$$

Afin de parvenir à un rayonnement longitudinal.

Si la vitesse de phase est supérieure à  $C$ , alors le faisceau principal du diagramme de rayonnement sera divisé et le rayonnement sera plus un rayonnement longitudinal. Un rapport de vitesse optimal a été défini dans:

$$p = \frac{C}{v_{ph}} = 1 + \frac{\lambda_0}{2L} \quad (III.03)$$

Une plage optimale de l'épaisseur du diélectrique effective ( $t_{eff}$ ) normalisée à la longueur d'onde dans l'espace libre ( $\lambda_0$ ) a été identifiée dans [26]. La gamme optimale est

d'environ  $0.003 \lambda_0$  à  $0.01 \lambda_0$  et l'épaisseur du diélectrique effective normalisé est définie dans la relation:

$$\frac{t_{eff}}{\lambda_0} = (\sqrt{\epsilon_r} - 1) \frac{t}{\lambda_0} \quad (III.04)$$

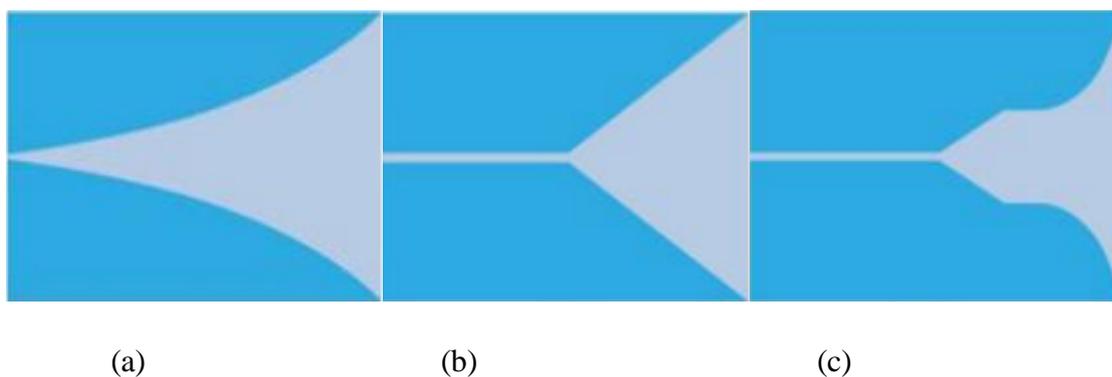
Ou  $t$  est l'épaisseur du diélectrique réel, cette règle est applicable pour toute structure conique dans la longueur de  $4\lambda_0$  à  $10\lambda_0$  <sup>[21][22]</sup>.

#### III.2.1. Conception d'antennes Vivaldi à fente conique

Les antennes Vivaldi à fente conique sont des antennes à onde progressive qui peuvent rayonner d'une manière stable à travers une large bande de fréquence. L'intérêt de l'antenne à fente conique est sa capacité de produire un faisceau symétrique dans les plans E et H sur une large bande de fréquences grâce à sa géométrie planaire. Le choix correcte des paramètres de l'antenne TSA, tels que sa forme, sa longueur totale, l'épaisseur du substrat et la constante diélectrique, est nécessaire. L'antenne consiste en une fente conique fendue dans une couche métallique imprimée sur un substrat diélectrique, il existe trois types d'antennes TSAs selon les formes de ses fentes coniques:

- ✓ L'antenne Vivaldi à fente conique (une fente exponentielle),
- ✓ L'antenne Vivaldi à fente linéaire (Linear Tapered Slot Antenna : LTSA)
- ✓ L'antenne Vivaldi à fente de largeur constante (Constant Width Slot Antenna: CWSA)

La figure suivante montre les trois types d'antennes TSAs:



**Figure III.2:** Les antennes TSA.

(a) à fente exponentielle, (b) à fente linéaire, (c) à fente largeur constante.

Elles sont généralement constituées par une ligne de fente s'élargissant suivant un profil exponentielle, l'évasement progressif d'une ligne à fente, à la manière d'un cornet plat jusqu'à sa terminaison finale (rupture du conducteur) à l'espace ouvert.

Le profil géométrique fente conique est donné par les paramètres suivants

$$y = C_1 e^{Rx} + C_2 \quad (\text{III.05})$$

$$C_1 = \frac{Y_1 - Y_2}{e^{Rx_2} - e^{Rx_1}} \quad (\text{III.06})$$

$$C_2 = \frac{Y_1 e^{Rx_2} - Y_2 e^{Rx_1}}{e^{Rx_2} - e^{Rx_1}} \quad (\text{III.07})$$

Tels que:

$P_1(x_1, y_1)$  et  $P_2(x_2, y_2)$  sont les coordonnées des points finale et initiale respectivement.

#### III.2.2. Calcul des paramètres

En théorie, la largeur d'ouverture minimum est donnée par :

$$W_{\min} = S_w = \lambda_g/2 \quad (\text{III.08})$$

Avec:

$$\lambda_g = C / f_{\min} \sqrt{\epsilon_r} \quad (\text{III.09})$$

Tel que:

C: Vitesse de la lumière

$f_{\min}$ : Fréquence minimum

$\epsilon_r$ : Constante diélectrique

Ensuite, la largeur d'ouverture maximum est:

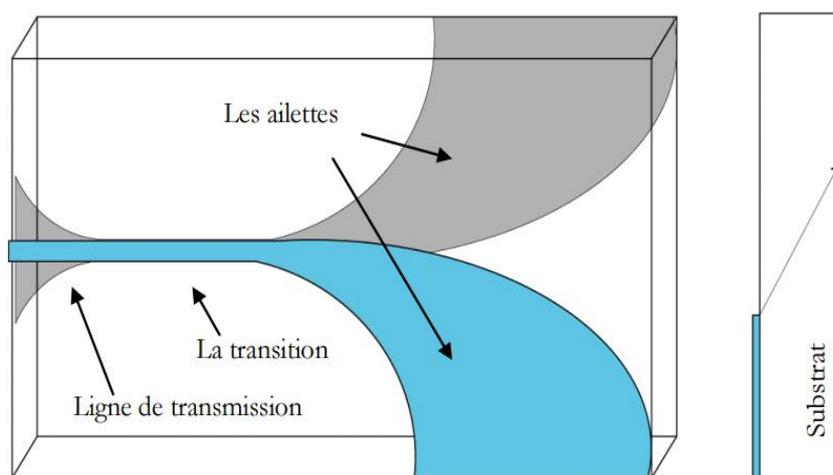
$$W_{\max} = C / f \sqrt{\epsilon_r} \quad (\text{III.10})$$

$f$ : Fréquence centrale

### III.3 Antenne Vivaldi antipodale

L'Antenne Vivaldi antipodale (Antipodal Vivaldi Antenna) a été étudiée par W.Nester en 1985 et puis par E. Gazit en 1988 Figure III.3. Dans la configuration antipodale, l'antenne est créée sur un substrat diélectrique avec métallisation à deux faces. C'est une solution pour le problème d'alimentation liée à la conception originale de Gibson (Vivaldi à fente conique).

La partie d'alimentation est une ligne micro ruban, suivie par une bande équilibrée qui assure la transition. Cette dernière sert à alimenter les ailettes (les palmes) des formes exponentielles, ces ailettes sont disposées de telle façon, que d'un point de vue perpendiculaire au plan de substrat, ils créent une forme évasée. Contrairement à la conception originale de Gibson, les ailettes ont également des bords extérieurs de formes linéaires qui peuvent influencer sur le rendement de rayonnement de l'antenne. Habituellement une courbe exponentielle est utilisée pour définir les bords extérieurs, mais les paramètres de la courbure peuvent différer des bords extérieurs. L'antenne Vivaldi antipodale est illustrée dans la Figure III.03.



**Figure III.03:** Antenne Vivaldi antipodale

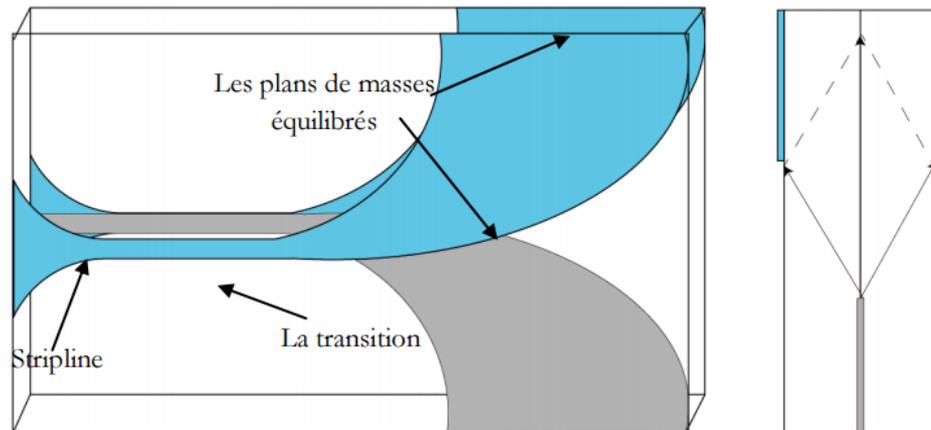
Cette conception est titulaire de nombreux avantages par rapport à la première structure avec une seule partie de métallisation. Premièrement la transition entre la ligne transmission et al ligne double est Assy facile à concevoir et fabriquer.

La fréquence maximale de la coupure est augmentée avec l'alimentation de la ligne double. Car il n'y a pas de limitation sur la largeur de la fente comme dans le cas de l'antenne Vivaldi à fente conique.

Le principale inconvénient de cette configuration est dans la polarisation croisée , observée en particulier pour la fréquence les plus élevées .En dehors de la question de polarisation , les paramètres de rayonnement De cette configuration sont similaires à la conception originale de Vivaldi.

### III.4. Antenne Vivaldi antipodale équilibrée

L'antenne Vivaldi antipodale équilibrée (balanced antipodal Vivaldi Antenna). Une des dernières améliorations de la conception originale a été présentée par Langley, Hall et Newhan en 1996. Cette conception est une évolution de la version antipodale. La création d'une triplaque (striplibe) équilibrée en ajoutant une autre couche de métallisation, réduit la polarisation croisée Figure III.4.



