

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère De L'enseignement Supérieur Et De La Recherche Scientifique



Université SAAD DAHLEB BLIDA 1
Institut d'Aéronautique et des Etudes Spatiales
Département Navigation Aérienne



Mémoire de fin d'études pour l'obtention du diplôme de

MASTER

Filière : Aéronautique

Option : CNS/ATM

(Communication, Navigation et Surveillance/ Management du Trafic Aérien)

Thème :

*Etude de l'influence de la géométrie des
structures aéronautiques sur les antennes
imprimées*

Réalisé par :
Nawel BENHAMDANI
Sabrina BEKOUCHE

Encadré par :
Dr: HAMOUDA Zahir
Mr: KOUIDER ELOUAHED Boulenouar

Soutenu le 26 septembre 2020 devant le jury composé de :

Mme : Othmane Fadila *Présidente*

Mme : Azine Houria *Examinatrice*

ANNEE 2019/2020

Dédicace

À ma très chère mère, pour son amour et ses encouragements.

À mon très cher père, qui est le premier soutien pour moi.

À mes frères et mes chers.

À toute ma famille.

À tous les amis.

Nawel Benhamdani

Dédicace

À la mémoire de mon père qui n'a pas eu la chance d'assister ces moments.

À ma chère mère.

À mes sœurs et mon frère.

À mon neveu nouveau-né.

Sabrina Bekouche

REMERCIEMENTS

*Nous tenons d'abord à remercier "**AllahTout-Puissant**" de nous avoir donné le courage, la volonté, la force et la patience pour mener à bien ce travail.*

*Nous voudrions exprimer notre profonde gratitude au Docteur. "**HAMOUDA Zahir**", pour ses précieux conseils, ses encouragements incessants et surtout sa grande disponibilité tout au long de la réalisation de ce travail. Nous le remercions de la confiance qu'il nous a témoignée.*

*Nous remercions également notre Co-promoteur Mr. "**KOUIDER ELOUAHED Boulenouar**" pour son aide et ses encouragements.*

Nous remercions tout particulièrement les membres du jury qui ont accepté de lire et juger notre travail, ainsi que tous nos enseignants pendant toutes ces années d'études.

Nos dernières pensées iront à nos familles, pour leur soutien jusqu'à aujourd'hui, pour nous aider, mais surtout pour l'aide qu'elles nous apportent au quotidien. Nous vous en sommes reconnaissants et nous ne vous remercierons jamais assez.

Merci.

ملخص:

الهدف الرئيسي من هذا العمل هو دراسة تأثير هندسة هياكل الطيران على أداء هوائي التصحيح. يعرض هذا المشروع تصميم الهوائيات المطبوعة المطابقة، وهذا النوع من الهوائيات له خصائص كهربائية وميكانيكية مثيرة للاهتمام للاستخدام في التطبيقات التي تتطلب خصائص المرنة. سيتم تصميم الهوائيات على شكل جسم الطائرة وأجنحة الطائرات، وتم إجراء المحاكاة على منصة كهرومغناطيسية. من المفترض أن يعمل الهوائي المقترح على نطاق تردد UHF وبشكل أدق عند تردد 2.4 جيجا هرتز وهو تردد Wifi. الكلمات المفتاحية: هوائي التصحيح، السماحية العازلة، معامل الانعكاس S11.

ABSTRACT:

The main objective of this work is to study the influence of the geometry of aeronautical structures on the performance of a patch antenna.

This project presents the design of conformal printed antennas; this type of antennas has interesting electrical and mechanical properties for use in applications requiring flexibility properties. The antennas will be modelled on fuselages and airplane wings. The simulation was performed on an electromagnetic platform. The proposed antenna is intended to operate at the UHF frequency band and more precisely at the 2.4 GHz frequency, which is the Wi-Fi frequency.

Keywords: patch antenna, dielectric permittivity, the reflection coefficient S11.

RESUME:

L'objectif principal de ce travail est l'étude de l'influence de la géométrie des structures aéronautiques sur les performances d'une antenne patch.

Ce projet présente la conception des antennes imprimées conformes, ce type d'antennes possède des propriétés électriques et mécaniques intéressantes pour une utilisation dans des applications nécessitant des propriétés de flexibilité. Les antennes seront conçues sous forme de fuselages et d'ailes d'avion. la simulation a été réalisée sous une plate-forme électromagnétique. L'antenne proposée est destinée à fonctionner à la bande de fréquence UHF et plus précisément à la fréquence 2.4 GHz qui est la fréquence de Wifi.

Mots clés : antenne patch, permittivité diélectrique, le coefficient de réflexion S11.

LISTE DES FIGURES

Figure I.1: Structure générale d'une antenne [1].....	4
Figure I.2: Présentation de rôle d'antenne.	5
Figure I.3: Emplacement des antennes dans un avion Boeing 787.....	5
Figure I.4: Antenne long-fil.	6
Figure I.5: Antenne filaire.....	7
Figure I.6.a: Antenne à fente circulaire.....	7
Figure I.7.b: Antenne à fente fermée.....	8
Figure I.8: Antenne plane.....	9
Figure I.9: Antenne cadre.....	9
Figure I.10: Un drone volant avec un réseau d'antennes intégré pour la communication.....	11
Figure I.11: Schéma de réseau d'antennes intégré proposé, (a) Couche inférieure, (b) Couche intermédiaire, (c) Couche supérieure.	12
Figure I.12: Réseau d'antennes intégré fabriqué, (a) vue de dessus, (b) vue de bas, (c) zoom avant sur le connecteur et les en-têtes SMA.	12
Figure I.13: Puissance rayonnée par une antenne dans une direction de l'espace.	13
Figure I.14: Représentation du diagramme de rayonnement d'une antenne.....	14
Figure I.15: Diagramme de rayonnement en 3D [11].	15
Figure I.16: Exemple de diagramme de rayonnement d'une antenne (antenne log-périodique).	15
Figure I.17: Diagramme de rayonnement et angle d'ouverture.	16
Figure I.18: Coefficient de réflexion du réseau d'antenne de référence.	18
Figure I.19: Les différentes régions de rayonnements.	22
Figure I.20: Polarisation circulaire.....	23
Figure I.21: Polarisation rectiligne.....	23
Figure I.22: Antenne Yagi en polarisation circulaire.....	23
Figure II.1.: Structure d'une antenne patch.....	28
Figure II.2: : Les différentes formes de la plaque rayonnante..	28
Figure II.3: Alimentation d'une antenne patch par une ligne micro ruban.....	31
Figure II.4: Antenne micro ruban alimenté par sonde coaxial.....	31
Figure II.5: Alimentation couplée par ouverture.....	32
Figure II.6: Alimentation Couplée Par Proximité.....	23
Figure II.7: Antenne imprimée fonctionnant sur son mode fondamental.	38

Figure II.8: Distribution du champ électrique vertical.....	38
Figure II.9: Une illustration de la bande passante à -10 dB..	39
Figure II.10: Deux plaques d'époxy avec deux épaisseurs différentes	44
Figure II.11: Conception top-down ou bottom-up d'une antenne reconfigurable	48
Figure II.12 : Géométrie d'une antenne monopole reconfigurable basée sur un élément à enroulement.....	48
Figure II.13: Photographie d'une antenne MEMS micro ruban reconfigurable.....	49
Figure II.14: Géométrie d'une antenne reconfigurable basée sur un substrat flexible.....	49
Figure III.1: Modèle entier du drone (UAV).....	53
Figure III.2: Configuration du fuselage avec option de séparation de la flèche arrière.....	53
Figure III.3: Dessin de plan d'aile 3D (logiciel XFLR5).....	54
Figure III.4: Dimensions du fuselage.....	54
Figure III.5: Dimensions de l'aile.....	54
Figure III.6: Vue de dessus de l'antenne patch rectangulaire.....	55
Figure III.7: Structure d'antenne imprimée plane.....	58
Figure III.8: Antenne imprimée plane alimentée par un câble coaxial.....	58
Figure III.9: Coefficient de réflexion en fonction de fréquence.....	59
Figure III.10: Rapport d'onde stationnaire en fonction de la fréquence.....	60
Figure III.11: Diagramme de rayonnement.....	61
Figure III.12: Diagramme de rayonnement (2D).....	61
Figure III.13: Répartition du champ électrique E.....	62
Figure III.14: Répartition du champ magnétique H.....	62
Figure III.15: Structure d'antenne imprimée plane avec six sous-couches diélectriques.....	63
Figure III.16: Antenne imprimée plane avec six sous-couches diélectriques alimentées par un câble coaxial.....	64
Figure III.17: Coefficient de réflexion en fonction de fréquence.....	65
Figure III.18: Rapport d'onde stationnaire en fonction de la fréquence.....	66
Figure III.19: Diagramme de rayonnement.....	66
Figure III.20: Diagramme de rayonnement en 2D.....	67
Figure III.21: Répartition du champ électrique E.....	67
Figure III.22: Répartition du champ magnétique H.....	68
Figure III.23: Antenne imprimée conforme.....	71
Figure III.24: Antenne imprimée conforme alimentée par un câble coaxial.....	71

Figure III.25: Coefficient de réflexion en fonction de fréquence.	72
Figure III.26: Rapport d'onde stationnaire en fonction de la fréquence.	72
Figure III.27: Diagramme de rayonnement.	73
Figure III.28: Diagramme de rayonnement (2D).	73
Figure III.29: Répartition du champ électrique E.	74
Figure III.30: Répartition du champ magnétique H.	74
Figure III.31: Antenne imprimée conforme avec six sous-couches diélectriques.	75
Figure III.32: Antenne imprimée conforme avec six sous-couches diélectriques alimentée par un câble coaxial.	75
Figure III.33: Coefficient de réflexion en fonction de la fréquence.	76
Figure III.34: Rapport d'onde stationnaire en fonction de la fréquence.	77
Figure III.35: Diagramme de rayonnement.	78
Figure III.36: Diagramme de rayonnement (2D).	78
Figure III.37: Répartition du champ électrique E.	79
Figure III.38: Répartition du champ magnétique H.	79
Figure III.39: Antenne imprimée sous forme d'aile.	80
Figure III.40: Antenne imprimée sous forme d'aile alimentée par un câble coaxial.	81
Figure III.41: Coefficient de réflexion en fonction de la fréquence.	82
Figure III.42: Rapport d'onde stationnaire en fonction de la fréquence.	82
Figure III.43: Diagramme de rayonnement.	83
Figure III.44: Diagramme de rayonnement en 2D.	83
Figure III.45: Répartition du champ électrique E.	84
Figure III.46: Répartition du champ magnétique H.	84
Figure III.47: Antenne imprimée sous forme d'aile avec une six sous-couches diélectriques (substrat).	85
Figure III.48: Antenne imprimée sous forme d'aile avec six sous-couches diélectriques (substrat) alimentée par câble coaxial.	85
Figure III.49: Coefficient de réflexion en fonction de la fréquence.	86
Figure III.50: Rapport d'onde stationnaire en fonction de la fréquence.	87
Figure III.51: Diagramme de rayonnement.	87
Figure III.52: Diagramme de rayonnement en 2D.	88
Figure III.53: Répartition du champ électrique E.	88
Figure III.54: Répartition du champ magnétique H.	89

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1: Les trois zones de rayonnement d'une antenne.	21
Tableau II.1: Avantages et inconvénients des antennes imprimées.	29
Tableau II.2: L'application des antennes imprimées dans quelques domaines avec les bandes de fréquences utilisées	30
Tableau II.3: Comparaison entre les différentes méthodes d'alimentation.	33
Tableau II.4: Avantages et inconvénients de différentes techniques d'alimentation.	34
Tableau III.1: Avantages et inconvénients de la méthode des éléments finis (FEM).	52
Tableau III.2: Dimensions géométriques de l'antenne imprimée.	56
Tableau III.3: Paramètres utilisés dans le simulateur électromagnétique pour la simulation.	57
Tableau III.4: Variation des positions des points d'alimentation avec les valeurs des coefficients de réflexion et les bandes de fréquences correspondantes.	59
Tableau III.5: Variation des positions des points d'alimentation avec les valeurs des coefficients de réflexion et les bandes passante correspondantes.	65
Tableau III.6: Les différents matériaux exécutés avec ses valeurs de permittivités.	69
Tableau III.7: Les différentes valeurs de permittivité avec ses fréquences obtenues.	69
Tableau III.8: Les différents paramètres obtenus en fonction de leurs permittivités.	69
Tableau III.9: Variation de la position des points d'alimentation avec les valeurs de coefficient de réflexion et les bandes passante correspondantes.	76
Tableau III.10: Variation de la position des points d'alimentation avec les valeurs de coefficient de réflexion et les bandes passantes correspondantes.	86
Tableau III.11: Comparaison entre les résultats de simulation de l'antenne conforme et celui de l'antenne sous forme d'aile.	89
Tableau III.12: Dimensions et caractéristiques de l'antenne imprimée à réaliser.	90

TABLE DES MATIERES

<i>Dédicace</i>	i
<i>Dédicace</i>	ii
REMERCIEMENTS	iii
RESUME :	Erreur ! Signet non défini.
LISTE DES FIGURES	v

LISTE DES TABLEAUX.....	viii
LISTE DES ABREVIATIONS.....	xiv
LISTE DES SYMBOLES.....	xvi
INTRODUCTION GENERALE :	1

Chapitre I : Généralité sur les antennes

I.1.Introduction :.....	3
I.2.Définition :.....	3
I.3.Le rôle de l’antenne :	4
I.4.Emplacements des antennes sur un aéronef :.....	5
I.4.1.Fréquences aéronautiques :	6
I.5.Les types des antennes utilisées en aéronautique :	6
I.5.1.L’antenne filaire :	6
I.5.2.L’antenne à fente :.....	7
I.5.3.L’antenne planaire :.....	8
I.5.4.L’antenne cadre :.....	8
I.6.Un réseau d’antennes planaires avec un réseau d’alimentation intégré pour les applications UAV	9
I.6.1.Conception de réseau d’antennes intégrées	11
I.7.Les caractéristiques des antennes	13
I.7.1.La puissance rayonnée	13
I.7.2. Le diagramme de rayonnement	13
I.7.3.L’angle d’ouverture	16
I.7.4.La directivité	16
I.7.5.Le gain	16
I.7.6.Le rendement	17
I.7.6.1.Lient entre le gain et angle d’ouverture	17
I.7.7.Coefficient de réflexion S11	17

I.7.8.Le Rapport d'Onde Stationnaire	18
I.7.9.Le ROS et les antennes	18
I.7.9.1.Calcul du rapport d'onde stationnaire	19
I.7.9.2.Signification de la mesure du ROS	19
I.7.10.Adaptation et condition d'adaptation	19
I.7.11.Puissance isotrope rayonnée équivalente (PIRE)	20
I.7.12.La résistance de rayonnement	20
I.7.13.Les trois zones de rayonnement d'une antenne	20
I.7.14.Polarisation de l'antenne	22
I.7.15.Le bilan de liaison :	24
I.8.Conclusion :	25

Chapitre II : Les antennes imprimées

II.1.Introduction :	26
II.2.Définition d'une antenne imprimée :	27
II.2.1.Les couches métalliques :	27
II.2.2.Le substrat :	27
II.3.Les différentes formes d'une antenne patch :	28
II.4.Avantages ET Inconvénients d'antenne Patch :	28
II.5.Application de l'antenne patch :	29
II.6.Les techniques d'alimentation :	30
II.6.1.Alimentations par contact :	30
II.6.1.1.Alimentation directe par une ligne micro ruban :	30
II.6.1.2.Alimentation par câble coaxial :	31
II.6.2.Alimentations par proximité :	31
II.6.2.1.Alimentation couplée par ouverture :	31
II.6.2.2.Alimentation Couplée Par Proximité :	32
II.7.Comparaison entre les différentes techniques d'alimentation :	33

II.8. Avantages et inconvénients des différentes techniques d'alimentation :	33
II.9. Méthodes d'analyse des antennes imprimées :	34
II.9.1. Les méthodes approximatives :	35
II.9.1.1. Modèle de la ligne de transmission :	35
II.9.1.2. Modèle de la cavité résonnante :	35
II.9.2. Les méthodes numériques :	36
II.9.2.1. Méthode des éléments finis (FEM) :	36
II.9.2.2. Méthode des différences finies (FDTD) :	36
II.9.2.3. Méthode des moments (MoM) :	36
II.9.2.4. Méthode TLM (transmission line matrix- méthode) :	37
II.10. principe de fonctionnement d'antenne patch :	37
II.11. Caractéristiques des antennes patch :	38
II.11.1. Mécanisme de rayonnement d'antenne patch rectangulaire :	38
II.11.2. La bande passante :	38
II.11.3. L'impédance d'entrée d'antenne patch :	39
II.12. Calcul des paramètres du patch :	40
II.13. Critère de choix du substrat :	41
II.14. Les matériaux diélectriques utilisés :	41
II.14.1. Les matériaux ferromagnétiques :	42
II.14.2. Les matériaux céramiques :	42
II.14.3. Les matériaux semi-conducteurs :	42
II.14.4. Les matériaux synthétiques :	42
II.14.5. Les matériaux TMM (Thermoset Microwave Material) :	43
II.14.6. Les matériaux photoniques :	43
II.15. Les matériaux à base de l'époxy :	43
II.15.1. Description :	43
II.15.2. Spécification :	43

II.15.3.Caractéristiques :	44
II.15.4.Emballage inclut :	44
II.16.Les propriétés des substrats diélectriques utilisés dans la fabrication des antennes imprimées :	44
II.16.1.Permittivité :	44
II.16.2.Tangente de pertes $\tan \delta$:	45
II.17.L'influence de différents paramètres sur l'efficacité de l'antenne patch :	46
II.17.1.l'effet de l'épaisseur de patch :	46
II.17.2.Influence de la constante diélectrique du substrat :	46
II.18.Antenne reconfigurable :	46
II.18.1.Conception des antennes reconfigurables et problèmes associés :	46
II.19.Conclusion :	50

Chapitre III : Conception de l'antenne imprimée

Calcul, simulation et résultat	51
III.1.Introduction :	51
III.2.Objectif :	51
III.3.La méthode des éléments finis (FEM) :	52
III.3.1.Avantages et inconvénients de la méthode des éléments finis :	52
III.4.Modèle et dimensions du drone :	52
III.4.1.Définition :	52
III.4.2.Dimensions du drone :	53
III.5.Calcul des paramètres de l'antenne imprimée :	54
III.5.1.Constante diélectrique du substrat (ϵ_r) :	55
III.5.2.La fréquence de travail (f_0) :	55
III.5.3.Épaisseur du substrat diélectrique (h) :	55
III.5.4.La détermination du point d'alimentation :	56
III.6.Conception et simulations de l'antenne imprimée :	57

III.6.1. Conception de l'antenne imprimée plane :	57
III.6.1.1. L'alimentation de l'antenne :	58
III.6.1.2. Résultats de simulation :	59
III.6.1.3. Répartition des champs électrique E et magnétique H :	62
III.6.2. Conception de l'antenne imprimée plane avec six sous-couches diélectriques (substrat) modèle de sandwich :	63
III.6.2.1. L'alimentation de l'antenne :	63
III.6.2.2. Résultats de simulation :	64
III.6.2.3. Répartition des champs électrique E et magnétique H :	67
III.6.3. Influence de la permittivité relative du substrat sur l'antenne :	68
III.6.4. Conception de l'antenne imprimée conforme :	70
III.6.4.1. L'alimentation de l'antenne :	71
III.6.4.2. Résultats de simulation :	71
III.6.4.3. Répartition des champs électrique E et magnétique H :	73
III.6.5. Conception de l'antenne imprimée conforme avec six sous-couches diélectriques (substrat) :	74
III.6.5.1. L'alimentation de l'antenne :	75
III.6.5.2. Résultats de simulation :	76
III.6.5.3. Répartition des champs électrique E et magnétique H :	78
III.6.6. Conception de l'antenne imprimée sous forme d'aile :	80
III.6.6.1. L'alimentation de l'antenne :	80
III.6.6.2. Résultats de simulation :	81
III.6.6.3. Répartition des champs électrique E et magnétique H :	83
III.6.7. Conception de l'antenne imprimée sous forme d'aile avec six sous-couches diélectriques (substrat) :	84
III.6.7.1. L'alimentation de l'antenne :	85
III.6.7.2. Résultats de simulation :	85
III.6.7.3. Répartition des champs électrique E et magnétique H :	88

III.7.Résultat final à réaliser :	89
III.7.1.Dimensions et caractéristiques de l’antenne imprimée :	90
III.8.Conclusion :	91
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES	92
BIBLIOGRAPHIE	93
ANNEXE 1	97

LISTE DES ABREVIATIONS

ABREVIATIONS

<i>UAV</i>	Unmanned Aerial Vehicle.
<i>HF</i>	High frequency
<i>VHF</i>	Very high frequency
<i>UHF</i>	Ultra-high frequency
<i>MHZ</i>	Mega Hertz
<i>ILS</i>	Instrument Landing System
<i>VOR</i>	VHF Omni-directional ranging
<i>VDL</i>	VHF Digital Link
<i>DME</i>	Distance Measuring Equipment
<i>GSM</i>	Global System for Mobile Communication
<i>GPS</i>	Global Positioning System
<i>Wi-Fi</i>	Wireless Fidelity
<i>Wi MAX</i>	Worldwide Interoperability for Microwave Access
<i>ADF</i>	Automatic Direction Finder
<i>dB</i>	Décibel
<i>BW</i>	Beam Width

<i>PIRE</i>	Puissance Isotopique Rayonnée Equivalente
<i>ROS</i>	Rapport d'onde stationnaire
<i>LAN/TWLU</i>	Terminal Wireless Local Area Network (LAN) Unit
<i>ATC/TCAS</i>	Air Traffic Control/ Traffic Collision and Avoidance System
<i>RA</i>	Radio Altimeter
<i>TCS</i>	Terminal Cellular System
<i>CWLU</i>	Crew Wireless LAN Unit
<i>ELT</i>	Emergency locator transmitter
<i>GHZ</i>	Giga Hertz
<i>MLT</i>	Modèle de la ligne de transmission
<i>FEM</i>	Finite Element Method
<i>FDTD</i>	Finite Difference Time Domain
<i>MOM</i>	Méthode des moments
<i>TLM</i>	Transmission Line Matrix
<i>RF</i>	Radio fréquence
<i>S11</i>	Coefficient de réflexion
<i>BP</i>	Bande passante
<i>Q</i>	Facteur de qualité
<i>SMA/N</i>	Sub Miniature version A
<i>RL</i>	Return Loss
<i>TOS</i>	Taux d'onde stationnaire
<i>VSWR</i>	Voltage Standing Wave Ratio
<i>Tanδ</i>	Tangente de perte

<i>FR4</i>	Tissu de verre époxy fr4
<i>MEMS</i>	Micro Electro Mechanical Systems
<i>2D</i>	2 Dimensional
<i>3D</i>	3 Dimensional

LISTE DES SYMBOLES

SYMBOLES

<i>E</i>	Champ électrique (V/m)
<i>H</i>	Champ magnétique (A/m)
<i>λ</i>	Longueur d'onde (m)
<i>C</i>	Célérité de lumière (3 x 10⁸ m/s)
<i>Ω</i>	Angle solide (stéradian)
<i>ϕ</i>	Azimut (°)
<i>Z_{in}</i>	Impédance d'antenne (Ω)
<i>Z_c</i>	Impédance caractéristique (Ω)
<i>G</i>	Gain
<i>D</i>	Directivité
<i>η</i>	Efficacité
<i>ε_r</i>	Permittivité relative du substrat (F/m)
<i>ε₀</i>	Permittivité dans le vide (F/m)
<i>ε_{eff}</i>	Constant diélectrique effective
<i>L_{eff}</i>	Longueur effective (mm)
<i>ΔL</i>	Extension de largeur du patch (mm)

INTRODUCTION GENERALE :

De nos jours, les antennes sont devenues les éléments de base pour une liaison radioélectrique. Les antennes sont utilisées en GPS, télé localisation, radar ainsi que pour nos besoins dans la vie courante. Elles se présentent sous divers formes selon leur but d'utilisation. Les technologies modernes s'orientent vers la miniaturisation de ces antennes tout en essayant de garder les meilleures performances.

De nombreuses antennes sont placées sur le fuselage d'avion, d'où la performance est importante cela conduit à une réception d'information est de manière sure et efficace. Nous cherchons ici la bonne position d'antenne patch(le fuselage ou l'aile) afin que ses performances soient distinguées. Les antennes imprimées trouvent leur application dans le domaine de la communication aérienne, la navigation et la communication spatiale pour des fréquences allant de quelques centaines de MHz à des fréquences millimétriques. Elles relèvent meilleurs, en terme de poids, volume, une bonne conformabilité et la simplicité de fabrication, sans oublier que la majeure partie de la propagation se fait au-dessus du plan de masse et peut avoir un gain directionnel élevé. S'il a été démontré dans littérature scientifique que ces structures permettent d'obtenir des résultats très promoteurs en simulation et en mesure. L'apport principal de cette thèse a été de faire une simulation, conception et une comparaison entre la performance de cette antenne sur le fuselage et les ailes d'un aéronef selon les paramètres suivants : le diagramme de rayonnement, S11, la directivité et un gain important. Pour comprendre l'influence de géométrie des structures aéronautiques sur les antennes imprimées, on a basé sur l'étude d'antenne patch qui exerce à 2.4 GHz. elle permet de les adaptées aux applications requises. Un prototype de cette antenne avec un substrat(FR4) a été conçu, fabriqué et mesuré grâce à un logiciel de simulation électromagnétique. Les résultats obtenus démontrent l'intérêt, l'efficacité et le caractère général de la méthode proposée pour la conception de dispositifs hyperfréquences.

Moyens matériels nécessaires :

- ✓ Le moyen de simulation est un logiciel de simulation électromagnétique;
- ✓ Les moyens de conception (Connecteur SMA, substrat) ;
- ✓ Les moyens de caractérisation (Analyseur de réseau).

Notre travail est scindé en trois chapitres :

✓ **Chapitre I :**

Ce chapitre comprend des informations générales sur les antennes.

Nous commençons par donner une définition d'une antenne ainsi que mettre en évidence les caractéristiques d'antennes telles que ; le diagramme de rayonnement, de gain et de directivité, la polarisation, le coefficient de réflexion et l'adaptation, et nous ajoutons également certains types d'antennes aéronautiques et leurs positions sur l'avion.

✓ **Chapitre II :**

Il sera consacré à la description d'une antenne patch, c'est-à-dire sa forme, ses principales caractéristiques et la comparaison des différentes techniques d'alimentation. Les avantages et les inconvénients de ces antennes, leur application dans des domaines divers, ainsi que les calculs mathématiques des paramètres caractéristiques de l'antenne patch rectangulaire, nous mentionnerons également des informations précieuses sur la reconfiguration mécanique des antennes imprimées.

✓ **Chapitre III :**

Cette partie introduira la modélisation et la simulation des différentes formes de l'antenne patch rectangulaire, comme l'antenne plane et l'antenne courbée, et l'effet des différents paramètres d'antenne sur son rayonnement. Il exprimera également son comportement dans différentes positions de l'avion, dont le fuselage et les ailes. Tous les résultats sont obtenus en simulant les différentes antennes conçues dans le simulateur électromagnétique.

Chapitre I : Généralité sur les antennes

I.1.Introduction :

Les premières antennes sont apparues à La fin du XIXe siècle, a une époque où les travaux sur l'électromagnétiques ont connu un développement considérable. Depuis, leur réalisation n'a cessé d'évoluer, d'abord, grâce aux progrès scientifiques de l'électromagnétisme, plus tard, sous la pression de nombreuses demandes technologiques dans des domaines d'application variés. L'essor actuel des communications impose des innovations importantes au niveau de la conception des systèmes et des antennes associées, dont les formes aujourd'hui très diverses varient beaucoup selon les utilisateurs : télécommunications mobiles, satellites, télévision, radio, identification, objets communication,... etc. Malgré cette grande diversité, toutes les antennes ont en commun de transformer un signal guidé en un signal rayonnant (ou réciproquement), dans un spectre électromagnétique relativement large allant des ondes radio aux hyperfréquences. Actuellement la course à l'innovation concernant les systèmes de communication entraîne des études poussées dans le domaine des antennes.

Dans ce chapitre nous présentons les principes fondamentaux d'antennes, les différentes caractéristiques d'antennes. Aussi les types d'antennes utilisées dans l'aéronautique, L'emplacement des antennes sur un aéronef et la fréquence utilisée en aéronautique.

I.2.Définition :

En radioélectricité, une antenne est un dispositif permettant de rayonner (émetteur) ou de capter (récepteur) des ondes électromagnétiques.

L'antenne est un élément fondamental d'un système radio, et ses caractéristiques de rendement, de gain et de rayonnement influent directement sur la qualité et la portée du système. La figure suivante représente la structure générale d'une antenne.

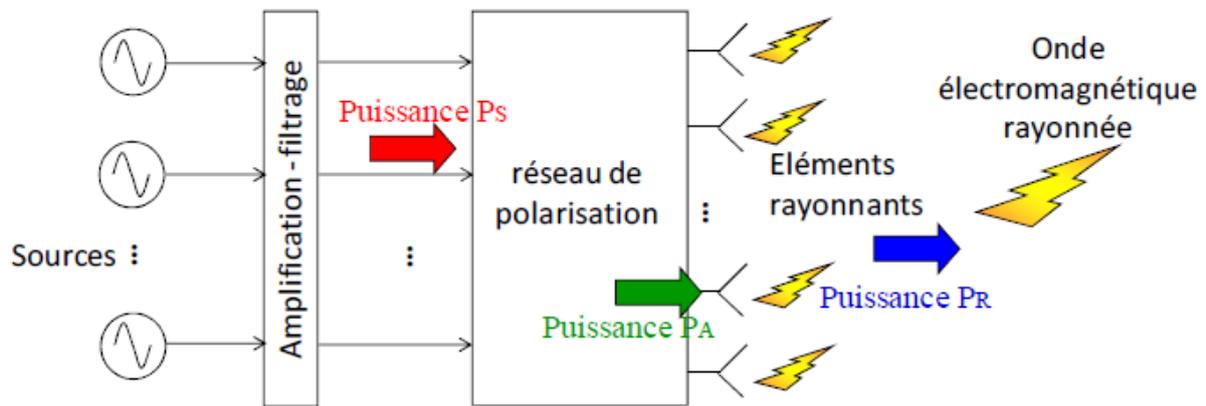


Figure I.1: Structure générale d'une antenne [1].

I.3. Le rôle de l'antenne :

L'antenne a plusieurs rôles, les principaux étant :

- ✓ Permettre une adaptation correcte entre l'équipement radio et le milieu de propagation.
- ✓ Assurer la transmission ou la réception de l'énergie dans les directions privilégiées
- ✓ Transmettre l'information le plus fidèlement possible.

Si nous considérons un système de communication sans fil le plus simple, il serait composé d'un bloc d'envoi et d'un bloc de réception. Ces deux blocs seraient séparés par un canal de propagation dans lequel le signal transmis passe avant d'être reçu, la figure I.2 [2] présente le rôle d'antenne.

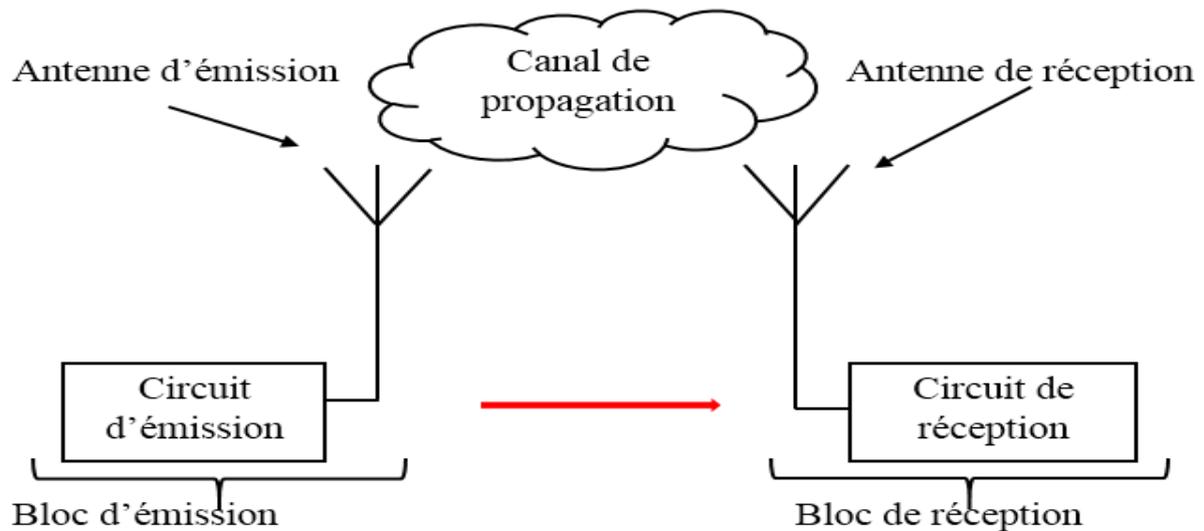


Figure I.2: Présentation de rôle d'antenne.

I.4.Emplacements des antennes sur un aéronef :

Comme on peut le voir sur la figure suivante, il y a plusieurs petites antennes sur les avions de ligne. Présentes à l'arrière des ailes (bords de fuite et winglets) et sur l'empennage (dérive et stabilisateurs), leur nombre varie en fonction de la taille de l'appareil. On en trouve parfois aussi sur des hélicoptères. Généralement fabriquées en carbone, leur emplacement ne tient pas au hasard [3].

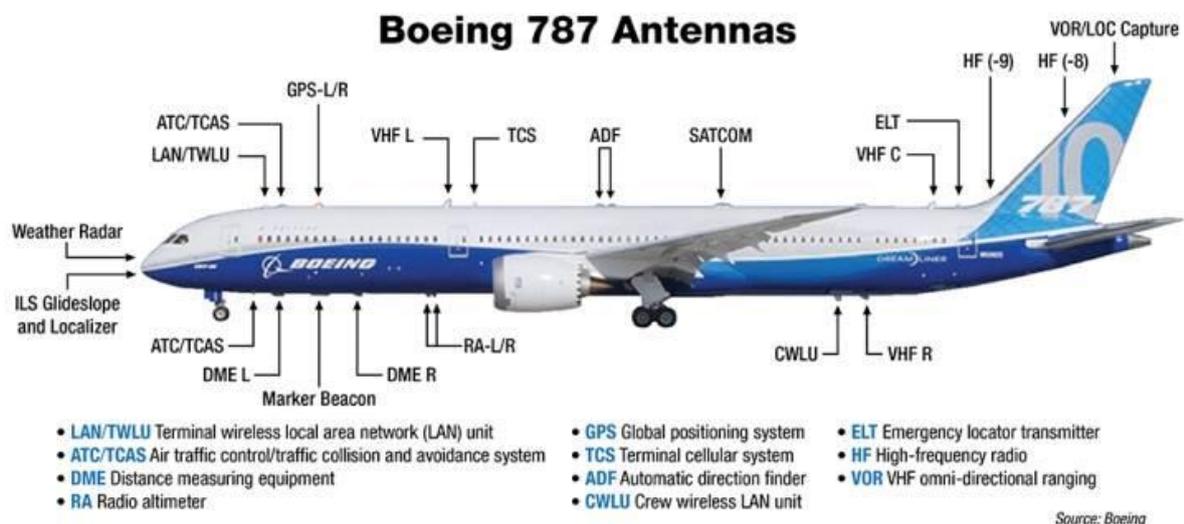


Figure I.3: Emplacement des antennes dans un avion Boeing 787.

