

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université SAAD DAHLEB BLIDA-1-
Institut d'Aéronautique et des Etudes Spatiales-IAES
Département de navigation aérienne

Mémoire de fin d'études
En vue de l'obtention du diplôme de master en Aéronautique

Option :
Communication Navigation Surveillance/Air Traffic Management (CNS/ATM)

Thème :

*Conception d'antennes pour le système de
mesure de distance (DME)*

Réalisé par :

BENAMARA Hennia

SMAIL Dihya

Encadré par :

Dr: HAMOUDA Zahir

Mr: KOUIDER ELOUAHED Boulouar

Ing : NADJI Faten

Année universitaire: 2018/2019

ملخص:

تستخدم الهوائيات المثبتة على الطائرات للاتصالات وكذلك لأنظمة الملاحة الراديوية المختلفة مثل أجهزة تحديد الاتجاه، أنظمة قياس المسافة، أنظمة تحديد المواقع العالمية، أنظمة الهبوط بالموجات الدقيقة ومقاييس الارتفاع... تستخدم هذه الأنظمة هوائيات تعمل على نطاق التردد L. و لديها مخطط إشعاع متعدد الاتجاهات في المستوي H واستقطاب رأسي. الهوائيات UWB الصغيرة بديلة لهوائيات أنظمة الاتصالات وطائرات الملاحة الراديوية. الهوائيات من نوع القبعة المقلوبة احادية القطب من نوع شفرة معروفة جيدًا بهوائيات UWB التي تشترك في نفس الخصائص. في مشروع التخرج هذا نقترح تصميمين جديدين لهوائيات UWB يفيان بمتطلبات نظام قياس المسافة (DME)، وهما مخطط الإشعاع متعدد الاتجاهات في المستوي H، الاستقطاب الرأسي ونطاق التردد من 960 ميغا هرتز إلى 1.22 جيجا هرتز. **كلمات مفتاحية:** DME، مخطط الإشعاع متعدد الاتجاهات، الاستقطاب الرأسي، هوائيات UWB، القبعة المقلوبة احادية القطب.

Résumé:

Les antennes installées sur les aéronefs sont utilisées pour les communications ainsi que pour divers systèmes de radio navigation tels que les radiogoniomètres, les systèmes de mesure de distance, les systèmes de positionnement global, les systèmes d'atterrissage à hyperfréquences et les altimètres...

Ces systèmes utilisent des antennes fonctionnant à la bande de fréquence L. Ces derniers présentent un diagramme de rayonnement omnidirectionnel dans le plan H et une polarisation verticale. Les petites antennes UWB sont alternatives pour les antennes des systèmes de communication et de radio navigation d'aéronefs. Les antennes telles que monopoles type chapeau inversé, à lame sont des antennes UWB bien connues partageant les mêmes caractéristiques.

Dans ce projet de fin d'étude, nous proposons deux nouveaux designs des antennes UWB répondant aux exigences du système de mesure de distance (DME), à savoir un diagramme de rayonnement omnidirectionnel dans le plan H, une polarisation verticale et une bande de fréquences de 960MHz à 1.22 GHz .

Mots clés: DME, diagramme de rayonnement omnidirectionnel, polarisation verticale, antennes UWB, monopoles chapeau inversé.

Abstract:

Antennas installed on aircraft are used for communications as well as for various radio navigation systems such as direction finders, distance measuring systems, global positioning systems, microwave landing systems and altimeters...

These systems use antennas operating at the frequency band L. They have an omnidirectional radiation pattern in the H plane and a vertical polarization. The small UWB antennas are alternative for antennas of communication systems and radio navigation aircraft. Antennas such as inverted hat type monopolies and blade antenna are well known UWB antennas sharing the same characteristics.

In this end of studies project, we propose two new designs of UWB antennas meeting the requirements of the distance measurement equipment (DME), namely an omnidirectional radiation pattern in the H plane, a vertical polarization and a frequency band from 960MHz to 1.22 GHz.

Key words: DME, omnidirectional radiation pattern, vertical polarization, UWB antennas, inverted hat monopolies.



Remerciements :

Le plus grand merci revient au dieu le tout puissant et le miséricordieux qui lui seul nous a guidé dans le bon sens durant notre vie et qui nous a donné la santé, le courage et la patience afin de réaliser ce modeste travail.

Remercier, c'est le plaisir de se souvenir de tous ceux qui, par leurs encouragements, leurs disponibilités et leurs amitiés, ont su créer une dynamique et une motivation nous ayant permis de finaliser ce mémoire.

Nous remercions tout d'abord Monsieur le directeur général de l'Ecole Supérieure des Techniques Aéronautique qui nous a ouvert les portes et nous a offert les moyens techniques afin d'accomplir ce présent mémoire.

Toutes nos infinies gratitude à notre promoteur : D^r HAMOUDA Zahir pour son professionnalisme, ses conseils objectifs qui ont été précieux et sa patience.

Nous remercions ensuite Notre encadreur M^r KOUIDER ELWAHED Boulenouar pour ses conseils, ses orientations et sa disponibilité.

Nous adressons aussi nos sincères remerciements aux membres du jury d'avoir accepté d'examiner ce mémoire.

Nous pensons ensuite à remercier nos enseignants du département de navigation aérienne ainsi que tous les enseignants de l'institut d'aéronautique et des études spatiales.

Nous voudrions également associer nos meilleurs remerciements à nos parents pour leurs tendresses et encouragements.

Enfin, un grand merci à nos amis pour l'amitié qu'ils nous ont témoigné tout au long de ces années d'étude.

Dihya, Hennia.

Dédicace

Je dédie cet humble travail avec grand amour,

Sincérité et fierté

*A celui qui m'a toujours appris comment réfléchir avant d'agir, à celui qui m'a soutenu tout au long de ma vie scolaire, à celui qui n'a jamais épargné un effort pour mon bien, **mon cher père**. Aucune dédicace ne serait exprimer l'amour, l'estime et le respect que j'ai toujours eu pour vous. Rien au monde ne vaut les efforts fournis jour et nuit pour mon éducation et mon bien être. Ce travail est le fruit de tes sacrifices que tu as consentis pour mon éducation et ma formation « Merci papa ».*

J'aurai bien aimé que vous soyez présent entre nous, mais le bon dieu a décidé autrement. « Paix a ton âme ».

*A la femme qui a souffert sans me faire souffrir, à celle qui m'a appris le vrai sens de la vie, à celle qui n'a hésité aucun moment à m'encourager, à celle qui est toujours à côté de moi, **ma chère mère**. Ta prière et ta bénédiction m'ont été d'un grand secours pour mener à bien mes études. Je te dédie ce travail en témoignage de mon profond amour. Puisse Dieu, le tout puissant, te préserver et t'accorder santé, longue vie et bonheur.*

*A mes très chers frères «**Ammar et Mohamed**» je vous souhaite un avenir plein de joie, de bonheur, de réussite et de sérénité. Je vous exprime à travers ce travail mes sentiments de fraternité et d'amour.*

*A **ma grande mère**, Je vous dois ce que je suis aujourd'hui grâce à votre amour, votre patience et vos conseils. Aucune dédicace ne serait exprimer profondément ce que je ressens envers vous, puisse dieu te donne santé et longue vie.*

*A **ma tendre tante et son époux** et surtout à leurs deux petits anges «**Lydia et Massyl**», que dieu vous donne une longue et joyeuse vie pleine de succès et de réussite.
*A **mon cher oncle et son adorable femme**, que dieu vous procure bonne santé et joyeuse vie.**

*A tous **mes amis** sans exception. A toute la promotion Master II CNS/ATM 2019.
*A mon adorable binôme **Hennia** et sa chère famille.**

A tous ce qui m'ont aidé de près ou de loin dans la réalisation de ce travail.

A tous ceux qui me sont chers et que j'ai omis de citer.

Dihya

Dédicace

A cœur vaillant rien d'impossible.

A conscience tranquille tout est accessible.

Quand il y a la soif d'apprendre.

Tout vient à point à qui sait attendre.

Les études sont avant tout.

Notre unique et seul atout.

Aujourd'hui, ici rassemblés auprès des jurys,

Nous prions dieu que cette soutenance

Fera signe de persévérance

Souhaitant que le fruit de nos efforts fournis

Jour et nuit, nous mènera vers le bonheur fleuri.

Je dédie ce mémoire :

*A la mémoire de mon cher grand-père **El hadj Derbel**, puisse Dieu le tout puissant l'accueillir en son vaste paradis.*

A Mes chers parents

Affables, honorables et aimables : vous représentez pour moi le symbole de la bonté par excellence, la source de tendresse et l'exemple du dévouement.

Aucune dédicace ne saurait être assez éloquente pour exprimer ce que vous méritez pour tous les sacrifices que vous n'avez pas cessé de me donner depuis ma naissance, durant mon enfance et même à l'âge adulte.

Je prie le bon Dieu de les bénir, de veiller sur eux, en espérant qu'ils seront toujours fiers de moi.

A mes chers frères et sœurs

Les mots ne suffisent guère pour exprimer l'attachement, l'amour et l'affection que je porte pour vous. Je vous souhaite un avenir plein de joie, de bonheur, de réussite et de sérénité.

A mes petits neveux Akram et Adem que dieu vous protège.

A tous les membres de ma famille, petits et grands.

A mon aimable binôme Dihya

À la mémoire de son père qu'Allah lui accorde son vaste paradis et à sa famille.

A mes chères Khadidja et Walida, aussi à mes collègues et tout le groupe CNS/ATM.

En témoignage de l'amitié qui nous uni et des souvenirs de tous les moments que nous avons passé ensemble, je vous dédie ce travail et je vous souhaite une vie pleine de santé et de bonheur.

Hennia

Table des matières:

Résumé	I
Remerciements	III
Dédicaces	IV
Tables des matières	VI
Liste des bréviations.....	X
Liste des figures	XII
Liste des tableaux	XIV
Introduction générale.....	1

Chapitre I: Généralité sur les antennes.

I.1	Introduction :	3
I.2	Définition d'une antenne :	3
I.3	Généralités sur les antennes :	5
I.3.1	Impédance d'entrée et coefficient de réflexion :	5
I.3.2	Le rapport d'onde stationnaire :	6
I.3.3	La bande passante :	7
I.3.4	Diagramme de rayonnement :	7
I.3.5	Le rapport avant/arrière :	8
I.3.6	Les régions du champ électromagnétique :	8
I.3.7	Le gain réalisé et la directivité :	9
I.3.8	Le rendement de l'antenne :	10
I.3.9	Bilan de puissance :	11
I.3.10	La polarisation :	12
I.3.11	Puissance isotrope rayonnée équivalente (PIRE) :	13
I.4	Rôles des antennes :	14

I.5	Différents types d'antennes :	15
I.6	Emplacement des antennes sur avion :	16
I.7	Les bandes de fréquence et leurs systèmes sur aéronef :	16
I.8	Equipement de Mesure de Distance(DME):.....	16
I.8.1	Définition:	16
I.8.2	Le principe du DME :	16
I.8.3	Précision de la distance mesurée :	18
I.9	Boîtier de commande :	18
I.10	Conclusion :	19

Chapitre II : Antennes Ultra Large Bande.

II.1	Introduction:	20
II.2	Historique:	20
II.3	Définition de l'ultra large bande:.....	21
II.4	Caractéristiques principales de l'Ultra Large Bande:	21
II.4.1	Problème dû à la propagation par trajets multiples:	22
II.4.2	Communications protégées:	22
II.4.3	Capacité de la technologie ULB:	23
II.4.4	Simplicité relative des systèmes ULB:.....	23
II.4.5	Inconvénients de l'Ultra Large Bande:	23
II.5	Différent types d'application de l'Ultra Large Bande:	23
II.6	Antenne ultra large bande:.....	24
II.7	Classification des antennes ULB selon leurs formes et leurs spécifications:	25
II.7.1	Antennes indépendantes de la fréquence:.....	25
II.7.2	Antennes omnidirectionnelles (élémentaires):	26
II.7.3	Antenne directive:.....	27
II.8	Classification des antennes ULB selon leurs applications:	28

II.9	Les antennes monopoles :.....	29
II.10	Antenne IHA (Inverted Hat Antenna):	29
II.11	Antenne à ouverture sur cavité :	30
II.12	Logiciel de simulation HFSS (High Frequency Structure Simulator):.....	30
II.13	Conclusion:	31

Chapitre III : Conception et simulation des antennes.