**Figure III.4:** Antenne Vivaldi antipodale équilibrée.

Cette configuration décrit la fonction de la troisième couche métallique, deux vecteurs du champ E avec des directions, de la plaque centrale vers les plans de masse donnent un vecteur résultant qui est parallèle à la métallisation.

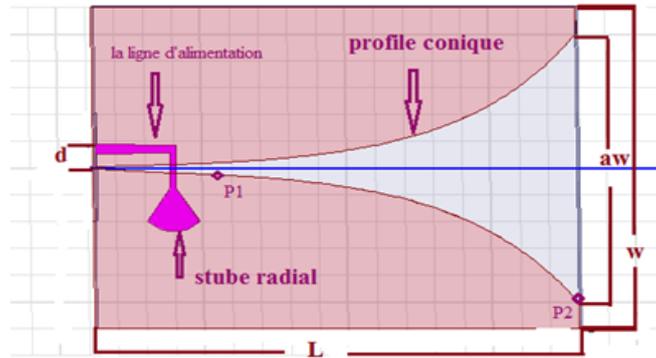
Un autre aspect positif de cette conception est le fait que la ligne d'alimentation est créée par une triplaque. Il s'agit de réduire le rayonnement de l'alimentation dans le cas où elle est ouverte. Il y'a aussi quelques inconvénients dans la conception de cette antenne antipodale équilibrée. Naturellement la construction de l'antenne est plus compliquée en raison de la structure triplaque.

### III.5. Etudes paramétriques

Dans un premier temps, nous avons choisi une antenne à fente conique, le type le moins complexe en termes de conception et de réalisation. L'antenne est alimentée par une ligne de transmission sous forme d'un transformateur d'impédance. Les paramètres géométriques de l'antenne, ainsi que sa conception sous HFSS sont montrés ci-dessous. La fente de cette antenne est définie par une fonction exponentielle donnée par la relation suivante qui a été calculé par les équations citées précédemment:

$$Y(x) = Ae^{px} + S_w \quad (\text{III.11})$$

Ou  $p$  représente le profil de la courbe exponentielle, et  $S_w$  est la largeur de la ligne à fentes. L'antenne a été simulée dans l'intervalle [3\_6] GHz en utilisant comme Substrat Rogers RT/duroid 5880 (tm) vu la disponibilité de ce matériau dans les laboratoires. La figure suivante représente l'antenne simulée:



**Figure III.5:** Schéma de l'antenne Vivaldi avec les paramètres géométriques

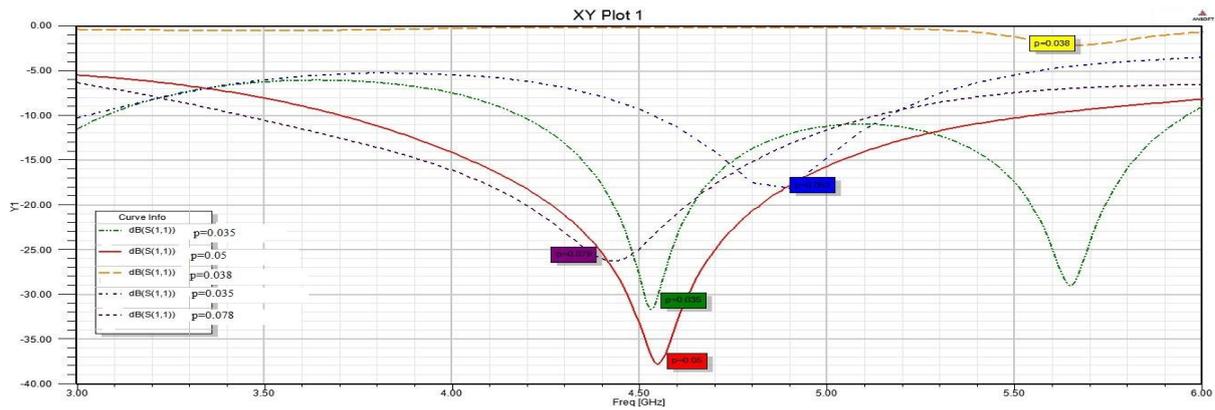
Une étude sous HFSS sera menée par la suite pour voir l'influence des dimensions du substrat, le profil conique, la ligne d'alimentation et l'angle de stub sur les caractéristiques de l'antenne.

#### III.5.1. Influence du profil conique

Tout d'abord, nous avons étudié le comportement de l'antenne pour les différents profils exponentiels défini par le facteur « $p$ ». Ce dernier peut changer la courbure exponentielle de l'antenne (figure). Les simulations de cette antenne sont faites avec les mêmes caractéristiques du substrat et la même technique d'alimentation définie précédemment.

(a)  $P=0.035$    (b)  $P=0.038$    (c)  $P=0.05$    (d)  $P=0.053$    (e)  $P=0.078$

La figure suivante représente les tracés du module du coefficient de réflexion (en décibels) en fonction de la fréquence (en GHz), pour des différents  $p$  allant de (a) jusqu'au (e).



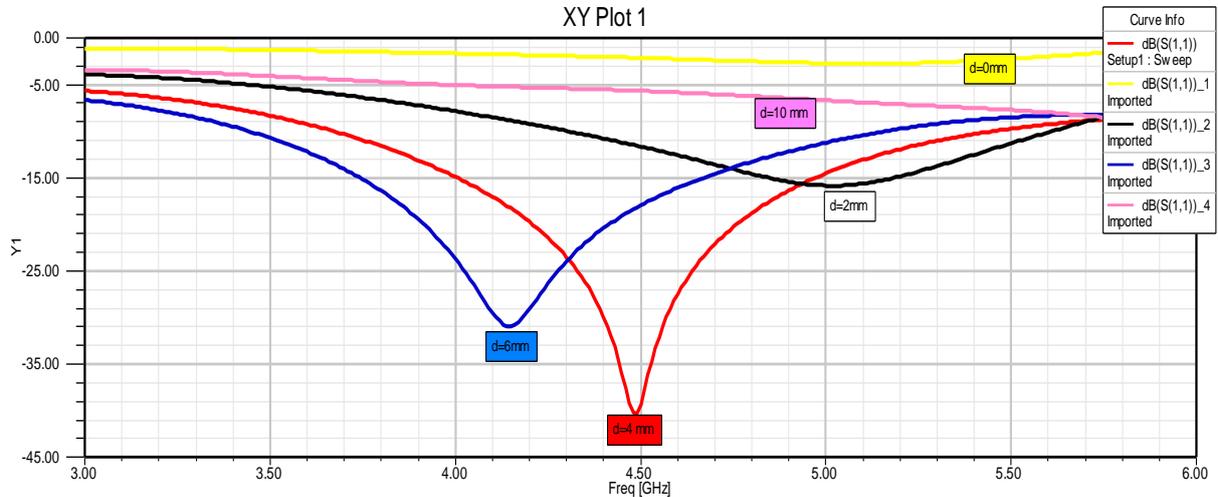
**Figure III.6:** Coefficient de réflexion S11 pour différents profils.

### III.5.2 Influence des paramètres de la ligne d'alimentation

Dans cette configuration, il y'a plusieurs variables qui peuvent influencer sur le coefficient de réflexion de notre antenne.

#### ➤ Influence de la distance de la ligne d'alimentation

La variation de la distance de la ligne d'alimentation «d» (mm) de la valeur 0 à 10mm a permis d'avoir les variations suivantes pour le coefficient de réflexion  $S_{11}$  en fonction de la fréquence.

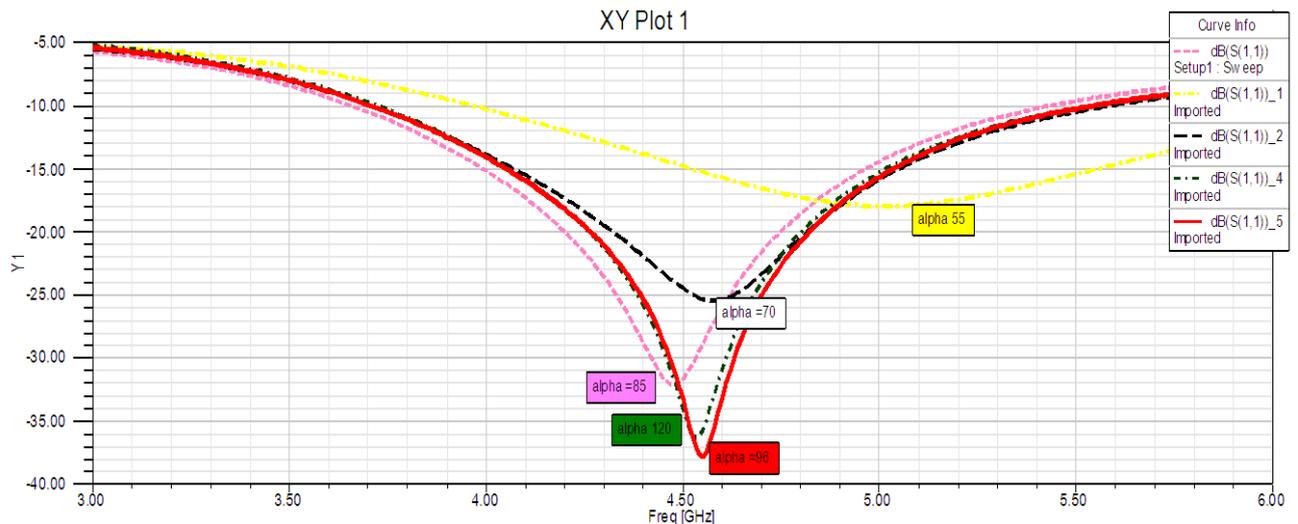


**Figure III.7:** Influence de la distance de la ligne d'alimentation

La distance de la ligne d'alimentation représente un point sensible pour une bonne adaptation de l'antenne ce qui nous a conduits à le choisir d'une façon très délicate.

#### ➤ Influence de l'angle du stub

Nous avons varié l'angle du stub  $\alpha$  (en degré) de 50 à 120° pour que la transition de la ligne d'alimentation à la ligne à fente donne une meilleure adaptation de notre antenne.