Un avion moderne a de nombreuses antennes qui dépassent de sa structure, pour la navigation, divers systèmes de communication, des systèmes d'atterrissage aux instruments, un altimètre radar, etc. Il peut y avoir jusqu'à 20 antennes différentes ou plus (jusqu'à 70 antennes sur un des avions militaires ont été cités [Schneider et al. 2001]) [4].

I.4.1.Fréquences aéronautiques :

Le contrôle aérien et les pilotes communiquent pour l'essentiel en VHF correspondant à des fréquences entre 30 et 300 MHz mais seule la plage 108-137 MHz est utilisée en radiophonie. La bande aéronautique entre 108 – 117,975 MHz est attribuée aux systèmes de navigation VHF/UHF (ILS, VOR, VDL mode 4 et DME). La bande entre 118 et 137 MHz est utilisée pour les communications à courte et moyenne distance entre les pilotes et le personnel des stations au sol [5].

I.5.Les types des antennes utilisées en aéronautique :

I.5.1.L'antenne filaire :

Constituée d'un fil électrique alimenté sur une extrémité, ce fil électrique rayonnant accordable d'une longueur aléatoire généralement choisi pour la commodité, ce fil étant généralement supporté par un mât. La configuration essentielle pour un rendement maximal est : un fil d'antenne monopole, une boîte d'accord d'antenne et un contrepoids. Elle est capable de fonctionner dans les bandes 2 à 23 Mhz.



Figure I.4: Antenne long-fil.

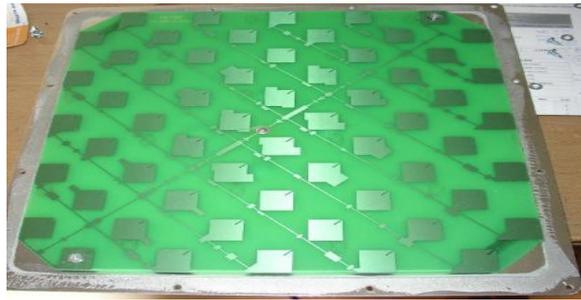


Figure I.5: Antenne filaire.

I.5.2.L'antenne à fente :

C'est une fente taillée dans un matériau conducteur, elle est conçue et adaptée aux très hautes fréquences avec une longueur correspond soit à $\lambda/2$ (fente ouverte) ou à $\lambda/4$ (fente fermée). L'antenne à fente se caractérise par son développement vertical ou horizontal en forme de cornière, ou de guide d'onde avec des fentes de dimensions et d'emplacement particuliers qui sont fonctions de la fréquence.

Elle est utilisée pour réaliser des antennes sectorielles de télécommunication, c'est-à-dire possédant un gain significatif sur un angle d'ouverture assez grand. Trois, voire quatre, antennes à fentes réunies avec un coupleur d'antennes permettent de couvrir une zone 360°. Ces antennes sont utilisées notamment pour le Wi-Fi, le radio amateurisme. Ce type d'antenne est le modèle de prédilection pour la conception d'antennes de systèmes de sécurité comme celles des radars micro-ondes utilisés pour la surveillance maritime et aéroportuaire.



Figure I.6.a: Antenne à fente circulaire.

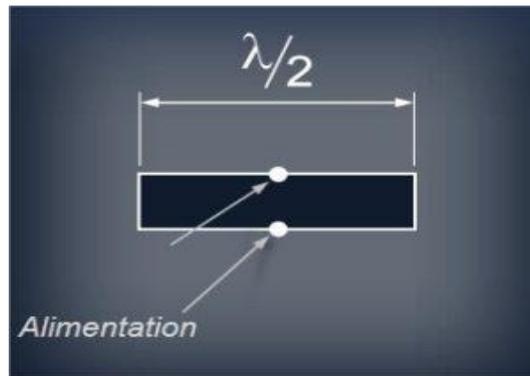


Figure I.7.b: Antenne à fente fermée.

I.5.3.L'antenne planaire :

Appelée aussi antenne à patch. C'est une antenne plane dont l'élément rayonnant est une surface conductrice généralement carrée, séparée d'un plan réflecteur conducteur par une lame diélectrique. Sa réalisation ressemble à un circuit imprimé double face, substrat, et est donc favorable à une production industrielle. Elle peut être utilisée seule ou comme élément d'un réseau. De même, elle peut être intégrée au plus près des circuits électroniques en occupant un volume réduit et se conformant à différents types de surface.

C'est le modèle le plus utilisé pour la conception des systèmes GSM, GPS, Wifi et Wi MAX.

I.5.4.L'antenne cadre :

C'est une antenne très directive, plutôt sensible à la composante magnétique de l'onde radio. C'est l'antenne typique de la radiogoniométrie, encore exploitée pour certains ADF mais abandonnée de plus en plus au profit de systèmes plus modernes. Elles peuvent être utilisées depuis des fréquences de quelques dizaines de kilohertz jusqu'à des fréquences de plusieurs gigahertz.

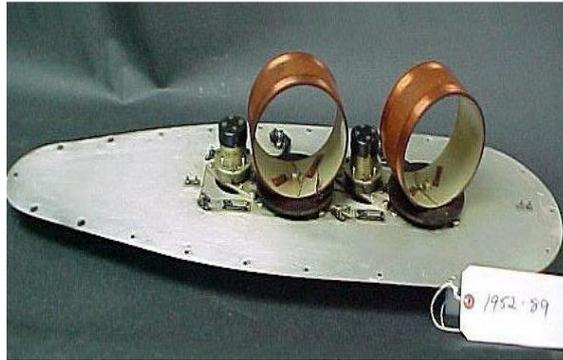


Figure I.8: Antenne plane.

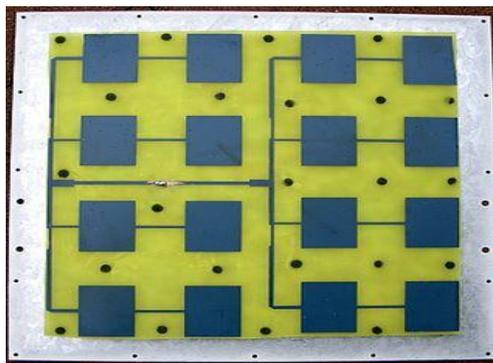


Figure I.9: Antenne cadre.

I.6. Un réseau d'antennes planaires avec un réseau d'alimentation intégré pour les applications UAV :

L'utilisation des véhicules aériens sans pilotage (UAV) à fin civiles et applications militaires se généralisent en surveillance, opérations de sauvetage et de combat sur le terrain. UAVs ont des liens de communication, un lien de contrôle qui fonctionne à fréquence pour permettre de couvrir de plus grandes distances et une donnée lien responsable de l'envoi d'informations sensorielle (par exemple images, emplacement) à une fréquence plus élevée et une bande passante plus large. [6], [7].

L'utilisation de réseaux d'antennes pour l'UAV présente plusieurs avantages tels que la réduction de la traînée, améliorer le profil aérodynamique de l'UAV et améliorer les performances de la liaison de communication [8], [9].

La figure **I.10(a)** montre un support de types UAV avec les emplacements des réseaux planaires incorporés indiqués sous les deux ailes. Un schéma de principe au niveau de système possible pour une liaison de données avec le réseau d'antennes intégré est représenté dans la

Chapitre I : Généralité sur les antennes

figure I.10 (b), le tableau est connecté à l'émetteur-récepteur RF via un seul connecteur (par exemple SMA) et les données sont décodés/codés en conséquences.

L'unité de microcontrôleur envoie les excitations de phase calculée à les éléments d'antenne directement basés sur le positionnement global module système (GPS) et l'entrée d'une unité de mesure inertielle (IMU). La combinaison de deux ensembles de données permet le microcontrôleur pour déterminer l'emplacement du faisceau en 3D espace, puis calcule l'azimut et l'élévation de la direction angle. La localisation de station au sol peut être réalisée en plusieurs façons, on peut être basé sur les niveaux de force de signal reçu (RSII). Cet algorithme sort du cadre de cet article. Donc on suppose que les angles de faisceau requis sont connus dans le a mis en œuvre d'un algorithme de guidage du faisceau dans ce travail.

Plusieurs ouvrages sont récemment apparus dans la littérature qui présente des réseaux d'antennes intégrés dans les structures d'aile des drones.

Dans [10], un réseau d'antennes linéaires à 4 éléments d'antenne monopole ce qui a utilisé l'aile nervures d'un drone comme leurs structures de support ont été proposées pour un fonctionnement dans la bande de 2.4 GHz. Le tableau n'avait qu'un degré de liberté (puisque'il s'agissait d'un tableau linéaire), gain une amélioration par rapport à un drone à antenne unique a été observée et les capacités de guidage de faisceau ont été accessibles.

L'algorithme de direction du faisceau a été construit sur une carte individuelle et le réseau d'alimentation RF était basé sur les cartes individuelles pour chacun des 4 déphaseurs. Un réseau d'antenne planaire de 12 éléments a été proposé [9] pour couvrir deux degrés de liberté lorsqu'il est intégré dans une structure d'aile d'UAV en plus d'offrant une portée de communication étendue via le plus grand gain [10].

La baie avait un réseau d'alimentation séparé qui a été conçu sur un tableau séparé, ainsi qu'un réseau de déphasage. Cela a rendu le design volumineux et lourd à placer dans unUAV de taille moyenne avec une capacité de charge utile de 500 à 700 g de plus, la baie a été implémentée sur un substrat FR4 de 0.8mm offrant une efficacité d'antenne inférieur à 50%.

Nous proposons un réseau d'antennes planaires intégré avec son réseau d'alimentation RF complet intégré sur une planche de 1.27mm d'épaisseur et avec une efficacité de l'antenne unique d'au moins 75%. Le poids de tableau proposé ... est beaucoup moins que les solutions fournies dans [10] et [9].

Chapitre I : Généralité sur les antennes

L'array est capable de fournir une couverture spatiale 3D avec une erreur d'angle d'élévation maximale de 25 degrés et erreur d'angle d'azimutale maximale de 25 degrés correspondant à erreurs sur un seul bit dans les déphaseurs 4 bits à commande numérique. Lorsque le faisceau est incliné près d'angles d'élévation de 70°, l'algorithme d'orientation du faisceau est implémenté sur un seul microcontrôleur carte qui alimente les excitations de phases requises. Les éléments à 12 antennes.

Une telle solution est d'une utilité pratique car la sortie RF n'a qu'un seul connecteur d'alimentation qui peut être directement connecté à la carte émetteur-récepteur, et le numérique, le contrôle passe par deux en-têtes sur les deux bords du embarquez vers le fuselage de l'UAV.

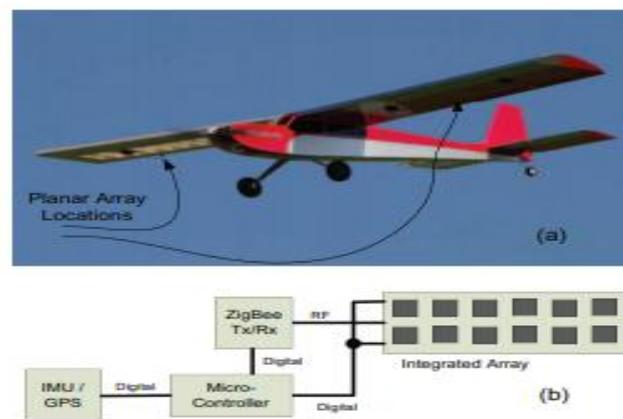


Figure I.10: Un drone volant avec un réseau d'antennes intégré pour la communication.

I.6.1. Conception de réseau d'antennes intégrées :

La figure **I.11** montre le schéma du plan imprimé intégré : Le réseau d'antennes de 12 éléments patch et son réseau d'alimentation. La carte se compose de 3 couches implémentées sur le substrat RO4350 avec une constante diélectrique de 3.6 et une épaisseur totale de 1.27 mm, les dimensions de la planche étaient de 458.8mm x 161mm, le tableau a été modélisé et simulé par HFSS. La couche inférieure (figure **I.12(a)**) tient le plan de patch à 12 éléments réseau d'antennes. Les dimensions de la pièce unique étaient de 31mm x 40mm et optimisées pour résonner à 2.45 GHz. L'inter-élément espacement entre les patches $\Delta x = \Delta y = 32$ mm.

L'épaisseur de substrat de la couche intermédiaire à inférieure était de 0.762 mm, la couche intermédiaire représentée sur la figure **I.12 (b)** contient le sol avion (GND) ainsi que certaines lignes de polarisation CC nécessaires pour exciter les déphaseurs RF à commande

Chapitre I : Généralité sur les antennes

numérique (DCPS) et n'étaient pas autorisés à acheminer sur la couche supérieure en raison de la contrainte de ligne.

L'épaisseur du substrat entre les couches supérieure et intermédiaire était de 0,508 mm. La couche supérieure (figure I.12 (c)) contient les lignes micro ruban radiofréquence (RF) optimisées pour l'impédance caractéristique 50Ω à 2.45 GHz ainsi que les circuits intégrés hyperfréquences (IC) de combinaison / séparateur RF (C / S) et DCPS.

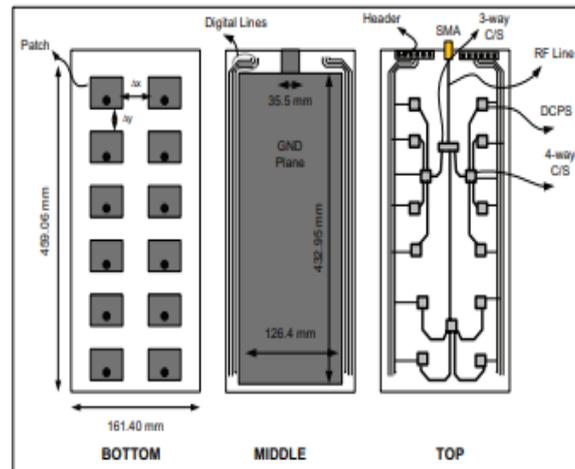


Figure I.11: Schéma de réseau d'antennes intégré proposé, (a) Couche inférieure, (b) Couche intermédiaire, (c) Couche supérieure.

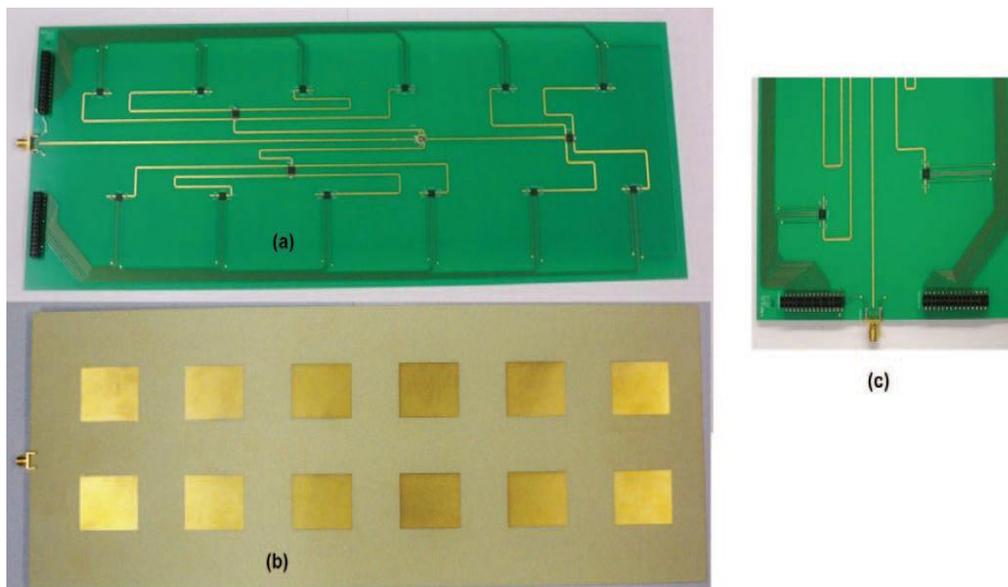


Figure I.12: Réseau d'antennes intégré fabriqué, (a) vue de dessus, (b) vue de bas, (c) zoom avant sur le connecteur et les en-têtes SMA.

I.7. Les caractéristiques des antennes :

I.7.1. La puissance rayonnée :

Une antenne sert à convertir une puissance électrique en une puissance rayonnée, 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 et connectée à une source qui lui fournit une puissance électrique P_A .

La puissance rayonnée dans une direction quelconque (θ, φ) dans un angle Solide (exprimé en stéradian sr) est donnée par l'équation (I.1).

La puissance fournie à une surface élémentaire située à une distance R est donnée par l'équation (I.2).

La puissance rayonnée totale correspond à la somme des puissances rayonnées dans toutes les directions de l'espace (équation3) (I.3).

$$p(\theta, \varphi) = \frac{P_A}{\Omega} \quad (\text{w ou w/sr}) \quad (\text{I.1})$$

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

$$P_{\text{tot}} = \iint P(\theta, \varphi) d\varphi d\theta \quad (\text{W/m}^2) \quad (\text{I.3})$$

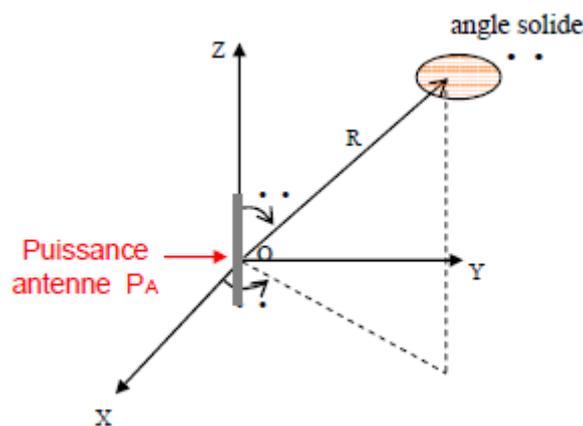


Figure I.13: Puissance rayonnée par une antenne dans une direction de l'espace.

I.7.2. Le diagramme de rayonnement :

Les antennes sont rarement omnidirectionnelles et émettent ou reçoivent dans des directions privilégiées. Le diagramme de rayonnement représente les variations de la puissance rayonnée par l'antenne dans les différentes directions de l'espace. Il indique les directions de

Chapitre I : Généralité sur les antennes

l'espace (θ_0, φ_0) dans lesquelles la puissance rayonnée est maximale. Il est important de noter que le diagramme de rayonnement n'a de sens que si l'onde est sphérique [1]. On trace dans le diagramme de rayonnement la fonction caractéristique de rayonnement $r(\theta, \varphi)$, qui varie entre 0 et 1 selon la direction. Celui-ci peut se représenter sous différentes formes **Figure I.15**. En général, le diagramme de rayonnement d'une antenne est représenté dans les plans horizontaux ($\theta = 90^\circ$) et verticaux ($\varphi = \text{constante}$), ou bien dans les plans E et H.

$$r(\theta, \varphi) = P(\theta, \varphi) / P_0(\theta_0, \varphi_0) \quad (\text{I.4})$$

Avec ;

$P(\theta, \varphi)$ est la puissance rayonnée dans une direction quelconque.

$P_0(\theta_0, \varphi_0)$ est la puissance rayonnée max.

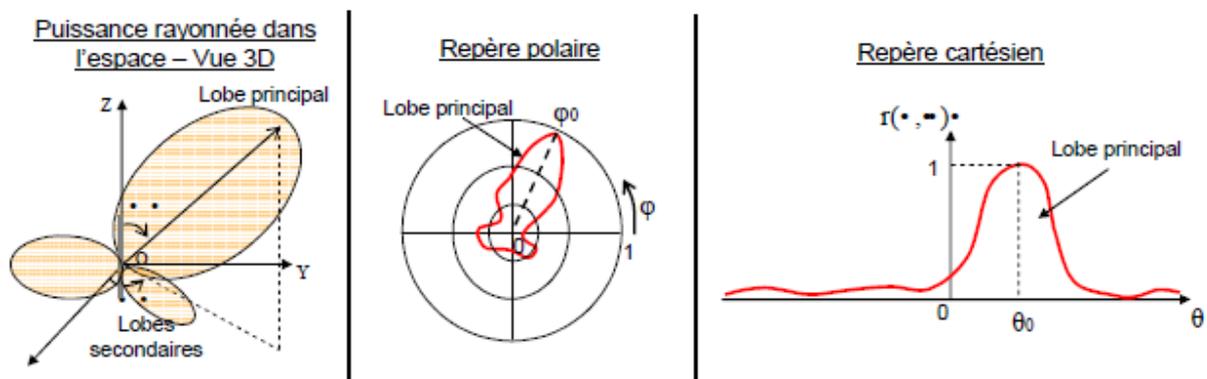


Figure I.14: Représentation du diagramme de rayonnement d'une antenne.

Le diagramme de rayonnement est une représentation géométrique de la façon dont une antenne collecte ou rayonne l'énergie électromagnétique dans l'espace. Cette représentation peut se faire soit en trois dimensions soit en deux dimensions sur des diagrammes polaires présentant différents plans.

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.

La figure suivante présente le diagramme de rayonnement en 3D.

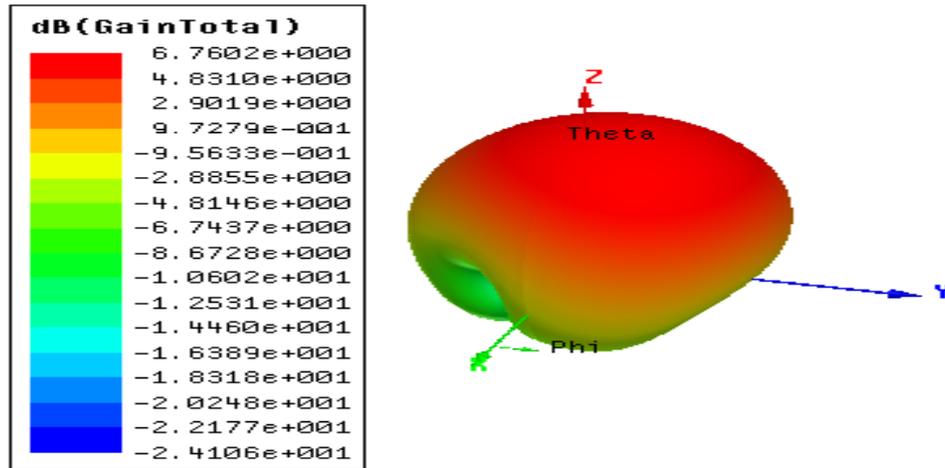


Figure I.15: Diagramme de rayonnement en 3D [11].

Le diagramme de rayonnement d'une antenne peut aussi varier avec la fréquence. Hormis les antennes omnidirectionnelles, les antennes ne rayonnent pas la puissance de manière uniforme dans l'espace. Dans ce cas, la fonction caractéristique de rayonnement est égale à 1 quel que soit la direction considérée. En général, la puissance est concentrée dans un ou plusieurs « lobes ». Le lobe principal correspond à la direction privilégiée de rayonnement. Les lobes secondaires sont généralement des lobes parasites. Dans ces directions, l'énergie rayonnée est perdue donc on cherche à les atténuer.

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.

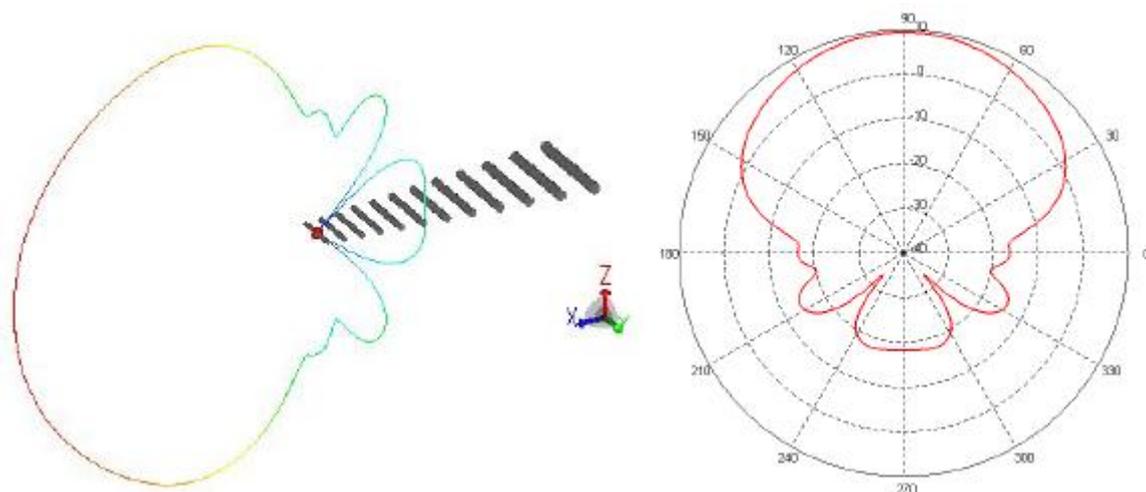


Figure I.16: Exemple de diagramme de rayonnement d'une antenne (antenne log-périodique).

I.7.3.L'angle d'ouverture :

L'angle d'ouverture (BeamWidth) caractérise la largeur du lobe principal. L'angle d'ouverture à 3 dB $2\theta_3$ 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 [1].

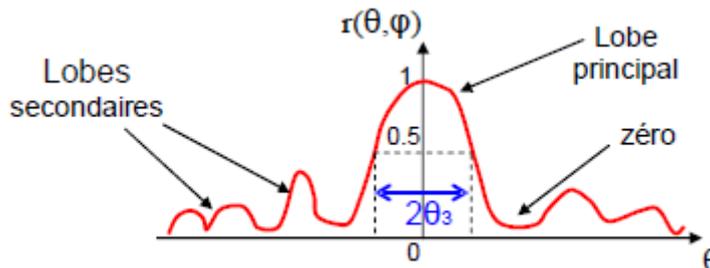


Figure I.17: Diagramme de rayonnement et angle d'ouverture.

I.7.4.La directivité :

La directivité d'une antenne caractérise la manière dont cette antenne focalise son rayonnement dans certaines directions de l'espace. Si le rayonnement de l'antenne est focalisé dans une direction privilégiée, on parle alors d'antenne directionnelle ou directive, l'antenne directionnelle est ainsi conçue pour émettre et recevoir le signal dans une direction spécifique.

Tel est l'exemple de l'antenne patch.

En revanche si le rayonnement s'effectue dans toutes les directions à 360° , l'antenne est dite omnidirectionnelle.

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

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

I.7.5.Le gain :

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

Chapitre I : Généralité sur les antennes

maximal (θ_0, φ_0) . Cette propriété caractérise la capacité d'une antenne à focaliser la puissance rayonnée dans une direction.

$$G(\theta, \varphi) = 4\pi \frac{P(\theta, \varphi)}{P_A} \quad (\text{I.6})$$

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

$$G(\theta, \varphi) = \eta D(\theta, \varphi) \quad (\text{I.7})$$

I.7.6. Le rendement :

Le rendement η 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. Une antenne aura un bon rendement si la résistance de pertes est faible devant la résistance de rayonnement [12]. On voit que le rendement relie le gain et la directivité comme indiqué dans l'équation

(I.8).

$$P_R = \eta \cdot P_A \quad \Rightarrow \quad G = \eta \cdot D \quad (\text{I.8})$$

I.7.6.1. Lien entre le gain et angle d'ouverture :

Intuitivement, on voit que le gain dépend de l'ouverture d'une antenne. Plus le gain d'une antenne est grand, plus l'angle d'ouverture du lobe principal est petit, comme le montre le résultat suivant (équations (I.9), (I.10) et (I.11)).

$$G = \eta \cdot 4\pi \frac{P(\theta_0, \varphi_0)}{P_R} \quad (\text{I.9})$$

$$P_R = \int_0^{4\pi} P(\theta, \varphi) d\Omega = \int_0^{4\pi} r(\theta, \varphi) P(\theta_0, \varphi_0) d\Omega \quad (\text{I.10})$$

$$G = \eta \cdot \frac{4\pi}{\int_0^{4\pi} r(\theta, \varphi) d\Omega} \quad (\text{I.11})$$

I.7.7. Coefficient de réflexion S11 :

Met en évidence le transfert d'énergie par l'antenne. Lorsque le coefficient S11 connaît une forte atténuation à une fréquence donnée appelée fréquence de résonance, il y a un maximum de transfert de puissance entre le générateur et la charge. C'est sur ce paramètre que l'on se base pour optimiser l'antenne [13].

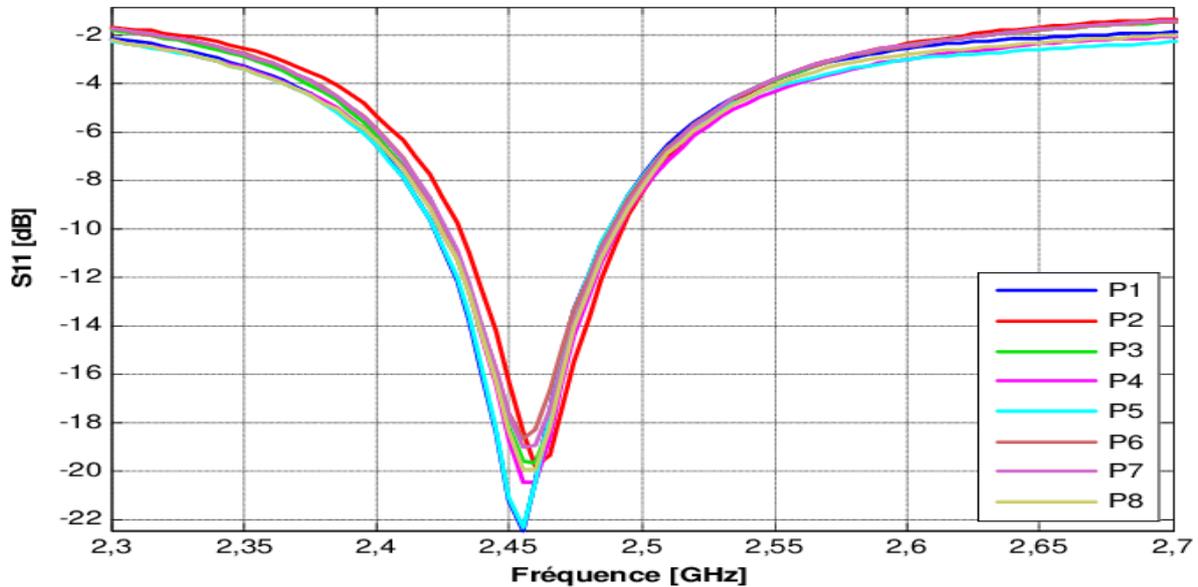


Figure I.18: Coefficient de réflexion du réseau d'antenne de référence.

I.7.8. Le Rapport d'Onde Stationnaire :

Le Rapport d'Onde Stationnaire (ROS) appelé aussi le Taux d'Onde Stationnaire (TOS), en anglais, VSWR pour Voltage Standing Wave Ratio tout comme le coefficient de réflexion traduit l'adaptation ou la désadaptation d'impédance entre deux éléments. Lorsque l'adaptation n'est pas parfaite, la partie de l'onde réfléchie se superpose à l'onde incidente pour ne former qu'une seule onde, appelée onde stationnaire. Il se définit comme le rapport des valeurs maximales et minimales de l'amplitude de l'onde stationnaire, il est donné par la relation suivante :

$$VSWR = \frac{E_{fwd} + E_{ref}}{E_{fwd} - E_{ref}} \quad (I.12)$$

I.7.9. Le ROS et les antennes :

Le rapport d'ondes stationnaires (ROS) est un indicateur du bon fonctionnement du système d'alimentation d'une antenne. Il n'exprime pas les qualités de l'antenne proprement dite mais le fait que celle-ci peut être raccordée à un émetteur sans risque pour ce dernier [14].

Chapitre I : Généralité sur les antennes

Ce facteur exprime la qualité de l'adaptation de l'antenne à une ligne de transmission coaxiale ou bifilaire.

I.7.9.1. Calcul du rapport d'onde stationnaire :

Par définition le ROS est le rapport entre le maximum et le minimum de tension relevés sur la ligne au niveau d'un ventre de tension.

$$\text{ROS} = \frac{U_{\max}}{U_{\min}} = \frac{I_{\max}}{I_{\min}} \quad (\text{I.13})$$

On peut aussi l'exprimer à partir du coefficient de réflexion :

$$\text{ROS} = \frac{1 + \rho}{1 - \rho} \quad (\text{I.14})$$

Si la ligne est chargée par une résistance pure :

$$\text{ROS} = \frac{R}{Z_c} \quad (\text{I.15})$$

I.7.9.2. Signification de la mesure du ROS :

La mesure du ROS permet d'évaluer la transmission d'énergie entre un émetteur et sa charge. **ROS=1** ne signifie pas que l'antenne est adaptée à la ligne.

I.7.10. Adaptation et condition d'adaptation :

Une antenne est reliée à la source par une ligne de transmission d'impédance caractéristique Z_c (en général, $Z_c = 50\Omega$). 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 Γ_{in} ou S_{11} en entrée de l'antenne.

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.

$$P_A = P_S (1 - |\Gamma_{in}|^2) \quad (\text{I.16})$$

$$S_{11} = \Gamma_{in} = \frac{Z_{in} - Z_c}{Z_{in} + Z_c} \quad (\text{I.17})$$

Condition d'adaptation $S_{11}=0 \implies Z_{in}=Z_c$

Chapitre I : Généralité sur les antennes

Si l'adaptation n'est pas assurée, une partie de la puissance ($= \Gamma^2.P_A$) est renvoyée vers la source (ou re-rayonnée par l'antenne dans le cas de la réception). 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.7.11. Puissance isotrope rayonnée équivalente (PIRE) :

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.18).

$$PIRE = G \times P_A \quad (I.18)$$

I.7.12. La résistance de rayonnement :

Elle s'agit d'une puissance active. 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 :

$$P_{Rad} = \frac{1}{2} R_{Rad} I_{in}^2 \quad (I.19)$$

$$\eta = \frac{P_{Rad}}{P_A} \quad (I.20)$$

$$\eta = \frac{P_{Rad}}{P_{Rad} + R_{Loss}} \quad (I.21)$$

I.7.13. Les trois zones de rayonnement d'une antenne :

L'espace entourant l'antenne est généralement subdivisé en trois régions [15].

Le tableau suivant présente les trois zones de rayonnement d'une antenne.

Chapitre I : Généralité sur les antennes

Tableau I.1: Les trois zones de rayonnement d'une antenne.