III.1	Introduction:	33
III.2	La première antenne IHA:	33
III.2.1	Modélisation par HFSS d'antenne IHA :	33
III.2.2	Simulations et résultats:	34
III.2.2.1	La modélisation géométrique (Mesh ou maillage):	34
III.2.2.2	Le coefficient de réflexion S_{11} :	35
III.2.2.3	Taux d'ondes stationnaires TOS (VSWR):.....	35
III.2.2.4	Le diagramme de rayonnement et le gain:	36
III.2.2.5	Les répartitions des champs:	37
III.2.3	La conception de l'antenne IHA étudiée :	38
III.2.4	Phase de mesure:	38
III.2.4.1	Analyseur de réseau:	38
III.2.4.2	Résultats de mesure:	39
III.3	La première antenne avec cavité:	40
III.3.1	Résultats des optimisations:	41
III.3.1.1	La modélisation géométrique (Mesh):	41
III.3.1.2	Le coefficient de réflexion S_{11} :	41
III.3.1.3	Le coefficient de réflexion S_{11} :	42
III.3.1.4	Le diagramme de rayonnement et le gain:	43
III.4	Deuxième antenne avec cavité :	44

III.4.1	Simulation et résultats de la deuxième antenne étudiée:.....	44
III.4.1.1	La modélisation géométrique (Mesh):	44
III.4.1.2	Le coefficient de réflexion S_{11} :	45
III.4.1.3	Taux d'ondes stationnaires TOS (VSWR):.....	45
III.4.1.4	Le diagramme de rayonnement et le gain:	46
III.4.1.5	Les répartitions des champs:	47
III.5	Antenne vidée:	48
III.5.1	La modélisation géométrique (Mesh):	48
III.5.2	Le coefficient de réflexion S_{11} :	49
III.5.3	Taux d'ondes stationnaires TOS (VSWR):.....	49
III.5.4	Le diagramme de rayonnement et le gain:	50
III.5.5	Les répartitions des champs:	50
III.5.6	La conception de l'antenne IHA:	51
III.5.7	Résultats de mesure:	52
III.5.7.1	Mesure de coefficient de réflexion :	52
III.5.7.2	Mesure du diagramme de rayonnement:	53
III.6	Phase de comparaison :.....	54
III.7	Conclusion:	55
	Conclusion générale	56
	Bibliographie	58

Liste des abréviations:

UWB	Ultra-Wideband
DME	Distance Measuring Equipment
GHz	Giga Hertz
MHz	Méga Hertz
Cm	Centimètre
ATC	Air Traffic Control
TCAS	Traffic Collision Avoidance System
HFSS	High Frequency Structure Simulation
dB	déciBel
RL	Perte par Réflexion
ROS	Rapport d'Onde Stationnaire
PIRE	Puissance Isotrope Rayonnée Equivalente
EIRP	Effective Isotropic Radiated Power
Nm	Nautical mille
Km	kilo mètre
VOR	VHF Omnidirectional Range
ILS	Instrument Landing System
ADF	Automatic Direction Finder
ULB	Ultra Large Bande
FCC	Federal Communication Commission
dBm	déciBel milliwatt
BP	Bande Passante
DSP	Digital Signal Processor
SNR	Signal to Noise Ratio (rapport signal à bruit)
RF	Radio Frequency

GPS	Global Positioning System
PCS	Personal Communication Service /system
WLAN	Wireless Local Area Network
GPR:	Ground Penetrating Radar
CEM	Compatibilité du champ Electromagnétique ou Mesure du champ
IHA	Inverted Hat Antenna
TOS	Taux d'Onde Stationnaire
VSWR	Voltage Standing Wave Ratio

Liste des figures :

Chapitre I

Figure (I.1): Principe de transmission par onde électromagnétique.....	4
Figure (I.2): Diagramme de rayonnement pour différents types d'antennes.....	8
Figure (I.3): Zones de champ autour de l'antenne.....	8
Figure (I.4): Puissances mises en jeu durant le processus de rayonnement.....	11
Figure (I.5): Bilan de liaison entre deux antennes en communication.....	12
Figure (I.6): Polarisation rectiligne ou linéaire et polarisation circulaire.....	13
Figure (I.7): Rôles des antennes d'émission et de réception.....	14
Figure (I.8): Emplacement des antennes sur avion. [11].....	15
Figure (I.9): Antennes DME à lame.....	17
Figure (I.10): Dialogue entre le DME et la station sol. [16].....	18
Figure (I.11): Différentes positions d'un avion par rapport à une station DME. [12].....	18
Figure (I.12): Boitier de commande du DME.....	19

Chapitre II

Figure (II.1): Propagation par trajets multiples.....	22
Figure (II.2): Les différentes applications de l'Ultra Large Bande [21].....	24
Figure (II.3) : Les différentes bandes de fréquences, champ magnétique et puissances [26]..	25
Figure (II.4): Antenne spirale a) Archimède b) Conique c) Logarithmique.....	26
Figure (II.5): Antenne log périodique a) Circulaire b) Trapézoïdale c) Dipôle.....	26
Figure (II.6): Antenne a) biconique dimension infini b) biconique dimension fini c)discone.	27
Figure (II.7): Antenne a) circulaire /elliptique b) trapézoïdale d) papillon.....	27
Figure (II.8): Antenne a) cornet b) Vivaldi.....	28
Figure (II.9): Antenne à chapeau inversé.....	39
Figure (II.10): Organigramme des différentes étapes d'un design HFSS.....	31

Chapitre III

Figure (III.1): Géométrie de l'antenne à 3 ellipses.	33
Figure (III.2): Présentation des ellipses de l'antenne avec le logiciel Ansys.....	34
Figure (III.3): La géométrie des cellules.....	35
Figure (III.4): Résultats du coefficient de réflexion S_{11}	35
Figure (III.5): Résultats du taux d'ondes stationnaires TOS (VSWR).	35
Figure (III.6): Diagrammes de rayonnement en 2D/3D de l'antenne.	36
Figure (III.7): La répartition du champ électrique E.....	37
Figure (III.8): La répartition du champ magnétique H.....	37
Figure (III.9): Photographie de l'antenne IHA réalisée.	38
Figure (III.10): Analyseur de réseau vectoriel ZVL.....	38
Figure (III.11): Photographie de mesure de l'antenne réalisée.	39
Figure (III.12): Comparaison du coefficient de réflexion simulé et mesuré.	40
Figure (III.13): Antenne IHA avec cavité.	40
Figure (III.14): La géométrie des cellules.....	41
Figure (III.15): Coefficient de réflexion pour différentes variations du diamètre de la cavité.42	
Figure (III.16): S_{11} pour différentes variations de diamètre de la cavité.....	42
Figure (III.17): Coefficient de réflexion de l'antenne conçue avec cavité.....	43
Figure (III.18): Modèles de rayonnement 2D/3D de l'antenne avec cavité.....	43
Figure (III.19): Géométrie de la nouvelle antenne avec le logiciel Ansys.....	44
Figure (III.20): L'antenne IHA conçue avec le logiciel HFSS.	44
Figure (III.21): La géométrie des cellules.....	45
Figure (III.22): Résultats du coefficient de réflexion de la nouvelle IHA.	45
Figure (III.23): Taux d'ondes stationnaires TOS.	46
Figure (III.24): Diagramme de rayonnement en 2D/3D.....	46
Figure (III.25): La répartition du champ électrique E.....	47

Figure (III.26): La répartition du champ magnétique H.....	47
Figure (III.27): L'antenne IHA vidée avec le logiciel HFSS.....	48
Figure (III.28): Maillage de l'antenne vidée.....	48
Figure (III.29): Le coefficient de réflexion de l'antenne vidée.....	49
Figure (III.30): Taux d'ondes stationnaires de l'antenne vidée.....	49
Figure (III.31): Le diagramme de rayonnement en 2D/3D de l'antenne vidée.....	50
Figure (III.32): La répartition du champ E.....	50
Figure (III.33): La répartition du champ H.....	51
Figure (III.34): Photographie de conception de l'antenne vidée.....	51
Figure (III.35): Photographie de l'antenne vidée avec cavité.....	52
Figure (III.36): Photo d'un montage expérimental de l'antenne étudiée.....	52
Figure (III.37): Comparaison entre les résultats de simulation et les résultats de mesure.....	53
Figure (III.38): Photographie du montage de mesure du diagramme de rayonnement.....	53
Figure (III.39): Diagramme de rayonnement mesuré en 2D des champs E et H.....	54
Figure (III.40): Diagramme de rayonnement mesuré en 3D.....	54

Liste des tableaux:

Tableau (I.1): Systèmes et fréquences typiques pour un aéronef civil.....	16
Tableau (III.1): Comparaison des paramètres diélectriques des trois antennes étudiées.....	55

Introduction générale

Introduction Générale:

Le domaine des télécommunications est en perpétuelle évolution. Ses axes d'investigation sont principalement motivés par un besoin toujours grandissant en termes de débit de données mais restent freinés par un spectre des fréquences de plus en plus occupé. Dans ce contexte, l'utilisation des signaux ultra large bande pour transmettre l'information semble une alternative très prometteuse. Récemment, la technologie Ultra Large Bande a attiré une grande attention aussi bien dans les domaines académiques qu'industriels.

En effet, l'ULB permet d'atteindre des débits de plusieurs centaines de mégabits par seconde, tout en conservant une complexité et des coûts limités.

Sa nature impulsionnelle et sa largeur de bande lui confèrent en outre une bonne résistance aux brouillages et aux trajets multiples, ce qui la rend très adaptée à une utilisation en intérieur.

Egalement, sa faible densité spectrale de puissance lui permet de cohabiter en introduisant peu d'interférences aux systèmes environnants. Une des issues clés dans les systèmes ULB est de concevoir des antennes appropriées capables de fonctionner dans la bande de fréquence désirée. Plusieurs types d'antennes monopoles omnidirectionnels ont été développés pour les communications à courte distance.

Les avions commerciaux et long-courriers comportent plusieurs systèmes de navigation et de communication fonctionnant sur une large bande de fréquence. Des antennes placées à l'extérieur de l'aéronef sont nécessaires pour établir le lien entre les systèmes embarqués et le monde extérieur. Typiquement, des antennes à lame sont utilisées dans ce but. Les antennes VHF et celles qui opèrent dans la bande L sont particulièrement problématiques.

Les antennes à lames présentent plusieurs désavantages. Elles dépassent la surface du fuselage, contribuant ainsi à la traînée totale de l'aéronef. Parce qu'elles sont placées à l'extérieur de l'avion, il y a des connecteurs et des joints qui restent exposés à l'environnement. De ce fait, elles peuvent être endommagées par la corrosion. En outre, les antennes à lames à plus basse fréquence dépassent de plus de 45 cm du fuselage. Ce fait augmente la probabilité de dommage par des agents extérieurs.

Dans cette perspective on cherche une réduction du poids et de la traînée aérienne. Bien que la surface occupée par des antennes à lames soit petite comparée à celle du fuselage,

elles contribuent à la traînée totale .Cependant, ce sont des composantes qui peuvent être améliorées.

Nous proposons une antenne qui peut facilement être encastrée dans le fuselage, qui appartient donc à la catégorie des « suppressed antennas ».

L'antenne ne dépasse pas la surface du fuselage, et en conséquence la traînée aérodynamique, les bruits acoustiques et turbulences qui sont généralement associées aux antennes de type lame seront complètement éliminés.

L'objectif de ce projet de fin d'étude est de concevoir une antenne qui puisse remplacer les traditionnelles antennes à lames et qui puisse s'intégrer facilement au fuselage de l'avion. À cette fin, la bande L est utilisée par plusieurs systèmes de navigation nommés Contrôle du Trafic Aérien (ATC), Système d'Alerte de Trafic et d'évitement de Collision (TCAS) et Equipement de Mesure de Distance (DME). Le système DME est le plus exigeant des trois derniers en termes de largeur de bande. Dans ce mémoire une nouvelle configuration d'antenne à profil bas est proposée. Elle est une combinaison d'une antenne à cavité et d'une antenne à fente annulaire. L'antenne, nommée Inverted Hat Antenna (IHA), est alimentée par un monopole dont le profil géométrique est composé de trois ellipses.