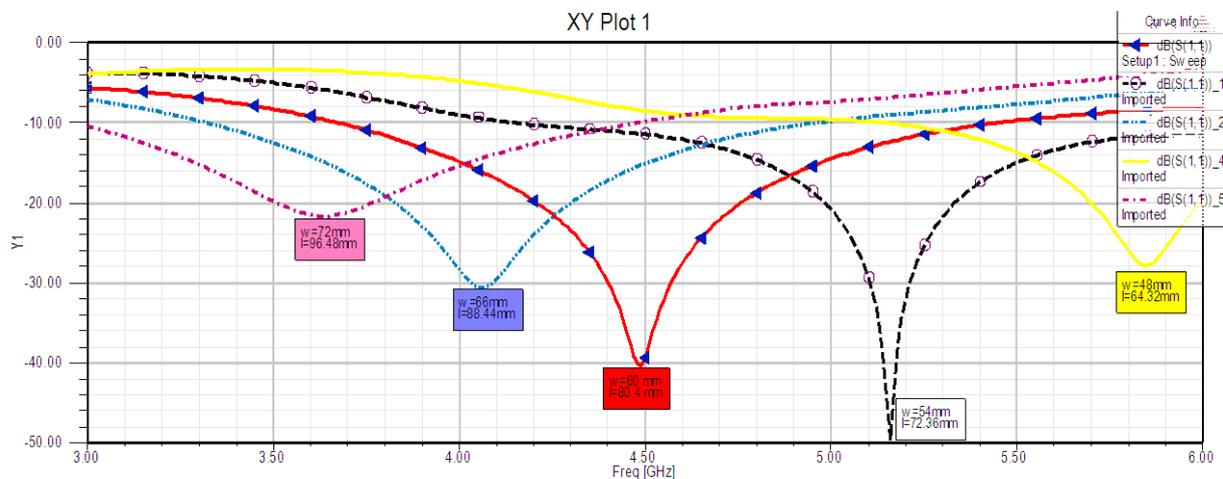


**Figure III.8:** Influence de l'angle du stub.

### III.5.3. Influence des paramètres du substrat

#### ➤ Influence de la largeur et la longueur du substrat l et w

La largeur et la longueur de l'antenne sont deux paramètres fondamentaux, qui peuvent directement influencer sur le coefficient de réflexion de l'antenne. Par la suite nous avons varié la largeur et la longueur de l'antenne de 40 à 90mm et nous avons obtenus les résultats portés dans la Figure III.9.



**Figure III.9:** Influence de la largeur et la longueur du substrat l et w.

La largeur de l'antenne doit être supérieure à une demi-longueur d'onde à la fréquence d'opération la plus basse, de manière à obtenir la performance de rayonnement souhaitée. Diminuer la largeur d'antenne inférieur à cette valeur diminue la fréquence la plus basse de fonctionnement, ainsi la bande passante d'antenne diminue considérablement.

La longueur d'onde de la fréquence minimale de fonctionnement est de 33,33mm telle que calculée avant. Une antenne de largeur W supérieur à 33,33mm fournira des

performances de rayonnement acceptables dites que bon résultat est un  $w=66\text{mm}$  et  $l=80,4\text{mm}$ .

#### ➤ Influence de l'épaisseur de substrat

Finalement, nous avons varié l'épaisseur de substrat  $h$  pour connaître la meilleure épaisseur du substrat à utiliser. Pour cela nous avons simulé les coefficients de réflexion  $S_{11}$  en fonction de la fréquence pour les valeurs de  $h$  allant de  $0.8\text{ mm}$  à  $1.6\text{ mm}$ . Les résultats de simulation sont portés sur la Figure (III.12) tel que pour  $h=1.5\text{ mm}$  donne un meilleur coefficient de réflexion  $S_{11}=-40\text{ dB}$ .

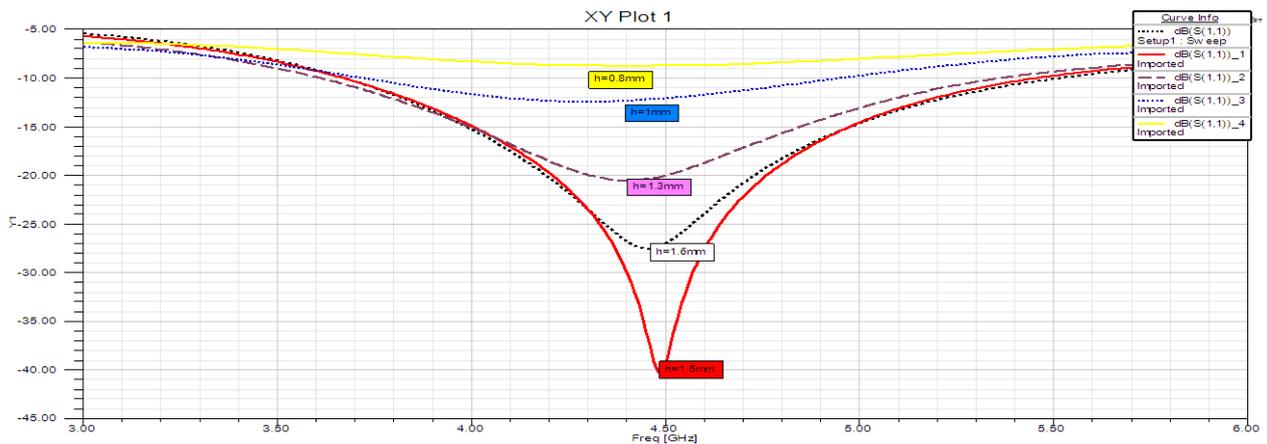


Figure III.10: Influence de l'épaisseur de substrat

### III.6. Conception Antenne Vivaldi optimisée

L'étude paramétrique précédente nous a permis d'obtenir les valeurs optimales des différents paramètres de la structure.

Nous avons commencé notre étude paramétrique par la variation du paramètre  $p$  (profil conique) et nous avons retenu la valeur  $p=0.05$ . Ensuite nous avons varié la distance de la ligne d'alimentation afin d'assurer une bonne adaptation à la fin la valeur  $d=4\text{ mm}$  s'avère très bonne. Le rayon du stub qui joue un rôle important dans la transition a été varié aussi,  $R=4\text{ mm}$  était le meilleur résultat. Pour l'angle du stub  $\alpha$ , la valeur optimale retenue est égale à  $96^\circ$ .

Finalement nous avons varié la largeur  $W$  qui correspond à la largeur et la longueur du Substrat, la valeur retenue est  $W=60\text{ mm}$  et  $L=80.4\text{ mm}$ .

A la fin de l'étude paramétrique, nous avons pu concevoir notre antenne et la simuler sous le logiciel HFSS comme ci-dessous :

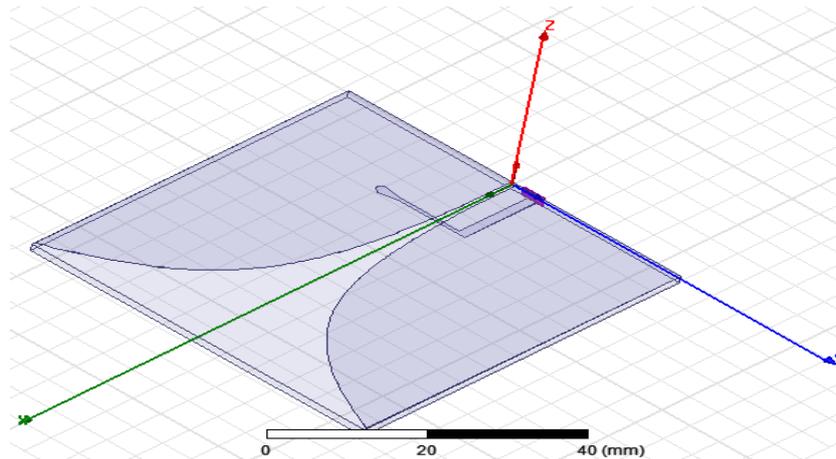


Figure III.11: Antenne Vivaldi simulée sous HFSS.

L'ensemble de ces valeurs est récapitulé dans le tableau suivant :

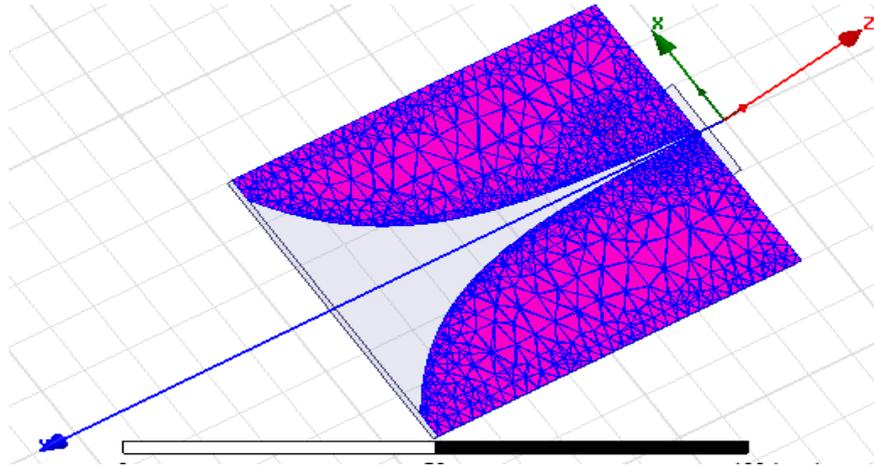
Paramètres	Dimensions l'antenne
<b>P</b> (profil de la courbe exponentielle)	0.05
<b>a<sub>w</sub></b> (La largeur d'ouverture à l'extrémité du cône)	50mm
<b>d</b> (Distance de la ligne d'alimentation)	4 mm
<b>h</b> (Epaisseur du substrat)	1.6 mm
<b>Angle</b> (stub radiale)	96°
<b>W</b> (Largeur du substrat)	60mm
<b>L</b> (longueur du substrat)	80.4mm

Tableau III.01: Recapitulatif des dimentions de l'antenne optimisée.