Région réactive (zone de Rayleigh)	Région du champ proche rayonné (zone de Fresnel)	Région de Fraunhofer (zone du champ lointain)
<p>C'est la région entourant la source de rayonnement ou la puissance réactive (purement imaginaire) prédomine.</p> <p>L'énergie électromagnétique reste confinée à 90% à l'intérieur d'un faisceau tubulaire. Pour la plupart des antennes, cette région est délimitée par une sphère de rayon $R_1 = 0,62 \sqrt{\frac{D^3}{\lambda}}$ où λ est la longueur d'onde et D la plus grande dimension de l'antenne.</p>	<p>C'est la région comprise entre la zone réactive et la zone du champ lointain et dans laquelle la divergence du faisceau devient appréciable. Cette région est également appelée zone de Fresnel par analogie à la terminologie de l'optique géométrique. Elle est délimitée par une Distance R avec $R_1 \leq R \leq R_2$ avec $(R_2 = \frac{2D^2}{\lambda})$.</p> <p>Le champ rayonné dépend, en général, de la distance. De plus la composante radiale du champ est appréciable</p>	<p>définie par une distance radial R telle que $R \geq R_2$, où l'énergie électromagnétique rayonnée dans toutes les directions de l'espace couvertes par le diagramme de rayonnement de l'antenne.</p> <p>La puissance rayonnée est une structure TEM par rapport à la direction Radiale réelle et elle est indépendante de cette dernière.</p>

La figure suivante présente les différentes régions de rayonnement d'antenne.

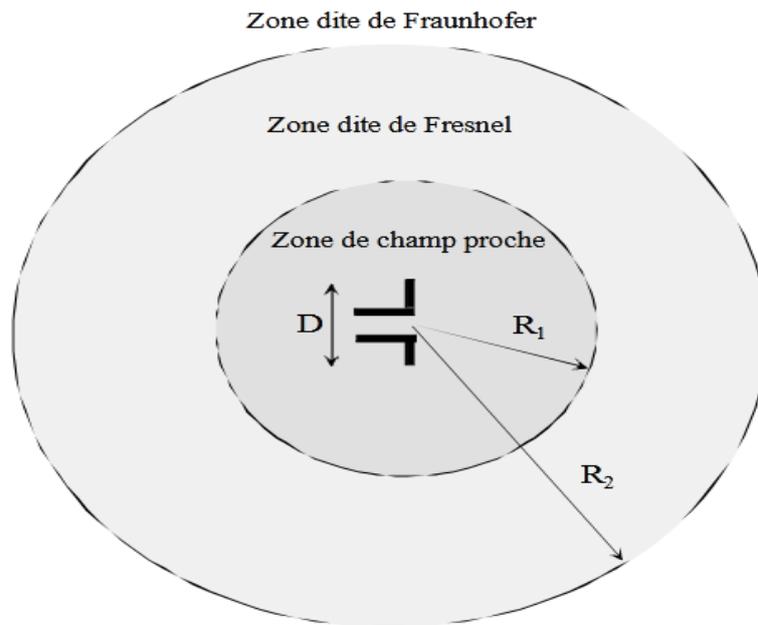


Figure I.19: Les différentes régions de rayonnements.

I.7.14. Polarisation de l'antenne :

La polarisation d'une antenne est déterminée par celle de l'onde radiée dans une direction donnée, elle est identique à la direction du champ électrique, c'est à dire à celle des brins rayonnants de l'antenne. Le plan E (électrique) est parallèle au vecteur E de l'onde émise. On parle de polarisation verticale si le plan E est perpendiculaire au sol ; s'il est parallèle au sol, on parle de polarisation horizontale. Aussi le vecteur du champ électrique instantané trace dans le temps une figure. On réfère à ce phénomène simplement la polarisation du champ électrique. La figure est généralement une ellipse qui présente des cas particuliers. Si le chemin du vecteur de champ électrique suit une ligne, l'antenne est dite linéairement polarisée. Si le vecteur champ électrique tourne selon un cercle, elle est dite à polarisation circulaire [17].

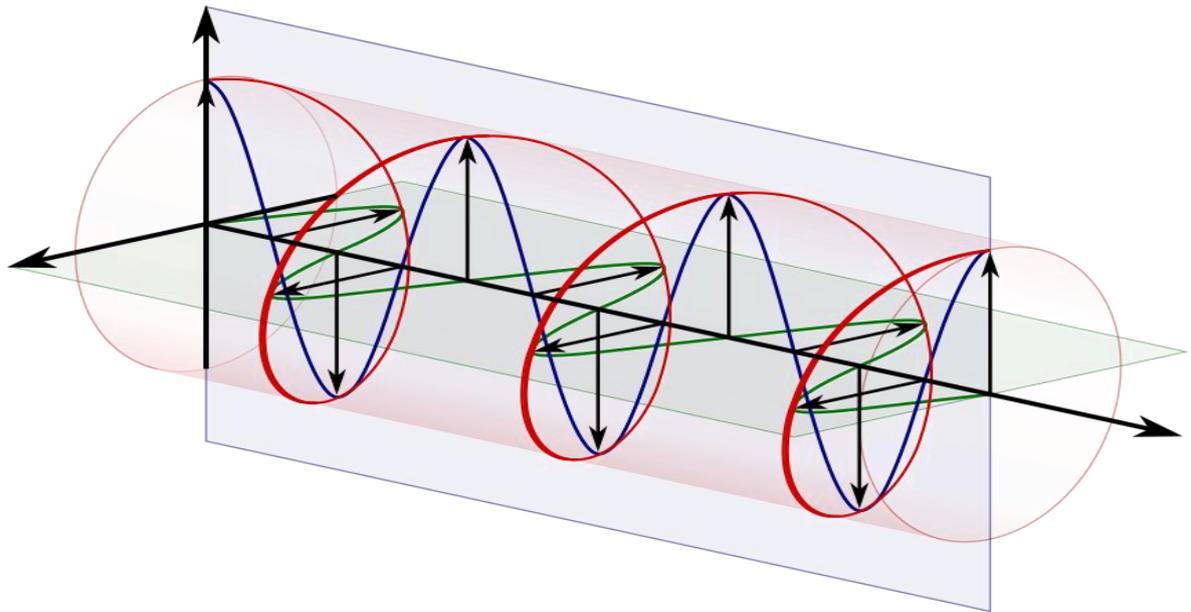


Figure I.20: Polarisation circulaire.

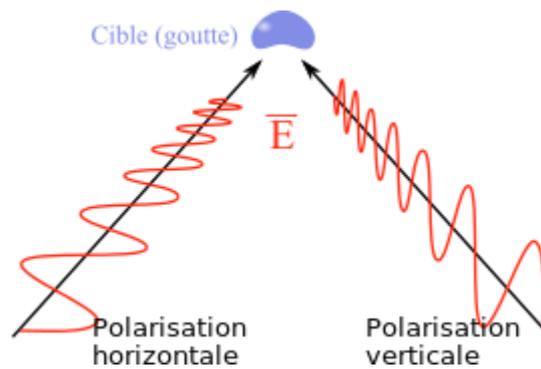


Figure I.21: Polarisation rectiligne.

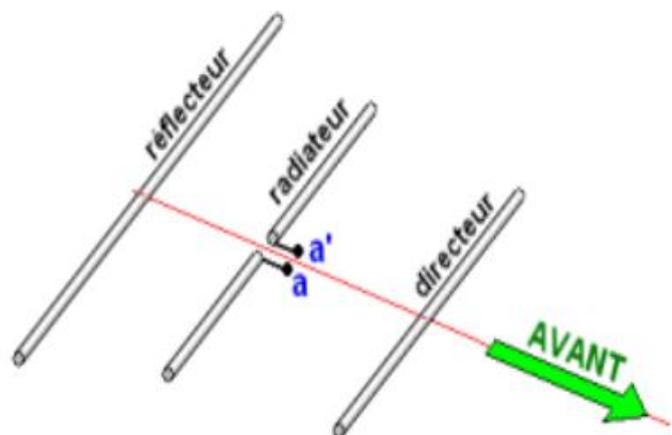


Figure I.22: Antenne Yagi en polarisation circulaire.

I.7.15. Le 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 2 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.

I.8. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons cherché à définir ce qu'est une antenne et son rôle, puis nous avons également présenté le positionnement des différentes antennes sur l'aéronef et les bandes de fréquences utilisées. Nous avons également montré un projet très important sur les antennes intégrées dans la structure d'un UAV qui a été réalisé avec succès sur les ailes de cet UAV.

Nous avons conclu ce chapitre avec les caractéristiques d'une antenne telles que l'impédance d'entrée, la résistance aux rayonnements ainsi que la directivité, le gain et l'efficacité.

Le chapitre suivant sera consacré à la description des antennes imprimées, telles que la structure, la forme, leurs avantages et inconvénients et l'application de ces antennes dans plusieurs domaines. Ainsi que la comparaison des différentes techniques d'alimentation, les calculs mathématiques des paramètres caractéristiques de l'antenne patch rectangulaire. Ce chapitre sera terminé par des informations précieuses sur la reconfiguration mécanique des antennes imprimées.

Chapitre II : Les antennes imprimées

II.1.Introduction :

Les antennes imprimées (à élément rayonnant, plaquées, ou même patch) sont apparues dans les années cinquante et ont été développées au cours des années soixante-dix. Cependant plusieurs recherches ont été menées pour arriver à une antenne imprimée optimale pouvant répondre aux exigences de l'industrie des télécommunications pour des applications aéronautiques, aérospatiales et militaires.

Ce type d'antennes s'adapte facilement aux surfaces planes et non planes et présentent une grande robustesse et flexibilité lorsqu'il est monté sur des surfaces rigides. Les antennes imprimées sont également très performant en termes de résonance, d'impédance d'entrée et de diagramme de rayonnement. Les inconvénients majeurs des antennes micro rubans résident dans leur faible pureté de polarisation et une bande passante étroite [18].

Plusieurs travaux de recherche ont été menés pour améliorer les caractéristiques de rayonnement des réseaux d'antennes imprimées, par le changement des paramètres de réseaux. L'antenne imprimée sur un substrat isotrope a fait l'objet d'un certain nombre de travaux de recherches durant les dernières décennies, le concept de la structure rayonnante a été étudié la première fois par Deschamps en 1950.

Actuellement un réseau imprimé est largement utilisé puisqu'il permet de répondre à de nombreuses contraintes commandées par les systèmes. Il est caractérisé par le diagramme de rayonnement, la fonction caractéristique, l'angle d'ouverture, la dynamique d'une antenne, le gain et la directivité. Les domaines d'utilisation privilégiés de ces antennes, sont trouvés dans de nombreux systèmes de communication tels que la téléphonie mobile, les systèmes multimédia sans fil (WIFI, Bluetooth) ou encore les communications spatiales. Elles trouvent également des applications dans certains systèmes radar ou de télé- détection et sont utilisées dans des bandes de fréquences allant de 1GHz jusqu'aux bandes millimétriques. Ces applications sont soumises à des critères sélectifs et à des limitations de poids, de volume et d'épaisseur [17].

Dans ce chapitre, nous fournirons des riches descriptions d'antennes imprimées, telles que la structure, les différentes formes, les méthodes d'analyses, leurs avantages et inconvénients, et l'application de ces antennes dans plusieurs domaines. Nous présenterons également une comparaison entre les différentes techniques d'alimentation, ainsi que des calculs mathématiques des paramètres caractéristiques d'une antenne patch rectangulaire. Nous conclurons ce manuscrit avec des informations précieuses sur la reconfiguration mécanique des antennes imprimées.

II.2.Définition d'une antenne imprimée :

Une antenne imprimée est généralement constituée d'un plan de masse, d'une ou de plusieurs couches de substrat qui peuvent avoir une permittivité (ϵ_r) égale ou différentes. Sur la surface, on a un élément rayonnant de géométrie quelconque (rectangle, cercle, carré, ...). Il existe plusieurs mécanismes d'excitations qui permettent d'avoir des diagrammes de rayonnements en polarisations linéaires ou circulaires [19].

II.2.1.Les couches métalliques :

- La couche inférieure de l'antenne imprimée joue le rôle d'un plan de masse parfaitement réflecteur, elle est souvent métallique et réalisée avec de très bons conducteurs :

Le cuivre ($\sigma=5,7 \cdot 10^7$ S/m), l'argent ($\sigma=6,2 \cdot 10^7$ S/m), et l'or ($\sigma=4,1 \cdot 10^7$ S/m).

- La couche supérieure peut comporter un ou plusieurs éléments métalliques qui s'appellent l'élément rayonnant, pavés, plaques rayonnantes ou patches en anglais", son rôle principal consiste à rayonner l'énergie. Physiquement le patch est un conducteur mince (son épaisseur est souvent négligeable car elle est de l'ordre de quelques microns), et dans la plupart des applications pratiques il est de forme rectangulaire ou circulaire, mais en général d'autres géométries sont possibles à tester, dont la forme triangulaire [18].

II.2.2.Le substrat :

La couche intermédiaire est le substrat diélectrique, son importance réside dans son influence directe sur la fréquence de résonance, la bande passante, et par conséquent le rayonnement de l'antenne, car une bonne partie des ondes susceptibles de se propager est retournée dans ce dernier, il s'agit des ondes guidées. La sélection du matériau du substrat est basée sur les caractéristiques désirées de ce dernier pour des performances optimales selon la spécification et les classes des fréquences [19].

Les substrats diélectriques ont généralement une faible permittivité ($\epsilon_r \leq 3$) pour faciliter et favoriser le rayonnement, en évitant le confinement des champs dans la cavité comprise entre l'élément imprimé et le plan de masse.

Les substrats possèdent aussi des qualités en tant que métaux, leurs propriétés électromagnétiques sont caractérisées essentiellement par trois grandeurs physiques :

Chapitre II : Les antennes imprimées

Conductivité, constante diélectrique relative, angle de perte. Les substrats exploités dans la conception des antennes imprimées sont nombreux et doivent être compatibles avec le matériau de l'élément rayonnant [20]. La figure suivante présente la structure d'une antenne patch.

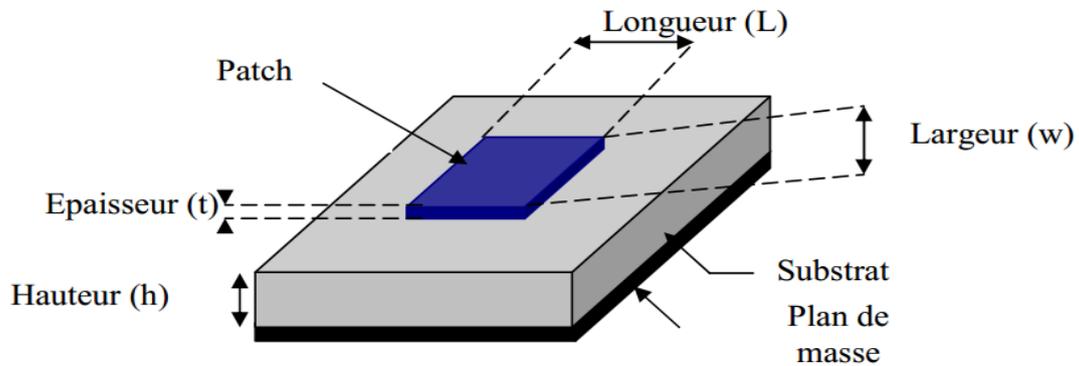


Figure II.1: Structure d'une antenne patch.

II.3. Les différentes formes d'une antenne patch :

L'antenne patch peut prendre plusieurs formes qui peuvent être rectangulaire, carré, circulaire ou simplement un dipôle. Ces formes sont les plus courantes car elles présentent une grande facilité d'analyse et de fabrication, mais également un diagramme de rayonnement très intéressant.

Parmi toutes ces formes, l'élément rectangulaire est sans contexte le plus facile à appréhender pour la compréhension des mécanismes de rayonnements des antennes planaires.

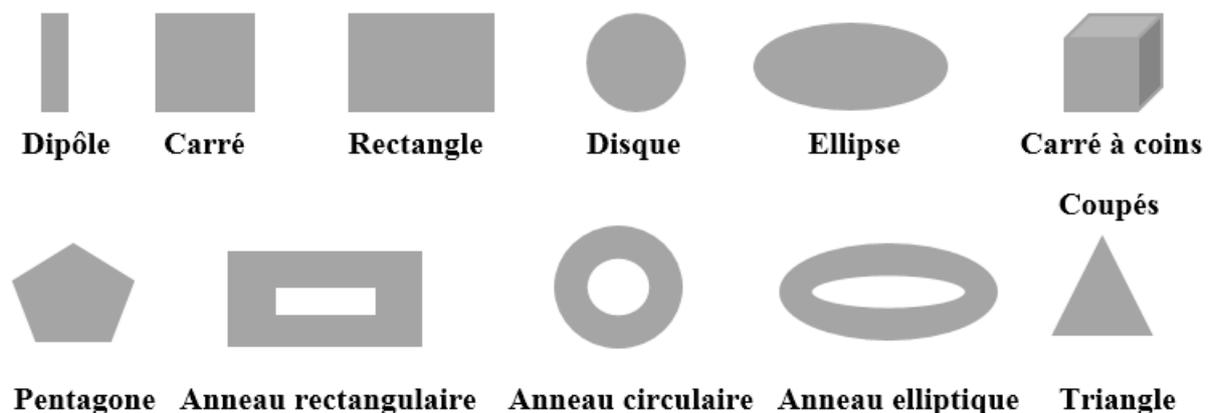


Figure II.2: Les différentes formes de la plaque rayonnante.

II.4. Avantages ET Inconvénients d'antenne Patch :

Chapitre II : Les antennes imprimées

Tableau II.1: Avantages et inconvénients des antennes imprimées.

Avantages	Inconvénient
coût de fabrication faible	Bande passante limitée
Poids léger	Faible gain
Conforme	Une pureté de polarisation difficile à obtenir
Simple à fabriquer	L'excitation possible d'ondes de surface dans le diélectrique
Peut être intégrée dans les circuits Imprimés	Des puissances transportées faibles en comparaison aux antennes traditionnelles
La possibilité de mise en réseaux	Nécessite un substrat de bonne qualité avec une bonne tolérance de température

II.5.Application de l'antenne patch :

Les antennes imprimées sont bien connues pour leurs performances et leur conception robuste, leur fabrication et leur utilisation étendue. Les avantages de cette antenne patch sont de surmonter leurs mérites tels que la simplicité de conception, la légèreté, etc.

Les applications sont dans les différents domaines tels que les applications médicales, les satellites et bien sûr même dans les systèmes militaires comme dans les fusées, les missiles d'avions, etc. l'utilisation des antennes se répand largement dans tous les domaines et zones et maintenant, elles sont en plein essor dans les aspects commerciaux en raison de leur faible coût du matériau de substrat et de la fabrication. Il est également prévu qu'en raison de l'utilisation croissante des antennes patch dans la large gamme, cela pourrait prendre le pas sur l'utilisation des antennes conventionnelles pour les applications maximales.

Certaines des applications de l'antenne patch sont :

- ✓ Radioaltimètres
- ✓ Systèmes de commandement et de contrôle
- ✓ Instruments de télédétection et d'environnement
- ✓ Éléments d'alimentation dans les antennes complexes
- ✓ Récepteurs de navigation par satellite
- ✓ Radio mobile
- ✓ Antennes intégrées
- ✓ Radiateurs biomédicaux et alarmes d'intrus
- ✓ Doppler et autres radars

Chapitre II : Les antennes imprimées

✓ Communications par satellite, services de radiodiffusion directe DBS (direct broadcast Services) [21].

Quelques domaines d'applications des antennes imprimées et leurs largeurs de bandes sont présentés dans le tableau suivant.

Tableau II.2: L'application des antennes imprimées dans quelques domaines avec les bandes de fréquences utilisées [22].

Applications	Fréquences
GPS	1575 MHz et 1227 MHz
Système de communication personnel	1.875-1.99 GHz et 2.18-2.20 GHz
GSM	980-915 MHz et 935-960 MHz
Réseaux locaux sans fils	2.40-2.48 GHz et 5.4 GHz
Satellite de radiodiffusion	11.7-12.5 GHz
Radar de poursuite	60 GHz et 77 GHz

II.6. Les techniques d'alimentation :

L'alimentation de l'antenne patch dépend de la manière dont l'antenne est intégrée dans le dispositif. C'est une partie très importante dans le processus de la conception.

Pour cela plusieurs techniques ont été considérées dans ce but, elles peuvent être classées en deux grandes catégories.

II.6.1. Alimentations par contact :

II.6.1.1. Alimentation directe par une ligne micro ruban :

Dans ce cas d'alimentation, une ligne microstrip (microbande) est reliée directement sur le côté rayonnant du patch.

L'avantage de ce type d'alimentation est qu'elle est facile à mettre en œuvre et à modéliser. C'est l'une des techniques les plus utilisées dans les antennes imprimées. Elle a l'inconvénient de générer un rayonnement parasite [23].

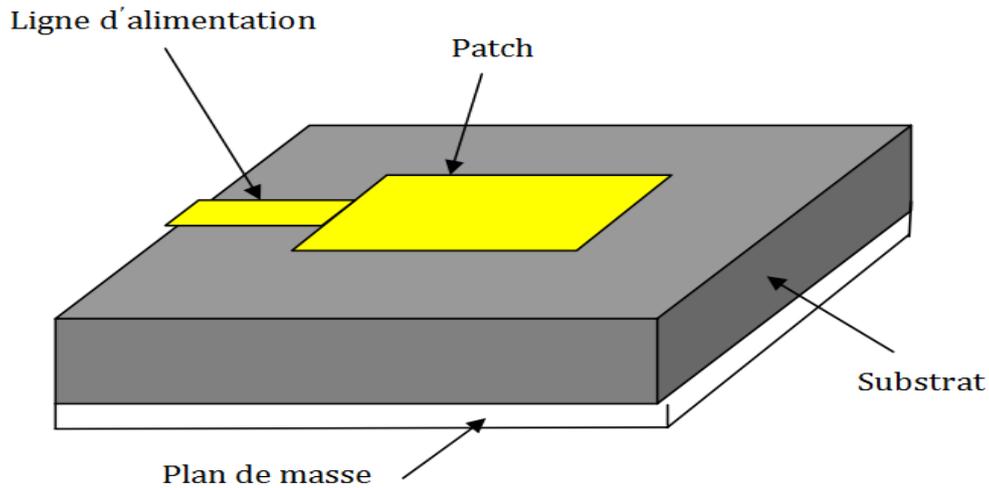


Figure II.3: Alimentation d'une antenne patch par une ligne micro ruban.

II.6.1.2. Alimentation par câble coaxial :

L'alimentation coaxiale où le conducteur intérieur est attaché au patch et le Conducteur externe au plan de masse est également largement utilisée. L'avantage principal de ce type d'alimentation est qu'elle facile à mettre en œuvre et à adapter. Mais il offre une bande passante étroite.

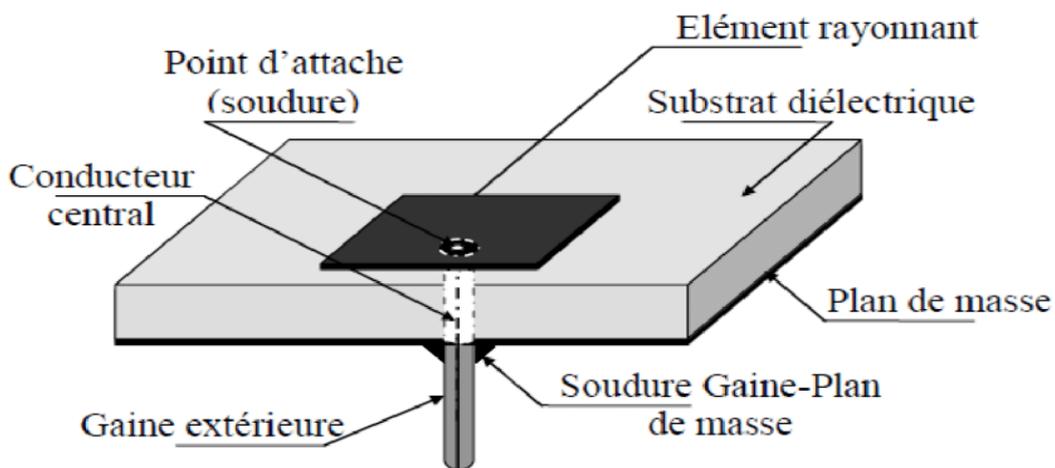


Figure II.4: Antenne micro ruban alimenté par sonde coaxial.

II.6.2. Alimentations par proximité :

II.6.2.1. Alimentation couplée par ouverture :

Chapitre II : Les antennes imprimées

L'alimentation par ligne micro ruban ou par ligne coaxiale présentent une asymétrie qui Génère des modes d'ordres supérieurs produisant un rayonnement de polarisation croisée, pour y remédier à cet état de fait l'alimentation par fente a été introduite.

Un couplage électromagnétique est introduit à travers une petite fente réalisée dans le plan de masse qui sépare deux substrats l'un portant l'élément rayonnant et l'autre la ligne micro ruban Cette configuration permet une optimisation indépendante entre la ligne d'alimentation et le patch, facile à modéliser et présente un rayonnement parasite modéré. Cependant, elle est la plus difficile à mettre en œuvre et présente une bande passante étroite.

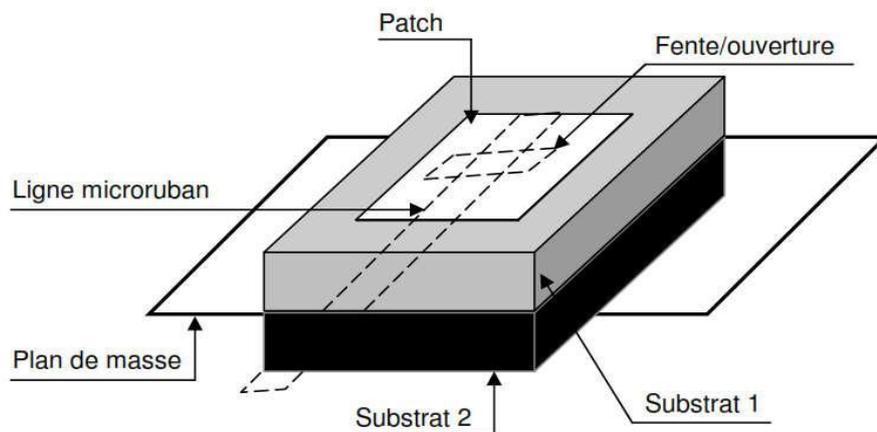


Figure II.5: Alimentation couplée par ouverture.

II.6.2.2. Alimentation Couplée Par Proximité :

Dans ce type d'alimentation, deux substrats diélectriques sont employés tels que la ligne d'alimentation est entre les deux substrats et le patch de rayonnement est sur le substrat supérieur.

L'avantage principal de cette technique d'alimentation est l'élimination du faux rayonnement d'alimentation et l'obtention d'une bande passante plus large et ce par l'augmentation globale de l'épaisseur de l'antenne.

Parmi les inconvénients de cette méthode d'alimentation nous citons la difficulté de fabrication à cause des deux couches diélectriques nécessitant un alignement approprié, ainsi que la difficulté d'intégration de dispositifs actifs.

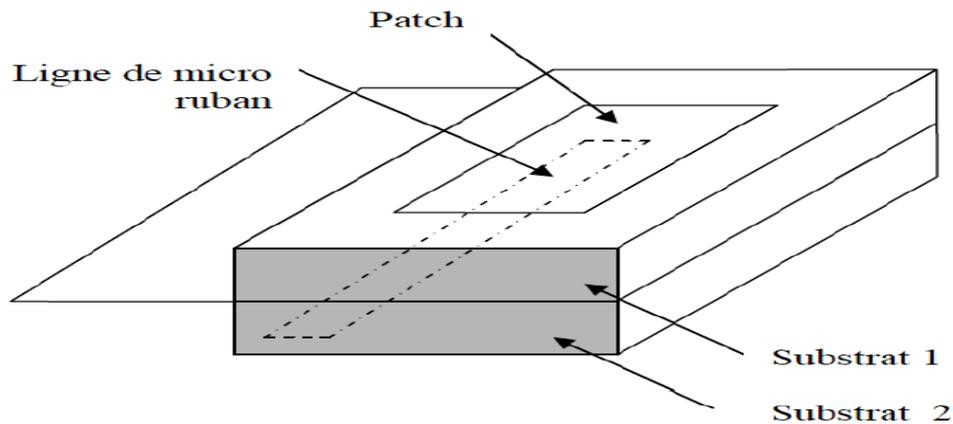


Figure II.6: Alimentation Couplée Par Proximité.

II.7.Comparaison entre les différentes techniques d'alimentation :

Le tableau II.3 résume les caractéristiques des différentes techniques d'alimentation.

Tableau II.3: Comparaison entre les différentes méthodes d'alimentation.

Caractéristiques	Alimentation par micro ruban	Alimentation micro coaxial	Alimentation par ouverture	Alimentation par proximité
Rayonnement parasite	Plus	Plus	Moins	Minimum
Fiabilité	Meilleur	Pauvre	Bon	Bon
Facilité de fabrication	Facile	Nécessite soudage et perçage	Nécessité et d'alignement	Nécessité d'alignement
Bande passante	2 à 5 %	2 à 5 %	2 à 5 %	15%

II.8.Avantages et inconvénients des différentes techniques d'alimentation :

Le tableau suivant résume les avantages et les inconvénients de différentes techniques d'alimentation d'antenne imprimée.

Chapitre II : Les antennes imprimées

Tableau II.4: Avantages et inconvénients de différentes techniques d'alimentation.

Méthodes		Avantages	Inconvénients
Alimentation avec contact	Sonde coaxial	<ul style="list-style-type: none"> -Pas de pertes par rayonnement de ligne. -Sélection possible d'un mode privilégié. -Obtention d'une impédance d'entrée adéquate par positionnement de la sonde. -Prédiction aisée de l'impédance d'entrée pour des substrats faible hauteur. -Technique de perçage simple jusqu'à 10 GHz. 	<ul style="list-style-type: none"> -Dans le cas de substrat épais, la réactance inductive supplémentaire apportée par la sonde affecte de la bande passante. -Partie selfique ramenée par l'âme du connecteur à prendre en compte. -Technique de perçage et de soudure plus délicate en millimétrique. -Difficile à exciter chaque élément d'un réseau seul.
	Ligne microbande	<ul style="list-style-type: none"> -Procédé technologique le plus simple par gravure sur la même face de l'antenne et du circuit d'alimentation. -Adaptation de l'aérien possible par contact pénétrant. 	<ul style="list-style-type: none"> -Rayonnement parasite de la discontinuité ligne-aérien -Rayonnement parasite possible du circuit de distribution en millimétrique. -Structure figée après gravure
Alimentation sans contact	Par couplage	<ul style="list-style-type: none"> -Dessin du circuit d'alimentation modifiable par rapport aux aériens. -Bande passante plus large par augmentation de la hauteur. 	<ul style="list-style-type: none"> Deux couches de substrat requises. -Difficulté pour l'intégration de dispositifs actifs et pour la dissipation de chaleur.

II.9.Méthodes d'analyse des antennes imprimées :

Plusieurs méthodes et modèles sont proposés pour analyser les antennes imprimées, Ces méthodes peuvent être divisées en deux groupes.

II.9.1. Les méthodes approximatives :

Ces méthodes reposent sur la prise en compte de la nature des phénomènes physiques qui se produisent au sein de l'antenne. Vu la complexité d'une telle analyse, un ensemble d'approximations sont mises en place afin de simplifier le modèle développé. Les modèles les plus populaires et qui fournissent des résultats suffisamment concis sont le modèle de la ligne de transmission et le modèle de la cavité. Ces modèles sont très populaires et très pratiques, ils considèrent l'antenne comme une ligne de transmission ou une cavité résonante [20].

II.9.1.1. Modèle de la ligne de transmission :

Le traitement théorique basé sur le modèle de la ligne de transmission (MLT) était le premier et le plus simple modèle utilisé pour l'analyse et la synthèse des antennes micro rubans. Ce modèle exploite l'analogie qui existe entre un patch d'une antenne imprimée et un tronçon d'une ligne de transmission ayant deux bords rayonnants. Dans ce modèle, l'inconnu à déterminer est la constante de propagation. Les pertes par rayonnement sont incluses dans le coefficient d'atténuation de la constante de propagation. Cependant, cette technique ne rend pas compte des effets des modes d'ordre supérieur.

II.9.1.2. Modèle de la cavité résonnante :

Le modèle de la cavité offre la simplicité et la visibilité physique dans l'analyse des antennes micro rubans. Une antenne imprimée peut être assimilée à une cavité fermée par deux murs électriques (le plan de masse et l'élément rayonnant) et quatre murs magnétiques verticaux. Une longueur et une largeur effective sont introduites pour prendre en compte les débordements des lignes des champs sur les bords de l'élément rayonnant.

Les champs à l'intérieur de la cavité peuvent être exprimés en fonction de modes discrets satisfaisant individuellement des conditions aux limites appropriées. Une fois ces champs connus, le champ rayonné, la puissance totale et l'impédance d'entrée seront alors déduits. Ce modèle n'est valide que pour des substrats électriquement minces et modélise difficilement le couplage.

II.9.2. Les méthodes numériques :

Ces méthodes d'analyse des antennes imprimées sont largement utilisées récemment, ce sont en effet des méthodes de calcul numérique.

Le principe de ces méthodes repose sur la résolution numérique des équations de Maxwell et la détermination de la distribution des champs et des courants électriques et magnétiques à la surface du patch, pour déterminer les caractéristiques des antennes telles que le coefficient de réflexion et l'adaptation à l'intérieur de l'antenne et le diagramme de rayonnement dans la zone de rayonnement de l'antenne.

II.9.2.1. Méthode des éléments finis (FEM) :

Cette méthode est très employée dans le domaine fréquentiel, consiste à discrétiser les équations de Maxwell en amont au niveau de la formulation aux dérivées partielles des équations de propagation.

L'avantage d'une telle technique réside dans la simplicité de traitement pour les géométries les plus complexes et les matériaux inhomogènes tout en tenant compte des dispersions. Cependant elle reste inefficace comparée à la méthode des moments pour le traitement des conducteurs rayonnants.

II.9.2.2. Méthode des différences finies (FDTD) :

La méthode des différences finies dans le domaine temporel F.D.T.D

(Finite Difference Time Domain) est une approche numérique permettant la résolution des équations différentielles dans le domaine temporel dans une structure uniformément maillée. La méthode consiste à approcher les dérivées ponctuelles spatiales et temporelles qui apparaissent dans les équations de Maxwell par des différences finies centrées.

L'avantage principal de cette méthode est la simplicité de sa formule, le calcul est alors fait dans le domaine temporel sur une large bande de fréquence.

II.9.2.3. Méthode des moments (MoM) :

Consiste à transformer l'équation intégrale en une équation algébrique matricielle qui peut être facilement résolue par les méthodes numériques.

La méthode des moments est la technique numérique la plus utilisée dans le domaine électromagnétique. La méthode de Galerkin, qui est un cas particulier de la méthode des

Chapitre II : Les antennes imprimées

moments, est implémentée dans le domaine de fourrier pour réduire le système des équations intégrales à une équation matricielle.