Le manuscrit est articulé en trois parties:

Le premier chapitre est focalisé sur la généralité des antennes .Nous y présenterons les antennes avec leurs différentes caractéristiques, leurs rôles et leurs emplacements sur avion, et pour clôturer nous y parlons brièvement sur le système de mesure de distance DME.

Le second chapitre détaillera la technologie ainsi que les antennes ultra large bande, nous y présenterons aussi notre logiciel de simulation HFSS.

Enfin, le dernier chapitre est consacré à la présentation des trois antennes étudiées ainsi que leurs résultats de simulation et leurs conceptions, en le clôturant avec les résultats de mesure.

Chapitre I:

Généralité sur les antennes

I.1 Introduction:

Les premières antennes sont apparues à la fin du XIXe siècle, à une époque où les travaux sur l'électromagnétisme 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 sont très diverses varient beaucoup selon les utilisations: télécommunications mobiles, radars, satellites, télévision, radiodiffusion, identification, objets communicants, 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. Il est important d'avoir une connaissance globale de leur fonctionnement lors du choix d'un dispositif rayonnant. La compréhension de ce fonctionnement aidera, d'une part à utiliser l'antenne au mieux de ses performances et d'autre part, à en réaliser une conception optimale.

Dans ce chapitre, nous allons présenter des généralités sur les antennes et leurs différentes caractéristiques.

I.2 Définition d'une antenne:

Une antenne est un dispositif qui permet de transformer l'énergie électrique en énergie électromagnétique en émission et vice versa en réception afin d'assurer la transmission de l'information. On peut les qualifier comme des adaptateurs d'impédance entre l'espace et l'émetteur ou le récepteur.

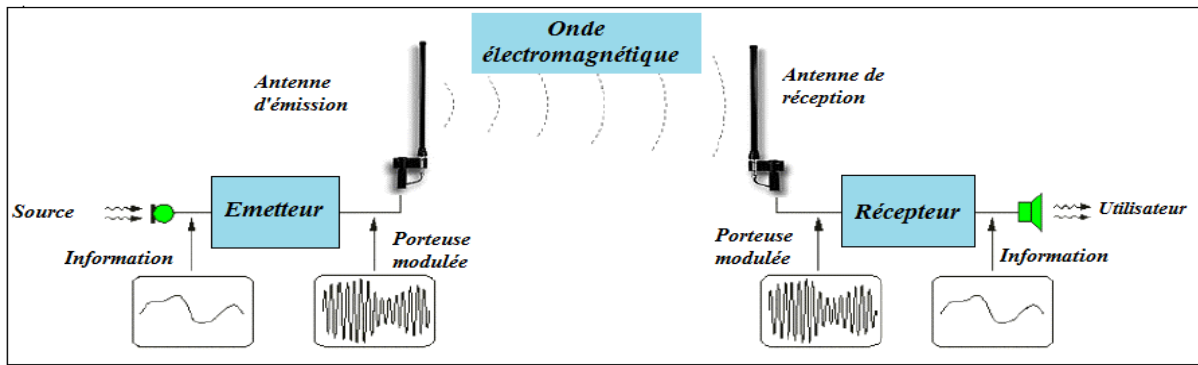


Figure (I.1): Principe de transmission par onde électromagnétique.

Ainsi, on peut définir une antenne en émission ou en réception selon son mode de fonctionnement. Le rôle de l'antenne d'émission est de transformer la puissance électromagnétique guidée, issue d'un générateur en une puissance rayonnée. Dans ce sens, c'est un transducteur [1].

De façon inverse, la puissance rayonnée peut être captée par une antenne de réception. Dans ce sens, l'antenne apparaît comme un capteur et un transformateur de puissance rayonnée en puissance électromagnétique guidée. Dans la plupart des cas, une antenne peut être utilisée en réception ou en émission avec les mêmes propriétés rayonnantes. On dit que son fonctionnement est réciproque.

Dans quelques cas exceptionnels pour lesquels les antennes comportent des matériaux non linéaires ou bien anisotropes, elles ne sont pas réciproques [1] [2].

Du fait de la réciprocité des antennes, il ne sera pratiquement jamais fait de déférence entre le rayonnement en émission ou en réception. Les qualités qui seront annoncées pour une antenne le seront dans les deux modes de fonctionnement, sans que cela soit précisé dans la plupart des cas [3] [4].

L'antenne a plusieurs rôles dont les principaux sont les suivants :

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

Dans les parties qui suivent nous allons donc préciser les caractéristiques qui définissent une antenne.

I.3 Généralités sur les antennes:

Une antenne est un élément passif qui assure la transformation d'une puissance électrique en une onde électromagnétique et réciproquement. Elle permet le transfert d'énergie entre un système d'émission et un système de réception. Ainsi une antenne peut se définir par sa fonction: c'est un transducteur passif qui convertit les grandeurs électriques d'un conducteur ou d'une ligne de transmission en grandeurs électromagnétiques dans l'espace et inversement. Les antennes sont indispensables aux systèmes de communication sans fil. Elles sont le seul élément à pouvoir assurer l'émission et/ou la réception des ondes électromagnétiques. Elles peuvent prendre plusieurs formes et différentes tailles suivant la fréquence de fonctionnement et le type d'applications [5]. Pour faciliter la lecture du manuscrit, il paraît utile de faire quelques rappels sur les notions fondamentales des antennes. Les antennes se caractérisent généralement par quelques paramètres importants qui permettent de comparer les structures entre elles, mais surtout qui fixent les performances. Ces paramètres peuvent être mesurés ou simulés.

Dans les parties qui suivent nous allons donc préciser les caractéristiques qui définissent une antenne.

I.3.1 Impédance d'entrée et coefficient de réflexion :

Une chaîne de transmission radiofréquence est toujours composée au minimum d'un générateur et d'une charge. Lorsque l'antenne est utilisée en émission, le générateur est constitué par le circuit de sortie de l'émetteur et la charge par l'antenne qui rayonne les signaux électromagnétiques. A l'inverse en mode réception, l'antenne constitue le générateur qui collecte les signaux électromagnétiques et le circuit d'entrée du circuit récepteur constitue la charge [6].

La réponse fréquentielle d'une antenne est caractérisée par l'évolution en fréquence de son impédance d'entrée. Celle-ci s'écrit:

$$Z_{in}(\omega) = R(\omega) + jX(\omega) \quad (I.1)$$

Avec: $\omega = 2\pi f$ la pulsation et f la fréquence.

D'autre part, lorsqu'une onde incidente change de milieu de propagation ou rencontre une nouvelle interface; une partie de cette onde incidente est réfléchiée et l'autre partie est transmise dans le nouveau milieu. Le coefficient de réflexion Γ et le coefficient de transmission T , quantifient ces deux parties, respectivement.

Chapitre I: Généralité sur les antennes.

On définit le coefficient de réflexion Γ par:

$$\Gamma = \frac{Z_{in}(\omega) - Z_0}{Z_{in}(\omega) + Z_0} \quad (I.2)$$

Où Z_0 est l'impédance caractéristique qui peut prendre différentes valeurs en fonction de l'application.

Les pertes par réflexion RL (en dB) sont alors données par la relation:

$$RL = -20 \log |\Gamma| \quad (I.3)$$

Plus simplement, le coefficient de réflexion est un paramètre qui permet de quantifier la quantité du signal réfléchi par rapport au signal incident. Il permet de caractériser l'adaptation de l'antenne au circuit qui la précède. Plus l'antenne est adaptée plus le coefficient de réflexion est faible. Ainsi, avec un coefficient de réflexion à -10 dB, 90% de la puissance est transmise à l'antenne.

Dans toute la suite de cette thèse on considérera qu'une bonne adaptation se traduit par un coefficient de réflexion inférieur à -10 dB.

I.3.2 Le rapport d'onde stationnaire:

Une antenne reliée à une ligne de transmission et rayonnant en espace libre peut être considérée comme un dispositif de couplage entre une onde guidée le long de la ligne et une onde rayonnée dans l'espace. Les lignes de transmission permettent aux ondes électromagnétiques de se propager dans les deux directions. Quand la source, la ligne de transmission et la charge ont toutes la même impédance, l'onde électromagnétique se propage de la source à la charge sans aucune perte du signal. Par contre, si la source n'a pas la même impédance que les autres éléments de la chaîne de transmission, une partie de l'onde sera réfléchi et renvoyée vers la source. Le rapport d'onde stationnaire ou ROS tout comme le coefficient de réflexion traduit l'adaptation ou la désadaptation d'impédance entre deux éléments (ligne de transmission et antenne). Lorsque l'adaptation n'est pas parfaite, la partie de l'onde réfléchi se superpose à l'onde incidente pour ne former qu'une seule onde, appelée onde stationnaire. Par conséquent, La tension est maximale lorsque les ondes incidente et réfléchi sont en phase et minimale lorsqu'elles sont en opposition de phase. L'équation donnant le ROS peut être facilement écrite en fonction du coefficient de réflexion.

$$ROS = \frac{1+|\Gamma|}{1-|\Gamma|} \quad (I.4)$$

Le ROS indique donc directement à quel point l'adaptation d'impédance est bien faite ou non. Lorsque l'impédance est parfaitement adaptée, le coefficient de réflexion est nul et le

ROS égal à 1. Au contraire, dans le cas où une impédance de charge donnerait un facteur de réflexion qui tendrait vers l'unité, ce qui signifierait que toute la puissance serait réfléchi, on mesurerait un ROS qui tendrait vers l'infini.

I.3.3 La bande passante:

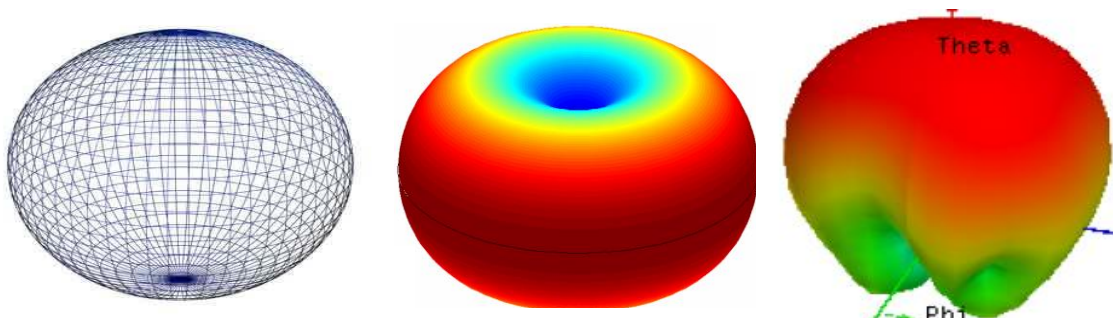
La bande passante est la région pour laquelle les propriétés électromagnétiques de l'antenne sont stables. Elle est donc liée aux caractéristiques d'adaptation et de rayonnement. La bande passante d'adaptation correspond à la région des fréquences où l'énergie reçue par l'antenne est transmise le plus efficacement au dispositif situé derrière l'antenne. La bande passante d'une antenne définit la bande de fréquence (délimitée par les fréquences minimale et maximale f_{\min} et f_{\max}) dans laquelle le coefficient de réflexion est inférieur à un seuil fixé. Dans toute la suite de la thèse la bande passante correspond à la bande de fréquence pour laquelle le coefficient de réflexion est inférieur de -10dB. En pourcentage, la bande passante (BW pour Band Width) est définie comme suit:

$$BW_{\%} = 100 \frac{f_{\max} - f_{\min}}{f_c} \quad (I.5)$$

f_c : la fréquence centrale

I.3.4 Diagramme de rayonnement :

Le diagramme de rayonnement est une représentation géométrique de la façon dont une antenne collecte ou rayonne l'énergie électromagnétique dans l'espace. Il représente les variations de la puissance que rayonne l'antenne par unité d'angle solide dans les différentes directions de l'espace [7]. Le diagramme de rayonnement change d'une antenne à une autre, il peut être omnidirectionnel comme dans le cas d'une antenne isotrope ou monopôle **Figure (I.2)-(a)**, ou directif comme dans le cas d'une antenne patch **Figure (I.2)-(c)**. Le diagramme de rayonnement d'une antenne permet de visualiser ses lobes dans les trois dimensions, dans le plan horizontal ou dans le plan vertical **Figure(I.2)**.