### III.7 Simulation et resultats d'antenne vivaldi optimisée

#### ➤ La modélisation géométrique (Mesh, Maillage)

Le maillage d'antenne Vivaldi est de forme rectangulaire comme montre la figure suivante:

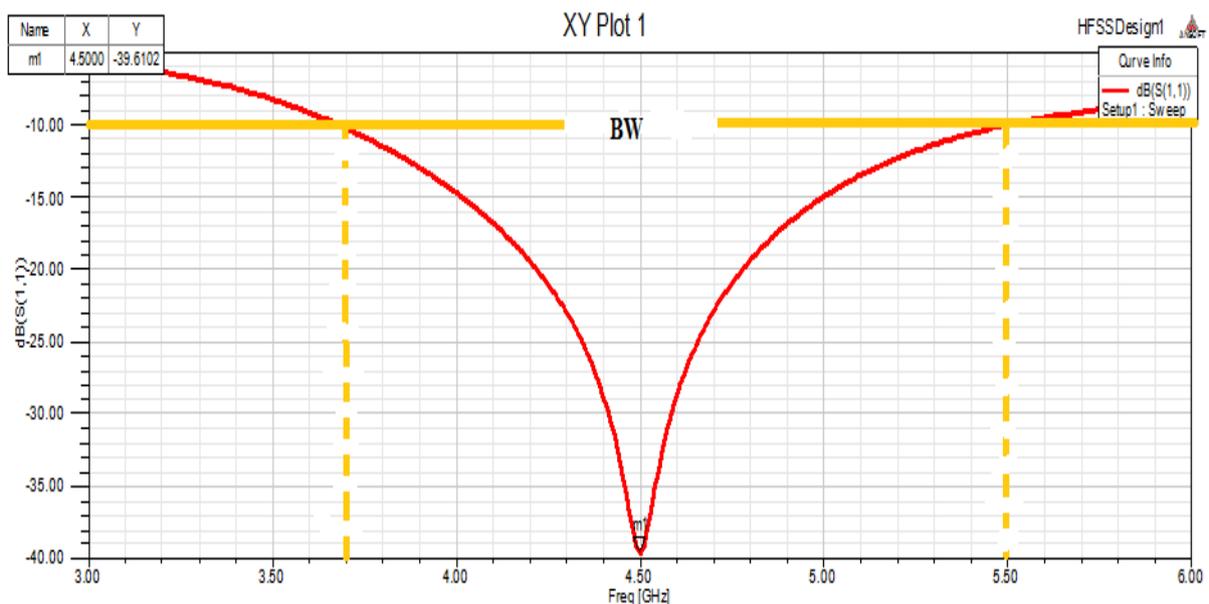


**Figure III.7.1:** La modélisation géométrique (Mesh ou maillage.)

On remarque que les dimensions des mailles sont plus grandes au centre qu'on bordure, ce qui signifie une concentration du champ électromagnétique sur la partie du profil conique là où le rayonnement va se déclencher.

### ➤ Le coefficient de réflexion

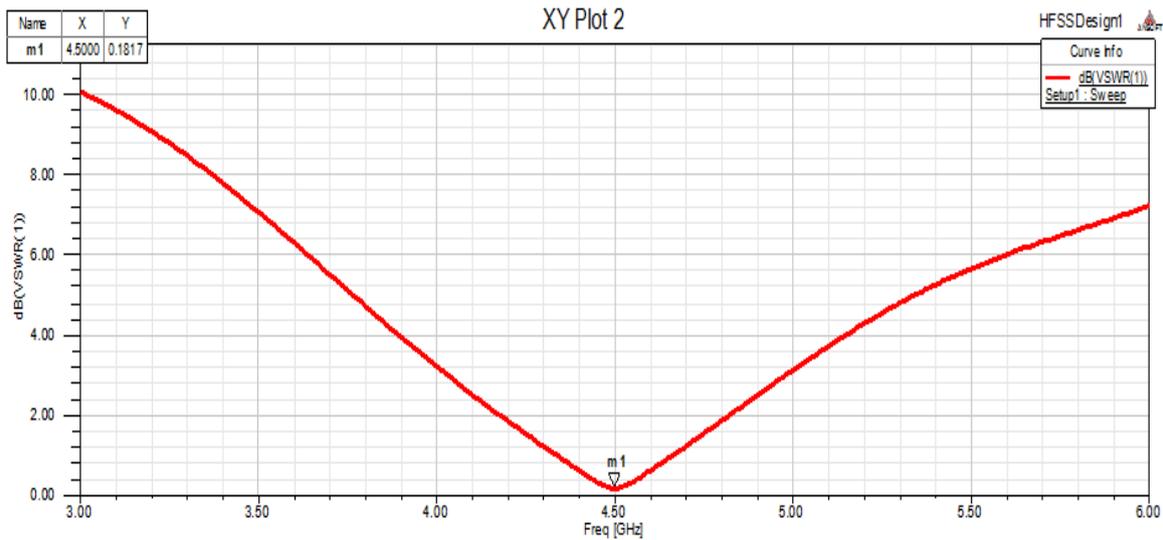
Dans cette figure on constate que le coefficient  $S_{11}$  est de l'ordre de  $-40\text{dB}$  pour une bande passante de  $[3.7\text{GHz}-5.5\text{GHz}]$ , Cette dernière couvre la fréquence souhaitée.



**Figure III.13:** Paramètre  $S_{11}$  pour l'antenne optimisée

### ➤ Le Taux d'Onde Stationnaire

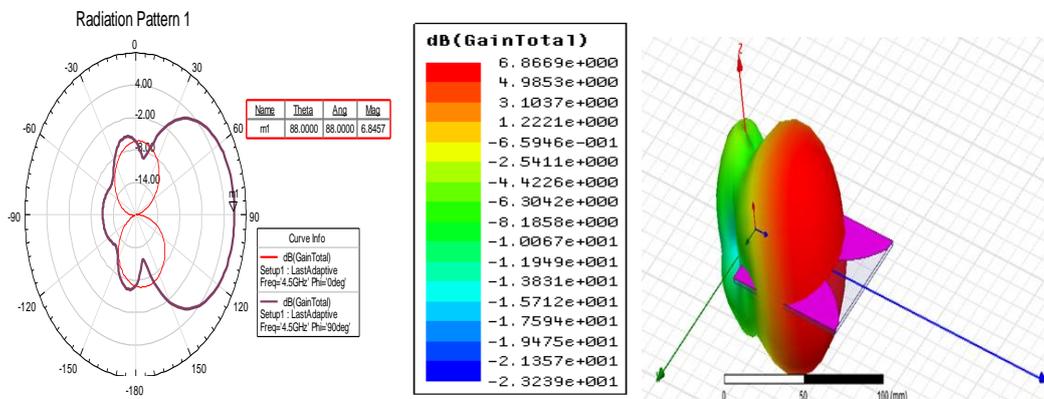
Le taux d'ondes stationnaires traduit l'adaptation ou la désadaptation d'impédance entre deux éléments. La figure présente un TOS d'une valeur 0.18 à une fréquence de résonance 4,5 GHz



**Figure III.14:** Le TOS pour l'antenne Vivaldi optimisée.

### ➤ Diagramme de rayonnement et gain

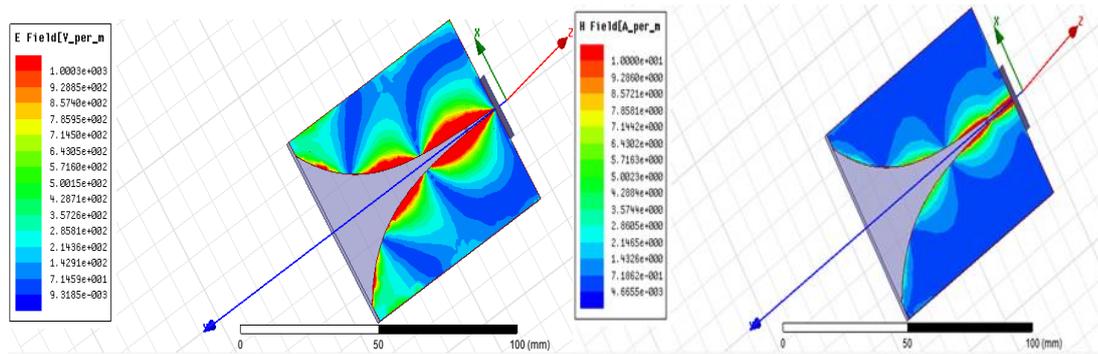
Le diagramme de rayonnement permet de localiser les zones de l'espace entourant l'antenne et les directions où le rayonnement est intense ou faible, ce diagramme permet de savoir rapidement la performance de l'antenne. On remarque ici un gain trop faible (moins de 7 dB)



**Figure III.15:** Diagramme de rayonnement et gain.

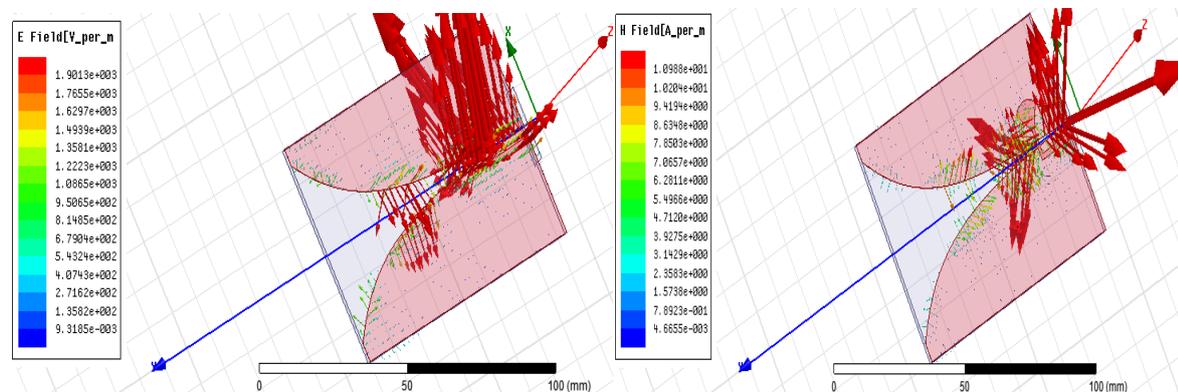
### ➤ Répartition des champs E/H

On remarque que l'intensité du champ électrique et magnétique est concentrée le long de profile conique