II.9.2.4.Méthode TLM (transmission line matrix- méthode) :

Cette méthode peut être considérée, d'un certain point de vue, comme une simulation du principe de HUYGENS appliquée au phénomène de propagation guidée, elle est destinée à augmenter la précision, à diminuer le temps de calcul et à simplifier sa mise en œuvre de façon à pouvoir utiliser de manière plus efficace les moyens informatiques disponibles.

II.10.principe de fonctionnement d'antenne patch :

Dans son fonctionnement usuel, une antenne imprimée sur substrat diélectrique peut être considérée en première approximation comme une cavité résonante imparfaite, présentant des murs magnétiques verticaux à pertes et des murs électriques horizontaux. Pour des fréquences appelées 'de résonance', cette cavité emmagasine de l'énergie électromagnétique selon un ensemble de modes de type TM_{mn} . Le rayonnement résultant de cette structure se traduit par des pertes qui s'opèrent au niveau des murs magnétiques. Une partie du signal émis est réfléchi par le plan de masse, puis par le conducteur supérieur et ainsi de suite. La forme et l'orientation des lignes de champs entre les bords de la plaque rayonnante et le plan de masse caractérisent les directions privilégiées du champ rayonné. En général, le mode fondamentale est considéré comme étant le mode de fonctionnement de ce type d'antennes. Ce mode emporte le maximum d'énergie et se caractérise par une répartition du champ électrique en dessous de l'élément rayonnant dont une dimension au moins est égale à une demi-longueur d'onde (figureII.7).

Les courants surfaciques qui sont produits sur l'élément métallique sont dirigés selon l'axe de symétrie passant par le point d'excitation [24].

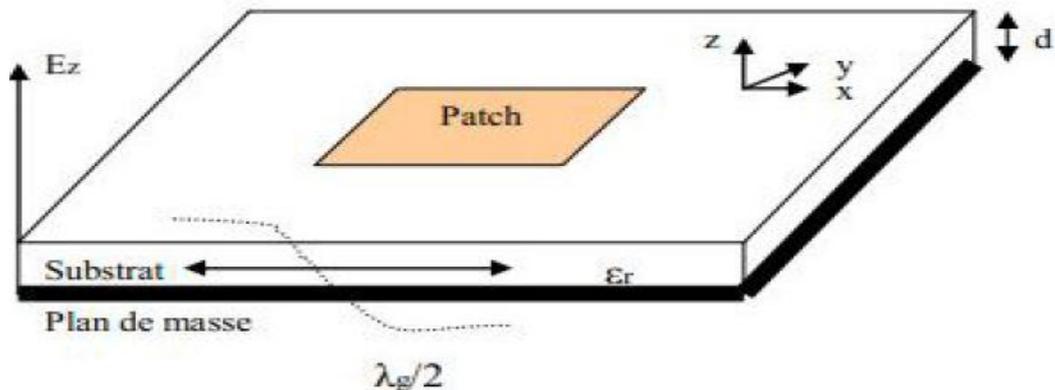


Figure II.7: Antenne imprimée fonctionnant sur son mode fondamental.

II.11. Caractéristiques des antennes patch :

II.11.1. Mécanisme de rayonnement d'antenne patch rectangulaire :

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 (fréquence radio), 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) [17].

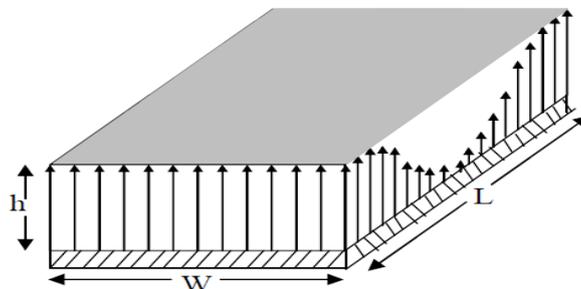


Figure II.8: Distribution du champ électrique vertical.

II.11.2. La bande passante :

Chapitre II : Les antennes imprimées

La bande passante d'une antenne patch est définie comme la gamme de fréquence pour laquelle le patch est adapté à sa ligne d'alimentation, elle est relativement faible. Pour accroître la bande passante il est possible d'augmenter l'épaisseur du substrat. Elle est donnée par la relation :

$$BP(\%) = [(fr2-fr1)/fr1]*100. \quad (II.1)$$

Avec fr la fréquence à la résonance, $fr1$ et $fr2$ les deux fréquences minimale et maximale.

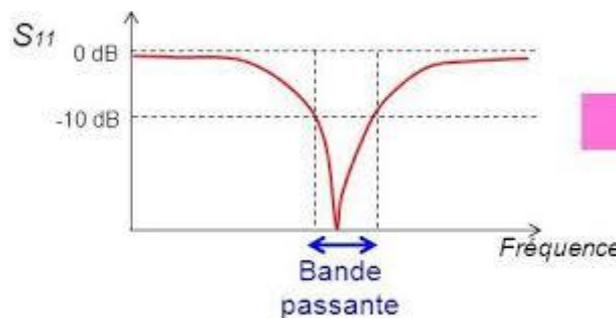


Figure II.9: Une illustration de la bande passante à -10 dB.

La bande passante ΔF , pour une certaine valeur du rapport d'onde stationnaire S à l'entrée de l'antenne, est donnée par :

$$\frac{\Delta F}{F_{res}} = \frac{S-1}{Q\sqrt{S}} \quad (II.2)$$

Q : étant le facteur de qualité

Pour augmenter la bande passante d'une antenne, il faut diminuer Q et donc augmenter les pertes, ce qui, dans certains cas, entraîne une diminution de l'efficacité.

Par ailleurs, il faut aussi noter que lorsque l'on diminue le volume utile de l'antenne, on augmente son facteur de qualité et la bande passante devient alors plus faible. Les bandes passantes des antennes de géométrie simple sont de l'ordre de 0,5 à 5 % [25].

II.11.3.L'impédance d'entrée d'antenne patch :

C'est l'impédance vu dans le plan de la ligne d'alimentation au niveau du connecteur SMA/N (Adaptateur SMA-Mâle vers N-Femelle) [26]. Elle est assez difficile à calculer et de nombreuses formules approchées existent pour l'évaluer. L'impédance d'entrée dépend de plusieurs paramètres, tels que la constante diélectrique, l'épaisseur et la largeur du substrat, ainsi que de la position du point d'alimentation.

Chapitre II : Les antennes imprimées

Les équations ci-dessous permettent de déterminer approximativement la résistance d'entrée d'une antenne patch rectangulaire.

$$R_{in} = \frac{1}{G_1} \quad (\text{II.3})$$

$$\text{Si } \frac{W}{\lambda_0} \ll 1 \quad G_1 = \frac{W^2}{90\lambda_0^2} \quad (\text{II.4})$$

$$\text{Si } \frac{W}{\lambda_0} \gg 1 \quad G_1 = \frac{W^2}{120\lambda_0^2} \quad (\text{II.5})$$

II.12. Calcul des paramètres du patch :

Etape1_ Calcul de la largeur W de l'antenne patch :

$$w = \frac{c}{2f_0 \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}}} \quad (\text{II.6})$$

Etape2_ Calcul de la constant diélectrique effective ϵ_{eff} :

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} (1 + 12h/w)^{-1/2} \quad (\text{II.7})$$

Etape3_ Calcul de la longueur effective L_{eff} :

$$L_{eff} = \frac{c}{2f_0 \sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (\text{II.8})$$

Etape4_ Calcul de l'extension de largeur du patch ΔL :

$$\Delta L = 0.412h \frac{(\epsilon_{eff} + 0.3) \left(\frac{w}{h} + 0.264\right)}{(\epsilon_{eff} - 0.258) \left(\frac{w}{h} + 0.8\right)} \quad (\text{II.9})$$

Etape5_ Calcul de la longueur du patch L :

$$L = L_{eff} - 2\Delta L \quad (\text{II.10})$$

Avec les paramètres utilisés sont :

f_0 : la fréquence de résonance.

W : la largeur du patch

Chapitre II : Les antennes imprimées

L : la longueur du patch

h : l'épaisseur du substrat

ϵ_r : la permittivité relative du substrat

c : la vitesse de lumière 3×10^8

II.13. Critère de choix du substrat :

Le choix du substrat et de ses dimensions sera très important dans la conception d'une antenne imprimée. En effet, les paramètres d'épaisseur et de constante diélectrique du substrat joueront un rôle important sur les caractéristiques de l'antenne telles que le rayonnement et l'efficacité.

L'épaisseur du substrat utilisé doit être suffisamment élevée, mais plus petite que $0,11 \lambda_0$, λ_0 est la longueur d'onde de la fréquence pour laquelle on conçoit l'antenne. Cette contrainte doit être respectée parce qu'un élément rectangulaire ne pourra pas entrer en résonance. En plus de rendre notre antenne plus robuste, l'épaisseur du diélectrique va augmenter la puissance de rayonnement et améliorer la plage d'impédance de l'antenne, ce qui veut dire que l'impédance d'une antenne conçue avec un substrat épais va varier moins rapidement lorsque la fréquence change que dans le cas où l'on utilise un substrat mince. Cette caractéristique nous permet donc de concevoir des antennes plus puissantes, mais aussi pouvant tolérer une plage de fréquence beaucoup plus élevée.

L'autre caractéristique importante, est le constant diélectrique de ce substrat. Un constant diélectrique faible va permettre d'augmenter la puissance de rayonnement de l'antenne, donc une constante faible va être préférée. Cependant, un constant diélectrique plus faible nécessite des éléments de rayonnement ayant une taille plus grande. En général, les substrats ayant un constant diélectrique de $\epsilon_r < 2.5$ sont préférés.

II.14. Les matériaux diélectriques utilisés :

Le substrat joue un rôle double dans la technologie microbande. Il est à la fois un matériau diélectrique, où viennent se graver les circuits, et une pièce mécanique, car il supporte la structure. Cela implique des exigences à la fois sur le plan mécanique et électrique parfois difficiles à concilier, d'épaisseur généralement faible devant la longueur d'onde de fonctionnement ($h \ll \lambda_0$).

Chapitre II : Les antennes imprimées

Le substrat diélectrique affecte le comportement et les performances électromagnétiques de l'antenne. On préfère souvent utiliser des substrats à faibles pertes diélectriques ($\tan\delta < 1000$) qui favorisent le rendement de l'antenne et ceux à permittivité relative faible ($\epsilon_r < 3$) qui améliorent le rayonnement tout en diminuant les pertes par ondes de surface pour une hauteur donnée. Dans une liste loin d'être exhaustive, nous présentons les principales catégories de matériaux diélectriques utilisés [27].

II.14.1. Les matériaux ferromagnétiques :

Ces matériaux comprennent les substrats ferrites. L'effet gyromagnétique est mis à profit pour concevoir des circulateurs, des isolateurs ou encore des antennes plaquées rayonnant naturellement une onde en polarisation circulaire. Ce sont des matériaux anisotropes à forte permittivité relative (de 9 à 16) et à faibles pertes diélectriques.

II.14.2. Les matériaux céramiques :

Couramment employés pour les circuits micro rubans, dont le plus répandu est sans doute l'alumine (Al_2O_3) avec une permittivité relative autour de 10. D'un point de vue mécanique, ces substrats disposent généralement d'excellentes qualités de surface et de rigidité mais ils sont très fragiles. Leurs permittivités, dans la plupart des cas, sont élevées et ils présentent des faibles pertes ($\tan\delta = 0.001$).

II.14.3. Les matériaux semi-conducteurs :

Du type Arséniure de Gallium (GaAs) ou Silicium (Si). La surface disponible, généralement réduite pour réaliser des antennes destinées à des applications dans le domaine millimétrique.

II.14.4. Les matériaux synthétiques :

La plupart de ces matériaux possèdent d'excellentes propriétés électriques, une permittivité proche de 2 avec des pertes faibles ($\tan\delta \approx 0,003$). Cependant, les pertes deviennent vite importantes lorsque l'on monte en fréquence ($\tan\delta > 0,01$ à 26.5 GHz).

Chapitre II : Les antennes imprimées

Un exemple de ces matériaux : le polyéthylène, le polyester, le téflon, le polypropylène,

II.14.5. Les matériaux TMM (Thermoset Microwave Material) :

Ces matériaux constitués de résines chargées de différents composants céramiques de faibles pertes ($\tan \delta < 0.0018$) pour des permittivités respectivement égales à 3.25, 4.5, 6.5, 9.8. Rigides et moins cassants que les céramiques, ils conservent leurs dimensions et leurs permittivités à des températures élevées.

II.14.6. Les matériaux photoniques :

Depuis le début des années soixante, un nouveau type de matériaux, les cristaux photoniques (matériaux à permittivité périodique) font l'objet d'une grande effervescence dans le monde scientifique. Or, la grande majorité des recherches portant sur ces matériaux ont été effectuées par des physiciens dans le cadre d'études de dispositifs optiques. Actuellement, les chercheurs s'intéressent à une application dans le domaine des microondes. Il s'agit de concevoir une antenne imprimée sur une cavité à base des matériaux photoniques, ces derniers peuvent réduire les ondes de surface.

II.15. Les matériaux à base de l'époxy :

II.15.1. Description :

FR-4 est un stratifié industriel thermodurcissable constitué d'un matériau en tissu de verre à filament continu. Avec un liant de résine époxy. Il a des caractéristiques de haute résistance, d'excellentes propriétés électriques et chimiques non seulement à température ambiante, mais également dans des conditions humides ou humides.

II.15.2. Spécification :

Matière : Fibre de verre FR4.

Couleur : Jaune, il peut avoir différent.

Forme : Feuille.

Longueur : 300mm / 11.8 ".

Chapitre II : Les antennes imprimées

Largeur : 150mm / 5.9 "

Epaisseur : 0.8mm, 1.6mm.

II.15.3.Caractéristiques :

- Il s'agit d'un stratifié très résistant, ignifuge, à haute pression, de résine époxy et de tissu de verre tissé.
- Idéal pour construire de nombreuses pièces sur vos modèles, tels que cornes de surface de contrôle, servo-plateaux, autogiro. Des plaques de rotor et de nombreuses pièces de renforcement générales.

II.15.4.Emballage inclut :

1 x Feuille de fibre de verre.

La figure suivante présente deux plaques d'époxy avec deux épaisseurs différentes.

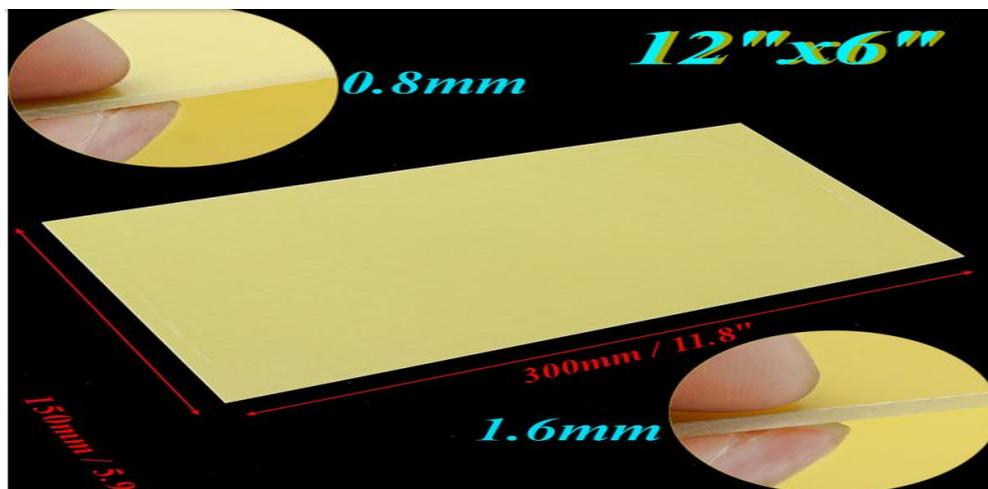


Figure II.10: Deux plaques d'époxy avec deux épaisseurs différentes [28].

II.16.Les propriétés des substrats diélectriques utilisés dans la fabrication des antennes imprimées :

II.16.1.Permittivité :

Chapitre II : Les antennes imprimées

La permittivité est la propriété définie comme la quantité de charges électriques pouvant être emmagasinées dans un volume donné. L'unité de la permittivité est le Farad/mètre (F/m). La permittivité du vide est noté ϵ_0 , sa valeur est de 8.854×10^{-12} F/m.

Les matériaux autres que le vide ont des valeurs de permittivités absolues ϵ plus grandes que ϵ_0 , et sont toujours référencées à la permittivité relative, notée :

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad (\text{II.11})$$

Les constantes diélectriques sont fonction de la fréquence et il est important de caractériser un substrat sur une gamme de fréquence. Pour tenir compte des effets de bords des champs électromagnétiques, la permittivité des substrats diélectriques est remplacée par une permittivité effective ϵ_{eff} .

Idéalement, les matériaux diélectriques avec de faibles tangentes de pertes sont préférés pour avoir un maximum d'efficacité de rayonnement de l'antenne. Cependant il y a toujours des pertes associées au diélectrique, que l'on exprime par l'apparition d'une partie imaginaire dans l'expression de la permittivité.

La permittivité d'un diélectrique est donc en général complexe et s'écrit :

$$\epsilon = \epsilon' + j\epsilon'' \quad (\text{II.12})$$

Où ϵ' est la partie réelle de la permittivité (constante diélectrique) et ϵ'' est la partie imaginaire de la permittivité représentant les pertes [29].

II.16.2. Tangente de pertes $\tan \delta$:

Pour quantifier les pertes diélectriques d'un matériau, un autre terme connu sous le nom de tangente de pertes ($\tan \delta$) est aussi utilisé, et reste le plus répandu auprès des fabricants de substrats. Les tangentes de pertes caractérisent la quantité de puissance convertie en chaleur dans le matériau. Elles sont données comme le rapport entre la partie imaginaire ϵ'' et la partie réelle ϵ' de la permittivité :

$$\tan \delta = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} \quad (\text{II.13})$$

Plus la tangente de perte est élevée, plus le diélectrique sera avec perte. Des pertes élevées donnent une réduction de l'efficacité du rayonnement. Dans notre étude, seuls les matériaux à faible tangente de perte seront considérés. On prend un substrat époxy FR4 dont les pertes sont de 0,02.

II.17.L'influence de différents paramètres sur l'efficacité de l'antenne patch :

II.17.1.l'effet de l'épaisseur de patch :

La fréquence de résonance est inversement proportionnelle à l'épaisseur du patch. Par contre, la bande passante est directement proportionnelle à l'épaisseur du patch **H**.

La largeur du patch a un effet mineur sur les fréquences de résonance donc de l'antenne par rapport la longueur et l'épaisseur du patch.

Et on a conclu que la fréquence de résonance est inversement proportionnelle à ces paramètres (longueur **L**, largeur **W** et l'épaisseur **H** du patch).

Nous l'avons démontré après le changement de largeur **W** et de longueur **L** du patch par rapport à la permittivité.

II.17.2.Influence de la constante diélectrique du substrat :

La permittivité diélectrique du substrat est l'un des paramètres les plus sensibles dans l'évaluation de l'antenne car la petite variation de la permittivité peut décaler la fréquence de résonance. Précisons bien que les matériaux ayant un constant diélectrique plus faible permettent d'obtenir une bande passante plus large et par la suite on aura une antenne plus efficace [30].

L'efficacité est une fonction décroissante de la permittivité.

II.18.Antenne reconfigurable :

La reconfiguration des antennes souligne la nécessité d'utiliser des antennes offrant plus de fonctionnalités que ne le permettent les conceptions conventionnelles. Les antennes reconfigurables apparaissent donc comme une solution attractive pour offrir une solution technique innovante aux systèmes de télécommunications modernes [31].

Les antennes reconfigurables sont très intéressantes car leur fonctionnement peut être modifié dynamiquement, ce qui peut être très avantageux pour plusieurs applications. De plus, la reconfiguration permet à l'antenne d'offrir plus de fonctionnalités [32].

II.18.1.Conception des antennes reconfigurables et problèmes associés :

Chapitre II : Les antennes imprimées

Les antennes reconfigurables offrent par définition la possibilité d'un changement de polarisation, de fréquence de fonctionnement ou de diagramme de rayonnement. Ceci permet une adaptation face aux changements des paramètres d'un système de télécommunications [33], [34]. En effet, une antenne classique est figée et ne peut fonctionner qu'aux fréquences pour lesquelles elle a été conçue à l'origine. Dans le cas d'une antenne reconfigurable, il est envisageable de pouvoir accorder sa fréquence de fonctionnement à un standard qui n'existait pas ou n'avait pas été pris en compte lors de la création de la dite antenne, cela permet notamment d'accéder à de nouveaux standards [35].

Avant de rentrer dans le détail de la conception d'une antenne reconfigurable, il est important de noter qu'il n'y a pas une, mais plusieurs méthodes de conception d'une telle antenne. Dans la suite de ce chapitre on se contentera d'utiliser la "méthode pochoir" présentée au troisième chapitre. Cependant, il est intéressant d'évoquer de manière plus largement les problématiques liées aux antennes reconfigurables avant de détailler plus avant la solution choisie dans les travaux présentés ici.

Tout d'abord, d'un point de vue conception, on peut commencer par rechercher une géométrie d'antenne adaptée aux contraintes de l'application visée (dimensions, robustesse, fréquence, etc...) et qui autorise à l'ajout de fonctionnalités reconfigurables. Mais le point de départ peut aussi être le composant de base de la structure antennaire. Si ce dernier possède des propriétés intéressantes dans le domaine des radiofréquences, Celles-ci peuvent être mises à profit. C'est le cas par exemple des antennes organiques pour lesquelles la reconfigurabilité est une application quasi naturelle. Enfin, suivant le point de départ est la recherche d'une fonctionnalité précise. Il faut alors associer dès le départ une géométrie et des composants pour essayer d'obtenir un comportement bien précis. On a donc une opposition entre deux démarches. La première dite "bottom-up" qui consiste à choisir des composants (respectivement une antenne), puis une antenne (respectivement des composants) se traduira par l'obtention de certaines fonctionnalités et au contraire une démarche "top-down" où l'on s'impose une fonctionnalité précise que l'on essaie d'obtenir en choisissant la structure d'antennes (géométrie et composants).

Ces deux situations sont illustrées par le schéma de la **Figure II.11** [35].

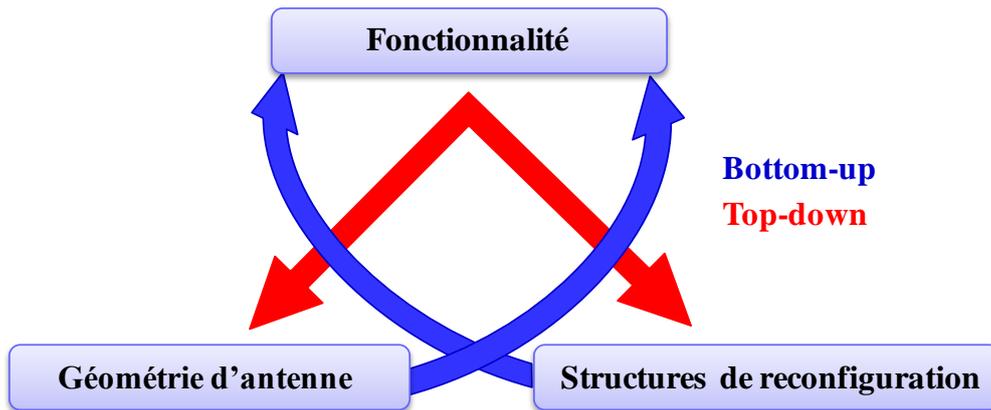


Figure II.11: Conception top-down ou bottom-up d'une antenne reconfigurable.

Nous allons, dans ce travail, présenter des antennes monopoles qui sont communément utilisées. Ces antennes ont été classées selon certaines propriétés : particularités géométriques ou spécificité du diagramme de rayonnement (antenne omnidirectionnel). Toutes ces antennes possèdent naturellement une bande passante assez élevée. Cette partie s'articule autour du design et du comportement des antennes reconfigurables. Nous traitons les antennes dont la reconfiguration est liée à des propriétés mécaniques.

Il existe plusieurs configurations mécaniques, pour modifier les propriétés électromagnétiques d'une antenne. La première concerne la déformation mécanique de l'élément rayonnant [36], [37], soit par commande manuelle, comme en **Figure II.12**, soit par commande électrique comme dans le cas de l'antenne MEMS proposée en **Figure II.13**.

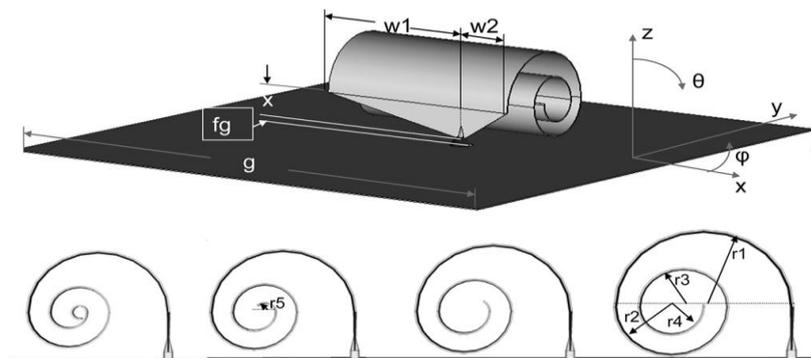


Figure II.12: Géométrie d'une antenne monopole reconfigurable basée sur un élément à enroulement.

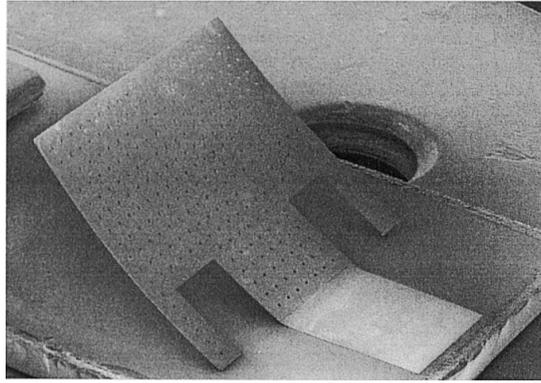


Figure II.13: Photographie d'une antenne MEMS micro ruban reconfigurable.

Une autre possibilité concerne l'utilisation de substrats flexibles dont les caractéristiques mécaniques sont accordables et qui permettent de passer d'un état à autre voir

Figure II.14 [38].

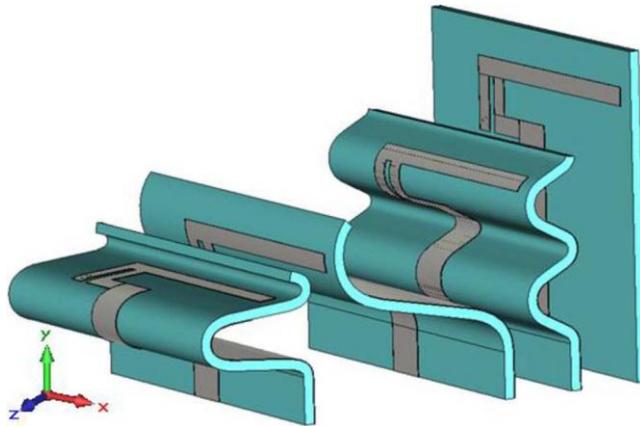


Figure II.14: Géométrie d'une antenne reconfigurable basée sur un substrat flexible.

La plupart des systèmes sans fils d'aujourd'hui comportent plusieurs antennes pour assumer les différents standards de communications qui existent. Cependant, il n'est pas recommandable d'avoir différentes antennes dans un système. L'espace disponible déjà limité devrait encore être partagé entre plusieurs antennes, ceci causerait un problème d'encombrement. L'utilisation d'antennes reconfigurables offre donc en particulier une meilleure exploitation d'espace.

Parmi les matériaux utilisables comme éléments de rayonnements reconfigurables, nous proposons trouve des polymères conducteurs chargés par les nanotubes de carbone. Les avantages principaux de ces matériaux sont leurs propriétés mécaniques qui impactent directement la flexibilité de l'antenne.

II.19.Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons montré le rôle et l'évolution technologique des antennes imprimées, leur fonctionnement ainsi que leurs avantages et inconvénients. Nous avons évoqué l'influence de certains paramètres sur le fonctionnement et le rendement de ce type d'antennes à savoir ; les constante diélectrique du substrat, le type d'alimentation et le l'épaisseur du patch. Nous avons également mis l'accent sur l'antenne patch et son mécanisme de rayonnement.

Nous avons conclu ce chapitre avec des informations précieuses sur la reconfiguration mécanique des antennes imprimées.

Dans le chapitre suivant nous commencerons par une définition de la méthode des éléments finis, ses avantages et inconvénients. Apres nous présenterons le modèle et les dimensions du drone sur lequel nous allons intégrer notre antenne dans sa structure.

Nous présenterons la conception et la simulation de l'antenne patch sous différentes formes, telles que l'antenne plane, l'antenne conforme (cylindrique) et l'antenne sous forme d'aile et nous exprimerons l'effet des différents paramètres de l'antenne sur son rayonnement.

Nous exprimerons également son comportement dans différentes positions de l'avion, y compris le fuselage et les ailes pour choisir la meilleure position pour installer notre antenne.

Chapitre III : Conception de l'antenne imprimée Calcul, simulation et résultat

III.1.Introduction :

La phase de conception d'une antenne, à l'aide d'un logiciel adapté, est une étape essentielle pour gagner du temps et optimiser la structure aux paramètres souhaités.

La conception permet également de prendre en compte les paramètres diélectriques et conducteurs des matériaux bon marché choisis, qui ne sont pas parfaits, et de nous rapprocher des futures antennes produites. Pour cela, nous devons choisir un outil de simulation électromagnétique adéquat.

Dans ce chapitre nous développerons la phase de conception en présentant le logiciel de simulation électromagnétique et ses différentes étapes, puis une phase de pré-calculs des paramètres d'antenne à concevoir et enfin les résultats de simulation de notre antenne imprimée rectangulaire.

III.2.Objectif :

Notre objectif est de concevoir une antenne imprimée conforme à la forme aérodynamique du drone.

Le but est de construire cette antenne de manière à ce qu'elle s'intègre dans la structure du drone (le fuselage ou les ailes) et ne provoque pas de traînée supplémentaire.

Le but est également que l'intégration de l'antenne rende l'antenne moins dérangeante, moins visible à l'œil humain.

La procédure de fabrication suit les étapes suivantes :

1. Calcul des dimensions de l'antenne.
2. Concevoir l'antenne imprimée.
3. Simulation et vérification des paramètres de l'antenne par le logiciel de simulation électromagnétique.
4. Etape de production finale.

Les projets présentés dans ce mémoire sont simulés par un simulateur électromagnétique.

III.3.La méthode des éléments finis (FEM) :

Le logiciel simulation électromagnétique utilise la méthode des éléments finis (FEM), cette méthode (parfois aussi appelée analyse par éléments finis) est une technique numérique pour trouver des solutions en approximant les équations aux dérivées partielles (EDP), ainsi que les équations intégrales. Il utilise également un maillage adaptatif et de superbes graphismes qui sont prêts pour tous les problèmes électromagnétiques 3D. Il peut être utilisé pour calculer des paramètres tels que la fréquence de résonance et les champs rayonnés.

III.3.1.Avantages et inconvénients de la méthode des éléments finis :

Le tableau suivant présente les principaux avantages et inconvénients de la méthode des éléments finis.

Tableau III.1: Avantages et inconvénients de la méthode des éléments finis (FEM).

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

III.4.Modèle et dimensions du drone :

III.4.1.Définition :

Un UAV (Unmanned Aerial Vehicle) miniature ou un petit UAV (SUAV) [39] est un véhicule aérien suffisamment petit pour être portable.

Les drones miniatures vont des micro-véhicules aériens (MAV) qui peuvent être transportés par un fantassin, aux drones portables qui peuvent être transportés et lancés comme un système de défense aérienne portable d'infanterie. Le terme est généralement appliqué à ceux utilisés à des fins militaires.

III.4.2. Dimensions du drone :

Les figures suivantes montrent l'exemple du drone (sa structure et ses dimensions), sur lequel nous allons intégrer notre antenne dans sa structure (fuselage ou ailes). Cet exemple a été réalisé au niveau du laboratoire de propulsion de l'Institut d'aéronautiques et des études spatiales de l'Université de Saad Dahleb Blida1.

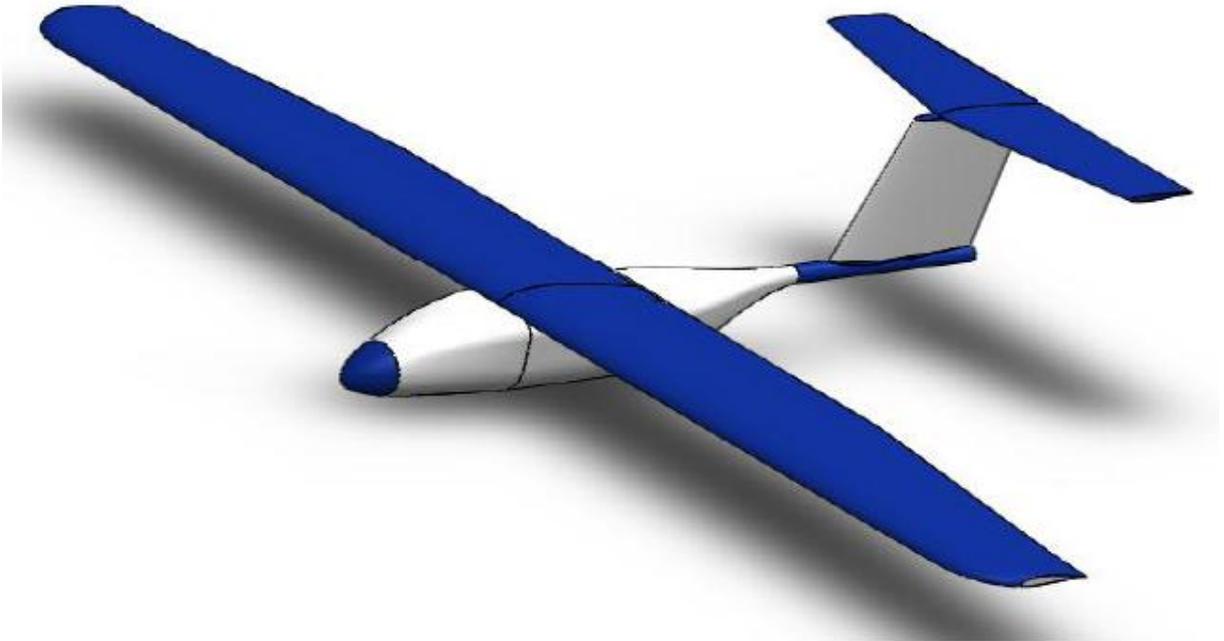


Figure III.1: Modèle entier du drone (UAV).