(a) Antenne isotrope (b) Antenne omnidirectionnelle (c) Antenne directive

Figure (.2): Diagramme de rayonnement pour différents types d'antennes.

Chapitre I: Généralité sur les antennes.

Le diagramme de rayonnement est formé par deux types de lobes, un lobe principal c'est le lobe de rayonnement contenant le maximum d'énergie et la direction du maximum de rayonnement. Tous les autres lobes sont appelés lobes secondaires. Ils représentent le rayonnement de l'antenne dans les directions indésirables. Le niveau du lobe secondaire est en général exprimé sous forme de rapport entre la densité de puissance dans le lobe en question et celle du lobe principal. Ce rapport est appelé le niveau des lobes secondaires et il est exprimé en dB.

I.3.5 Le rapport avant/arrière:

Il est relatif au lobe secondaire présent dans la direction opposée au lobe principal (à 180°). Le rapport avant/arrière est le rapport en dB de la puissance rayonnée dans la direction du maximum de rayonnement par rapport à celle rayonnée dans la direction opposée.

I.3.6 Les régions du champ électromagnétique:

L'espace entourant une antenne peut être divisé en trois régions distinctes comme le montre la **Figure (I.3)**.

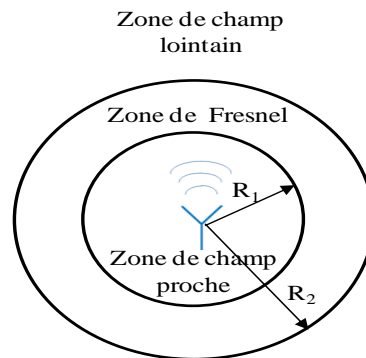


Figure (I.3): Zones de champ autour de l'antenne.

La structure du champ électromagnétique est différente en fonction de la distance à l'antenne. Les caractéristiques de rayonnement sont d'une façon générale données dans une zone dite de champ lointain.

- ✓ La première zone, la plus proche de l'antenne est délimitée par une sphère de rayon R_1 autour de l'antenne :

$$R_1 = 0.62 \sqrt{\frac{D^3}{\lambda}} \quad (\text{I.6})$$

Chapitre I: Généralité sur les antennes.

D: est la plus grande dimension de l'antenne et λ est la longueur d'onde de l'onde émise. Dans cette région appelée zone de Rayleigh le champ est principalement réactif.

- ✓ La deuxième zone, aussi appelée zone de Fresnel, est définie par un volume compris entre deux sphères autour de l'antenne :

$$R_1 < \text{Zone de Fresnel} < R_2$$

$$\text{Avec: } R_2 = \frac{2D^2}{\lambda} \quad (\text{I.7})$$

Dans cette région le champ rayonné prédomine et la distribution angulaire de champ dépend de la distance à l'antenne.

- ✓ La troisième zone, la région de champ lointain (dite zone de Fraunhofer) est définie pour R, la distance à la source, supérieure à R_2 . Le champ rayonné prédomine et la distribution angulaire de champ ne dépend plus fortement de la distance à l'antenne. Dans cette zone la densité de puissance est inversement proportionnelle à la distance au carré. Ce qui implique une forte chute de la puissance rayonnée.

Lorsque l'on parle des propriétés de rayonnement d'une antenne il est sous-entendu que l'on considère les propriétés observables en champ lointain (ou zone de Fraunhofer) car c'est cette distribution du champ électromagnétique qui va être vue par l'autre antenne de la chaîne de transmission. C'est donc la zone de Fraunhofer qui nous intéresse dans le cadre de cette étude.

I.3.7 Le gain réalisé et la directivité :

Le gain $G(\theta, \varphi)$ d'une antenne est un paramètre qui prend en compte ses performances électriques pour exprimer sa capacité à orienter le rayonnement dans une direction donnée. Le gain, qui s'exprime en fonction des angles d'orientation polaire (θ, φ) , est le rapport entre la puissance $P(\theta, \varphi)$ qu'elle rayonne par unité d'angle solide dans cette direction et la puissance qu'une source isotrope rayonnerait par unité d'angle solide, évidemment avec la même puissance d'alimentation P_a :

$$G(\theta, \varphi) = \frac{P(\theta, \varphi)}{P_a/4\pi} \quad (\text{I.8})$$

Enfin, le gain d'une antenne peut se définir comme le rapport de la densité de puissance rayonnée par l'antenne sur la densité de puissance rayonnée par l'antenne isotrope de référence, dans la même direction, les deux antennes étant alimentées par la même puissance d'excitation. Le gain maximal est relevé sur les diagrammes de rayonnement mesurés en chambre anéchoïque.

La directivité $D(\theta, \varphi)$ est le rapport entre la puissance $P(\theta, \varphi)$ par unité d'angle solide dans la direction (θ, φ) et la puissance que rayonnerait la source isotrope par unité d'angle solide, à condition que les puissances totales rayonnées soient les mêmes. De manière simplifiée, la directivité est égale au rapport de l'intensité de rayonnement dans une direction donnée par rapport à celle d'une source isotrope. Si la direction n'est pas spécifiée, on considère qu'il s'agit de la direction de rayonnement maximal.

$$D(\theta, \varphi) = \frac{P(\theta, \varphi)}{Pr/4\pi} \quad (\text{I.9})$$

I.3.8 Le rendement de l'antenne :

Le rendement (η_{ray}) d'une antenne est exprimé par le rapport du gain (G) et de sa directivité (D), qui correspond également au rapport de la puissance rayonnée par la puissance d'alimentation de l'antenne.

$$\eta_{\text{ray}} = \frac{G}{D} \quad (\text{I.10})$$

On distingue l'efficacité rayonnée de l'efficacité totale. Alors que l'efficacité totale prend en compte les pertes de désadaptation, l'efficacité rayonnée dépend uniquement de la structure géométrique de l'antenne. Elle est fixée par les dimensions, la forme, l'épaisseur et la largeur de métallisation, mais aussi par les pertes dans le substrat diélectrique. Elle représente bien un paramètre intrinsèque à l'antenne.

Le rendement de l'antenne (η_{ray}) ou encore efficacité de rayonnement d'antenne est donc aussi défini comme le rapport de la puissance utile rayonnée et de la puissance acceptée par l'antenne [8]. Avant de définir les différentes efficacités, il convient de considérer une antenne comme un système dont nous étudions la conservation de l'énergie. La puissance fournie à l'antenne est dissipée par les pertes dans l'antenne et rayonnée dans l'espace libre. Une partie de cette puissance est réfléchiée ($P_{\text{reflèchie}}$) et n'entre pas dans la structure de l'antenne contrairement à l'autre partie qui est injectée ($P_{\text{injectée}}$) dans la structure de l'antenne.

La puissance sortant de ce système, est la puissance rayonnée par l'antenne (P_r). La puissance acceptée ($P_{\text{acceptée}}$) est égale à la puissance injectée moins la puissance des pertes (P_{pertes}) dans la structure de l'antenne.

On peut donc distinguer les différentes puissances mises en jeu dans le processus de rayonnement comme indiqué ci-dessous **Figure (I.4)**.

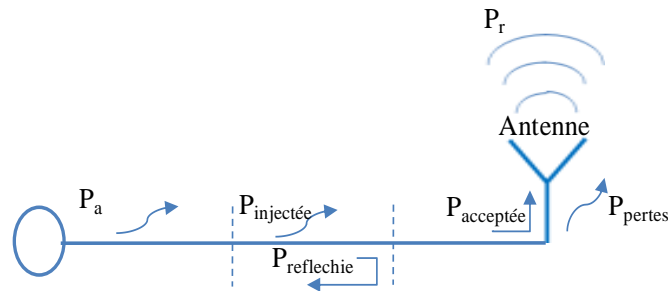


Figure (I.4): Puissances mises en jeu durant le processus de rayonnement.

Le rendement d'une antenne est très important et caractérise globalement son comportement mais il peut être très difficile à déterminer. Par exemple, les antennes imprimées ont souvent une très bonne efficacité de rayonnement mais les pertes dues au réseau d'alimentation, au matériau (ou substrat) et aux ondes de surface réduisent considérablement le rendement d'antenne [6]. L'efficacité de rayonnement, η_{ray} , se traduit donc aussi par le rapport entre la puissance rayonnée et la puissance d'alimentation. Elle est donc définie par l'expression:

$$\eta_{\text{ray}} = \frac{P_r}{P_a} \quad (\text{I.11})$$

I.3.9 Bilan de puissance :

Le fonctionnement d'une antenne exprime la manière dont elle transmet un signal injecté au port d'alimentation sous forme d'onde électromagnétique qui se propage dans l'espace dans des directions spécifiques suivant le type de l'antenne. Lorsqu'une onde électromagnétique atteint l'antenne de réception, une partie de sa densité de puissance est captée puis convertie en un signal transmis via le port de sortie de l'antenne vers le récepteur.

Pour assurer la communication entre deux terminaux sans fil, il faut que la puissance captée par une antenne réceptrice dépasse un certain seuil. Ainsi, pour établir une communication et échanger des informations, il faut au moins deux antennes qui doivent respecter un bilan de puissance défini par la formule de Friis [7]. La puissance de réception

Chapitre I: Généralité sur les antennes.

dépend de la puissance émise par l'antenne émettrice, de la fréquence de fonctionnement, de la distance qui sépare les deux antennes, des gains des antennes et des pertes dans le canal de transmission (de l'air, dans la plupart des cas). La **Figure (I.5)** illustre la transmission entre deux antennes.

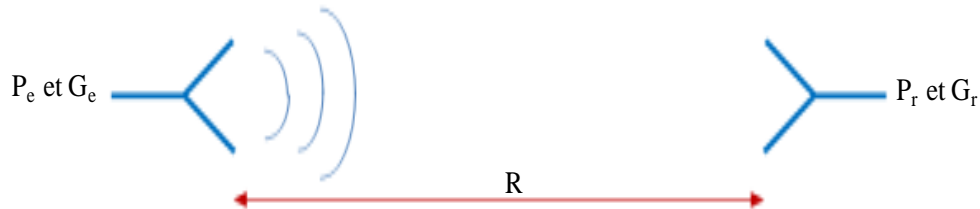


Figure (I.5): Bilan de liaison entre deux antennes en communication.

$$\frac{P_r}{P_e} = \left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 G_r G_e \quad (\text{I.12})$$

G_r et G_e sont les gains effectifs des différentes antennes, R est la distance séparant les antennes, λ est la longueur d'onde, P_r la puissance reçue par l'antenne de réception et P_e la puissance émise par l'antenne d'émission. Cette expression ne prend pas en compte les pertes de polarisation ou de désadaptions des antennes.

Les pertes dans l'espace libre $\left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2$ varient de manière importante comme l'inverse du carré de la distance et de la fréquence. La distance R est supposée assez grande pour que les antennes soient en zone de champ lointain l'une par rapport à l'autre.

Pour recevoir une puissance suffisante au niveau du récepteur, il faut disposer d'antennes ayant de bons rendements et de forts gains dans la direction voulue (antennes directives).

Le bilan de liaison est couramment évalué grâce à la formule de Friis. Cette relation n'est valable que dans un cas idéal, où les deux antennes communicantes sont parfaitement alignées et qu'il n'y a pas d'obstacle entre les deux.

Dans la partie suivante, on énonce quelques généralités sur les différents types d'antennes existants. Tout d'abord la notion des antennes monopôles ultra large bande sera précisée et des exemples seront donnés.

I.3.10 La polarisation:

Elle est définie comme étant l'orientation du champ électrique d'une onde électromagnétique.

Chapitre I: Généralité sur les antennes.

La polarisation d'une onde est une donnée fondamentale pour l'étude des antennes. En effet selon la constitution de l'antenne, elle ne recevra qu'une certaine forme de polarisation.

On la définit en s'intéressant à la façon dont se propage le vecteur E.