**Figure III.16:** Répartition des champs E/H d'une antenne Vivaldi

### ➤ Répartition des vecteurs des champs E/H



**Figure III.17:** Vecteur des champs électrique et magnétique d'une antenne Vivaldi

## III.8. Augmentations du gain d'une antenne Vivaldi

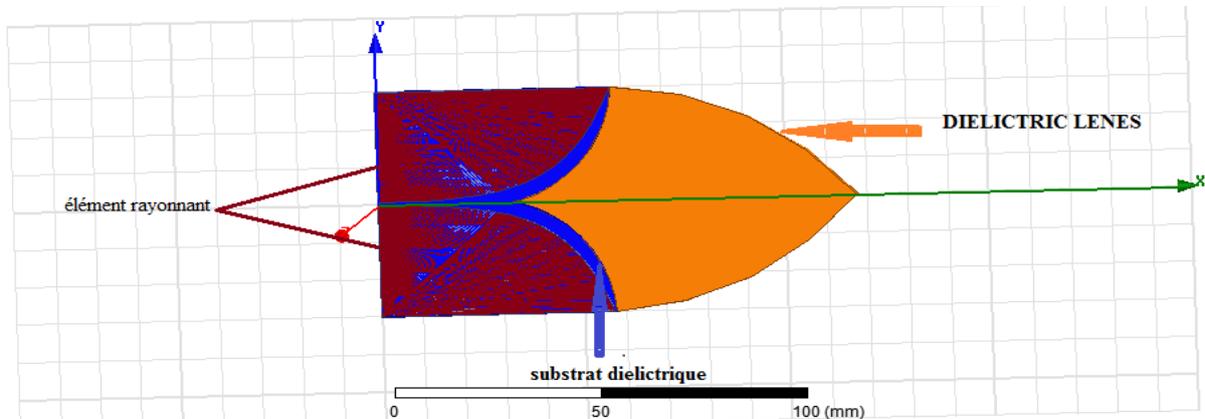
L'antenne Vivaldi a une structure plane et simple, un poids léger, une compacité, une largeur de bande ultra-large, un rendement élevé et un faisceau symétrique dans le plan E et le plan H. Mais malgré les nombreux avantages de l'antenne Vivaldi, elle souffre encore de certains inconvénients, tels que le faisceau incliné, la directivité et le gain, faibles ou incohérents, entre autres.

Plusieurs techniques ont été rapportées dans la littérature pour augmenter le gain notamment l'utilisation de SRR (*split ring resonator*), l'utilisation de Lentilles diélectriques (*lens dielectric*), les fentes des bras rayonnants (corrugation), la structure du réseau, la structure de la bande interdite photonique, le métamatériau à indice négatif (ZIM) [23]

### III.8.1. Lentilles diélectriques

Les lentilles diélectriques (Dielectric lens) sont généralement utilisées pour améliorer différentes caractéristiques des antennes Vivaldi. Formation de substrat ou utilisation de matériel différent devant l'ouverture de l'antenne Figure III.18, avec une constante diélectrique différente, utilisée pour augmenter le gain de l'antenne. Ce diélectrique est généralement connu sous le nom de lentille diélectrique. Clairement, la forme de la lentille et sa constante diélectrique sont les paramètres les plus importants dans sa conception. Différentes formes peuvent être envisagées pour la partie extérieure de la lentille. Cependant, la conception exponentielle représente le meilleur résultat dans ce domaine.

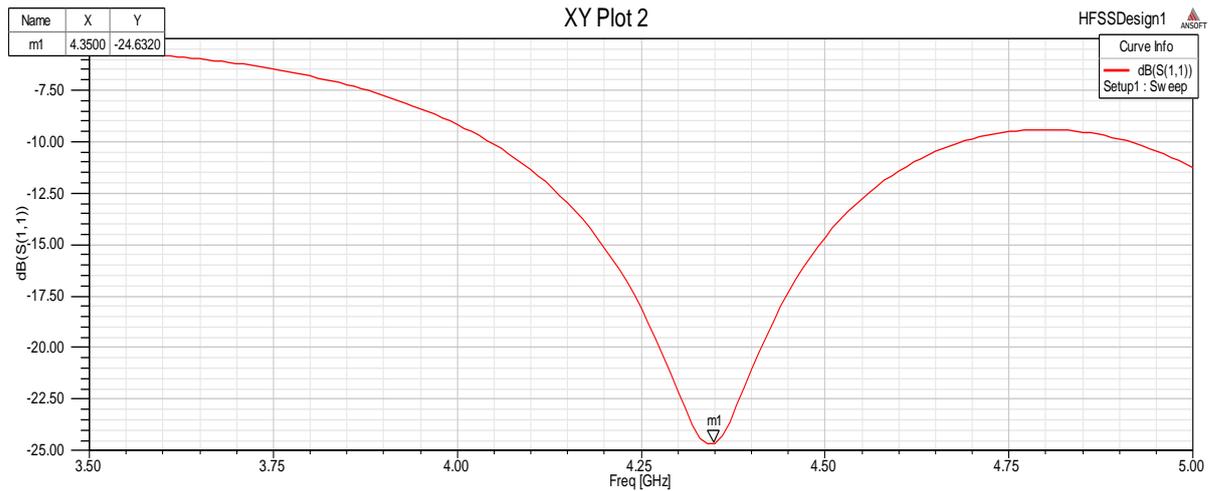
La conception exponentielle suit les mêmes relations qui ont été utilisées pour concevoir les correctifs. De plus, par définition l'ouverture de l'antenne comme les bords extérieurs de surfaces conductrices, il est possible de remplacer le substrat en cette partie avec un autre diélectrique. Ce diélectrique agira comme une partie de l'objectif et contribue à améliorer les caractéristiques de l'antenne. Cette partie de la structure suit la même structure exponentielle pour éviter tout conflit. Employant une lentille diélectrique sur l'ouverture de l'antenne ne pose pas d'effet notable sur la perte de retour d'antenne mais les effets sur le gain d'antenne ne sont pas négligeables. [24]



**Figure III.18:** Conception antenne Vivaldi avec lentille diélectrique sous HFSS.

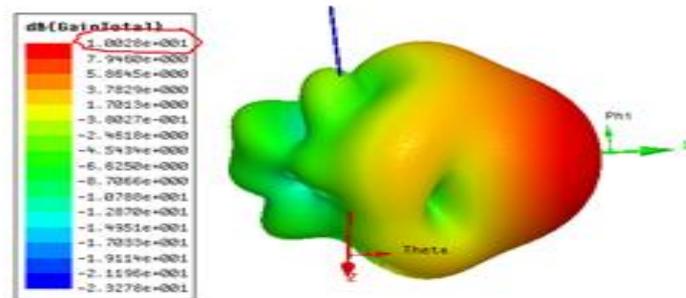
#### ➤ Coefficient de réflexion

Le pic est un peu décalé de 4.5 GHz avec un  $S_{11}$  de -24.63 dB sur une bande passante [4.05GHz-4.7GHz]



**Figure III.19:** Coefficient de réflexion.

### ➤ Gain

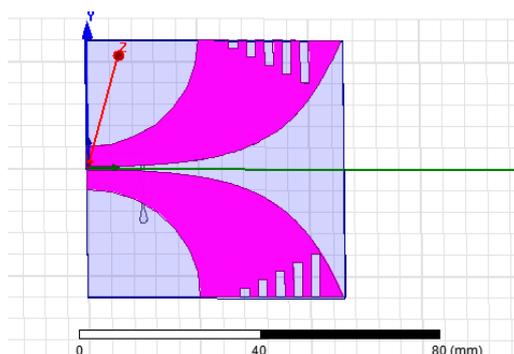


**Figure III.20:** Gain pour l'antenne Vivaldi avec lentille diélectrique.

L'utilisation de lentille diélectrique (Taconic) augmente le gain de 6.7dB à 10.028 dB comme montre la Figure III.20 mais l'utilisation de deux matériaux du substrat va compliquer le système, en plus le matériau de Taconic n'est pas disponible dans les laboratoires en Algérie par ce que il est très chère, alors on passe à une autre technique.

### III.8.2. Corrugation

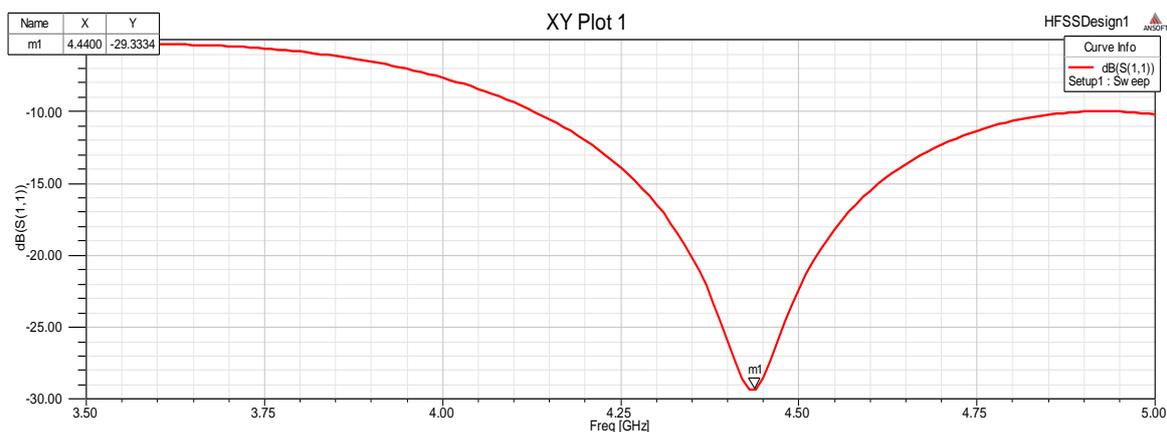
Afin d'améliorer encore le gain de l'antenne, L'ondulation est conçue en découpant des fentes rectangulaires de longueur variable à partir du cuivre de la torche exponentielle des deux côtés. La largeur des fentes et la séparation entre les fentes rectangulaires de l'ondulation restent les mêmes. Le chargement de l'ondulation sur les bords de la fente effilée fonctionne comme une charge résistive, le champ reste concentré vers la zone de la fente et contribue aux diagrammes de rayonnement de balance de feu [25]



**Figure III.21:** Conception d'une antenne Vivaldi avec des fentes rectangulaires sous HFSS

➤ **Coefficient de réflexion**

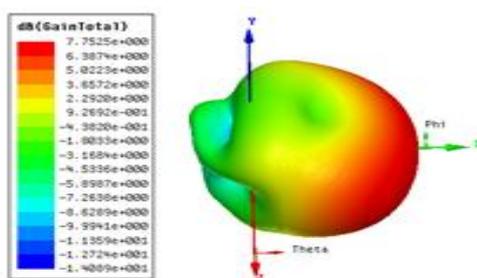
La technique de corrugation donne un pic à 4.44 GHz avec un  $S_{11}$  environ de -30 dB comme montre la figure suivante.