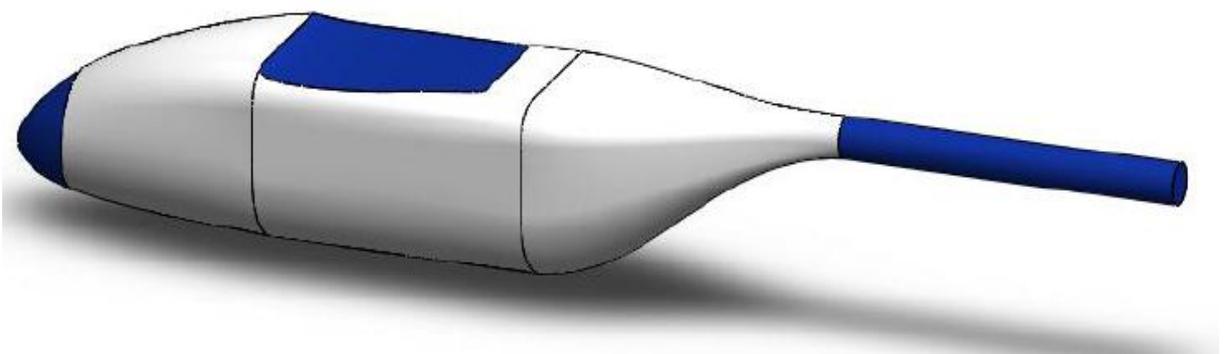


Figure III.2: Configuration du fuselage avec option de séparation de la flèche arrière.

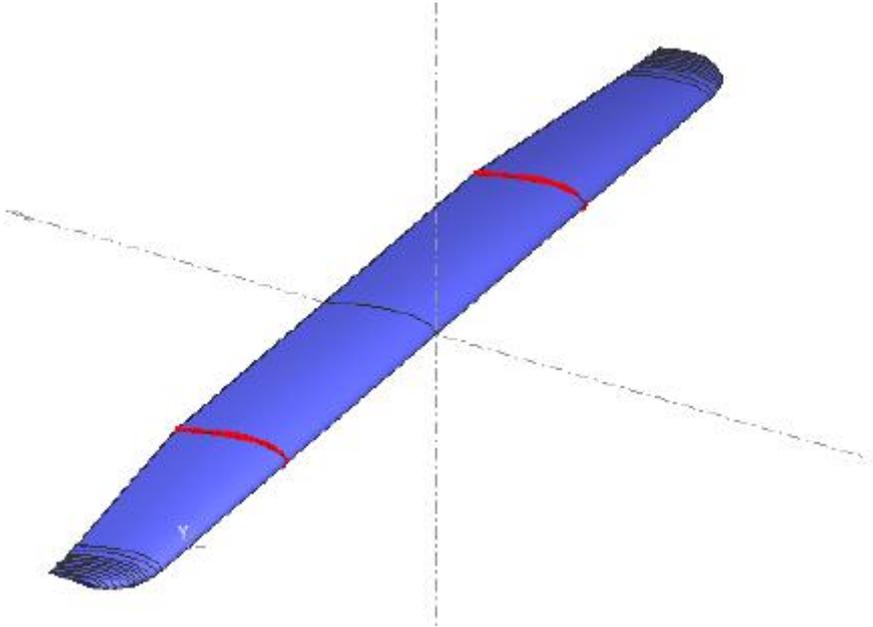


Figure III.3: Dessin de plan d'aile 3D (logiciel XFLR5).

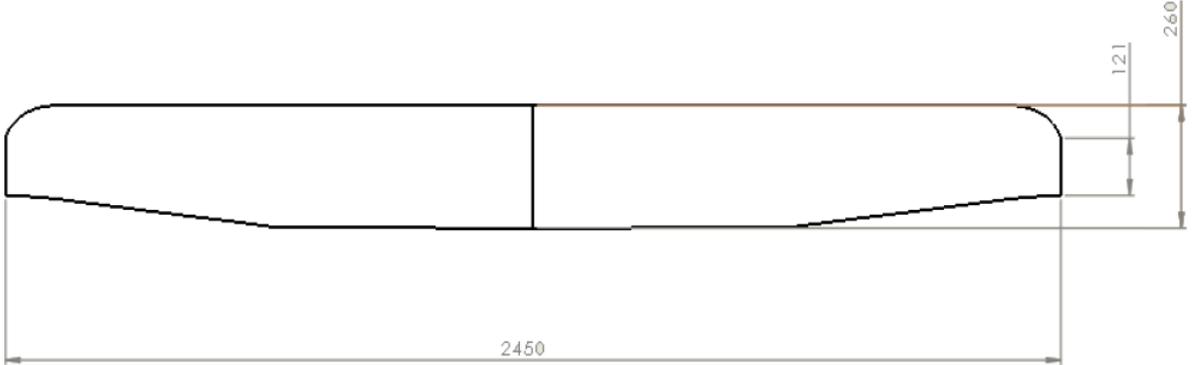


Figure III.4: Dimensions de l'aile.

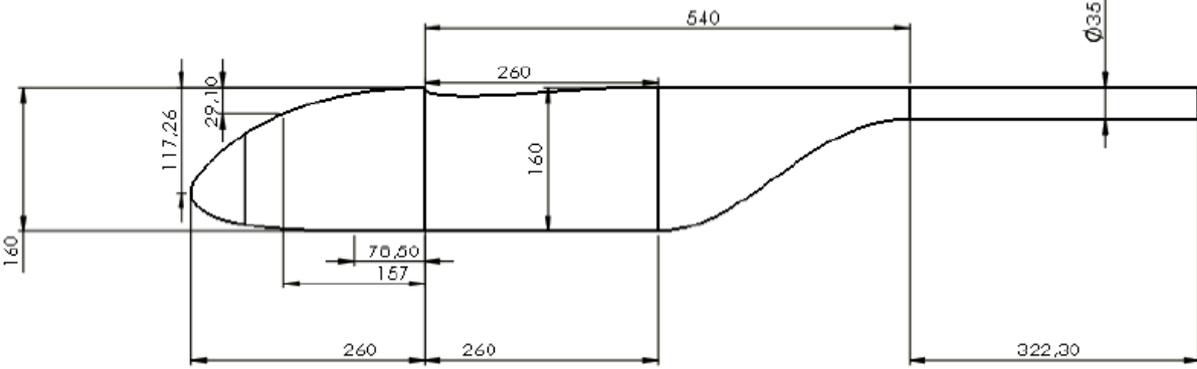


Figure III.5: Dimensions du fuselage.

III.5.Calcul des paramètres de l'antenne imprimée :

La figure suivante présente une vue de dessus de notre antenne.

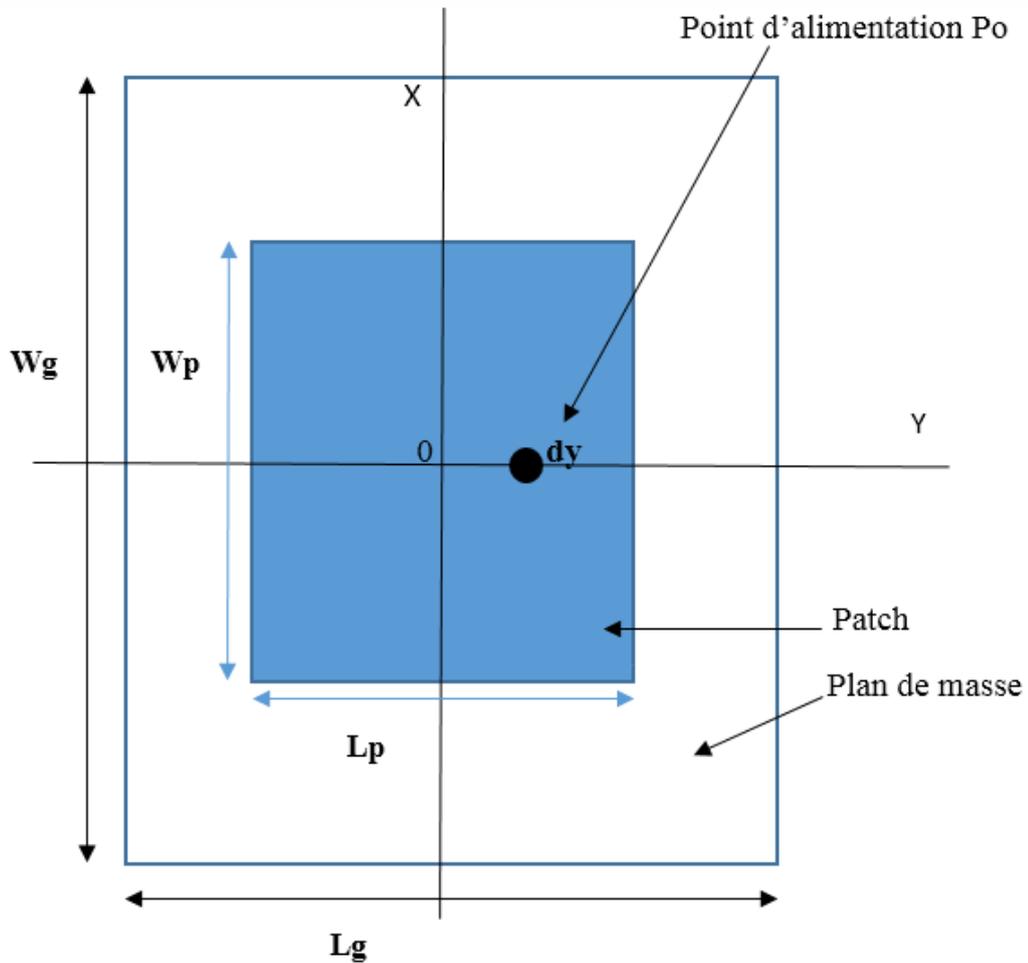


Figure III.6: Vue de dessus de l'antenne patch rectangulaire.

III.5.1. Constante diélectrique du substrat (ϵ_r) :

Le matériau diélectrique utilisé dans notre conception de l'antenne imprimée est de l'époxy FR4 caractérisé par son constant diélectrique (ϵ_r) qui est égale à 4.4 et son tangente de perte ($\tan \delta$) qui est égale à 0.02.

III.5.2. La fréquence de travail (f_0) :

La fréquence de travail de notre étude est égale à 2.4 GHz.

III.5.3. Épaisseur du substrat diélectrique (h) :

L'antenne imprimée a été conçue pour exclure l'antenne conventionnelle car les antennes patch sont utilisées dans la plupart des appareils compacts. Par conséquent, la hauteur de l'antenne a été fixée à 1.5 mm.

III.5.4. La détermination du point d'alimentation :

Comme le type d'alimentation a été spécifié et les paramètres sont calculés. L'impédance d'adaptation est de 50Ω . Afin d'avoir une correspondance de l'impédance, le connecteur doit être placé à une certaine distance du bord qui a une correspondance de 50Ω . Une méthode d'essai et d'erreur a été adoptée pour vérifier la valeur minimale de la perte de rendement. C'est la raison pour laquelle la coordonnée X_f est définie sur zéro et Y_f varie pour avoir le point d'alimentations optimales (il est préférable de choisir l'axe selon la longueur la plus petite).

Les paramètres qui sont décidés par défaut afin de poursuivre le processus de conception sont :

$$\epsilon_r = 4.4$$

$$h = 1.5 \text{ mm}$$

$$f_0 = 2.4 \text{ GHz}$$

Ces paramètres sont été exécutés dans un programme Matlab pour calculer les dimensions géométriques de notre antenne [ANNEXE1] :

Le tableau suivant nous donne les résultats d'exécution.

Tableau III.2: Dimensions géométriques de l'antenne imprimée.

Dimensions d'antenne		
Paramètres calculés	Largeur du plan de masse W_g	100 mm
	Longueur du plan de masse L_g	100 mm
	Largeur du patch W_p	39.5 mm
	Longueur du patch L_p	28.5 mm
	Position du point d'alimentation P_o	6.5 mm

III.6. Conception et simulations de l'antenne imprimée :

Le tableau ci-dessous donne les paramètres utilisés dans le simulateur électromagnétique pour la simulation.

Tableau III.3: Paramètres utilisés dans le simulateur électromagnétique pour la simulation.

Antenne	Patch	Plan de masse	Substrat
Caractéristiques			
Largeur (mm)	39.5	100	100
Longueur (mm)	28.5	100	100
Epaisseur (mm)	0.5	0.5	1.5
Matériel	Cuivre	Cuivre	FR4 époxy
Type d'alimentation	Alimentation par un câble coaxial		
Fréquence de travail (GHz)	f ₀ = 2.4 GHz		
Point d'alimentation Po	Po est situé à 6.5 mm par rapport au centre du patch sur l'axe Y		

III.6.1. Conception de l'antenne imprimée plane :

La structure de l'antenne est illustrée dans la figure suivante. La visualisation 3D permet d'identifier clairement les différents composants, à savoir, l'antenne patch, le câble d'alimentation, la porte d'excitation, le substrat et le volume reflétant les conditions aux bords absorbants.

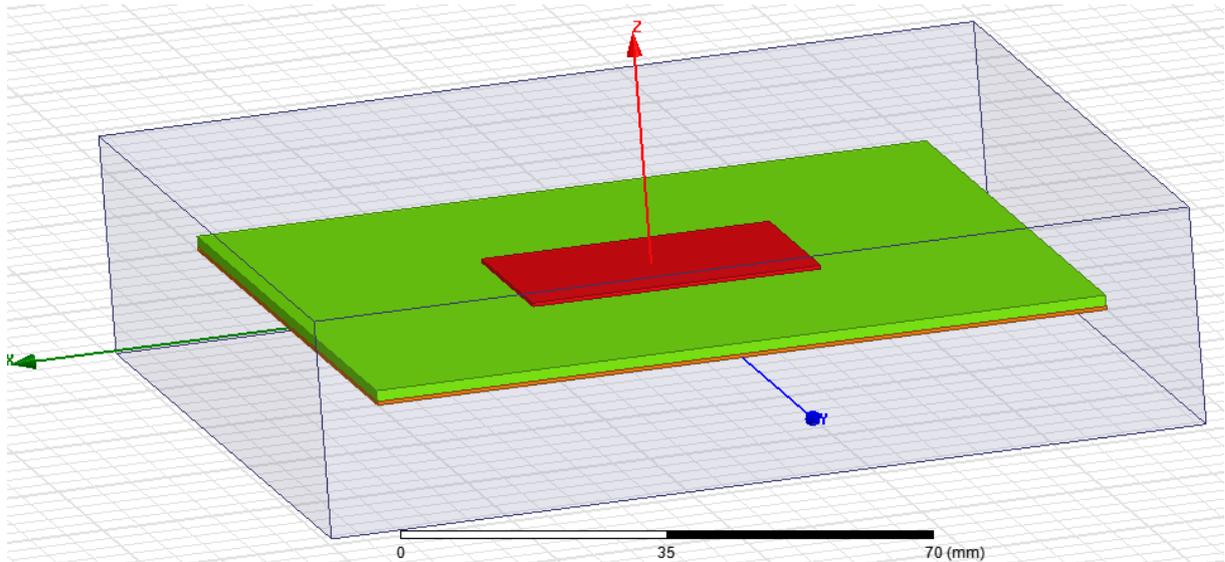


Figure III.7: Structure d'antenne imprimée plane.

III.6.1.1.L'alimentation de l'antenne :

Le type d'alimentation utilisé est l'alimentation par câble coaxial, qui est illustrée dans la figure suivante.

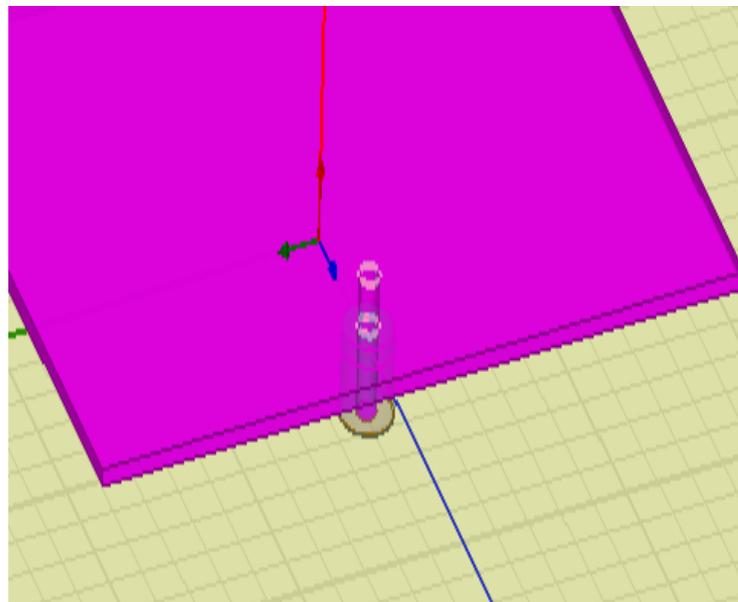


Figure III.8: Antenne imprimée plane alimentée par un câble coaxial.

III.6.1.2. Résultats de simulation :

Les figures III.9, III.10, III.11, III.12, III.13, III.14, présentent les résultats de simulation obtenus.

La figure III.9, présente la variation de coefficient de réflexion S11 des plusieurs points d'alimentation à l'entrée de l'antenne en fonction de la fréquence. Il est remarquable que la valeur minimale de S11 corresponde bien à la fréquence de résonance supposée théoriquement ($f_0=2.4\text{GHz}$).

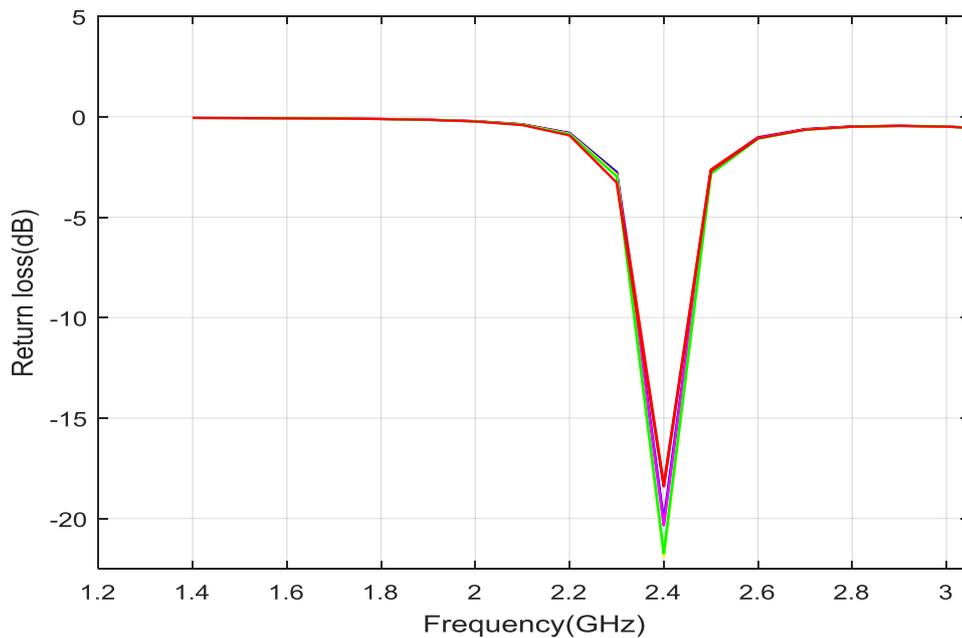


Figure III.9: Coefficient de réflexion en fonction de fréquence.

Pour le point d'alimentation P_0 , on a créé un intervalle qui varie entre les positions suivantes [6.5 mm à 7 mm], avec un pas est égal à 0.1 mm pour étudier son influence sur les paramètres de l'antenne.

Les résultats sont obtenus comme :

Tableau III.4: Variation des positions des points d'alimentation avec les valeurs des coefficients de réflexion et les bandes de fréquences correspondantes.

Coefficient de réflexion (dB)	Position du point d'alimentation P_0 (mm)	Bande passante (GHz)
-18.338	6.5	[2.3631 – 2.4330]
-20.080	6.6	[2.3617 – 2.4359]

-20.343	6.7	[2.3605 – 2.4360]
-21.869	6.8	[2.3595 – 2.4378]
-21.730	6.9	[2.3572 – 2.4351]
-18.406	7	[2.3576 – 2.4330]

La figure suivante représente la variation du rapport d'onde stationnaire à l'entrée de l'antenne en fonction de la fréquence.

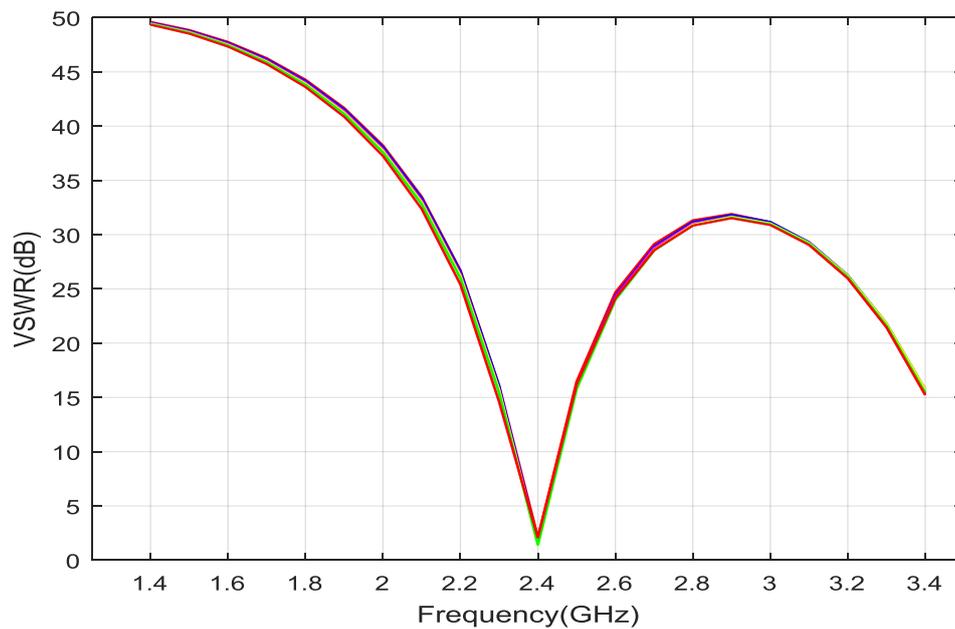


Figure III.10: Rapport d'onde stationnaire en fonction de la fréquence.

La figure III.11 présente le diagramme de rayonnement de l'antenne.

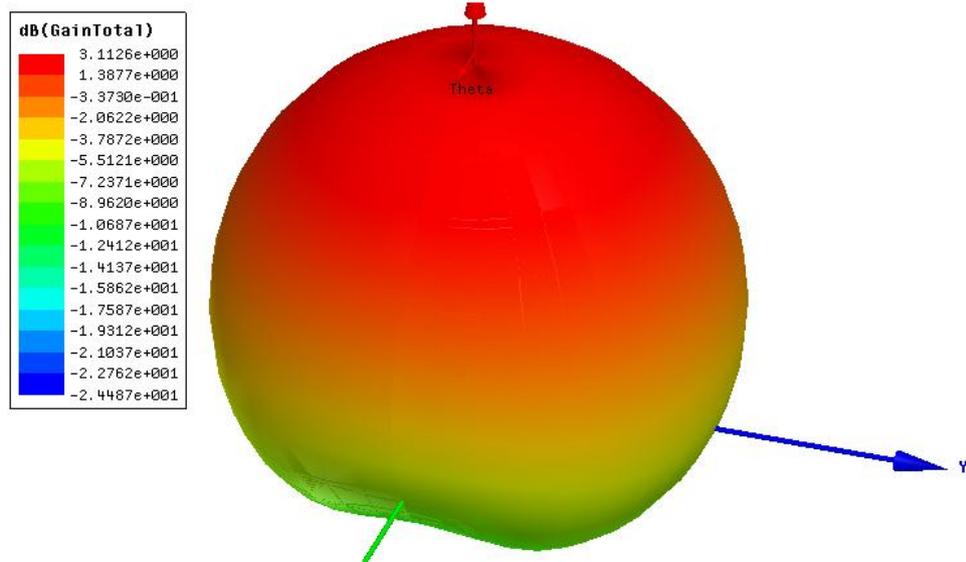


Figure III.11: Diagramme de rayonnement.

L'un des inconvénients de l'antenne patch est qu'elle ne rayonne que dans un demi-plan.

La figure suivante représente le diagramme de rayonnement en 2D.

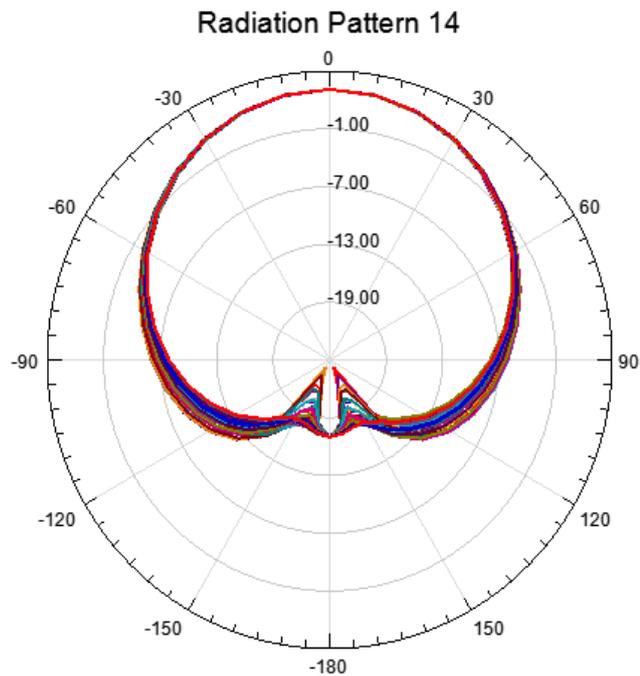


Figure III.12: Diagramme de rayonnement (2D).

III.6.1.3. Répartition des champs électrique E et magnétique H :

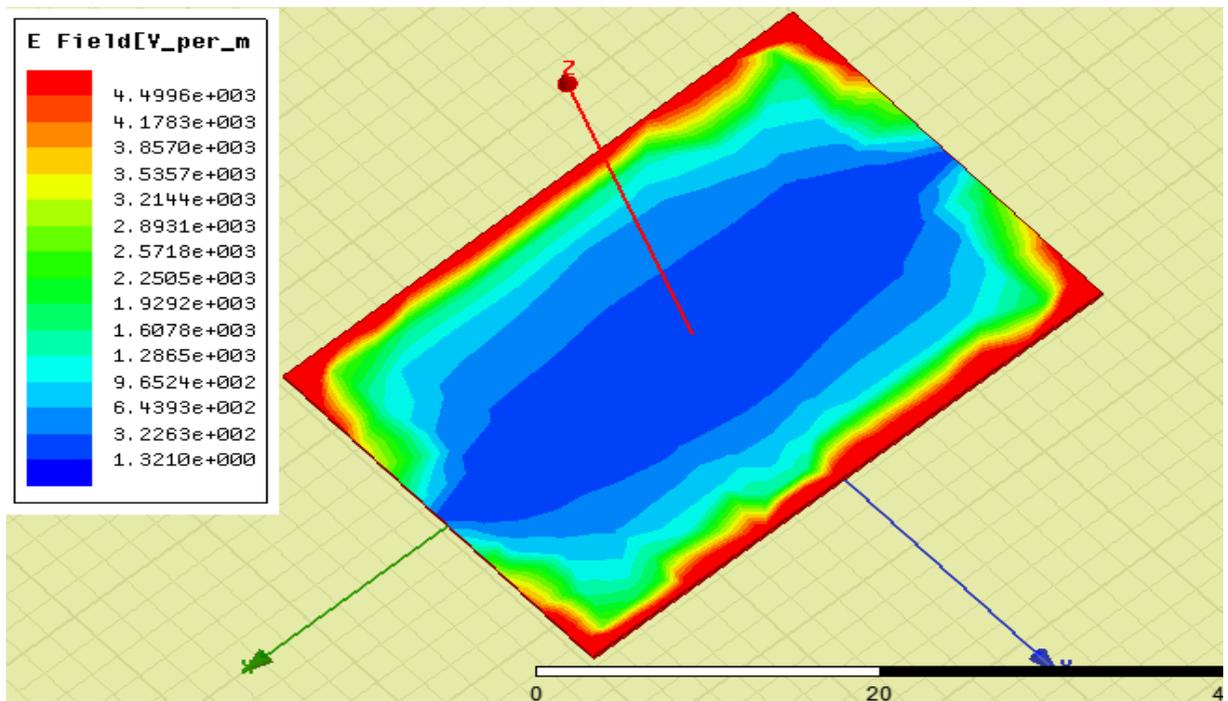


Figure III.13: Répartition du champ électrique E.

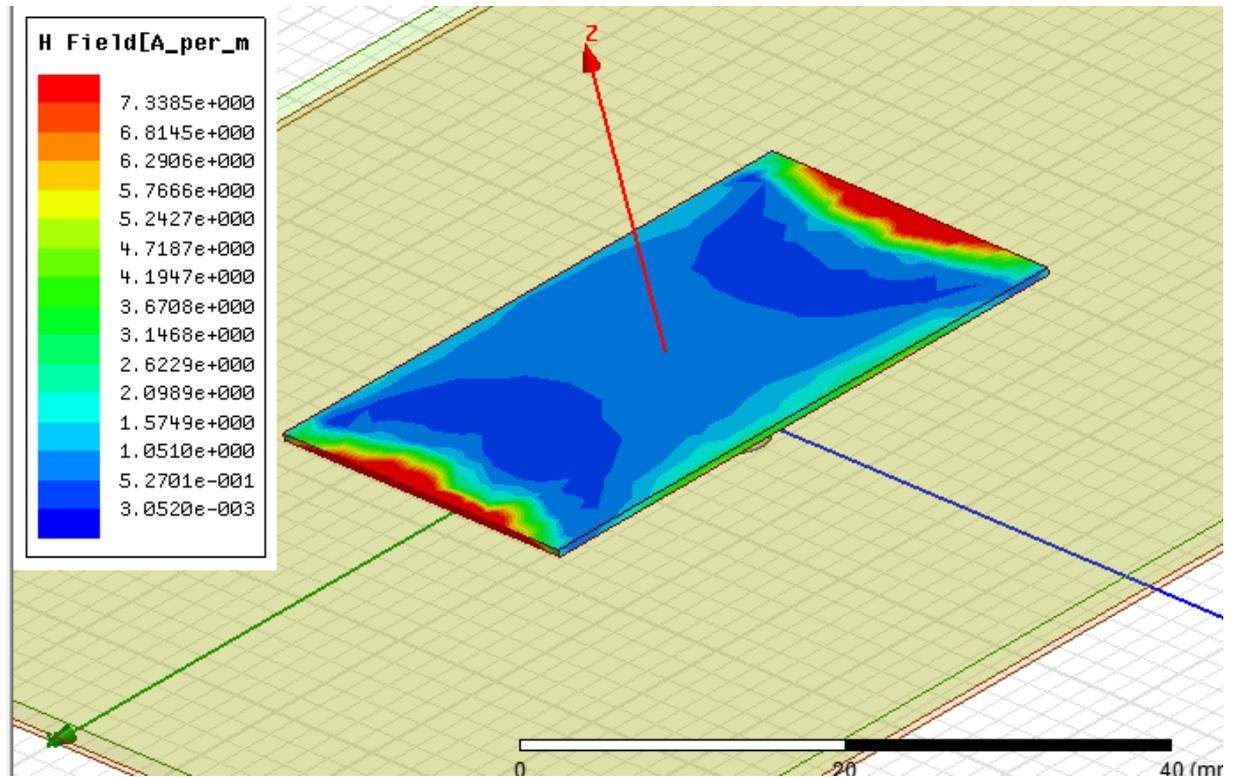


Figure III.14: Répartition du champ magnétique H.

La figure **III.13** présente, le champ électrique en surface et en volume de la structure simulée. Il est notable que le maximum de champ « E » se trouve concentré aux extrémités du patch suivant l'axe Y, ce qui explique le fait que le rayonnement de ce type d'antenne s'effectue principalement par ses bords.

De même que précédemment, La figure **III.14** présente, le champ magnétique en surface et en volume de la structure simulée. Le maximum du champ « H » se trouve concentré sur les bords du patch. Suivant l'axe X.

Après avoir la simulation de l'antenne imprimée plane. Et comme dans la pratique de la réalisation du drone dont elle est basée sur la méthode d'insérer de couche par couche pour avoir une épaisseur du substrat qui égale à 1.5mm, et puisque notre antenne est proposée pour être installée dans la structure de ce drone, nous passant maintenant à la conception de l'antenne imprimée plane avec six couches diélectriques.

III.6.2. Conception de l'antenne imprimée plane avec six sous-couches diélectriques (substrat) modèle de sandwich :

La structure de l'antenne est présentée dans la figure suivante.

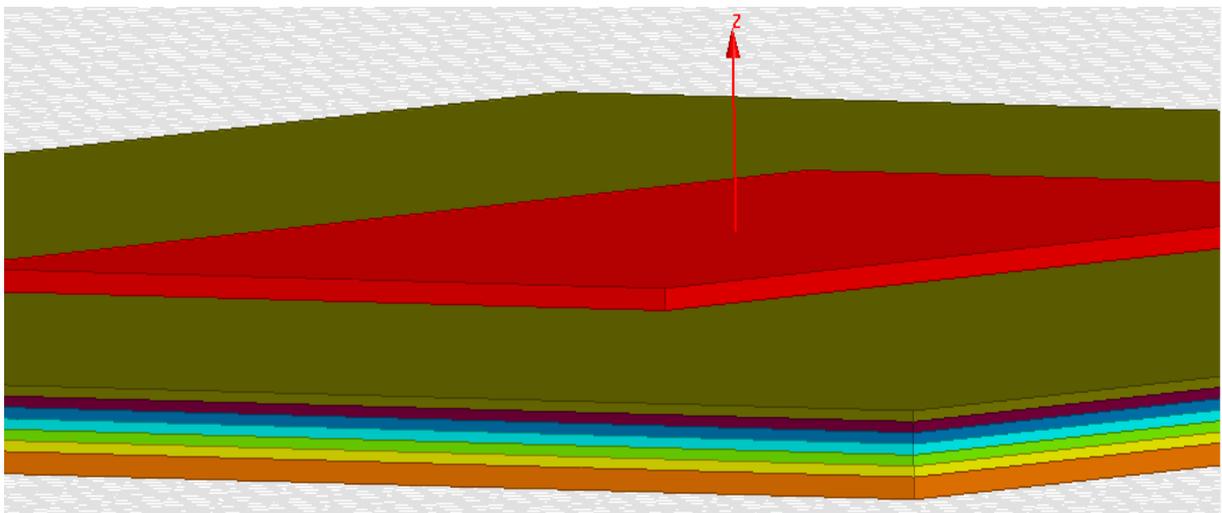


Figure III.15: Structure d'antenne imprimée plane avec six sous-couches diélectriques.

III.6.2.1. L'alimentation de l'antenne :

Le type d'alimentation utilisé est l'alimentation par câble coaxial, qui est illustrée dans la figure suivante.