On distingue trois types de polarisation:

a) Polarisation rectiligne ou linéaire :

La polarisation de l'onde est dite rectiligne ou linéaire lorsque le champ électrique E se propage en maintenant une direction constante dans le temps.

b) Polarisation circulaire :

La polarisation de l'onde est dite circulaire lorsque le champ électrique E décrit une hélice à section droite circulaire au cours du temps. Si on projette l'extrémité de E sur un plan orthogonal **Figure (I.6)**, on obtient un cercle. Ce cercle peut être décrit en fonction du temps dans un sens ou dans l'autre : on parle alors de polarisation circulaire droite ou gauche.

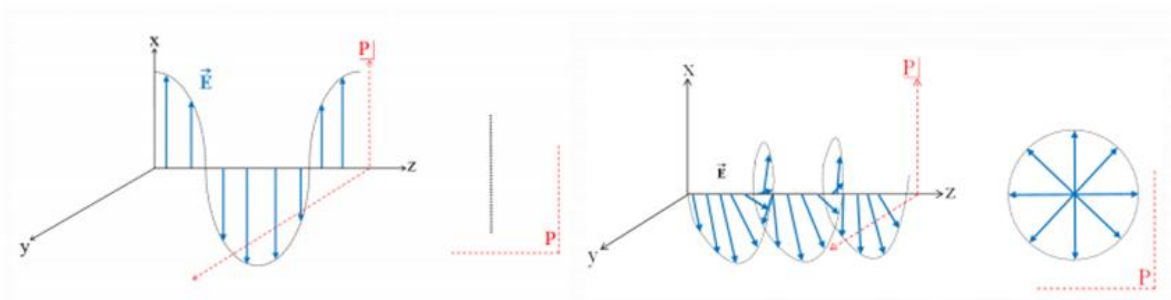


Figure (I.6):Polarisation rectiligne ou linéaire et polarisation circulaire.

c) Polarisation elliptique :

Dans ce cas, l'extrémité du vecteur E décrit une ellipse lorsque de sa projection dans un plan orthogonal à la propagation. Comme pour la polarisation circulaire, on distingue la polarisation elliptique droite et gauche.

I.3.11 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 comme suit :

$$PIRE = G * P_a \quad (I.13)$$

I.4 Rôles des antennes:

Le rôle d'une antenne est de convertir l'énergie électrique d'un signal en énergie électromagnétique transportée par une onde électromagnétique. Le transport d'énergie par une onde électromagnétique va donc permettre le transfert d'information sans support physique à travers un canal ou une liaison radioélectrique, à condition que l'onde électromagnétique soit modulée par un signal informatif. Une liaison radio électrique est un canal de transmission entre un émetteur et un récepteur, dont le support de transmission est assuré par des ondes électromagnétiques. Comme tous les canaux de communication, il est soumis aux problèmes posés par le bruit et les perturbations, qui vont limiter les performances du système de transmission. Ils sont aussi dépendants des propriétés de l'antenne qui va donner naissance à l'onde électromagnétique, et à l'environnement autour de l'antenne qui va influencer sur la propagation des ondes électromagnétiques. La connaissance et la modélisation de la propagation et des antennes sont complexes mais nécessaires pour dimensionner un système de transmission sans fils [9].

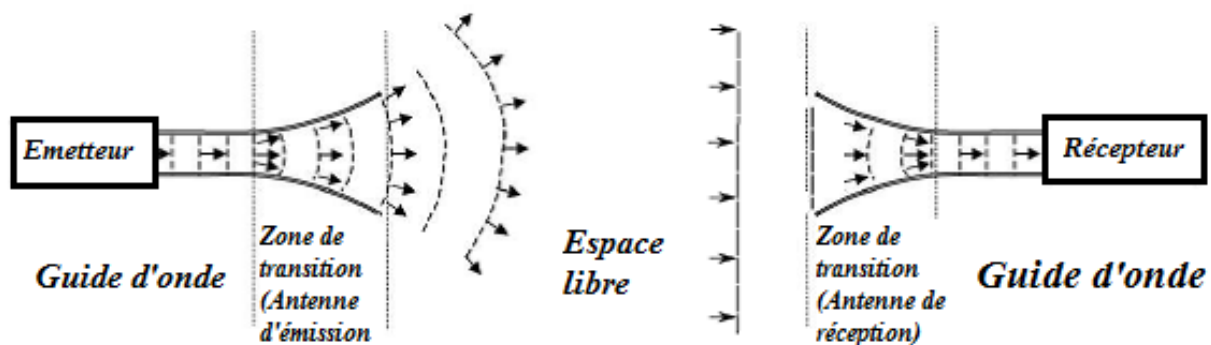


Figure (I.7): Rôles des antennes d'émission et de réception.

I.5 Différents types d'antennes:

Il existe plusieurs types d'antennes selon la géométrie, le gain la forme du faisceau et la bande passante. On peut les classer comme suit [10] :

- ✓ Les formes ou géométries : Antennes filaires (dipôle, boucle, spirale), antennes imprimées (patch, dipôle imprimé, spirale), antennes à ouverture (cornet, fente) ;
- ✓ Le gain : Gain élevé (planaire), gain moyen (cornet), gain bas (dipôle, fente, patch) ;
- ✓ La forme de faisceau : Omnidirectionnelle (dipôle), faisceau étroit (planaire), faisceau large (antenne réseau) ;
- ✓ La largeur de bande : Bande large (spirale), bande étroite (patch, fente) ;

Chapitre I: Généralité sur les antennes.

- ✓ Domaine d'utilisation (liaison terrestre, liaison spatiale, faisceaux hertziens, radar ...).

I.6 Emplacement des antennes sur avion :

Puisque le rayonnement des antennes dépend du type d'antenne et de sa position, le choix de leurs emplacements est primordial pour assurer le bon fonctionnement de tous les systèmes avioniques. Contrairement à ce qu'on pourrait penser, la position des antennes est déterminée en premier lieu par des considérations d'ordres mécaniques et aérodynamiques, les considérations électromagnétiques venant quant à elles en second plan. En outre, chaque système impose ses conditions en ce qui concerne le diagramme de rayonnement.

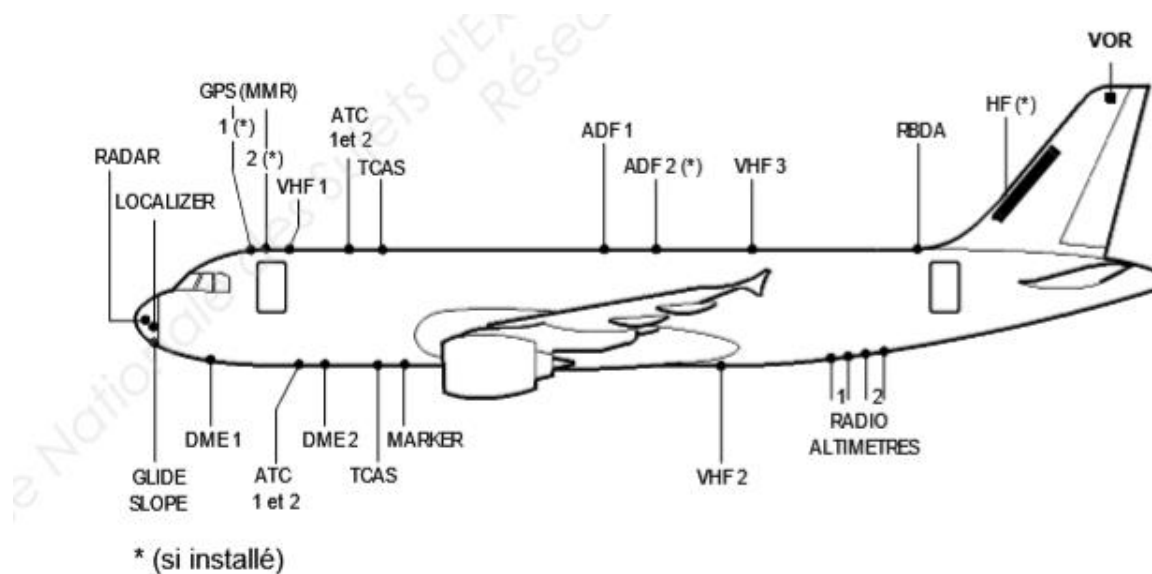


Figure (I.8): Emplacement des antennes sur avion. [11]

I.7 Les bandes de fréquence et leurs systèmes sur aéronef :

Dans l'espace les avions utilisent les communications HF (Hautes Fréquences) quand la VHF (très hautes fréquence) ne suffit plus. L'utilisation principale de l'HF est primordiale pour les vols transocéaniques. Les avions communiquent avec les stations au sol par l'intermédiaire de l'HF pour les rapports de position et d'autres fins.

On subdivise ce domaine en plusieurs bandes de fréquences, nommées par des lettres dont la définition est donnée dans le **tableau (I.1)** :

Chapitre I: Généralité sur les antennes.

Tableau (I.1): Systèmes et fréquences typiques pour un aéronef civil.

Bande	Système	Fréquences
AM	ADF	190-1799 kHz
VHF	MB	75MHz
VHF/UHF	ELT	406.025et / ou 121.5, 243MHz
VHF	VOR/LOC	108-118 MHz
VHF	VHF COM	116-156 MHz
VHF/UHF	GS	329.15-335 MHz
Bande L	DME	960-1220 MHz
Bande L	ATC, TCAS-b	1020,1090 MHz
Bande L	TCAS-T	1030,1090 MHz
Bande L1	GPS	1575.42 MHz
Bande C	Radio Altimètre	4200-4400 MHz
Bande X	Wx	9.34 GHz

I.8 Equipement de Mesure de Distance (DME):

I.8.1 Définition:

Un DME (Distance Measuring Equipment) est un transpondeur au sol qui permet, en répondant aux interrogations d'un émetteur-récepteur embarqué, de calculer avec précision la distance séparant les deux équipements radio [12].

Il permet de connaître la position de l'avion ainsi que sa vitesse sol presque instantanément à l'aide d'un seul relèvement [13]. Le DME fut inventé par Edward George "Taffy" Bowen et V.D.Burgmann [14].

I.8.2 Le principe du DME :

L'équipement de mesure de distance (Equipement de Mesure de Distance - DME) est un radio-transpondeur qui montre de façon continue la distance qui sépare l'aéronef d'une station DME au sol. Des paires d'impulsions (de largeur de 3.5 microsecondes) espacées de 12 ou 36 microsecondes sont envoyées par l'avion pour interroger la station au sol. Cette dernière transmet alors les impulsions de retour vers l'avion, avec le même intervalle de temps mais à une fréquence différente. Elle ajoute aussi un délai supplémentaire de 50 microsecondes. Une photo illustrant les antennes utilisées par le système DME est montrée à

Chapitre I: Généralité sur les antennes.

la **Figure (I.9)**. Le récepteur de bord mesure le temps aller-retour de ce signal et déduit la distance par rapport à la station au sol. Le système cherche des balises à l'avant de l'avion. Par conséquent, l'antenne est placée dans la partie inférieure (avant) du fuselage. En pratique deux antennes sont utilisées pour assurer la redondance. Les antennes pour ce système sont des monopoles ou des fentes verticales. Du fait que la longueur d'onde à 1 GHz est 30 cm, un monopole d'un quart de longueur d'onde aurait 7.5 cm de hauteur. Une antenne de cette taille est souvent incorporée dans une lame ou blade; aussi appelé aileron de requin. Cet appareil de mesure de distance opère dans la bande 960MHz-1215MHz et son signal a une polarisation verticale.



Figure (I.9): Antennes DME à lame.

Le DME a un rayonnement omnidirectionnel et sa portée correspond à une portée optique donc elle augmente avec l'altitude de l'aéronef, mais elle dépasse rarement les 200Nm (370Km) sur la plupart des appareils. Sa précision est de l'ordre de 0,2 Nm et il est quasi insensible aux perturbations atmosphériques [15].

Rarement implanté seul le DME est généralement couplé à un VOR ou à un ILS, dans ce cas l'utilisateur affiche uniquement la fréquence du VOR ou de l'ILS. Le DME peut également être associé à un Locator (ADF) pour une approche sur un aérodrome.

Cette nécessité de dialogue entre les deux appareillages distants implique qu'un DME ne peut être utilisé simultanément que par un nombre limité d'aéronefs (environ une centaine). Sinon cela sature la station au sol et aucun aéronef ne sera plus capable d'utiliser les informations reçues [12].