**Figure III.22:** Paramètre  $S_{11}$  après corrugation

➤ **gain**

Avec cette technique nous sommes parvenu à augmenter légèrement le gain (de 6.7 dB à 7.75 dB), malheureusement il est inférieur à la valeur de gain prise en compte sur le cahier de charge (gain supérieur à 10 dB). La figure ci-dessous montre le résultat:



**Figure III.23:** Gain pour l'antenne Vivaldi avec des fentes rectangulaires

Comme le montre les résultats précédents, tous les essais pour avoir un gain important s'avèrent sans utilité, nous avons joué sur les dimensions du substrat, puis sur le point d'alimentation et même avec corrugation, le gain a été toujours faible sauf pour le cas de lentille trop cher et qui n'est plus disponible dans les laboratoires; il nous a fallu alors de combiner plusieurs antenne en réseau pour parvenir à un gain plus élevé. En ce qui suit nous allons nous pencher vers un réseau Vivaldi.

### III.8.3. Antenne Vivaldi en réseau

Il s'agit d'associer plusieurs antennes Vivaldi dans la même structure dont le but d'améliorer le gain avec une bonne adaptation (à 4,5 GHz). Après plusieurs tentatives, on constate que pour maximiser la bande passante, Nous avons effectué plusieurs essais de conception réseau antenne Vivaldi sous HFSS, nous avons également étudié les cas de structures ci-dessous :

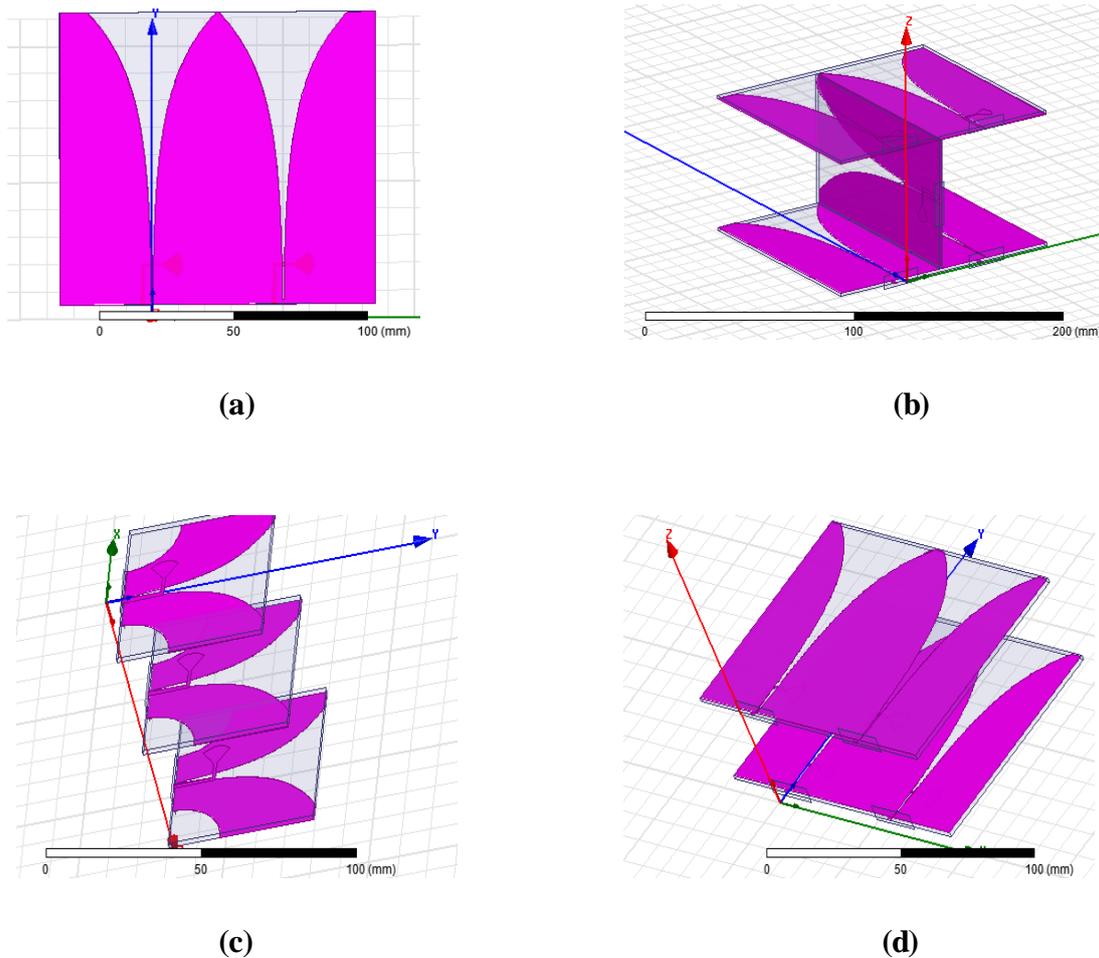


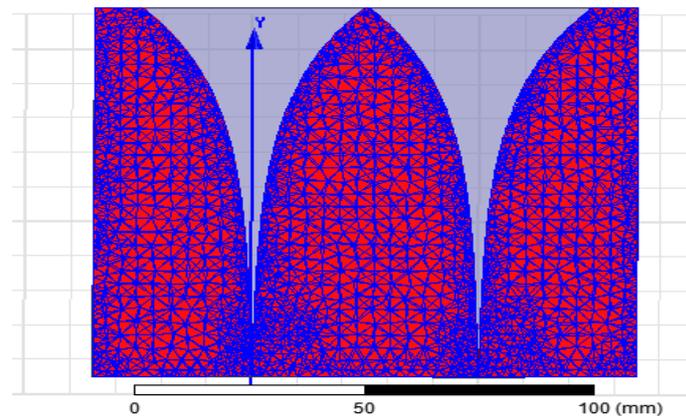
Figure III.24: Les différents designs des antennes Vivaldi en réseau.

Le meilleur design pour notre application antenne radar altimètre a profile bas, léger, facile a intégrer, c'est l'antenne dans la figure (a) avec les caractéristiques suivantes ;

### III.9. Simulation et résultats

#### ➤ Modélisation géométrique

L'étude des meshes fait partie importante de l'infographie tridimensionnelle, différentes représentations des meshes sont utilisées selon les besoins.

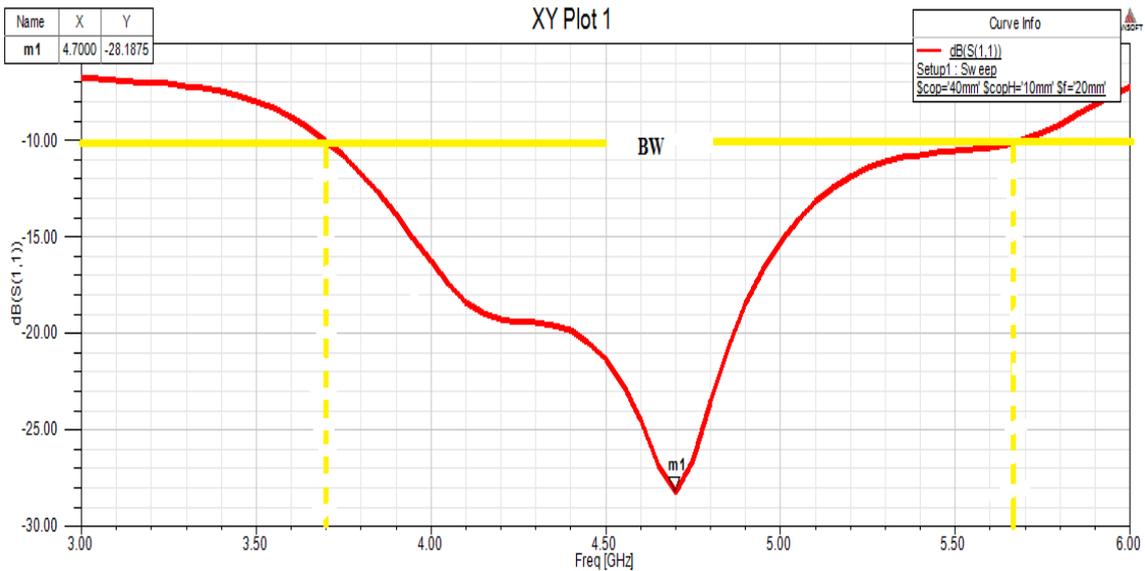


**Figure III.25:** Modélisation géométrique d'un réseau Vivaldi.

On voit clairement que le nombre des mailles est plus grand sur le profil conique et les zones adjacentes de celui-ci, c'est la concentration des champs.