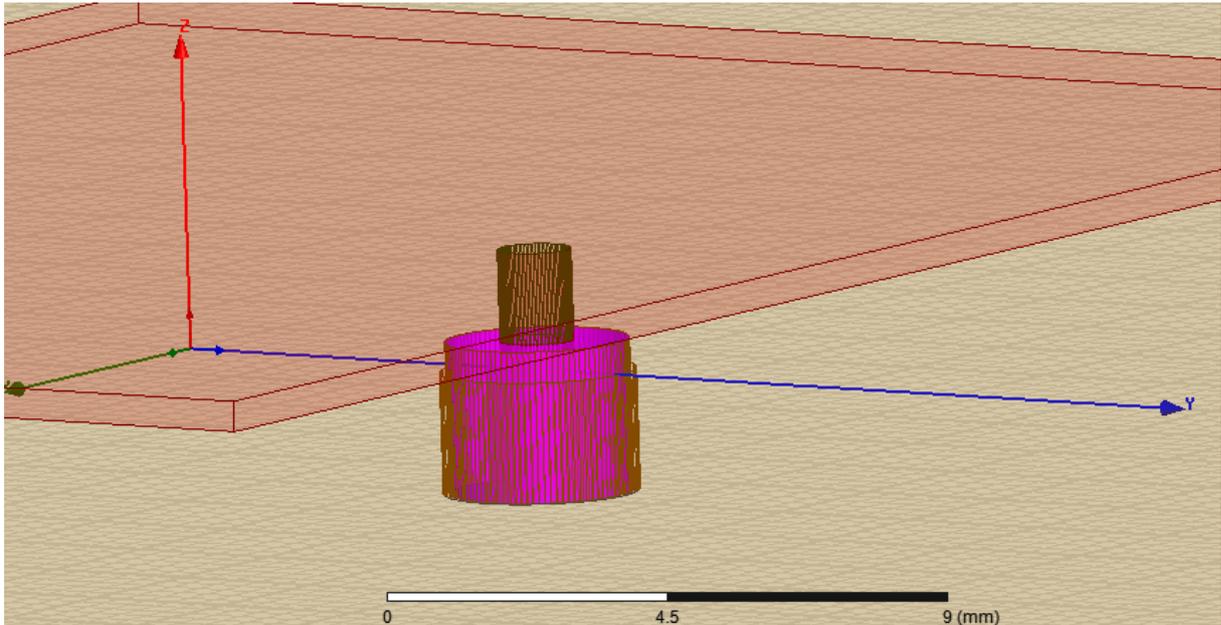


Figure III.16: Antenne imprimée plane avec six sous-couches diélectriques alimentées par un câble coaxial.

III.6.2.2. Résultats de simulation :

Les figures III.17, III.18, III.19, III.20, III.21, III.22, présentent les résultats de simulation obtenus.

La figure III.17, présente la variation de coefficient de réflexion des plusieurs points d'alimentation à l'entrée de l'antenne en fonction de la fréquence. Il est remarquable que la valeur minimale de coefficient de réflexion corresponde bien à la fréquence de résonance supposée théoriquement ($f_0=2.4$ GHz).

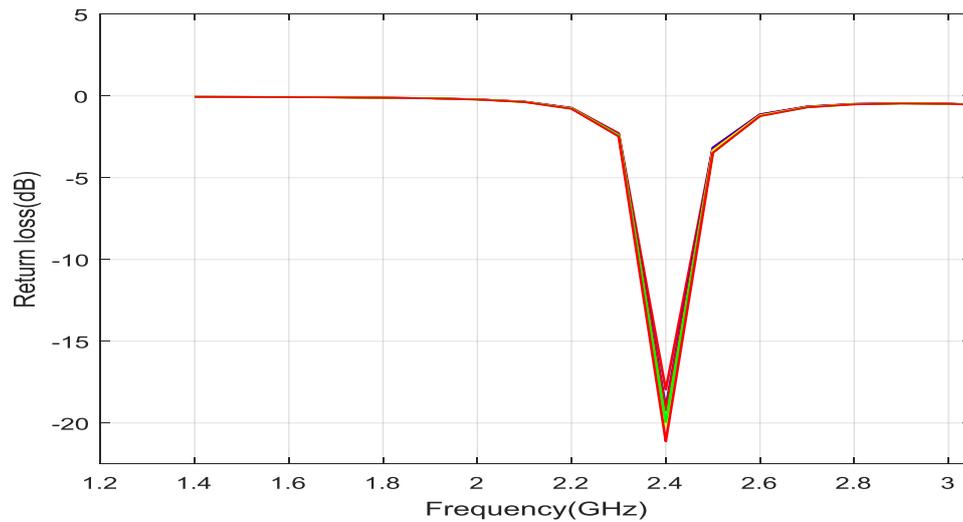


Figure III.17: Coefficient de réflexion en fonction de fréquence.

Pour le point d'alimentation P_o , on a créé un intervalle qui varie entre les positions suivantes [6.5 mm à 7 mm], avec un pas est égal à 0.1 mm pour étudier son influence sur les paramètres de l'antenne.

Les résultats sont obtenus comme :

Tableau III.5: Variation des positions des points d'alimentation avec les valeurs des coefficients de réflexion et les bandes passante correspondantes.

Coefficient de réflexion (dB)	Position du point d'alimentation P_o (mm)	Bande passante (GHz)
-17.960	6.5	[2.3400 – 2.4500]
-19.036	6.6	[2.3460 – 2.4568]
-19.230	6.7	[2.3460 – 2.4574]
-20.124	6.8	[2.3423 – 2.4605]
-19.956	6.9	[2.3421 – 2.4604]
-21.120	7	[2.3402 – 2.4629]

La figure suivante représente la variation du rapport d'onde stationnaire à l'entrée de l'antenne en fonction de la fréquence.

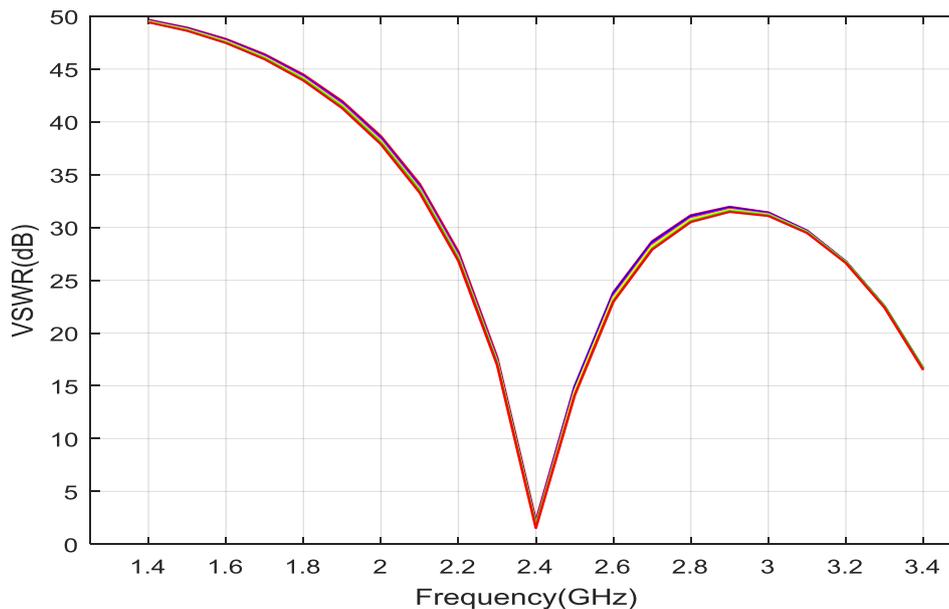


Figure III.18: Rapport d'onde stationnaire en fonction de la fréquence.

La figure III.19 présente le diagramme de rayonnement de l'antenne.

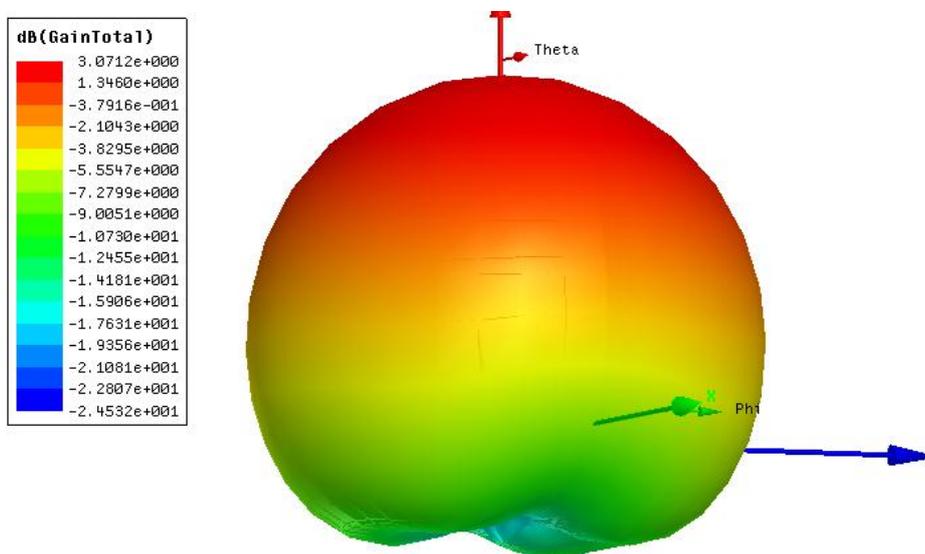


Figure III.19: Diagramme de rayonnement.

La figure suivante représente le diagramme de rayonnement en 2D.

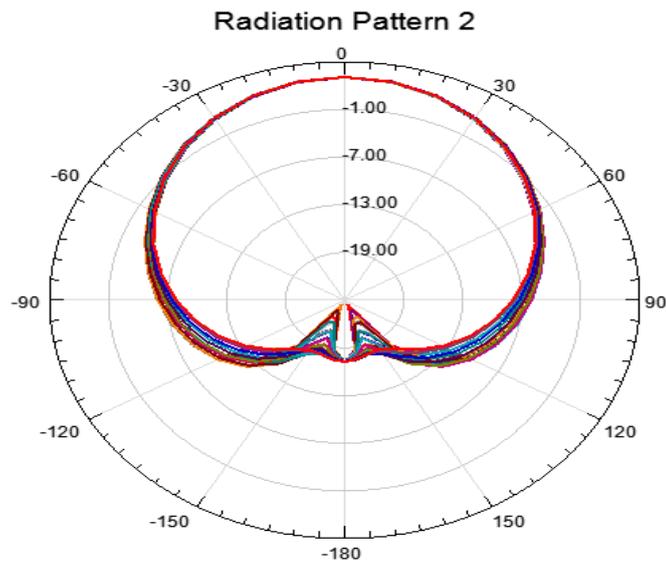


Figure III.20: Diagramme de rayonnement en 2D.

III.6.2.3. Répartition des champs électrique E et magnétique H :

La figure suivante présente la répartition du champ électrique E.

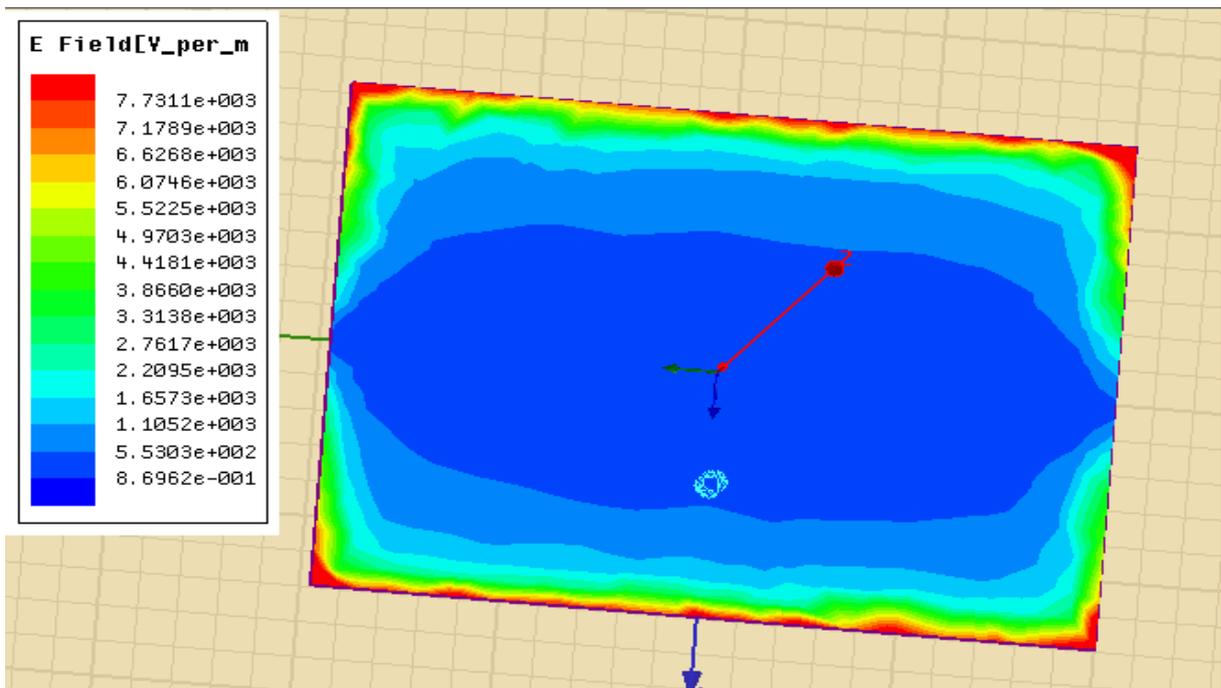


Figure III.21: Répartition du champ électrique E.

La figure suivante présente la répartition du champ magnétique H.

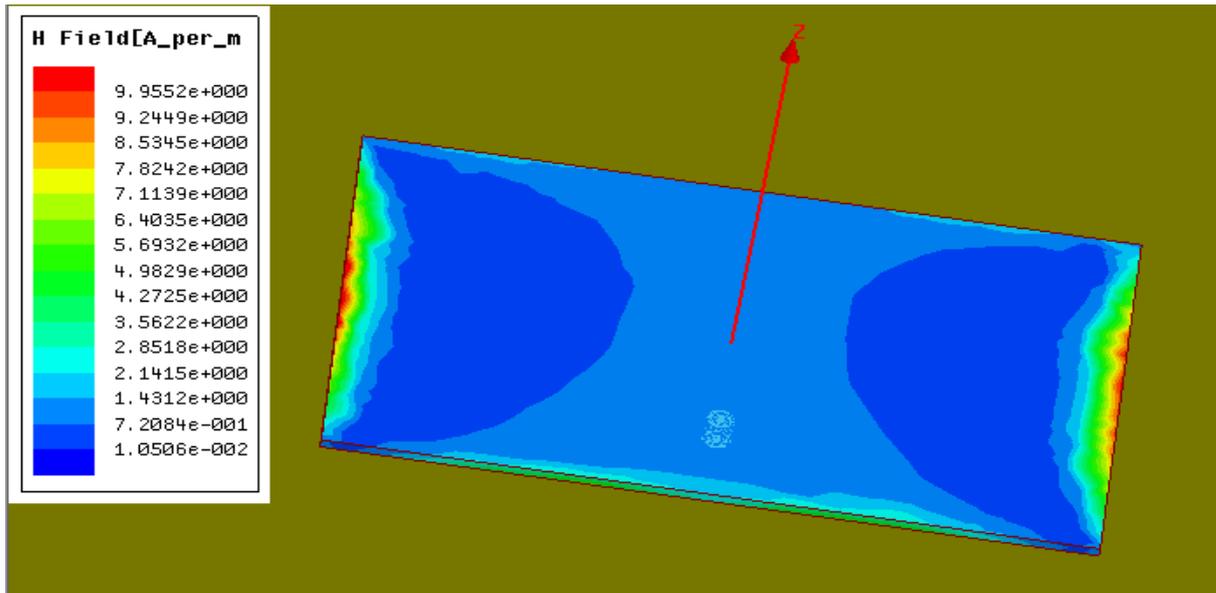


Figure III.22: Répartition du champ magnétique H.

Les figures **III.21** et **III.22** illustrent la répartition des champs électriques E et magnétiques H à voir avec l'effet de débordement de l'antenne patch. Il est Remarquable que la distribution du champ E soit suivant la largeur du patch, tandis que la distribution du champ magnétique H est suivant la longueur du patch.

La distribution des deux champs E et H est concentrée aux bornes où le rayonnement est effectué principalement par les bords de l'antenne patch. On notera que la répartition de ces champs E et H est meilleure pour l'antenne imprimée avec une seule couche diélectrique par rapport à l'antenne imprimée avec de multiples sous-couches diélectriques en raison de l'effet de ces sous-couches sur le rayonnement de l'antenne.

III.6.3. Influence de la permittivité relative du substrat sur l'antenne :

Comme l'antenne sera installée manuellement, il existe de risque d'avoir une permittivité non homogène dans une zone donné. Donc on passe à l'étape d'étudier l'influence de la permittivité sur les paramètres de l'antenne. La permittivité varie de 3 à 5 avec un pas de (0,2). Chaque permittivité est définie pour un matériau différent. Le tableau **III.6** présente les différents matériaux utilisés. Les différentes valeurs des permittivités ont été simulées pour obtenir les fréquences correspondantes, avec les même dimensions du patch ($W_p=39.5$ mm et $L_p=28.5$ mm). Les résultats sont présentés dans le tableau **III.7**.

Tableau III.6: Les différents matériaux exécutés avec ses valeurs de permittivités.

Permittivité diélectrique ϵ_r	Matériel
3	SUB
3.2	SUB 1
3.4	SUB 2
3.6	SUB3
3.8	SUB4
4	SUB5
4.2	SUB6
4.4	FR4 Epoxy
4.6	SUB7
4.8	SUB8
5	SUB9

Tableau III.7: Les différentes valeurs de permittivité avec ses fréquences obtenues.

ϵ_r	3	3.2	3.4	3.6	3.8	4	4.2	4.4	4.6	4.8	5
f_0 (GHz)	2.8	2.8	2.7	2.6	2.6	2.5	2.4	2.4	2.3	2.3	2.2

La petite variation de permittivité a décalé la fréquence de résonance. Nous avons donc fait varier les dimensions du patch (W_p et L_p) jusqu'à ce que la fréquence de résonance revienne à 2,4 GHz. Le tableau III.8 explique les différents paramètres obtenus après la simulation de différentes valeurs de permittivité pour chaque matériau.

Tableau III.8: Les différents paramètres obtenus en fonction de leurs permittivités.

Permittivité diélectrique	Matériel	Largeur du patch W_p (mm)	Longueur du patch L_p (mm)	Fréquence f_0 (GHz)	Coefficient de réflexion (dB)	Bande passante (GHz)
$\epsilon_r = 3$	SUB	45	34	2.4	-10.604	[2.3931-2.4085]
$\epsilon_r = 3.2$	SUB1	44	33	2.4	-11.620	[2.3834-2.4190]

$\epsilon_r = 3.4$	SUB2	43	32	2.4	-11.628	[2.3833- 2.4205]
$\epsilon_r = 3.6$	SUB3	42	31	2.4	-10.336	[2.3961- 2.4055]
$\epsilon_r = 3.8$	SUB4	41.5	30.5	2.4	-15.59	[2.3500 - 2.4400]
$\epsilon_r = 4$	SUB5	39	30	2.4	-13.938	[2.3417- 2.4340]
$\epsilon_r = 4.2$	SUB6	37	29	2.4	-18.175	[2.3484- 2.4565]
$\epsilon_r = 4.4$	FR4 Epoxy	39.5	28.5	2.4	-21.869	[2.3374- 2.4624]
$\epsilon_r = 4.6$	SUB7	37	28	2.4	-18.941	[2.3429- 2.4551]
$\epsilon_r = 4.8$	SUB8	35	27	2.4	-15.105	[2.3601- 2.4472]
$\epsilon_r = 5$	SUB9	37.5	26.5	2.4	-18.571	[2.3469- 2.4582]

C'étaient les paramètres de l'antenne imprimée plane étudiés comme résultats de la simulation. Et comme l'antenne est proposée pour être installée sur le fuselage du drone, nous passons maintenant à l'étape de la conception de l'antenne imprimée conforme à la structure du fuselage (forme cylindrique).

III.6.4. Conception de l'antenne imprimée conforme :

La structure est illustrée dans la figure suivante.

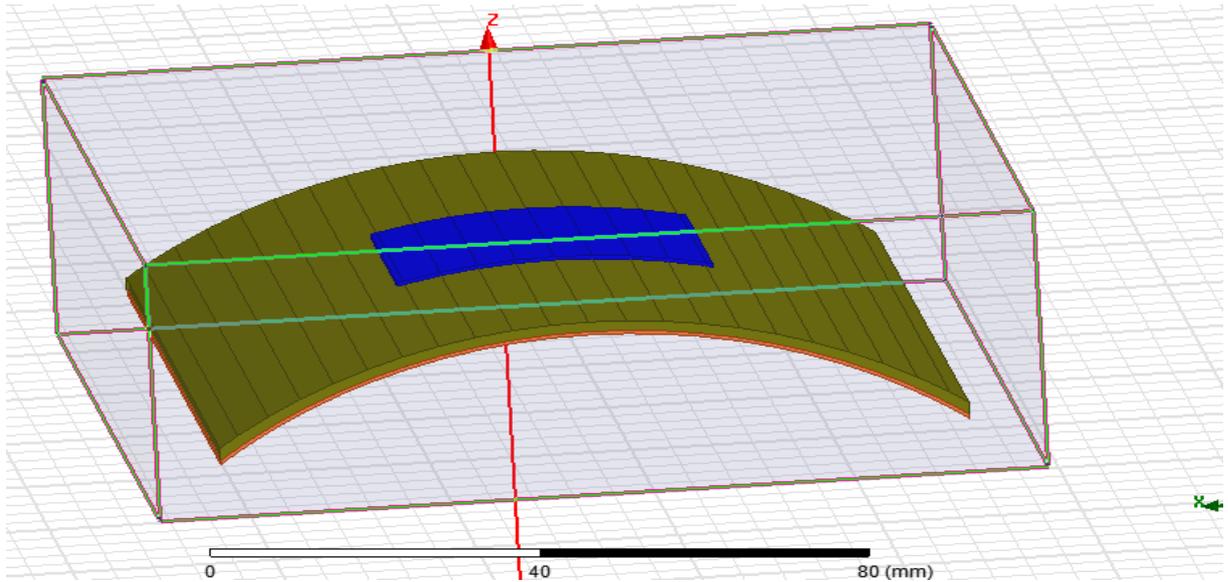


Figure III.23: Antenne imprimée conforme.

III.6.4.1.L'alimentation de l'antenne :

Le type d'alimentation utilisé est l'alimentation par câble coaxial, qui est illustrée dans la figure suivante.

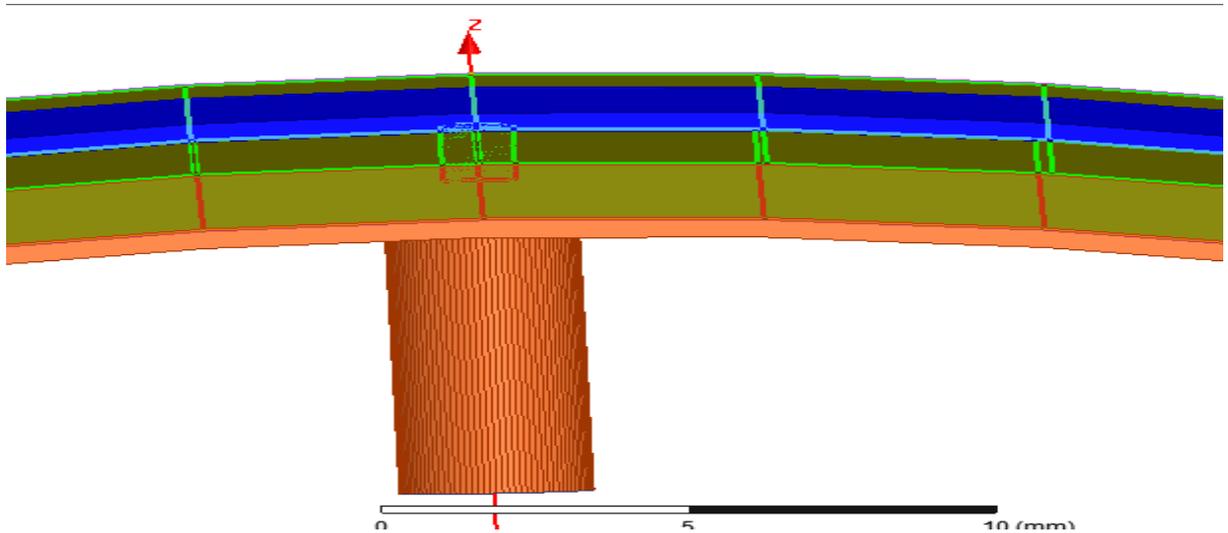


Figure III.24: Antenne imprimée conforme alimentée par un câble coaxial.

III.6.4.2.Résultats de simulation :

Les figures III.25, III.26, III.27, III.28, III.29, III.30, présentent les résultats de simulation obtenus.

La figure III.25, présente la variation de coefficient de réflexion à l'entrée de l'antenne en fonction de la fréquence.

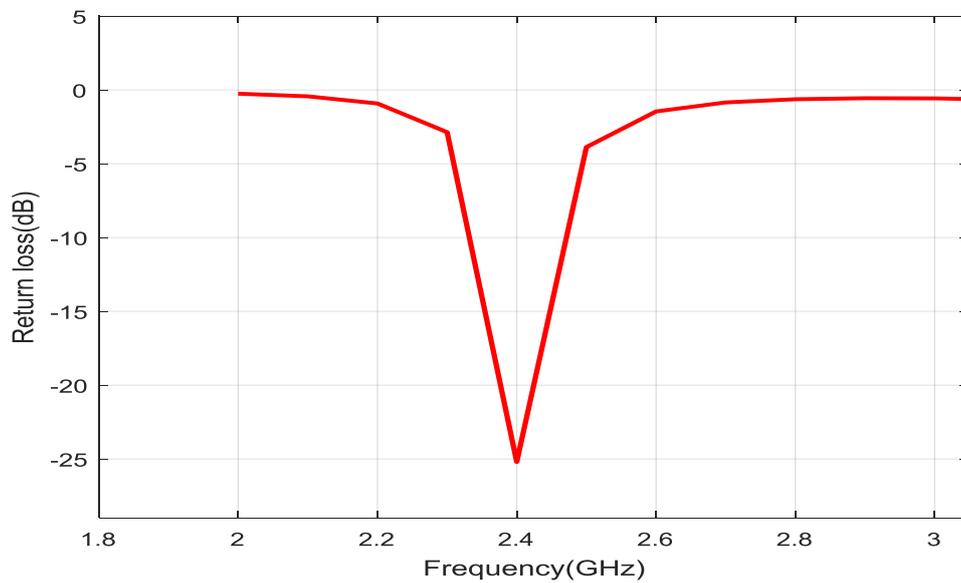


Figure III.25: Coefficient de réflexion en fonction de fréquence.

La figure suivante représente la variation du rapport d'onde stationnaire à l'entrée de l'antenne en fonction de la fréquence.

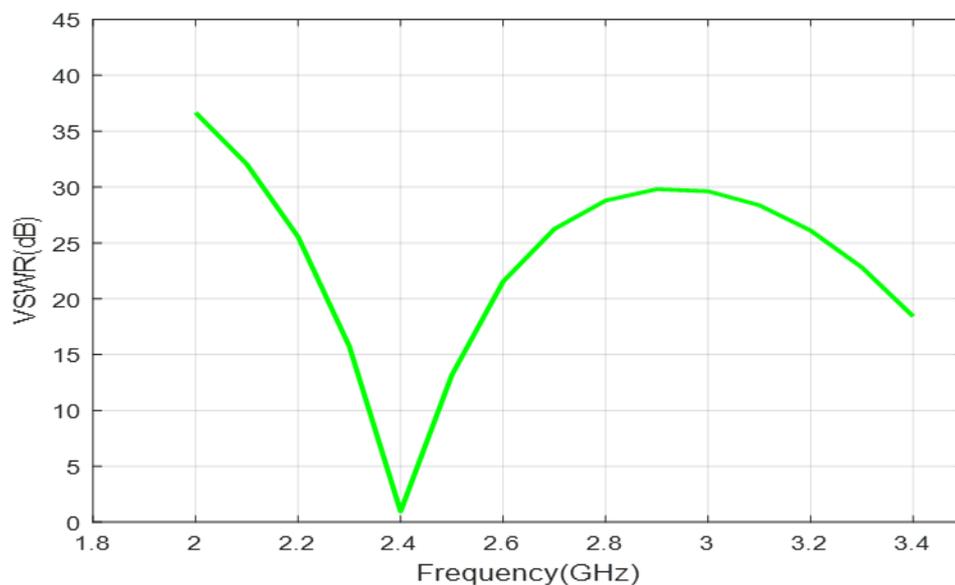


Figure III.26: Rapport d'onde stationnaire en fonction de la fréquence.

La figure suivante présente le diagramme de rayonnement de l'antenne.

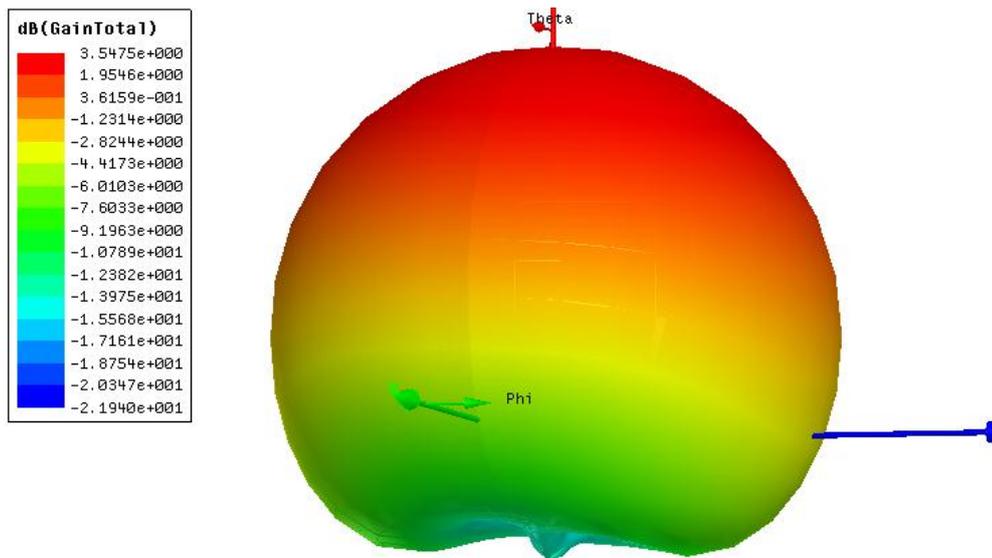


Figure III.27: Diagramme de rayonnement.

La figure suivante représente le diagramme de rayonnement en 2D.

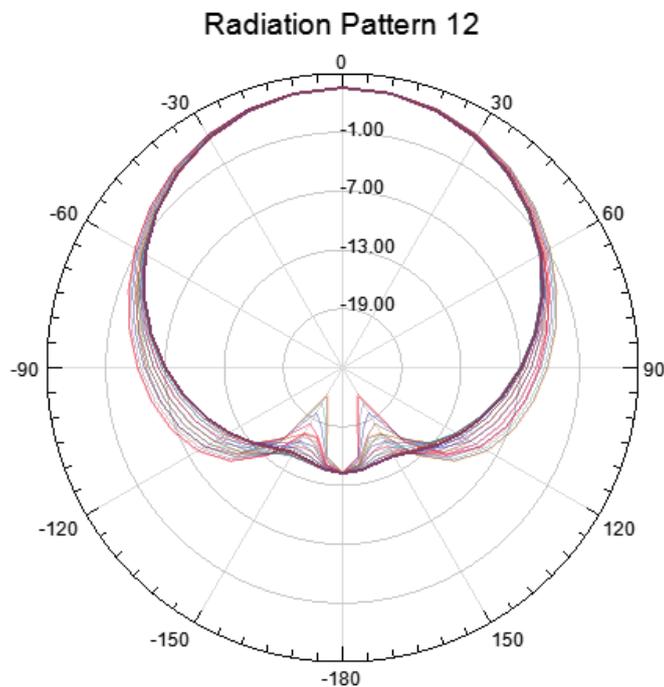


Figure III.28: Diagramme de rayonnement (2D).

III.6.4.3. Répartition des champs électrique E et magnétique H :

La figure suivante présente la répartition du champ électrique E.

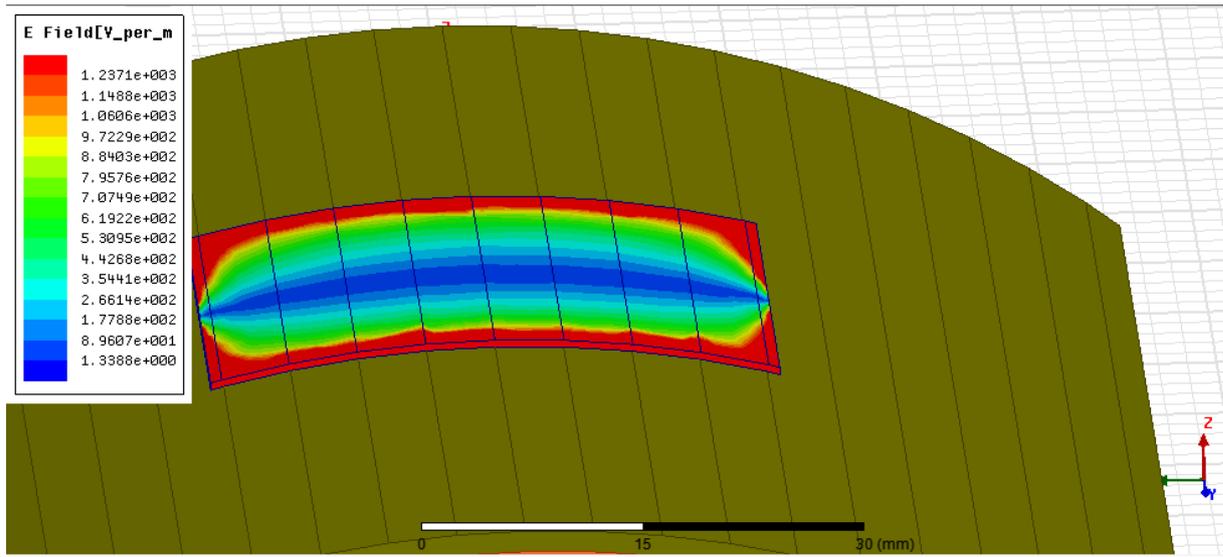


Figure III.29: Répartition du champ électrique E.

La figure suivante présente la répartition du champ magnétique H.