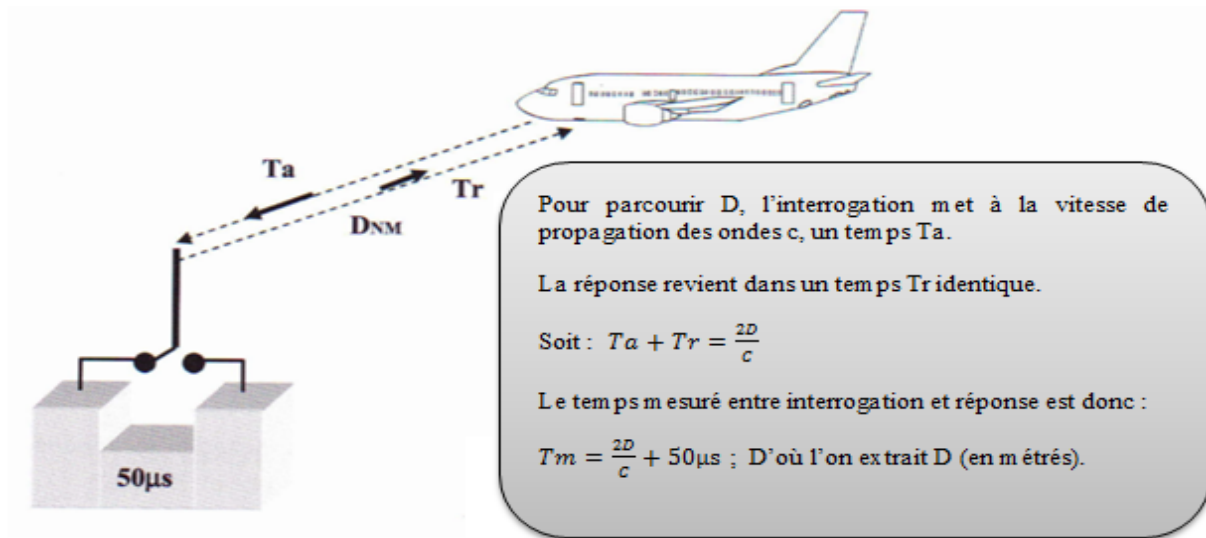


Figure (I.10): Dialogue entre le DME et la station sol. [16]

I.8.3 Précision de la distance mesurée:

La précision d'un DME est d'environ $0,25 \text{ Nm} + 1,25 \%$ de la distance [12]. La distance fournie par le DME n'est pas la distance sol mais la distance oblique avion-station. En pratique cette erreur est négligeable tant que le rapport distance/altitude reste suffisamment grand [13].

Donc, plus l'aéronef est proche de la station, plus la distance réelle horizontale au sol sera fautive. Mais à la verticale de la station, le DME indiquera la hauteur de l'avion par rapport à la station et non un zéro. Le DME donne donc une direction oblique «avion – station»

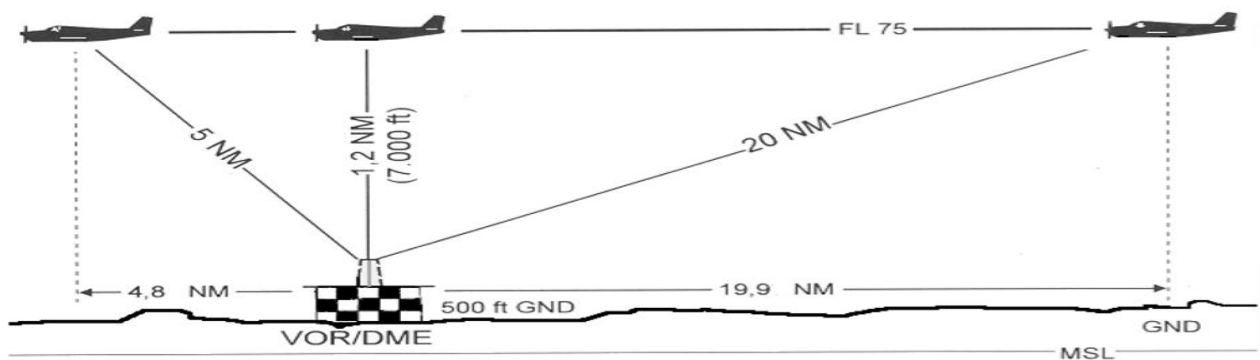


Figure (I.11): Différentes positions d'un avion par rapport à une station DME [12].

I.9 Boîtier de commande:

Ci-dessous un boîtier DME indépendant avec sélection des fréquences, affichage de la distance, de la vitesse sol et du temps pour rejoindre la station sol. Attention la vitesse sol et le

Chapitre I: Généralité sur les antennes.

temps ne seront valables que si l'aéronef se rapproche ou s'éloigne sur un radial constant de la station et qu'il se trouve à une distance raisonnable (mesure oblique) [15].



Figure (I.12): Boitier de commande du DME.

I.10 Conclusion:

La transmission des ondes dans l'environnement et plus précisément dans le canal de propagation a conduit au développement de multiples usages et services : radiodiffusion, télévision, radar, télécommunications, radionavigation... dans toutes ces applications, l'antenne désigne ce composant indispensable au rayonnement et à la captation des ondes électromagnétiques.

Les antennes ont des propriétés et des caractéristiques, selon lesquelles elles sont valorisées. Plusieurs techniques existent pour les réaliser. Alors, pour assurer un bon fonctionnement, il faut choisir celle la plus adaptée à l'application envisagée.

Ce premier chapitre a permis de présenter le contexte général dans lequel s'inscrivent les travaux effectués durant ce mémoire. Le très fort développement des antennes aéronautiques a entraîné récemment la création de nombreuses antennes réglementées par des normes. Un état de l'art de ces antennes a permis de mettre en évidence la nécessité de concevoir des antennes performantes dont les caractéristiques sont appropriées aux besoins des stations de base.

Chapitre II:

**Antenne Ultra Large
Bande**

II.1 Introduction:

Le terme «ultra-large bande» a été employé dès la fin des années 80 par le département américain de la défense. Avant sa standardisation, la technologie ULB a connu plusieurs autres noms tels que : communication en bande de base, radio impulsionnelle, communication sur porteuses libres, communication non sinusoïdale, communication à grande bande passante relative, super-large bande ou mono-impulsion.

En effet, ces 20 dernières années ont été marquées par l'utilisation de l'ULB uniquement pour certaines applications règlementées, et notamment la détection, le radar et les communications militaires. La particularité des systèmes ULB repose sur l'utilisation d'impulsions de faible puissance. Cette forme de communication a été présentée par R. A. Scholtz à la conférence Milcom en 1993 [SCH03], avec pour objectif principal de proposer un moyen de communication discret et surtout résistant en milieux fortement bruités.

Concevoir des antennes adéquates aux systèmes de communication sans fil à bande ultra large (ULB) est notre but majeur. Dans ce chapitre, nous nous intéresserons principalement à la technologie ULB et plus exactement aux antennes ULB et leurs caractéristiques.

II.2 Historique:

Durant les 3 dernières décennies, pour faire face à l'encombrement des bandes de fréquences utilisées pour la transmission d'informations, on a essentiellement cherché à réduire la largeur de bande nécessaire pour transmettre ces informations avec un taux d'erreurs acceptable. Ce n'est que récemment – une dizaine d'années – que le concept d'ultra large bande a retrouvé un intérêt principalement suscité par le développement des transmissions à courte distance.

Si le terme « ultra large bande » est relativement récent le concept lui-même est par contre bien plus ancien: [17]

- ❖ Dès la fin du 19^{ème} siècle, Heinrich Hertz avait eu l'idée d'utiliser des décharges électriques pour produire des ondes électromagnétiques. C'était la base de la technique Ultra large bande.
- ❖ Dans les années 60, Ross et Bennett [18] étudient pour la première fois la propagation d'ondes électromagnétiques d'un point de vue temporel plutôt que d'un point de vue

Chapitre II: Antennes Ultra Large Bande.

fréquentiel. Dans leur publication, apparaissent pour la première fois, des applications liées à cette nouvelle technique : les communications et les radars.

- ❖ Dans les années 1970-1994, la majorité des travaux vise à améliorer certains sous-systèmes de cette nouvelle technique. A cette époque, on lui donne plusieurs noms: technologie "sans porteuse", ou en "bande de base" ou encore technologie "impulsionnelle". C'est en 1989 que le terme ultra large bande apparaît dans une publication du ministère de la Défense aux Etats-Unis. Les travaux concernant cette technologie sont effectués, pour la plupart, dans le cadre de programmes confidentiels américains (militaires).
- ❖ En 1994, la confidentialité des travaux liés à l'ultra large bande est levée: La recherche se développe de façon importante aussi bien dans l'industrie que dans les universités.
- ❖ En 2002, la FCC (Federal Communication Commission) [2] [19], l'organisme de régulation des communications américain, réglemente l'Ultra large bande: Elle en donne une définition précise, et définit les niveaux de puissance maximale autorisés (- 41 dBm /MHz pour la bande haute).

II.3 Définition de l'ultra large bande:

La définition de l'Ultra large bande donnée par la FCC en février 2002 est la suivante.

Un signal est dit ultra large bande si:

- ✓ sa bande passante est au minimum de 500 MHz (à -10 dB) ;
- ✓ Sa bande passante relative est supérieure à 0.2.

$$BP_{relative} = 2 * \frac{f_h - f_l}{f_h + f_l} > 0.2 \quad (II.1)$$

Où f_h et f_l désignent respectivement les fréquences limites hautes et basses du spectre de signal, fréquences prises -10dB. Les deux conditions ne sont pas forcément remplies en même temps.

II.4 Caractéristiques principales de l'Ultra Large Bande:

Par rapport aux autres systèmes de transmission classique, l'ultra large bande dispose d'un certain nombre d'avantages remarquables:

II.4.1 Problème dû à la propagation par trajets multiples:

L'évanouissement du signal dû à la propagation par trajets multiples peut sensiblement réduire l'efficacité des systèmes de communications classiques. Dans le cas des communications ultra large bande, le signal transmis possède une largeur de bande très importante, quelques GHz en pratique (dit de façon équivalente une résolution temporelle très fine) comme la fenêtre d'observation du récepteur est très étroite, les réflexions multiples arrivées avec un retard de l'ordre de la nanoseconde peuvent être additionnées pour donner un gain comparable à celui obtenu dans le cas d'une propagation par trajet unique et direct. Cette caractéristique permet à la technologie ULB d'être performante dans des environnements encombrés.

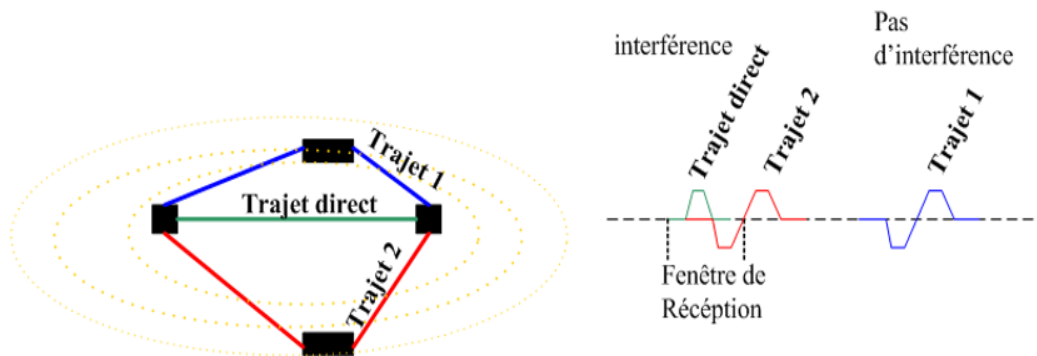


Figure (II.1): Propagation par trajets multiples.

La plupart des concepteurs de systèmes ULB adoptent une autre définition, à savoir une bande passante – 10 dB supérieure à 1.5 GHz (ou une bande passante fractionnelle supérieure à 0.25 par rapport à la fréquence centrale du système).