#### ➤ Coefficient de réflexion

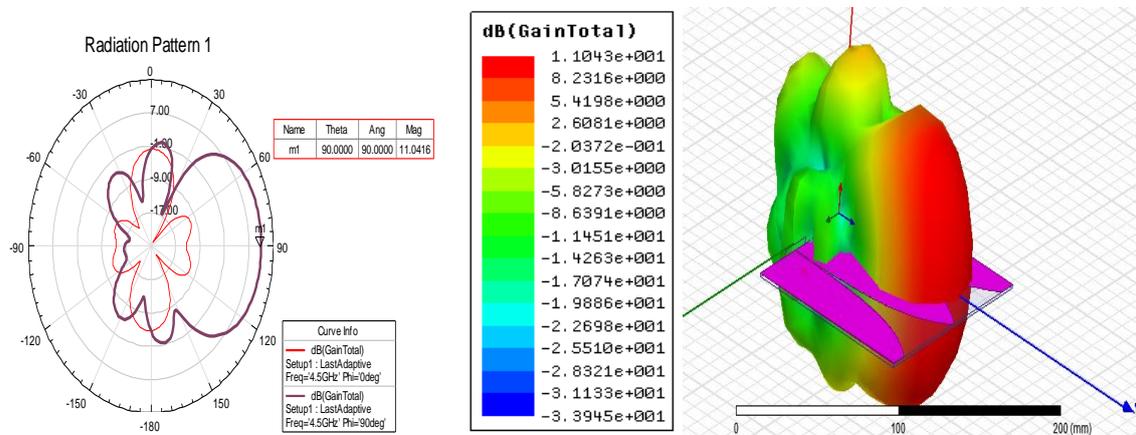
La Figure III.26 présente un pic à 4.7 GHz avec un coefficient de réflexion de -28 dB sur une bande passante [3.6 GHz-5.18 GHz]



**Figure III.26:** Le coefficient de réflexion et la bande passante d'antenne réseau Vivaldi

### ➤ Diagramme de rayonnement et gain

L'Antenne Vivaldi réseau augmente le gain de 6 dB jusqu'à 11 dB comme montre la figure suivante :



**Figure III.27:** Diagramme de rayonnement et gain d'une antenne Vivaldi réseau

### ➤ Répartition de champs électrique et magnétique

La Figure III.28 montre que L'intensité des champs est toujours concentrée le long de profile conique

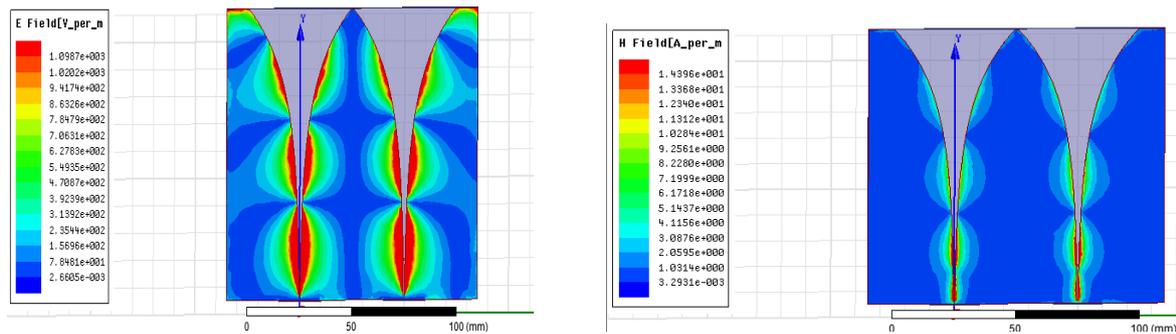


Figure III.28: La répartition des champs E/H d'une antenne réseau Vivaldi.

### ➤ Répartition des vecteurs des champs

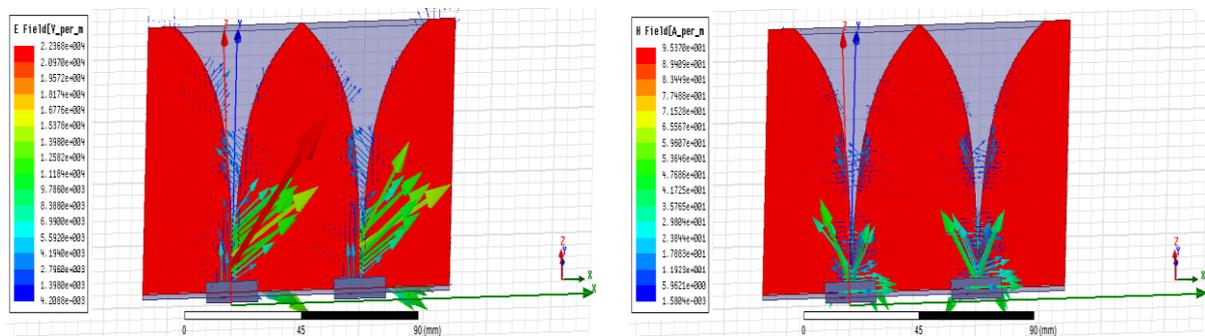


Figure III.29: Répartition des vecteurs de champ E / H d'une antenne réseau vivaldi

L'antenne Vivaldi décrite précédemment présente des bonnes caractéristiques en termes d'adaptation et de diagramme de rayonnement (11 dB), elle peut être utilisée dans des applications Ultra Large Bande dans la bande [3.54-5.54 GHz] ( $S_{11}$  inférieur à -10 dB sur toute cette bande).

## III.10. Réalisation

Dans cette partie, nous sommes passés à l'étape la plus concrète, en se basant essentiellement des valeurs fournies de l'antenne optimisée, et les moyens fournis à cette fin, la plaquette du substrat et les appareils du laboratoire ; nous avons suivi les étapes de réalisation suivantes :

### a) Impression du schéma de l'antenne

Dans cette étape nous avons fait extraire les fichiers dxf du logiciel HFSS de l'antenne optimisée, nous avons ensuite monté ces fichiers sur le PCB Layout afin d'avoir le schéma de l'antenne avec les dimensions exactes ; ceci a été imprimé sur un papier transparent comme le montre la figure suivante :

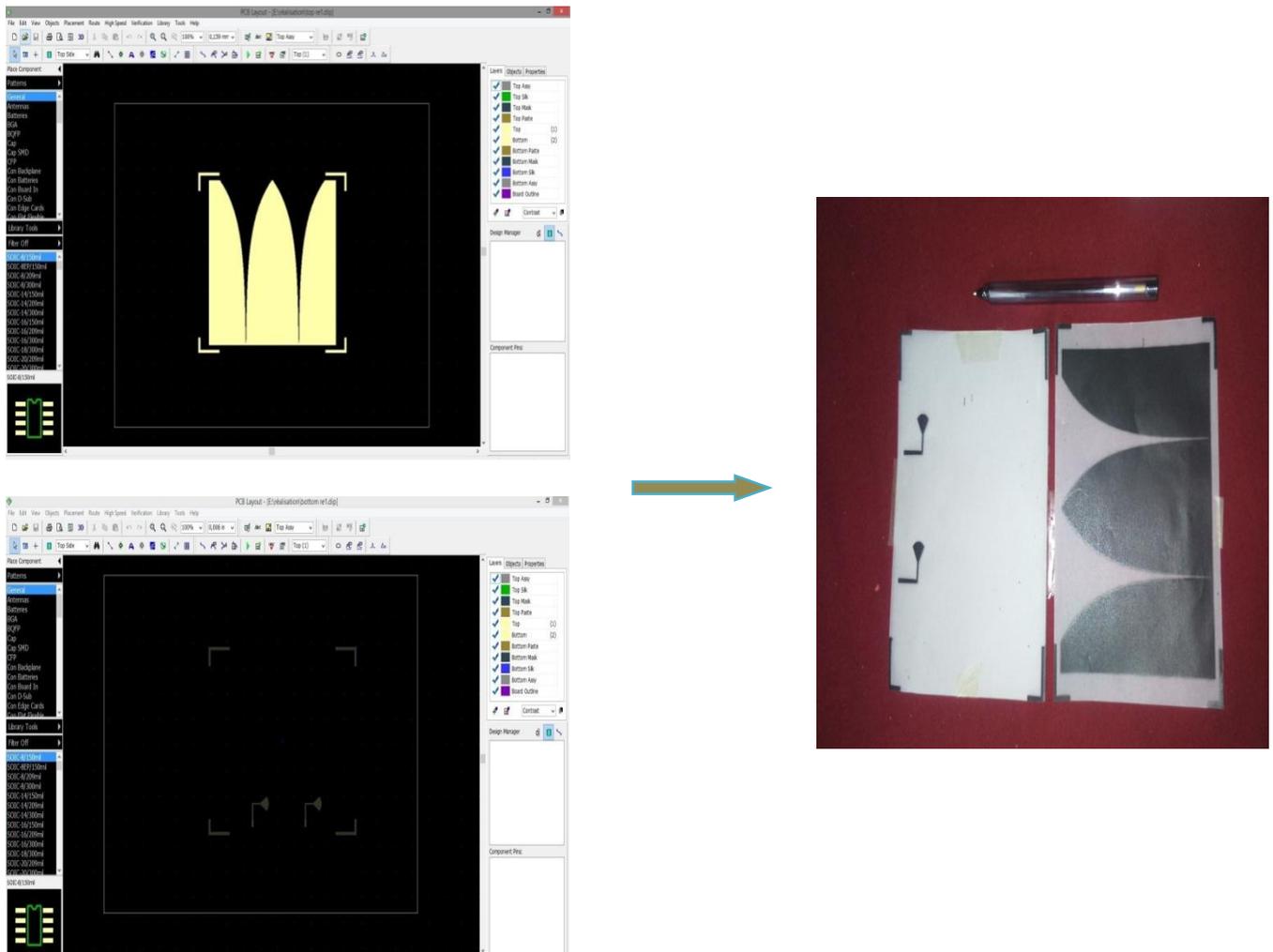


Figure III.30: Motif imprimé sur transparent via PCB Layout.

### b) Passage à la machine d'insolation

Cette unité sert à exposer le substrat aux rayons ultraviolets, pour affaiblir les parties affectés par ces rayons; qui sont finalement celle qui ne sont pas couvert par le motif noir sur la transparent; d'ailleurs nous avons fixé à l'aide d'un scotch le film transparents sur la plaquette, celle-ci devient trop fragile dans les parties transparentes une fois exposées au ultraviolet. Le processus d'exposition commence immédiatement après le démarrage de l'unité pour une durée d'environ une minute et quelques secondes.



**Figure III.31:** Exposition de la plaquette aux UV.

Nous avons après retiré la plaquette, enlevé le film transparent, puis l'a fait noyer dans un bain d'acide agressive, qui sert pour dissolvant .le motif imprimé commence à s'apparaître uniquement dans les zones noirs, et pour une apparition plus claire des traces , on peut servir d'un éponge mouillé du liquide dissolvant et frotter la plaquette manuellement.



**Figure III.32:** plaquette noyée dans une baignoire d'un dissolvant chimique.

### c) La gravure

Cette étape sert essentiellement à aggraver le motif sur le substrat d'une façon intact ; la machine de gravure comporte béatiement deux récipients, que l'on y passe la plaquette, premièrement dans le premier récipient qui contient un acide agressive, ça va aider à enlever et épilucher toute particule qui reste en dehors des bords du motif. Ensuite dans le deuxième qui comporte de l'eau pour les rincer pour rassurer de l'élimination des résidus.