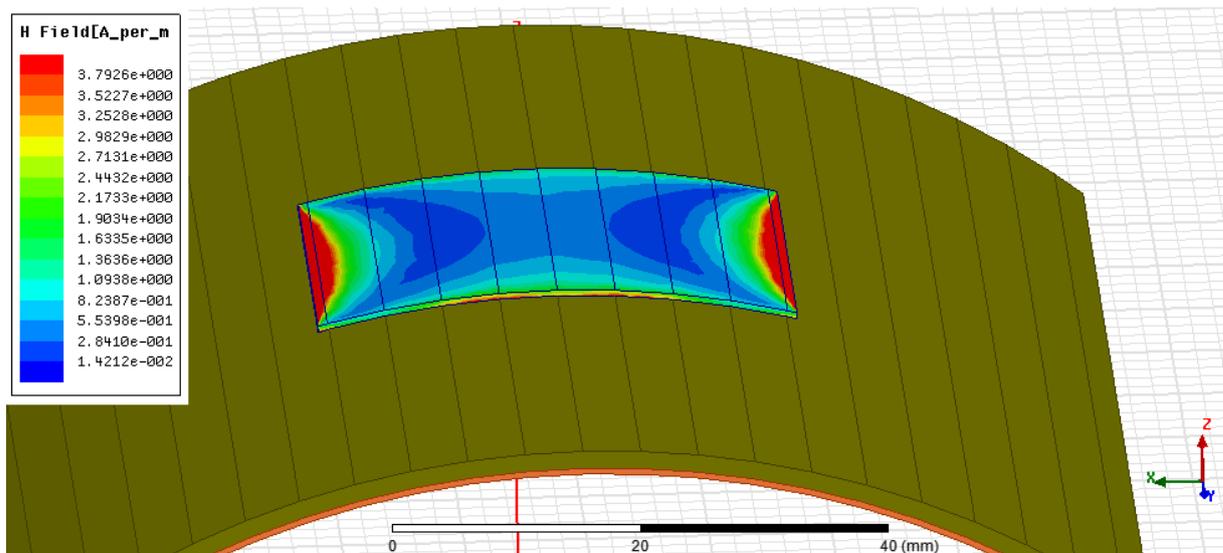


Figure III.30: Répartition du champ magnétique H.

Après avoir fait la simulation de l'antenne imprimée conforme avec une seule couche diélectrique, nous passons maintenant à la conception de l'antenne imprimée conforme avec six sous-couches diélectriques.

III.6.5. Conception de l'antenne imprimée conforme avec six sous-couches diélectriques (substrat) :

La structure est illustrée dans la figure suivante. Cette antenne est proposée pour être installée sur le fuselage du drone.

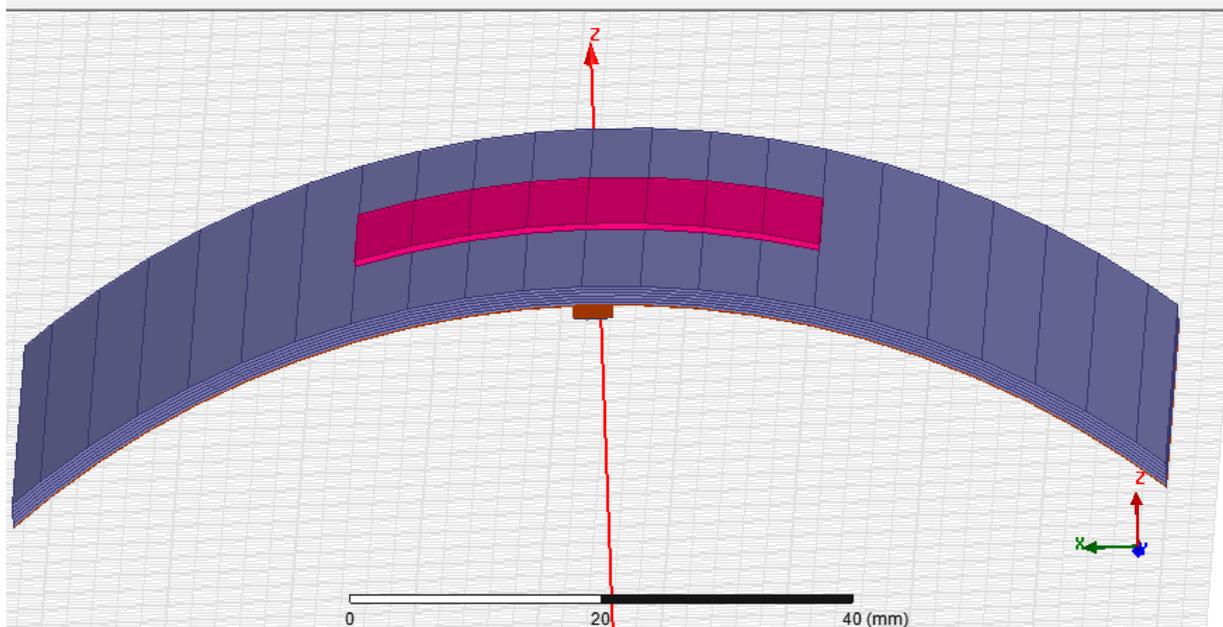


Figure III.31: Antenne imprimée conforme avec six sous-couches diélectriques.

III.6.5.1.L'alimentation de l'antenne :

Le type d'alimentation utilisé est l'alimentation par câble coaxial, qui est illustrée dans la figure suivante.

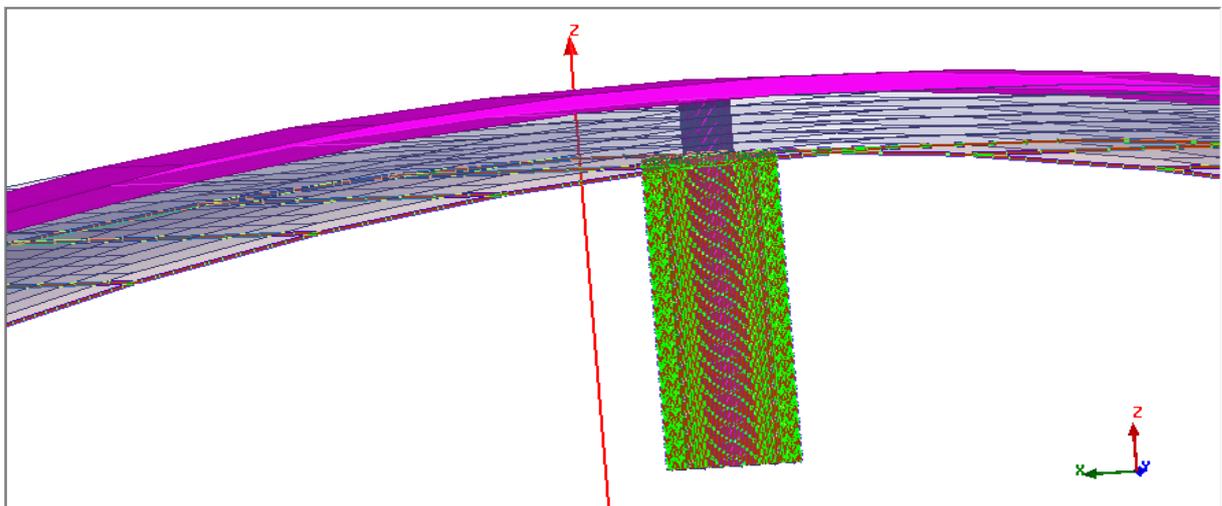


Figure III.32: Antenne imprimée conforme avec six sous-couches diélectriques alimentée par un câble coaxial.

III.6.5.2. Résultats de simulation :

Les figures III.33, III.34, III.35, III.36, III.37, III.38, présentent les résultats de simulation obtenus.

La figure III.33, présente la variation de coefficient de réflexion des plusieurs points d'alimentation à l'entrée de l'antenne en fonction de la fréquence.

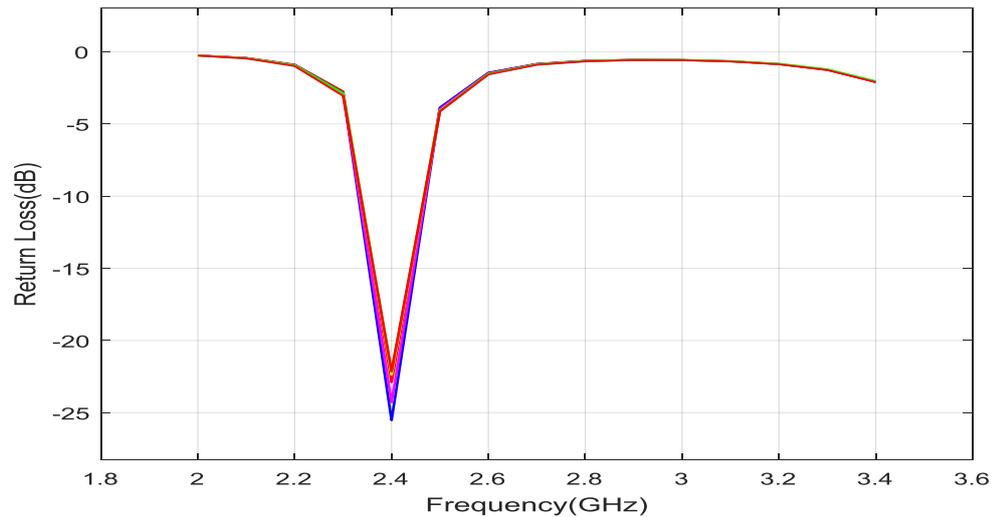


Figure III.33: Coefficient de réflexion en fonction de la fréquence.

Pour le point d'alimentation P_o , on a créé un intervalle qui varie entre les positions suivantes [6.5 mm à 7 mm], avec un pas qui est égal à 0.1 mm pour étudier son influence sur les paramètres de l'antenne.

Les résultats sont obtenus comme :

Tableau III.9: Variation de la position des points d'alimentation avec les valeurs de coefficient de réflexion et les bandes passantes correspondantes.

Coefficient de réflexion (dB)	Position du point d'alimentation P_o (mm)	Bande passante (GHz)
-22.888	6.5	[2.3340 – 2.4660]
-25.523	6.6	[2.3315 - 2.4717]
-24.280	6.7	[2.3319 – 2.4681]
-22.371	6.8	[2.3348 – 2.4652]
-22.174	6.9	[2.3360 – 2.4640]

-22.122	7	[2.3362 – 2.4380]
---------	---	-------------------

La figure suivante représente la variation du rapport d'onde stationnaire à l'entrée de l'antenne en fonction de la fréquence.

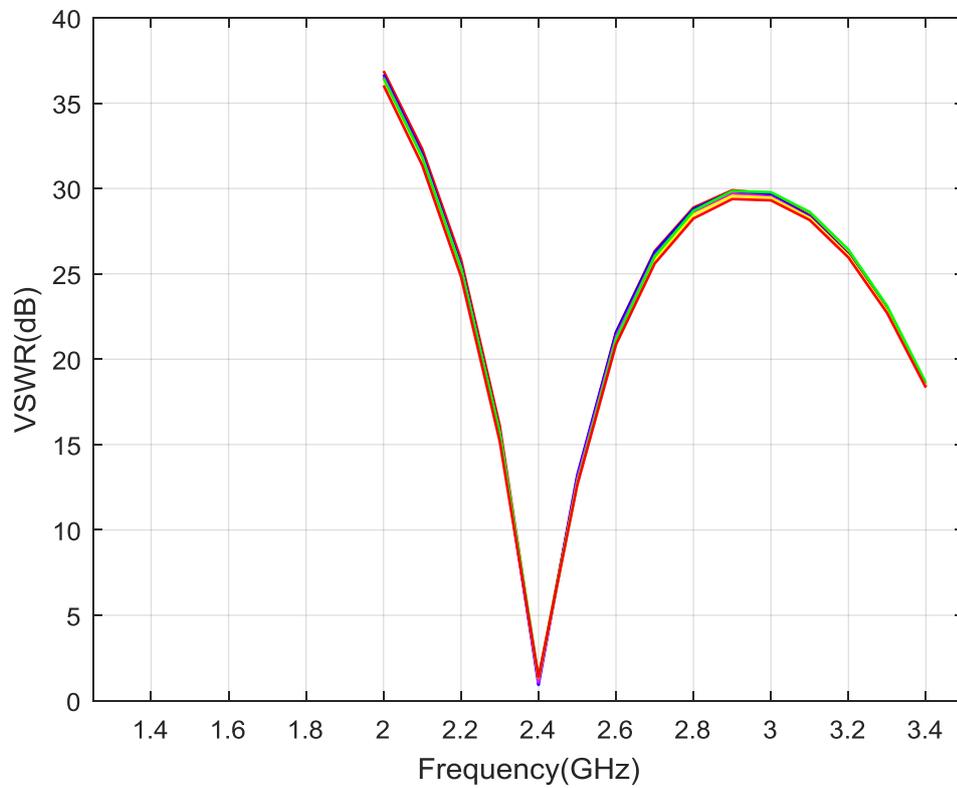


Figure III.34: Rapport d'onde stationnaire en fonction de la fréquence.

La figure suivante présente le digramme de rayonnement de l'antenne.

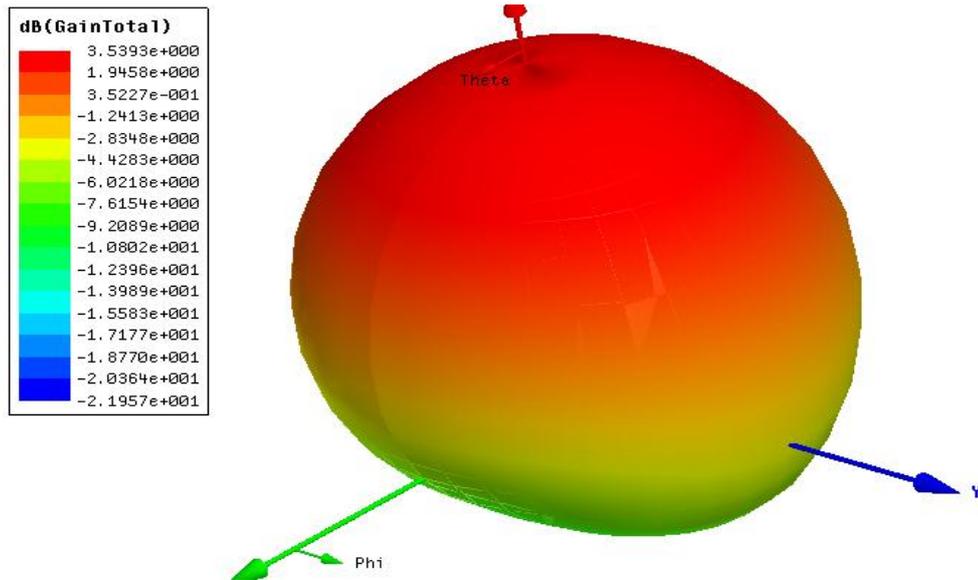


Figure III.35: Diagramme de rayonnement.

La figure suivante représente le diagramme de rayonnement en 2D.

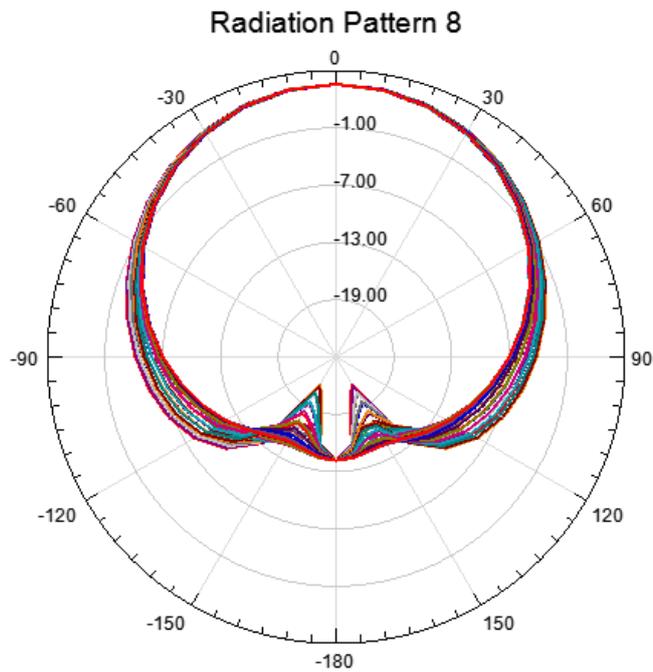


Figure III.36: Diagramme de rayonnement (2D).

III.6.5.3. Répartition des champs électrique E et magnétique H :

La figure suivante présente la répartition du champ électrique E.

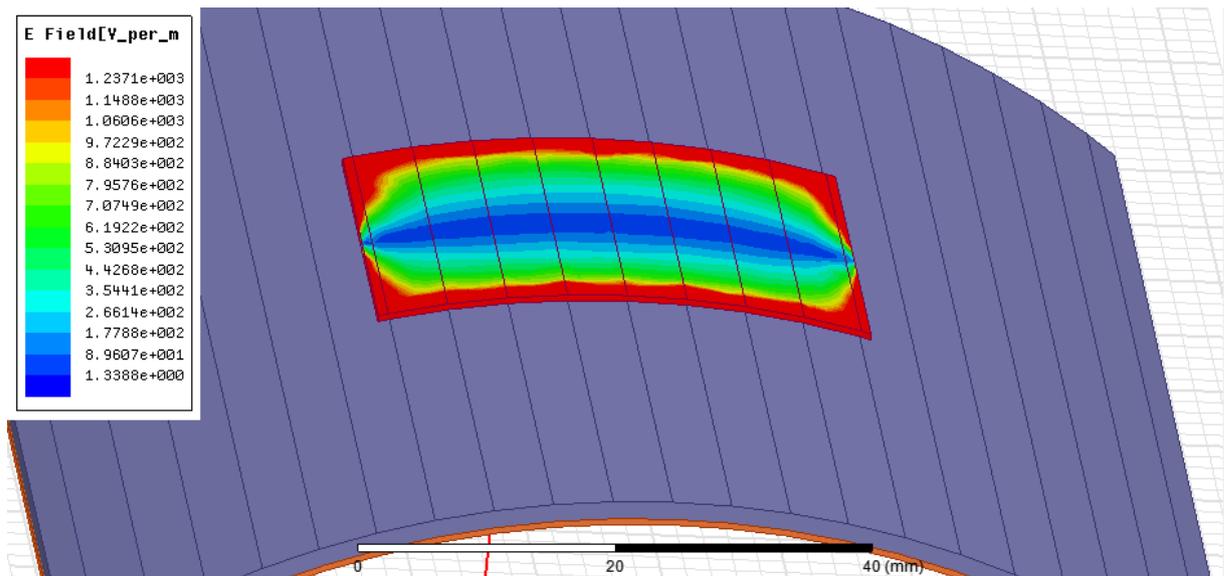


Figure III.37: Répartition du champ électrique E.

La figure suivante présente la répartition du champ magnétique H.

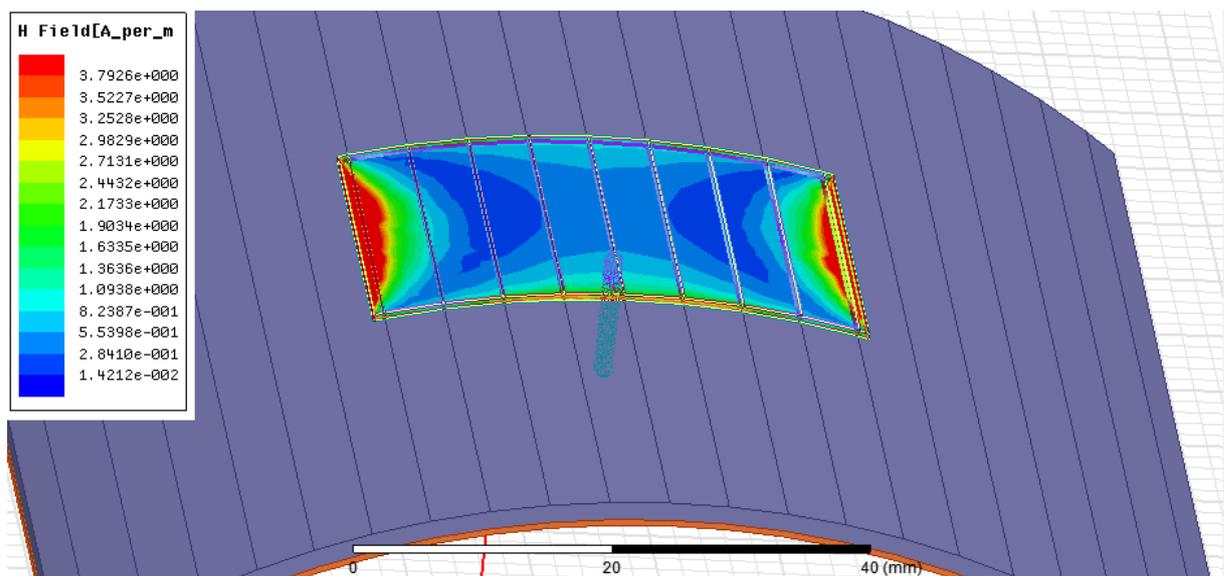


Figure III.38: Répartition du champ magnétique H.

Les figures III.37 et III.38 illustrent la distribution de champ électrique E et de champ magnétique H liés à l'effet de débordement de l'antenne patch. Il est remarquable que la distribution du champ E se fasse le long de la largeur du patch, tandis que la distribution du champ magnétique H se fait le long de la longueur du patch qui a une polarisation linéaire.

La répartition maximale du champ E aux bords de l'antenne imprimée conforme est bien répartie par rapport à l'antenne imprimée plate.

Après avoir eu la conception et la simulation de l'antenne imprimée conforme (cylindrique) proposée pour être installée sur le fuselage du drone, nous passons maintenant à l'étape de conception de l'antenne imprimée qui est proposée pour être installée dans les ailes du drone.

III.6.6. Conception de l'antenne imprimée sous forme d'aile :

La structure est présentée dans la figure suivante.

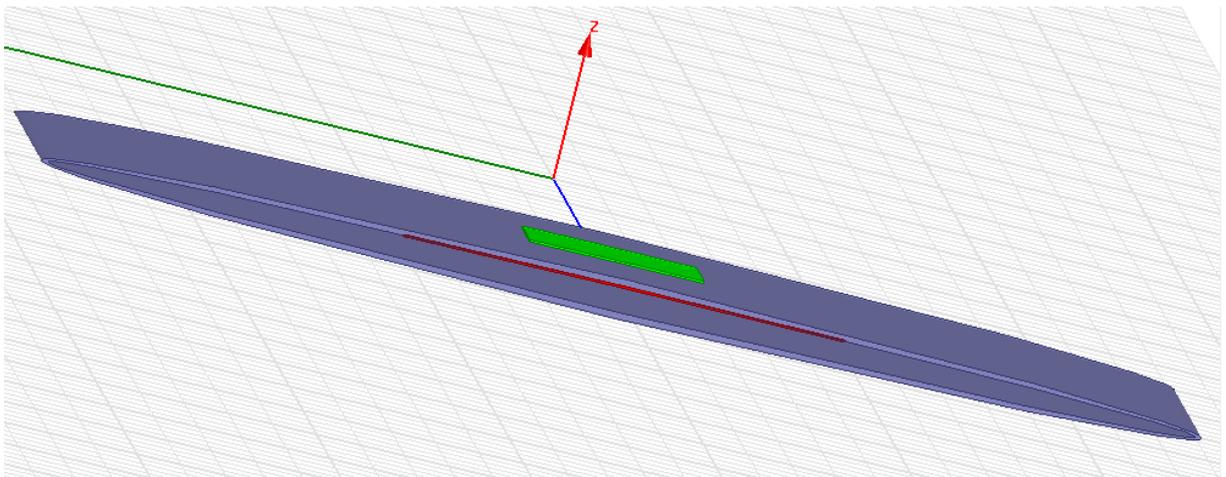


Figure III.39: Antenne imprimée sous forme d'aile.

III.6.6.1. L'alimentation de l'antenne :

Le type d'alimentation utilisé est l'alimentation par câble coaxial, qui est illustrée dans la figure suivante.

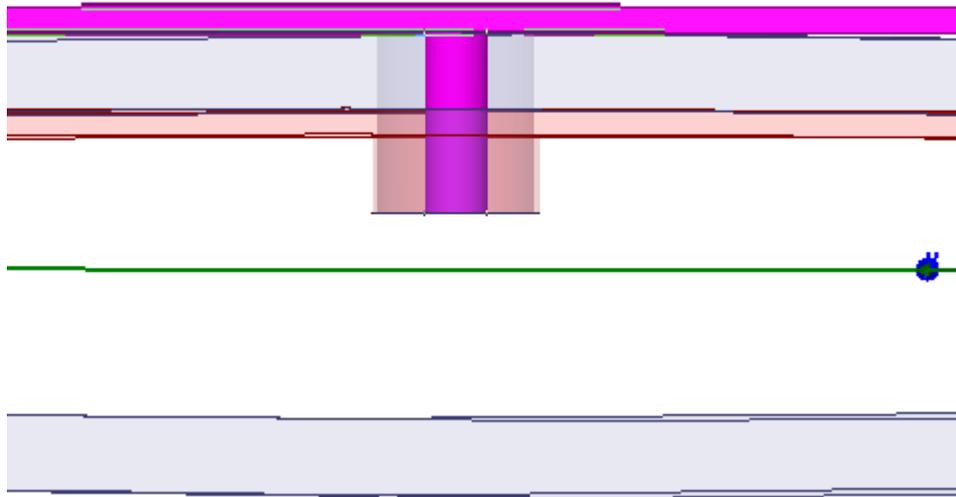


Figure III.40: Antenne imprimée sous forme d'aile alimentée par un câble coaxial.

III.6.6.2. Résultats de simulation :

Les figures **III.41**, **III.42**, **III.43**, **III.44**, **III.45**, **III.46**, présentent les résultats de simulation obtenus

La figure **III.41**, présente la variation de coefficient de à l'entrée de l'antenne en fonction de la fréquence.

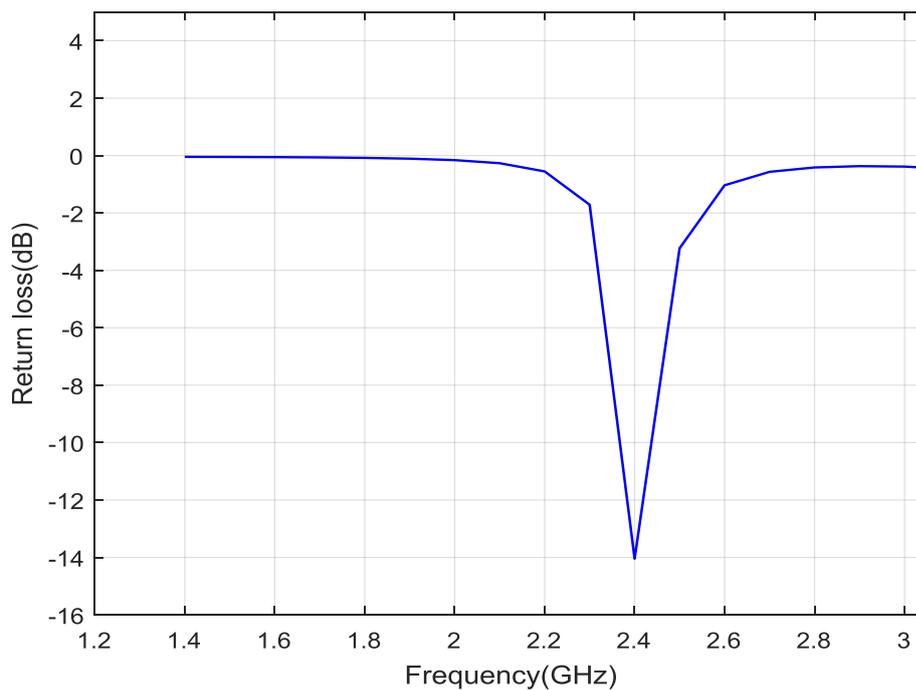


Figure III.41: Coefficient de réflexion en fonction de la fréquence.

La figure suivante représente la variation du rapport d'onde stationnaire à l'entrée de l'antenne en fonction de la fréquence.

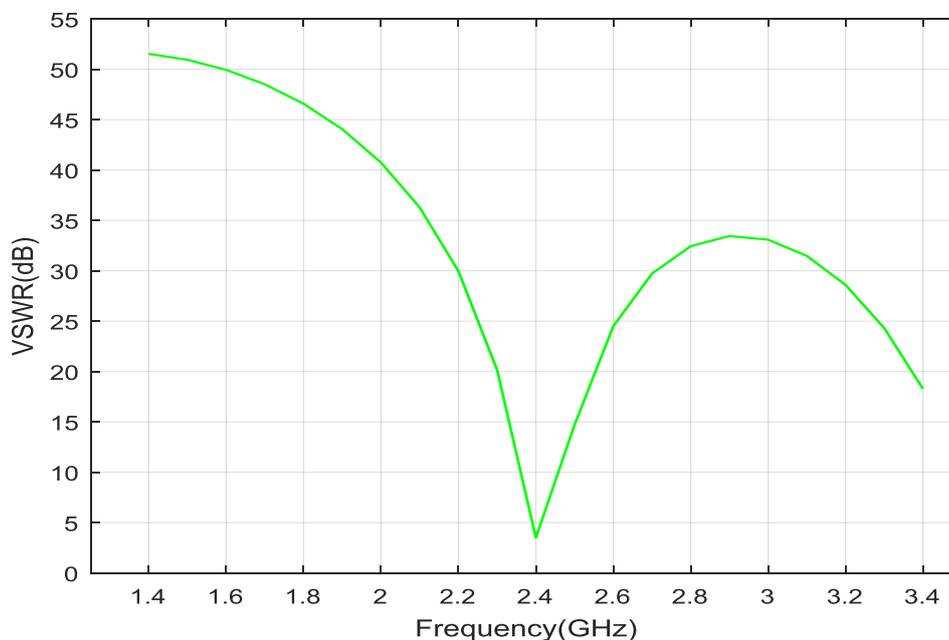


Figure III.42: Rapport d'onde stationnaire en fonction de la fréquence.

La figure suivante présente le diagramme de rayonnement de l'antenne.

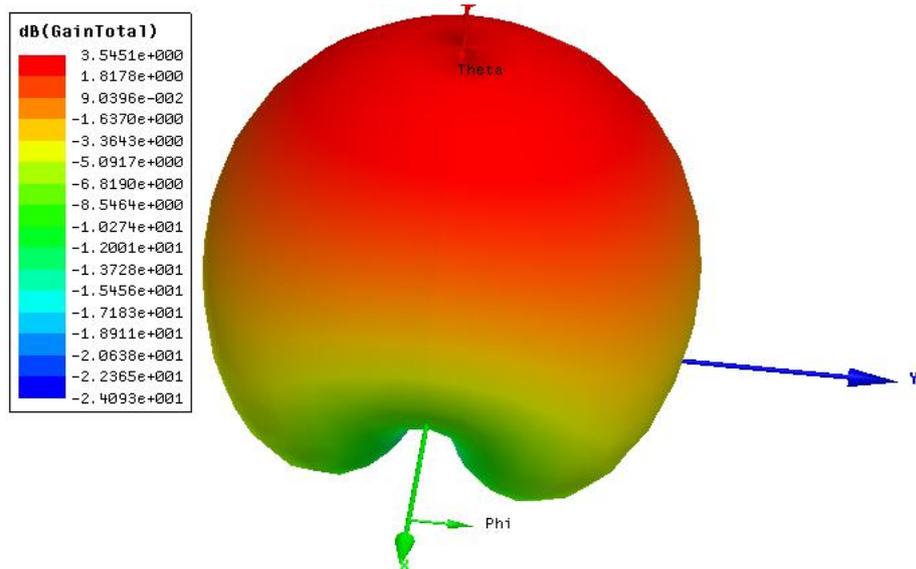


Figure III.43: Diagramme de rayonnement.

La figure suivante représente le diagramme de rayonnement en 2D.

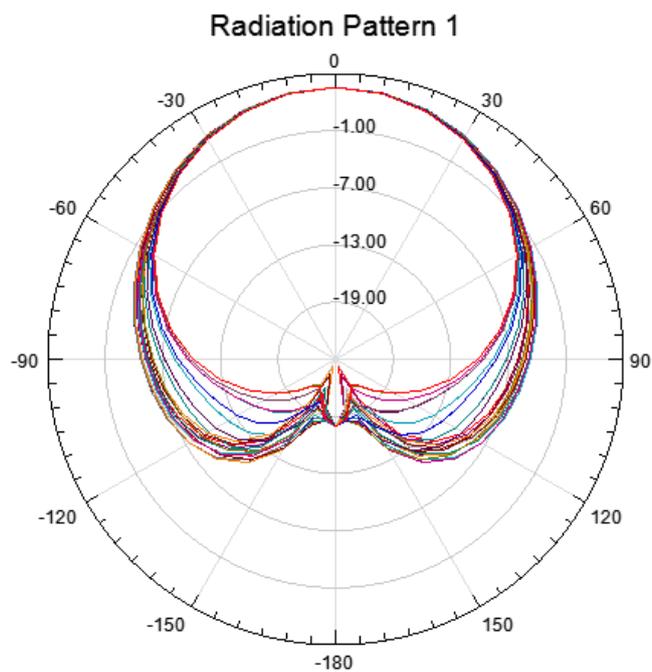


Figure III.44: Diagramme de rayonnement en 2D.

III.6.6.3. Répartition des champs électrique E et magnétique H :

La figure suivante présente la répartition du champ électrique E.

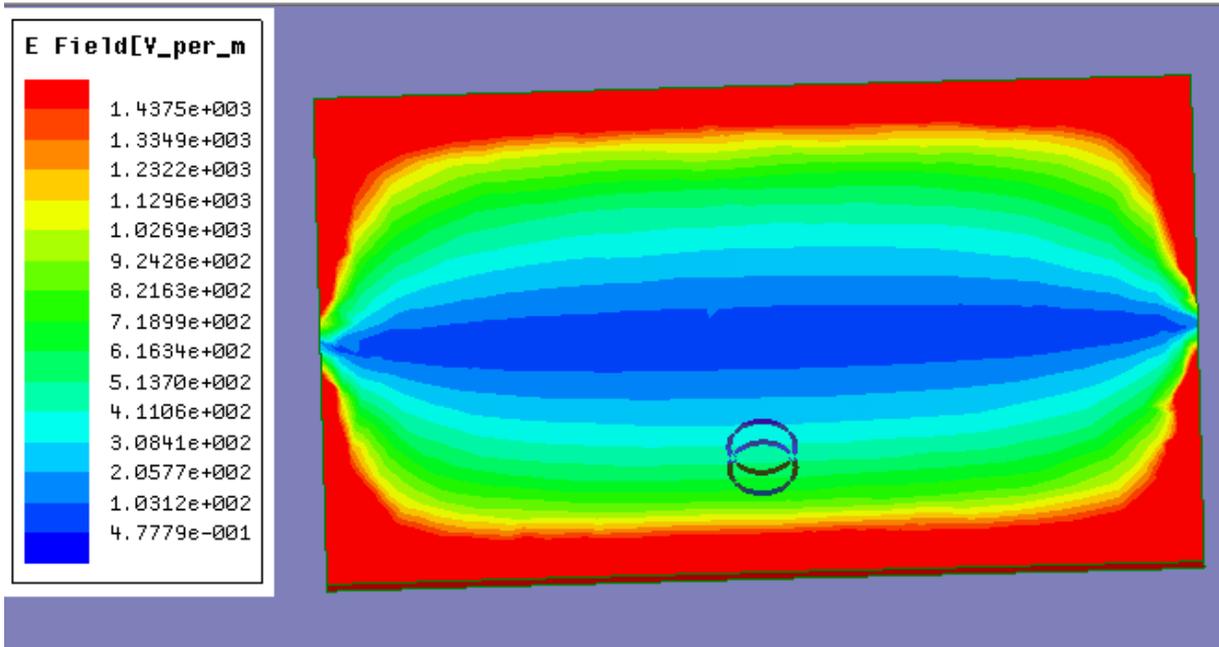


Figure III.45: Répartition du champ électrique E.