II.4.2 Communications protégées:

Les signaux ULB sont plus difficiles à détecter que les signaux de radiocommunications classiques car ils utilisent une grande largeur de bande et peuvent être produits sous forme de bruit (DSP très faible). Les signaux ULB sont quasiment indétectables parce qu'ils peuvent être transmis avec un niveau de densité spectrale de puissance bien inférieure au bruit de fond des récepteurs classiques. Cette caractéristique, particulière à l'ultra large bande, permet à cette dernière de coexister avec les systèmes de communications classiques.

II.4.3 Capacité de la technologie ULB:

Le théorème de Shannon nous enseigne que la capacité d'un système est donnée par la formule suivante :

$$C = B * \log_2(1 + SNR) \quad (II.2)$$

Où B désigne la bande passante du système et SNR le rapport signal à bruit.

De cette formule, on déduit que la capacité d'un système croît linéairement avec la bande passante mais croît seulement logarithmiquement avec le rapport signal à bruit. Par conséquent, pour augmenter la capacité d'un système, la meilleure méthode consiste à augmenter sa bande passante; c'est ce qui est réalisé par la technique ULB.

II.4.4 Simplicité relative des systèmes ULB:

Dans les systèmes de communications sans fils utilisant la technologie ULB, l'information en bande de base peut moduler directement les impulsions de courtes durées au lieu de moduler une onde sinusoïdale. L'architecture de l'émetteur et du récepteur ULB devient alors très simplifiée, ses simplifications se traduisent par une réduction du coût des systèmes RF.

II.4.5 Inconvénients de l'Ultra Large Bande:

Un des inconvénients lié à l'utilisation de cette nouvelle technique de communication tient au fait que les fréquences utilisées sont déjà employées par d'autres systèmes, ce qui rend possible l'existence d'interférences.

II.5 Différent types d'application de l'Ultra Large Bande:

Il existe trois grandes catégories d'applications principales pour les systèmes ULB: la détection, la géolocalisation, et les communications sans fil [19] [20]. Les deux premières ne demandent pas un gros débit d'information, mais nécessitent une bonne précision sur de grandes distances et une robustesse aux trajets multiples, tandis que les communications sans fils peuvent tirer profit des très hauts débits à courte portée offerte par la technologie ULB, les bandes de fréquences pour ces applications sont :

- ✓ Bande de fréquence 24 GHz et 77 GHz: applications liées aux véhicules;
- ✓ Bande de fréquence < 1 GHz : radar GPS et radar « SeeThrough Wall »;
- ✓ Bande 1.99 – 10.6 GHz : applications médicales (imagerie);

Chapitre II: Antennes Ultra Large Bande.

- ✓ Bande 3.1 -10.6 GHz : système de communication sans fil et applications liées à la localisation.

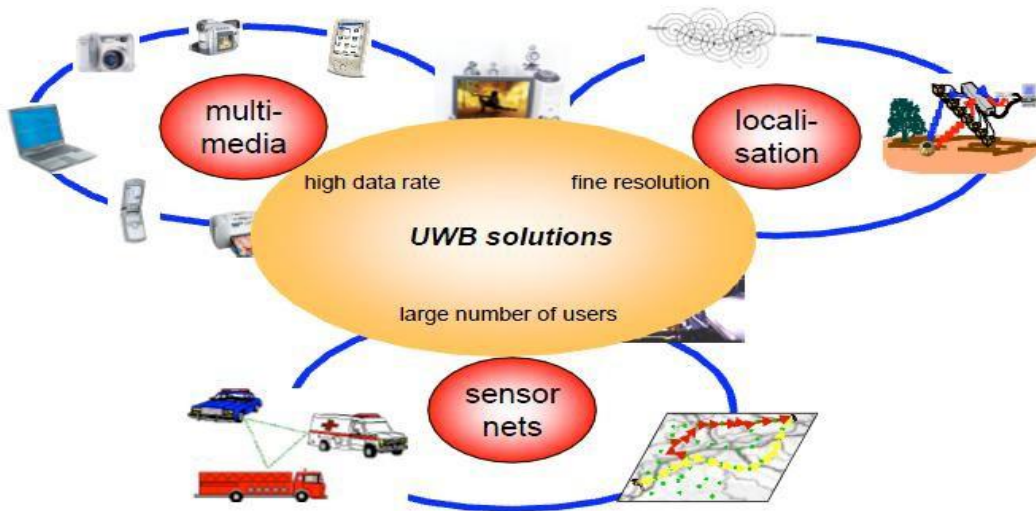


Figure (II.2): Les différentes applications de l'Ultra Large Bande [21].

II.6 Antenne ultra large bande:

Les antennes ultra large bande, adaptées sur plus de deux octaves, sont utilisées dans de nombreux domaines.

Les antennes monopoles doivent avoir des structures rayonnantes présentant une couverture multi-bandes et/ou large bande. Or les fréquences utilisées pour les différents services sont soit très éloignées, soit adjacentes suivant les standards que l'on considère. Face à cette contrainte, il est donc extrêmement difficile d'imaginer une structure compacte réunissant les caractéristiques permettant l'accès à l'ensemble des services. Cependant, les standards «GSM Global System for Mobile communication» (880MHz-960MHz), PCS «Personal Communications Services/System» (1.85 GHz-1.99GHz) et WLAN «Wireless Local Area Network» (2.4 GHz-5.8 GHz) sont relativement voisins du point de vue de leurs caractéristiques de rayonnement et bande de fréquences **Figure (II.3)** [22] [23]. Les antennes ULB sont nombreuses dans la littérature scientifique et candidatent pour répondre de la meilleure manière qui soit aux exigences de ces standards [24] [25].

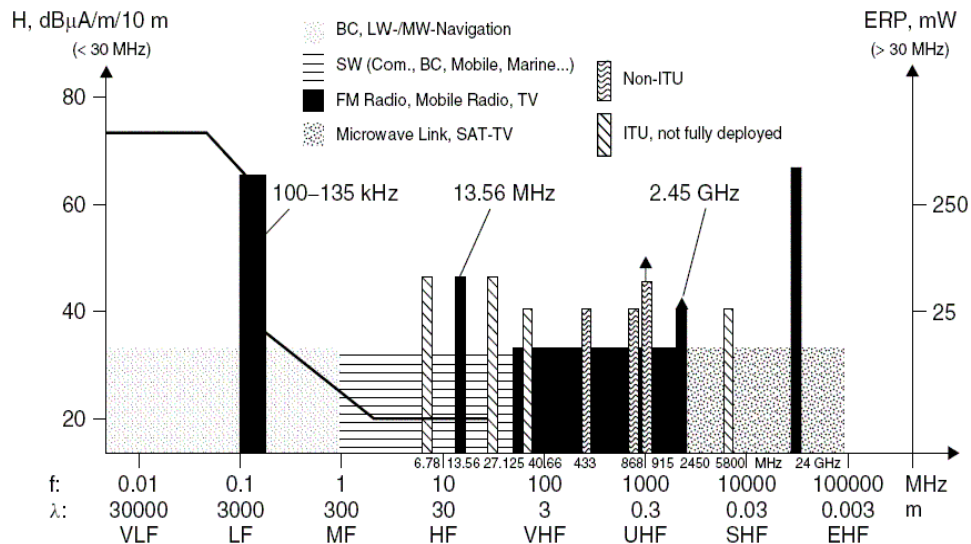


Figure (II.3) : Les différentes bandes de fréquences, champ magnétique et puissances [26].

Les antennes large bande suscitent un intérêt croissant dû à l'évolution rapide de la technologie des systèmes de communication. Les applications sont multiples et diverses. De nombreuses antennes (ULB) ont été développées principalement pour le domaine des télécommunications. La diversité des antennes ULB est tellement vaste qu'il est pratiquement impossible de faire un recensement exhaustif des antennes existantes.

II.7 Classification des antennes ULB selon leurs formes et leurs spécifications:

II.7.1 Antennes indépendantes de la fréquence:

Les antennes indépendantes de la fréquence sont connues depuis longtemps et ont été définies par Rumsey en 1957 [20].

Théoriquement, les antennes indépendantes de la fréquence sont des antennes dont le diagramme de rayonnement l'impédance d'entrée et la polarisation restent virtuellement inchangées sur une bande passante quasiment infinie [27].

a) Antennes spirales:

Ces antennes ont été décrites par Dyson en 1959 [28]. Il existe trois types de spirales: spirale équiangulaire (spirale logarithmique), spirale conique et la spirale de type archimède [29].

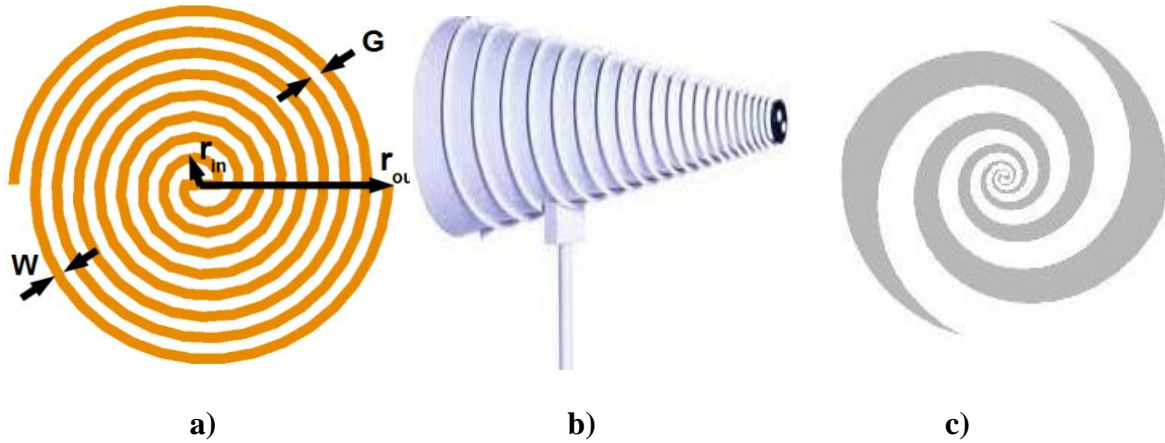


Figure (II.4): Antenne spirale a) Archimède b) Conique c) Logarithmique.

b) Antenne log périodique:

Les antennes log périodique ont été conçues pour la première fois par Duhamel et Isabell en 1959 [30].

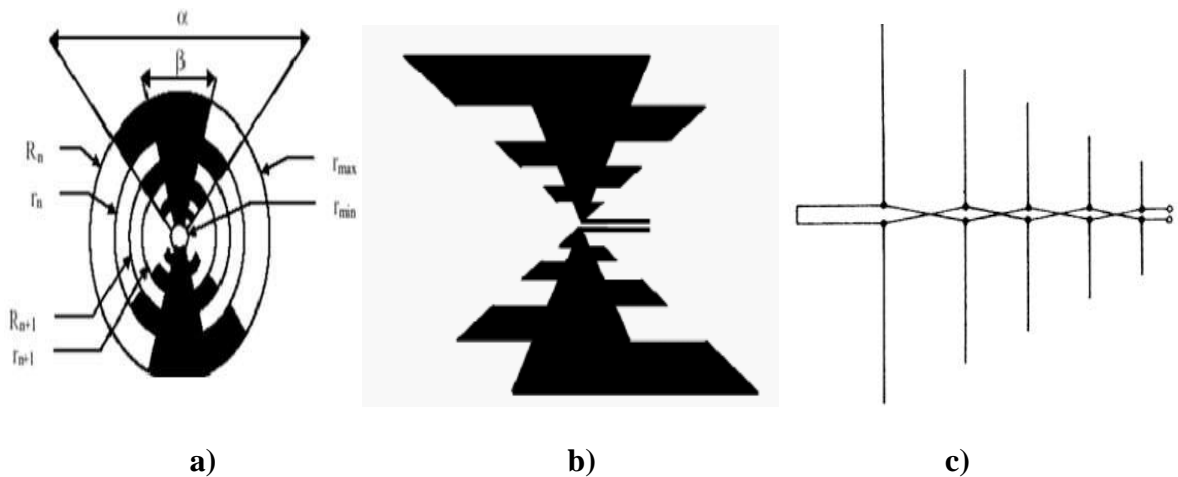


Figure (II.5): Antenne log périodique a) Circulaire b) Trapézoïdale c) Dipôle.