**Figure III.33:** La machine de gravure chimique.

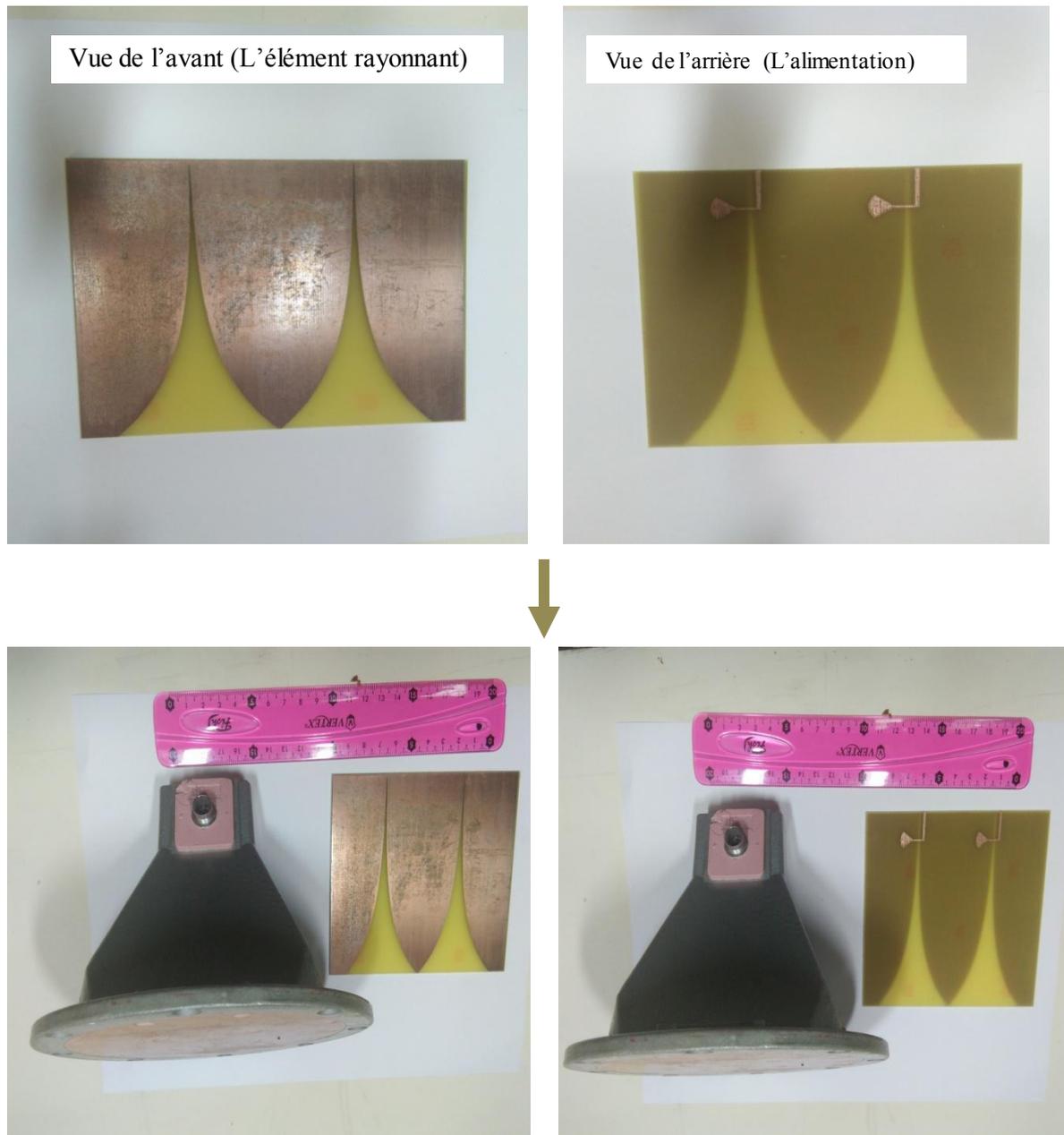
Voilà à quoi ressemble l'antenne à l'issue de la machine :



**Figure III.34:** Issue de la gravure d'antenne.

Dans le cas d'un enlèvement incomplet des zones qu'on souhaite éplucher, on peut ainsi refaire l'opération jusqu'à la disparition définitive des zones affectées par les UV.

A la fin nous avons obtenu notre antenne Vivaldi comme la montre la figure ci-après :



**Figure III.35:** Antenne Vivaldi réalisée.

Nous voyons dans la photo ci-dessus l'antenne Vivaldi réalisée, est trop légère par rapport au cornet, en comparant les dimensions de celui-ci avec notre antenne, le cornet est volume de a un diamètre de 20 cm, alors que l'antenne à droite est en 2D (épaisseur négligeable) avec les dimensions 12 cm de longueur et 10 de largeur.

Les photos précédentes sont prises lors de la réalisation de l'antenne dans le laboratoire d'antenne, au sein de l'Ecole Supérieur Technique d'Aviation (ESTA) situé à Dar El Beida, Alger.

### III.11. Conclusion

Ce chapitre a été consacré à l'étude des antennes Vivaldi, nous avons montré la faisabilité de conception des nouvelles antennes profile bas et plus légers, essayant de répondre aux exigences des antennes en aéronautique en terme de gain et adaptées à la fréquence 4,5 GHz du radioaltimètre. Nous avons pu déterminer l'influence de la géométrie du patch, et déduire par la suite les règles de comportement. Cette étude est alors exploitée pour réaliser une antenne Vivaldi répondant au cahier des charges, et avec une large bande de fréquence qui nous donne l'opportunité d'en profiter pour d'autre application et systèmes de communications.

## Références

- [1] <https://aviation.stackexchange.com>
- [2] Amna Ikram, Jean-Jacques Laurin, « On the Increase of the Directivity of a Low Profile Aircraft Antenna », Poly-Grames Research Centre, Departement of Electrical Engineering, Ecole Polytechnique, Montreal, Canada. 2014
- [3] <https://www.flightsim-corner.com/aller-plus-loin/navigation/radioelectricite-applications-en-aeronautique/>
- [4] Youssef Rhazi, System and Telecommunications Engineering Decision Laboratory, IbnTofail University Sciences Faculty of Kenitra, B.P. 133 – Morocco, Dec 2012-Jan 2013
- [5] A. Deschamps. « Microstrip Microwave Antennas», presented at 3rd USAS Symposium on Antennas, 1953.
- [6] John L.Volakis, « Antenna engineering ‘ ‘ HZANDBOOK, University Stuttgart 2007
- [7] A.Balanis, « Antenna theory analysis and design », Constantine A .Balanis,Arizona State University Tempe,AZ.2015
- [8]A.boyer, «Cours antenne », Institut national de sciences appliquées de Toulouse, Octobre 2011
- [9] Mouhamed Sow, « Contribution à la conception de radars géologiques impulsionnels », Thèse de doctorat, l'université de LIMOGES, France, 2015,
- [10]N-Zavala, Tecnolo, Simon R. Saunders, «Antennas and propagation for wireless communication systems », Mexico, Second edition, 2007;
- [11] Kiran Jain,Keshav Gupta, «Different Substrates Use in Microstrip Patch», Antenna-A Survey, School of Computing, Galgotissa University, Greater Noida (UP), India, 2014
- [12]Dr.K;Srinivasa Naik,Dr.S.Aruna, «Comparison between rectangular and triangular pacht antennas»,Departement of ECE, Vignan's Institute of Information Technology,Assistant Proffessor,Au college of Engineering,2017
- [13]Ziani kerarti Djalal « Etude de conception d'antenne ultra large bande », mémoire de magister, Tlemcen,2011 ;
- [14]Azzaz Rahmani Salima « analyse et conception des antennes imprimés multi bandes en anneaux concentriques pour les réseaux de télécommunications » Thèse de doctorat, université Abou Baker Belkaid ,Tlemcen ,2013 ;
- [15]CHOUTI Leila, mémoire de Magister « Contribution à l'étude d'antennes imprimées rectangulaires double bande et multi bandes tenant compte de l'effet de couplage », université Mentouri, Constantine, 2009 ;
- [16] Garg,R.Bhartia, P.,Bahl,I. and Ittipiboon,A.,Microstrip antenna design” handbook,John.2008

- [17] D. M. Pozar, « Microstrip antennas, IEEE, Vol. 80, N° .1, pp. 79-91, January 1992
- [18] G. Kumar and K. P. Ray, «Broadband micro strip antennas», Artech House Boston, London 2003;
- [19] J. R. James and P. S. Hall, «Broadband micro strip antennas», IEE Electromagnetic Waves Series 28, 1989
- [20] Robert Pearson, « low profile, dual polarised antenna for aeronautical and land mobile satcom », 2008 ;
- [21] Benmansour Thorayya, «Analyse et conception d'antenne Vivaldi», L'école doctorale des technologies, Université Abou Bakr Belkaid – Tlemcen, 2013
- [22] P. J. Gibson, «The Vivaldi aerial», Proceeding of the 9th European Microwave Conference ,P.101\_105, 1979.
- [23] V. S. P. Piksa, « Small Vivaldi antenna for UWB», Radioelektronika, 2005.
- [24] S. A. Adamu, T. Masri, W. A. W. Z. Abidin and K. H. Ping «Review On Gain and Directivity Enhancement Techniques of Vivaldi Antennas » , International Journal of Scientific & Engineering Research, Volume 8, Issue 3, March-2017
- [25] Majid Amiri, Farzad Tofigh, Ali Ghafoorzadeh-Yazdi, Mehran Abolhasan, «Exponential Antipodal Vivaldi Antenna With Exponential Dielectric Lens », *IEEE*, 2017
- [26] G. K. Pandey, H. S. Singh, P. K. Bharti, A. Pandey, and M. K. Meshram , « High Gain Vivaldi Antenna for Radar and Microwave Imaging Applications »; Department of Electronics Engineering, Indian Institute of Technology (Banaras Hindu University), Varanasi, India, International Journal of Signal Processing Systems Vol. 3, No. 1, June 2015