La figure suivante présente la répartition du champ magnétique H.

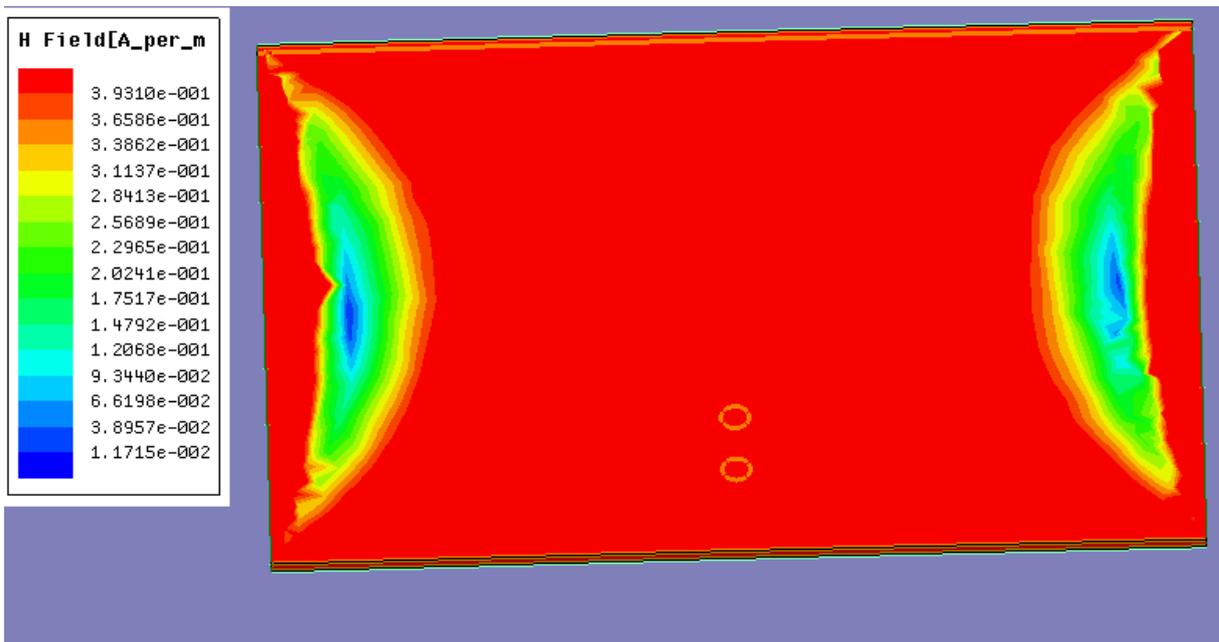


Figure III.46: Répartition du champ magnétique H.

III.6.7. Conception de l'antenne imprimée sous forme d'aile avec six sous-couches diélectriques (substrat) :

La structure est présentée dans la figure suivante.

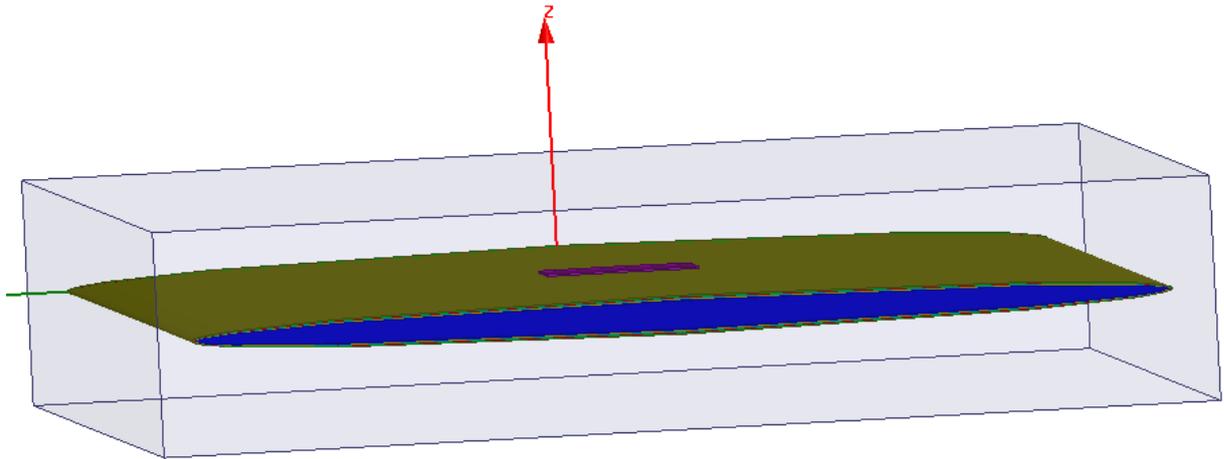


Figure III.47: Antenne imprimée sous forme d'aile avec une six sous-couches diélectriques (substrat).

III.6.7.1.L'alimentation de l'antenne :

Le type d'alimentation utilisé est l'alimentation par câble coaxial, qui est illustrée dans la figure suivante.

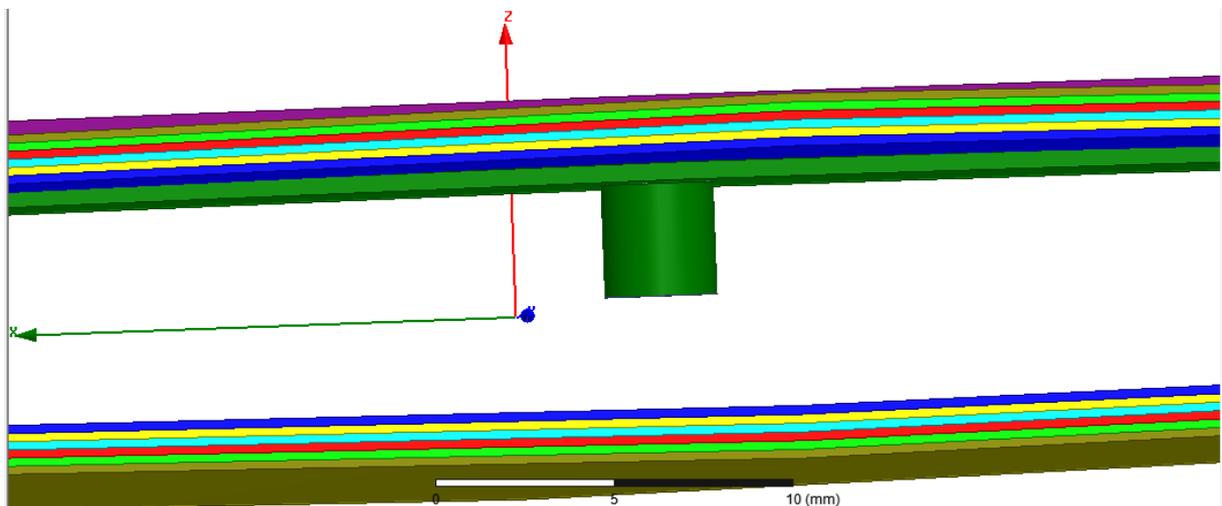


Figure III.48: Antenne imprimée sous forme d'aile avec six sous-couches diélectriques (substrat) alimentée par câble coaxial.

III.6.7.2.Résultats de simulation :

Les figures III.49, III.50, III.51, III.52, III.53, III.540, présentent les résultats de simulation obtenus.

La figure III.49, présente la variation de coefficient de réflexion S11 des plusieurs points d'alimentation à l'entrée de l'antenne en fonction de la fréquence

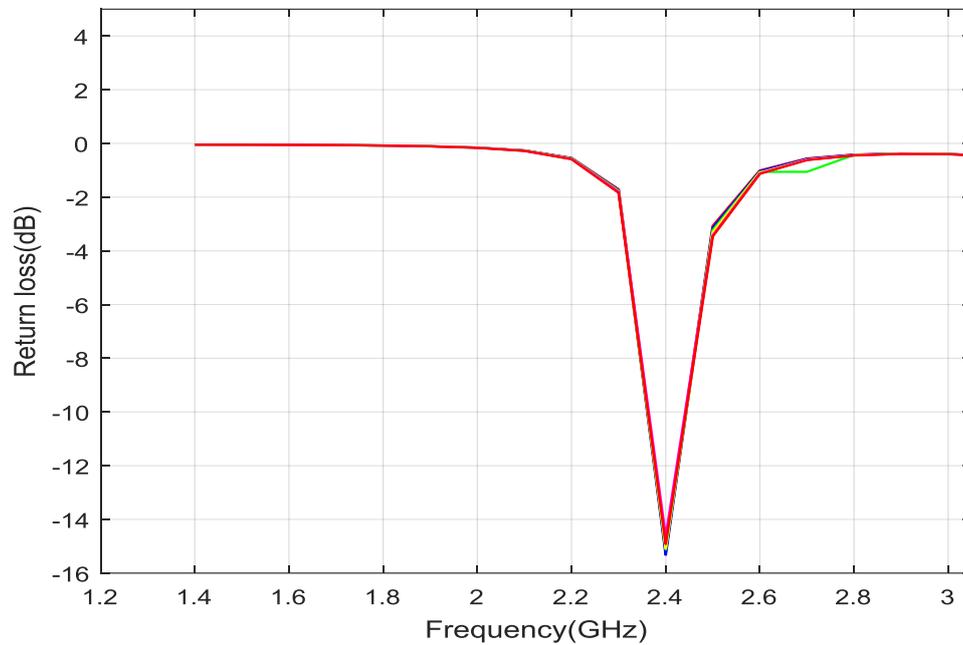


Figure III.49: Coefficient de réflexion en fonction de la fréquence.

Tableau III.10: Variation de la position des points d'alimentation avec les valeurs de coefficient de réflexion et les bandes passantes correspondantes.

Coefficient de réflexion (dB)	Position du point d'alimentation Po (mm)	Bande passante (GHz)
-15.201	6.5	[2.3614 – 2.4429]
-15.319	6.6	[2.3608 – 2.4437]
-15.078	6.7	[2.3766 – 2.4386]
-15.122	6.8	[2.3618 – 2.4432]
-14.645	6.9	[2.3638 – 2.4414]
-14.919	7	[2.3624 – 2.4429]

La figure suivante représente la variation du rapport d'onde stationnaire à l'entrée de l'antenne en fonction de la fréquence.

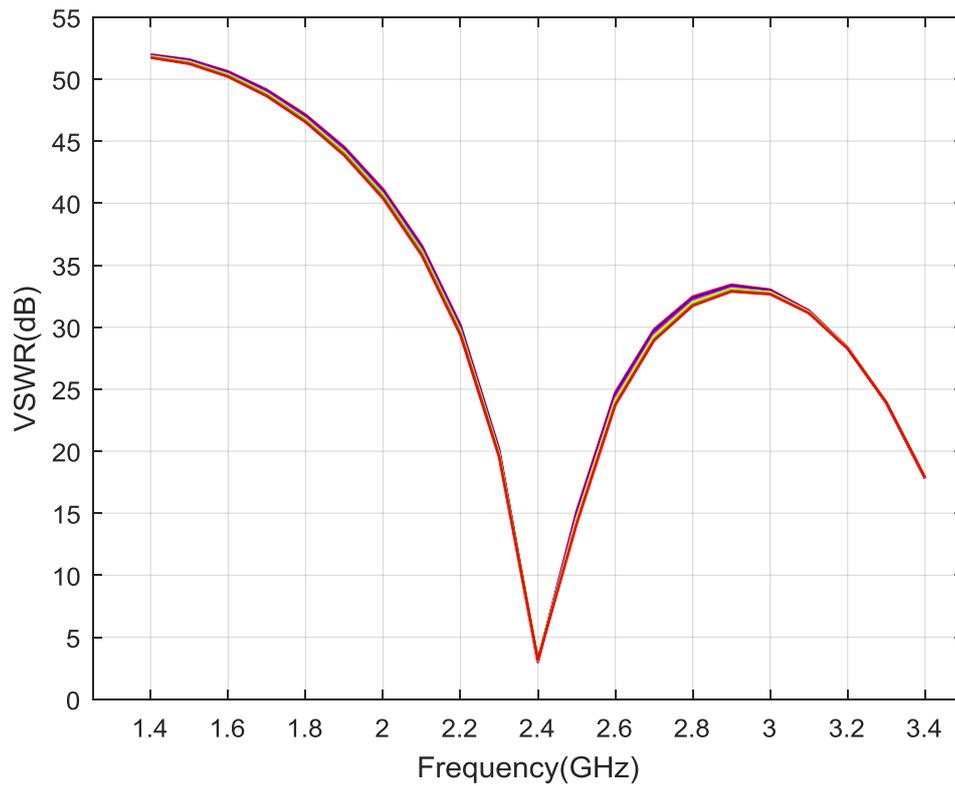


Figure III.50: Rapport d'onde stationnaire en fonction de la fréquence.

La figure suivante présente le diagramme de rayonnement de l'antenne.

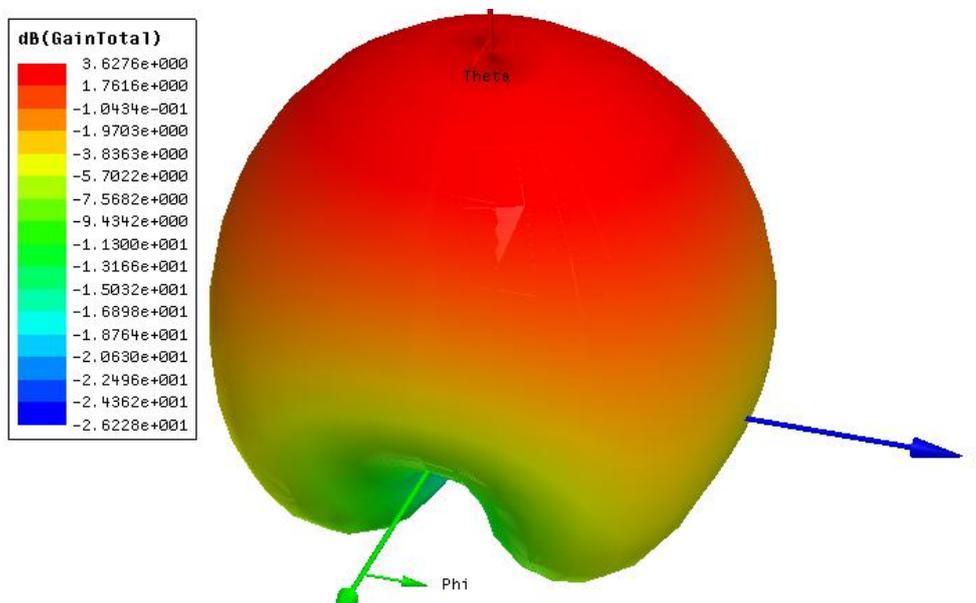


Figure III.51: Diagramme de rayonnement.

Cette antenne a un rayonnement plus efficace que l'antenne imprimée conforme.

La figure suivante représente le diagramme de rayonnement en 2D.

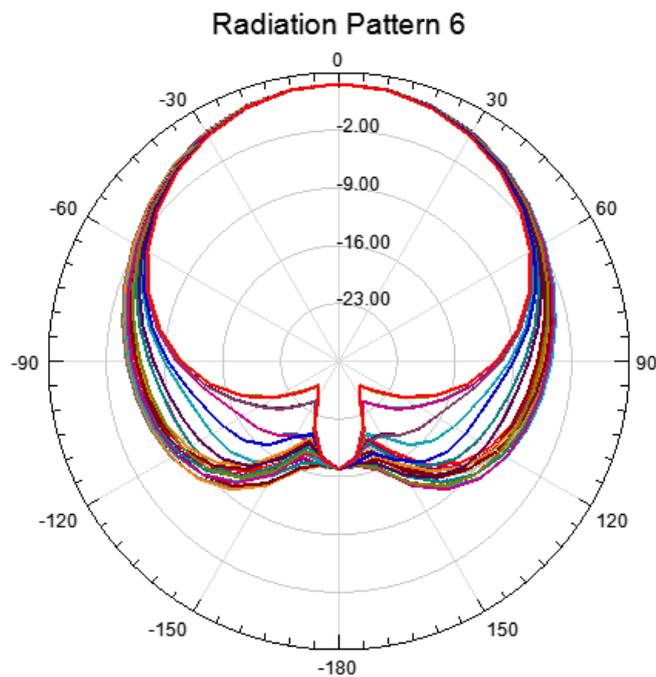


Figure III.52: Diagramme de rayonnement en 2D.

III.6.7.3. Répartition des champs électrique E et magnétique H :

La figure suivante présente la répartition du champ électrique E.

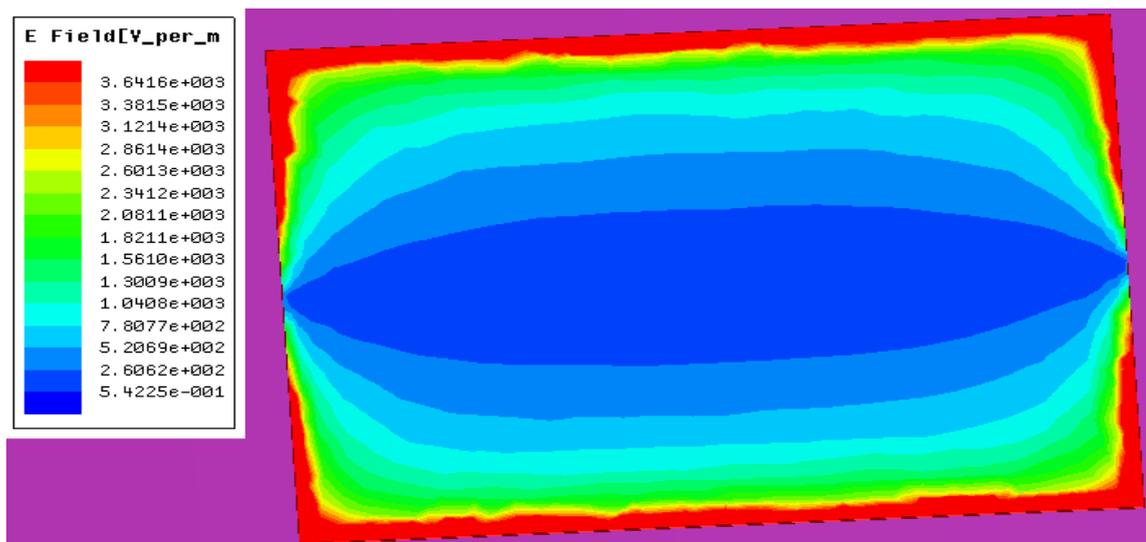


Figure III.53: Répartition du champ électrique E.

La figure suivante présente la répartition du champ magnétique H.

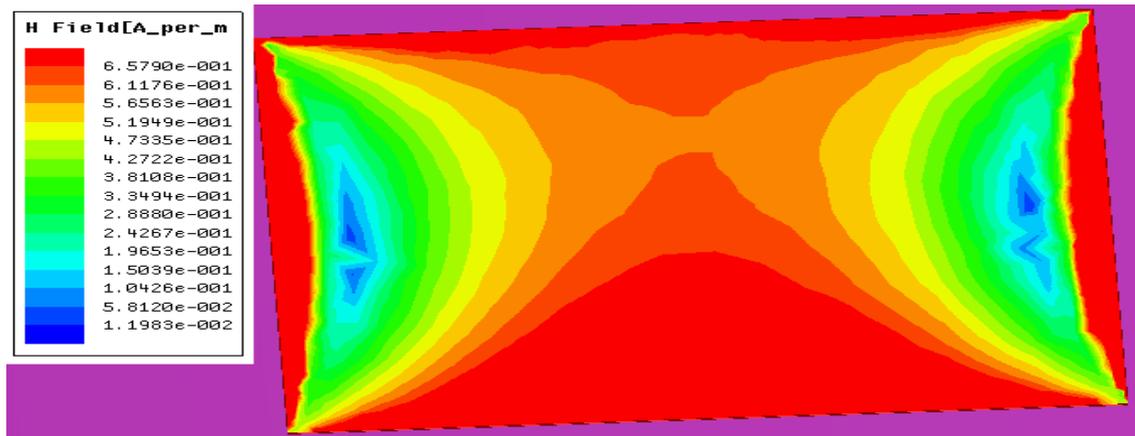


Figure III.54: Répartition du champ magnétique H.

L'antenne sous forme d'ailes présente une répartition maximale du champ électrique E et du champ magnétique H parfaite sur toute la surface du patch par rapport à ceux de l'antenne imprimée conforme et de l'antenne imprimée plane.

III.7.Résultat final à réaliser :

Le tableau suivant montre une comparaison entre les résultats de simulation de l'antenne conforme et de l'antenne sous forme d'aile.

Tableau III.11: Comparaison entre les résultats de simulation de l'antenne conforme et celui de l'antenne sous forme d'aile.

Forme d'antenne	Antenne conforme (cylindrique)	Antenne sous forme d'aile
Coefficient de réflexion	Variable avec les positions des points d'alimentation	Reste stable presque constante
Gain (dB)	3.5393	3.6276
	L'antenne sous forme d'aile a le gain meilleur	
Répartition de champ électrique E et de champ magnétique H	L'antenne sous forme d'aile a une répartition meilleure des champs E et H par rapport à l'antenne conforme	

Après avoir comparé les résultats de simulation des deux antennes imprimées proposées pour être installées l'une sur le fuselage du drone et l'autre dans les ailes, nous avons décidé d'installer notre antenne dans les ailes du drone grâce aux points suivants :

D'une part, le corps de l'avion (le fuselage) contient les circuits électroniques à l'intérieur, ce qui pose le problème de compatibilité qui peut influencer sur le rayonnement de l'antenne. D'autre part, le coefficient de réflexion est stable par rapport à celui de l'antenne courbée, avec un meilleur gain. Les drones ont des ailes vides, donc cela présente une meilleure zone où nous pouvons intégrer notre antenne.

III.7.1. Dimensions et caractéristiques de l'antenne imprimée :

Le tableau suivant montre les dimensions et les caractéristiques de l'antenne à réaliser.

Tableau III.12: Dimensions et caractéristiques de l'antenne imprimée à réaliser.

Caractéristiques	Largeur (mm)	Longueur (mm)	Epaisseur (mm)	Matériel
Paramètres				
Patch	39.5	28.5	0.5	Cuivre
Plan de masse	100	100	0.5	Cuivre
Substrat	100	100	1.5	Fr4 époxy
Point d'alimentation Po (mm)	Po est situé à 6.6 mm par rapport au centre du patch sur l'axe Y			

III.8.Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons conçu une antenne imprimée sous plusieurs formes (plane, conforme et sous forme d'aile) avec les deux modèles, modèle simple (une seule couche diélectrique du substrat) et modèle de sandwich (six sous-couches diélectriques du substrat).

Afin d'étudier les performances de cette antenne imprimée, elle a été alimentée par un câble coaxial, simulées sous un simulateur électromagnétique, après, nous avons présenté les résultats de simulation suivis par des commentaires et des discussions.

Après avoir comparé les résultats de simulation de deux antennes proposées pour être installées sur le drone, l'antenne conforme (cylindrique) et celle en forme d'aile, nous avons décidé que la meilleure position pour installer notre antenne est sur les ailes et nous avons donné les caractéristiques de cette antenne à réaliser.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

L'organisation de notre travail nous a permis de bien assimiler l'ensemble des connaissances collectées dans le domaine des antennes. Nous avons dans un premier temps présenté les antennes en générale, en étudiant ses éléments fondamentaux, ses caractéristiques. Ainsi que la technologie des antennes imprimées rectangulaires et leurs caractéristiques particulières.

L'essentiel du travail que nous avons entrepris sur les généralités des antennes imprimées porte sur la description de ces antennes, les différentes techniques d'alimentation et aussi sur les méthodes d'analyse. Cela nous a aidés à constater que les méthodes analytiques sont plus faciles pour le calcul des différents paramètres tel que, la fréquence de résonance, la bande passante, le facteur de qualité... etc. Mais ces méthodes restent imprécises et se limitent à des formes géométriques simples où le substrat devrait être mince. Par contre les méthodes numériques sont plus complexes et peuvent ne pas converger si le choix des fonctions de base est mauvais. Mais elles permettent de traiter des formes géométriques plus complexes.

L'objectif principal de ce travail était le choix de la meilleure position sur laquelle notre antenne qui fonctionne à une fréquence de 2.4 GHz soit installée dans la structure du drone, soit le fuselage ou l'aile. Pour cette raison nous avons conçu et simulé les deux antennes proposées, l'antenne conforme (cylindrique) qui est proposée pour être installée sur le fuselage et l'antenne sous forme d'aile qui est proposée pour être installée dans les ailes du drone.

Après avoir comparé les résultats de la simulation, nous avons conclu que la meilleure position pour installer notre antenne est dans l'aile du drone qui a un meilleur gain, et cela démontre l'étude mentionnée précédemment au chapitre I concernant le positionnement des antennes imprimées dans les ailes du drone.

Plusieurs perspectives peuvent être envisagées à partir de ce travail. Tout d'abord, il semble intéressant de réaliser l'antenne étudiée sur le terrain, en optimisant sa structure afin de concevoir l'antenne avec une bonne géométrie afin que le rayonnement soit efficace pour la position choisie dans laquelle l'antenne sera installée.

Egalement pour valider les résultats d'antenne simulée et tester la possibilité d'installer cette antenne sur la structure du drone. Et enfin d'adapter l'antenne aux circuits électriques, pour la mise en marche.

BIBLIOGRAPHIE

- [1], A. Boyer, " Antenne", support de cours et énoncé de travaux dirigés, Institut Informatique et Réseau, Université Toulouse, 10/ 2011.
- [2], M r. MEFTAH Azzedine, « Comparaison du tracé du diagramme de rayonnement de l'antenne Dipôle moyennant les logiciels MAGUS et MMANA-GAL », Université Badji Mokhtar de Annaba, 2018.
- [3], <https://www.aeronestv.com/fr/industrie/aviation-commerciale/3040-a-quoi-servent-ces-petites-antennes-sur-les-avions.htm>.
- [4], L. Josephson, P. Person, "CONFORMAL ARRAY ANTENNA THEORY AND DESIGN", Chalmers University of Technology, Sweden, Royal Institute of Technology, Sweden, IEEE Antennas and Propagation Society, Sponsor, Publié par John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey. Publié simultanément au Canada, 2006.
- [5], https://mobilit.belgium.be/fr/transport_aerien/espace_aerien/frequences_aeronautiques
- [6], P. Zhan, K. Yu, and A. L. Swindle Hurst, "Wireless relay communications With unmanned aerial vehicles: Performance and optimization," IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol. 47, No. 3, 2068- 2085, Jul. 2011.
- [7], W. Sun and Y. Hu, «Design and realization of direct PLL FM transmitter for UAV data link," International Conference on Information Engineering(ICIE), Vol. 1, 522-525, 2009.
- [8], H. Tsuji, D. Gray, M. Suzuki, and R. Miura, "Radio location estimation Experiment using array antennas for high altitude platforms," IEEE 18th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), 1-5, 2007.
- [9], M. S. Sharawi, M. Ibrahim, S. Deif and D. N. Aloï, "Planar Printed Antenna Array Embedded in the Wing Structure of a UAV for Communication Link Enhancement," Progress In Electromagnetics Research(PIER), Vol. 138, 697-715, 2013.
- [10], M. S. Sharawi, D. N. Aloï and O. A. Rawashdeh, "Design and Implementation of Embedded Printed Antenna Arrays in Small UAV Wing Structures," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 58, No. 8, 2531-2538, 2010.
- [11], M.H.E.Touati, « Conception et Simulation d'une antenne microruban circulaire », Mémoire de Master, Université Mohamed Khider Biskra, 05 Juin 2014.
- [12], Expert en signaux mixtes, « Notion de base sur les antennes », Versailles, 12/02/2013, Paul_journaux@hotmail.com.

Bibliographie

- [13], <https://www.memoireonline.com/11/12/6502/Conception-dune-antenne-Patch-Microstrip.html>
- [14], <https://f5zv.pagesperso-orange.fr/RADIO/RM/RM07/RM07f/RM07f05.htm>
- [15], B. Atti, M. Mekaouche, «L'effet des caractéristiques de l'antenne patch sur sa directivité », Mémoire de Master, Université A. Mira de Béjaia, 2014.
- [16], F. Ferrero, “Reconfiguration dynamique d'antenne imprimée en directivité et polarisation”, thèse de Doctorat, Université de Nice-Sophia Antipolis, 19/11/2007.
- [17], C. Leila, « Contribution à l'étude d'antennes imprimées rectangulaires double bande et multi bandes tenant compte de l'effet de couplage », Mémoire de Magister, Université Mentouri-Constantine, 2009.
- [18], L.Djouablia, « Contribution à l'étude des structure microbandes rayonnantes par la méthode des moments application à la forme triangulaire », thèse de Doctorat, Université de Constantine, 02/07/2012.
- [19], H.Chorfi, « Conception d'un nouveau système d'antenne réseau conforme en onde millimétrique », Mémoire de Magister, Université du Québec En Abitibi-Témiscamingue, 05/2012.
- [20], K.Hamdis, A.Boughaz, « influence des différents paramètres physique d'une antenne patch rectangulaire sur son rayonnement », Mémoire de Master ACADEMIQUE, Université Kasdi Merbah Ouargla, 24/06/2018.
- [21], V.L.Subrahmanya, “Pattern Analyse of The Rectangular Microstrip Patch Antenna”, these de Master, Université de “College of Boras”, 19/01/2009.
- [22], S.Boussaha, “Contribution à l'étude et à la modélisation des antennes imprimées rectangulaires, Applications aux systèmes de communication”, Mémoire de Magister, Université 8Mai 1945-Guelma, 2012.
- [23], S.Soltane, « Etude et caractérisation d'antennes imprimées pour système Ultra-Large Bande, thèse de Magister, Université Mohamed Khider-Biskra, 17/11/2015.
- [24], B.Zaoui, « Modélisation d'une antenne micro ruban compacte », Mémoire de Master, Université Echahid Hamma Lakhdar-El Oued, 02/06/2015.
- [25], D.Belghellaoui, « Analyse et conception des antennes micro rubans alimentées par guide d'onde coplanaire », Mémoire de Magister, Université de Mohamed Boudiaf-M'Sila, 06/2016.

Bibliographie

- [26], <https://www.mhzshop.com/shop/Connectique-MHz/Adaptateurs/N/Adaptateur-SMA-Male-vers-N-Femelle.html>
- [27], S.Tebache, « Méthode de caractérisation hyperfréquence des antennes imprimées », Mémoire de Magister, Université Mohamed Khider – Biskra, 25/06/2013.
- [28], https://fr.banggood.com/Glassfibre-Sheet-GRP-Epoxy-Glass-FR4-Fibreglass-Sheet-300150mm-p-1136690.html?ID=48187&cur_warehouse=CN
- [29], M. Silva Pimenta, « Antenne souples à base de méta matériaux de type conducteurs magnétiques artificiels pour les standards de systèmes de géolocalisation », Mémoire de Doctorat, Université de Nice-Sofia Antipolis, 14/11/2013.
- [30], A.Agouzoul, « Conception et réalisation d'une antenne à résonateur diélectrique à 60 GHz pour les applications souterraines », Mémoire présenté comme exigence partielle de la maîtrise en ingénierie, Université du Québec En Abitibi-Témiscamingue, 08/2013.
- [31], L.Pett, « Antennes reconfigurables à base de MEMS RF », thèse de Doctorat, Université de Joseph Fourier, 09/02/2007.
- [32], Y.Zemam, A.E.Foukia, « Etude et Conception d'Antennes Reconfigurable par Association d'éléments actifs », Mémoire de Master, Université Aboubakr Belkaid-Tlemcen, 13/06/2017.
- [33], Sonia Sharma, Monish Gupta, C.C. Tripathi. Reconfigurable Antennae: A Review [Document Web]. Adresse Web: [Http: //www.iject. Org/vol12issue3/sonia. Pdf](http://www.iject.org/vol12issue3/sonia.Pdf),
11 mars 2014.
- [34], M. Laribi, "Conception d'une antenne cornet -siw a gain variable" Mémoire de la maîtrise en Ingénierie, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, 2014.
- [35], S. Loizeau, "Conception et optimisation d'antennes reconfigurables multifonctionnelles et ultra large bande", Thèse Université Paris-sud XI, 2009.
- [36], G. Ruvio, M.J. Amman, Zhi Ning Chen, "Wideband Reconfigurable Rolled Planar Monopole Antenna", IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1.55, (6), pp.1760-1767, 2007.

Bibliographie

[37], J.-C. Langer, J. Zou, C. Liu, et J. T. Bernhard, "Micro machined reconfigurable out-of plane Microstrip patch antenna using plastic deformation magnetic actuation," *Microwave and wireless Components Letters, IEEE* , vol.13, no.3, pp. 120-122, 2003.

[38], Qi. Bai et R. Langley, "Crumpling of PIFA Textile Antenna" *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 60, (1), pp. 63-70, 2012.

[39], "SUAV Advanced Concept Technology Demonstration"
(<http://www.natick.army.mil/soldier/media/fact/techprog/SUAVs.htm>) U.S. Army Soldier Systems Center "Small Unmanned Aerial Vehicles Advanced Concept Technology Demonstration (SUAV ACTD)"
(<https://web.archive.org/web/20120225070402/http://www.natick.army.mil/soldier/media/fact/techprog/SUAVs.htm>). 25 February 2012. Archived from the original (<http://www.natick.army.mil/soldier/media/fact/techprog/SUAVs.htm>) on 25 February 2012.

ANNEXE 1

```
function cal_patch
global k0 W L
f = input('fréquence d'entrée f en GHz :')
Er = input('constante diélectrique d'entrée du substrat Er');
h = input('hauteur d'entrée du substrat h en mm:');
h=h/1000;%transforme la hauteur en mètres
f=f*1e9;% tourner la fréquence à HZ
c = 3e8;% vitesse de la lumière
k0=2*pi*f/c;% numéro d'onde
Rin = 50;%impédance d'entrée requise de l'antenne
% calcul de la largeur et de la longueur du 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;
% calcul de la distance du point d'alimentation en médaillon
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=['largeur= ', num2str(W*1000), ' mm']
str=['longueur = ', num2str(L*1000), ' mm']
str=['la distance du point d'alimentation incrusté= ', num2str(yo*1000), ' mm']
str=['longueur minimale du GP = ', num2str(LGP*1000), ' mm']
str=['largeur minimale du GP = ', num2str(WGP*1000), ' mm']
str=['longueur minimale du GP = ', num2str(LGP1*1000), ' mm']
str=['largeur minimale du GP = ', num2str(WGP1*1000), ' mm']
h=h/100;
% sous-fonctions
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));
```