II.7.2 Antennes omnidirectionnelles (élémentaires):

En général, les structures d'antennes élémentaires sont considérées comme une évolution des monopôles ou de dipôle simples

On distingue deux grandes catégories dans les antennes élémentaires, les antennes volumiques qui ont des géométries tridimensionnelles (3D), et les antennes monopoles/dipôles large bandes (leurs dérivées bidimensionnelles (2D)).

a) Volumique:

L'histoire des antennes ultra large bande revient à 1898, l'antenne biconique est parmi les premières antennes découvertes par Oliver Lodge en 1898 [31].

Chapitre II: Antennes Ultra Large Bande.

En 1939, Carter a pu suivre les travaux de Lodge et a redécouvert les antennes biconiques et discone montrées sur **la figure(II.6)**

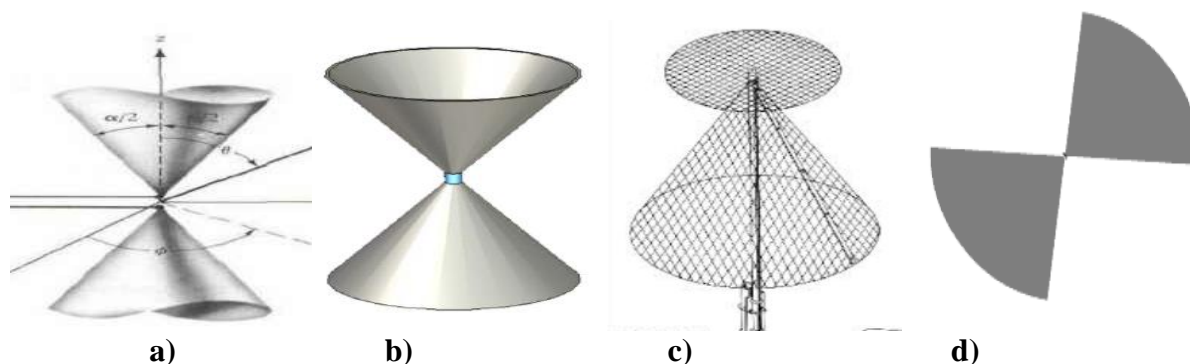


Figure (II.6): Antenne a) biconique dimension infini b) biconique dimension fini c) discone d) papillon.

b) Monopole:

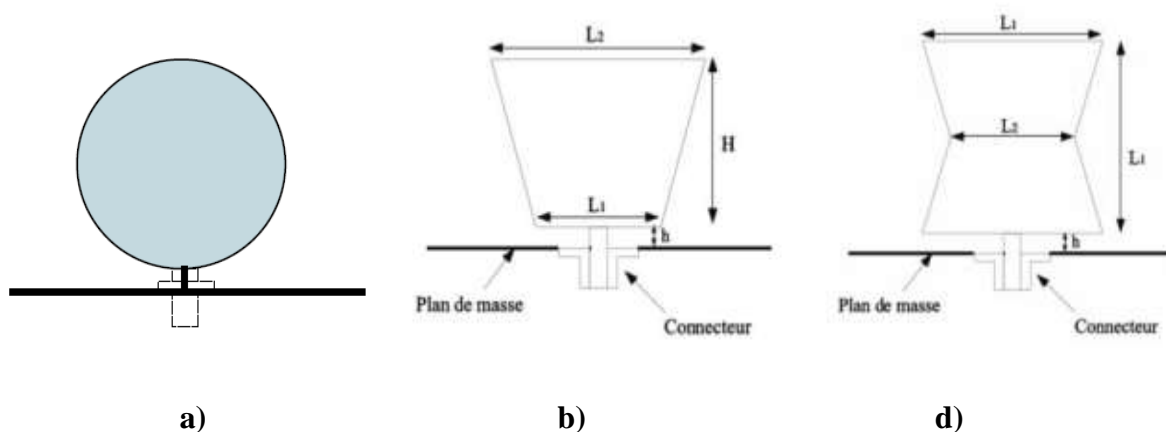


Figure (II.7): Antenne a) circulaire /elliptique b) trapézoïdale d) papillon.

II.7.3 Antenne directive:

Les antennes ULB directives peuvent être décrites comme des systèmes de transition entre un guide d'onde et l'espace libre.

L'antenne ULB directive est souvent utilisée dans des applications particulières; par exemple dans le cas d'une station de base en communication avec des stations fixes.

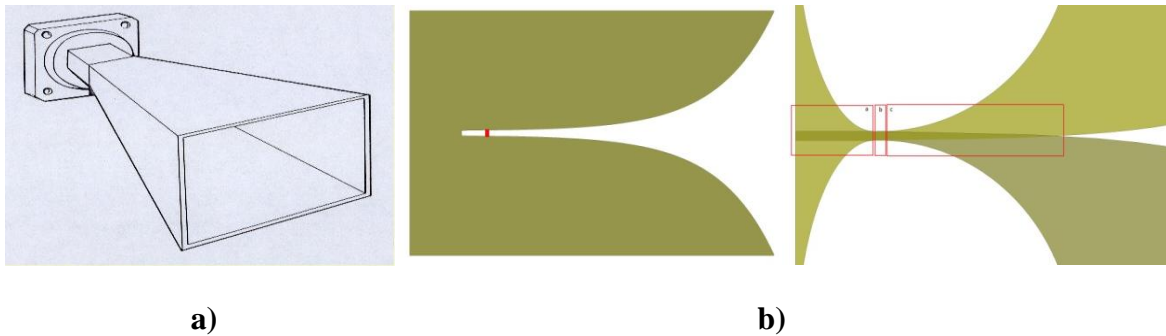


Figure (II.8): Antenne a) cornet b) Vivaldi.

II.8 Classification des antennes ULB selon leurs applications:

Trois classes d'antenne ULB fondées sur les applications ont déjà fait surface depuis l'apparition de l'antenne ULB.

En premier, la classe « **DC to daylight** » regroupe les antennes conçues pour obtenir le plus de bande passante possible. Il y a des applications typiques comportant à la fois des GPR (Ground Penetrating Radar), la CEM (compatibilité du Champ électromagnétique ou mesure du champ), les armes électromagnétiques, les radars en mode impulsionnel (impulse radars) ainsi que les systèmes de communication discrets. Le but visé par ces antennes est de couvrir le spectre le plus large possible.

Puis nous avons la classe « **multi narrowband** » qui, à la différence de la classe «DC to daylight» utilise exclusivement des sous bandes étroites à un moment donné.

Ensuite nous avons la classe des antennes conçues pour les systèmes **ULB 3.1-10.6 GHz** avec autorisation de la FCC. En termes de largeur de bande passante, il y a beaucoup moins d'exigence pour une antenne ULB de cette classe que pour les antennes «DC-to-Daylight». Entre ces antennes et les autres antennes ULB de classe traditionnelle, la distinction est nette :

Premièrement, ces antennes privilégient le respect d'un certain masque spectral plutôt que la recherche effrénée d'un maximum de bande passante. Ainsi, une bande passante trop large détériore la réponse du système, et s'avère donc contreproductive.

Deuxièmement, à l'opposé des antennes «multi narrowband» ces antennes consomment la quasi-totalité de la bande passante à un instant donné. Dès lors, il faut que l'antenne ULB qui est de cette classe soit ultraperformante dans sa bande passante d'utilisation.

Chapitre II: Antennes Ultra Large Bande.

Cette performance est évaluée à travers le diagramme de rayonnement, le gain, l'adaptation et la dispersion qui doit être très proche de 0.

II.9 Les antennes monopoles :

L'antenne monopole a été inventé en 1895, par le pionnier de la radio Guglielmo Marconi, pour cette raison on l'appelle parfois l'antenne Marconi.

Les antennes monopoles constituent la plupart des antennes omnidirectionnelles, elles offrent une bonne performance, soit en termes de bande passante ou de rayonnement. Les monopoles sont des antennes de petites dimensions, ce qui facilite leur intégration aux systèmes de petites dimensions.

Une antenne monopole est une catégorie d'antenne de radio constituée d'un conducteur en forme de tige rectiligne, monté perpendiculairement souvent sur un certain type de surface conductrice, dite plan de masse. Le signal de commande de l'émetteur est appliqué, pour les antennes de réception du signal de sortie au récepteur est pris entre l'extrémité inférieure du monopole et le plan de masse. Un côté de la ligne d'alimentation de l'antenne est fixé à l'extrémité inférieure du monopole, et l'autre côté est fixé au plan de masse.

La longueur de l'antenne est déterminée par la longueur d'onde des ondes radioélectriques avec lesquelles elle est utilisée. La forme la plus courante est le monopole de quart d'onde, dans lequel l'antenne représente environ le quart de la longueur l'onde des ondes radio [32] [33] [34].

II.10 Antenne IHA (Inverted Hat Antenna):

En référence à la **figure(III.9)**, la structure entière de l'antenne avec sa section d'alimentation pointue ressemble à celle d'un chapeau inversé. Elle est donc appelée antenne à chapeau inversé (IHA).

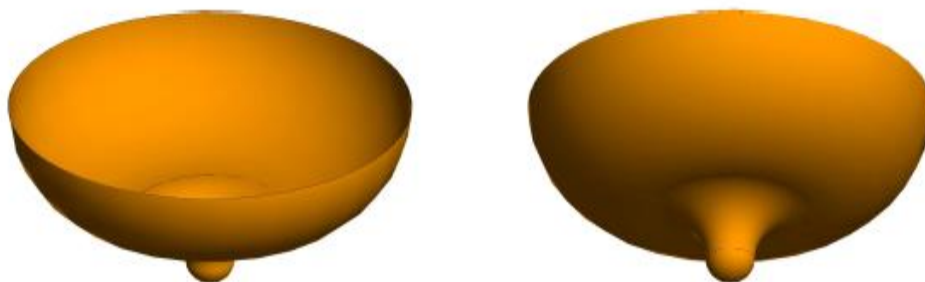


Figure (II.9): Antenne à chapeau inversé.

Chapitre II: Antennes Ultra Large Bande.

Inspiré par le mécanisme d'antenne à spirale, antenne à chapeau inversé à échelle de fréquence (IHA) est d'abord proposée avec sa surface extérieure composée de multiples ellipses qui suivent le taux de croissance d'une spirale exponentielle. Le profil de surface courbe réduit les variations de champ par rapport au profil linéaire, entraînant un rayonnement plus puissant aux basses fréquences.

Son fonctionnement est basé sur l'excitation d'une onde progressive entre le plan de masse et la partie supérieure de l'IHA. Ainsi, la limite opérationnelle de fréquence supérieure est influencée par la présence de modes de déplacement d'ordre supérieur. Cependant, la fréquence de fonctionnement inférieure de l'IHA est en fonction de sa taille globale et sa courbure.

II.11 Antenne à ouverture sur cavité :

Les antennes à ouverture rayonnante sont très utilisées dans le domaine des micro-ondes. Leur attrait principal réside dans la capacité à produire un fort gain. Ces antennes se présentent sous différentes géométries : carré, rectangle et circulaire pour les formes les plus classiques. La directivité maximale de ces antennes dépend directement de leur surface.

$$D_{max} = \frac{4\pi S}{\lambda^2} \quad (\text{II.3})$$

Où S représente la surface de l'antenne, et λ la longueur d'onde dans le vide.

La cavité génère les modes de résonance, ce qui influe sur l'élargissement de la bande d'intérêt.

Il est démontré qu'en choisissant les bonnes dimensions pour la cavité, la réponse fréquentielle des pertes de retour peut être contrôlée avec le profil du monopole, et ce, dans le but d'obtenir des résultats optimaux.

II.12 Logiciel de simulation HFSS (High Frequency Structure Simulator):

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

HFSS est utilisé essentiellement pour les expérimentations et les études de systèmes fonctionnant en hautes fréquences, il est exploité notamment pour calculer les paramètres S, les fréquences de résonances ainsi que les champs électromagnétiques. En utilisant les équations de Maxwell, le HFSS divise les structures géométriques complexes en des formes

géométriques plus simples, précisément des tétraèdres sur lesquels le calcul mathématique sera plus faisable, d'où on commence à parler de la convergence qui est la persistance des résultats obtenus. Le logiciel présenté ici utilise la méthode des éléments finis.

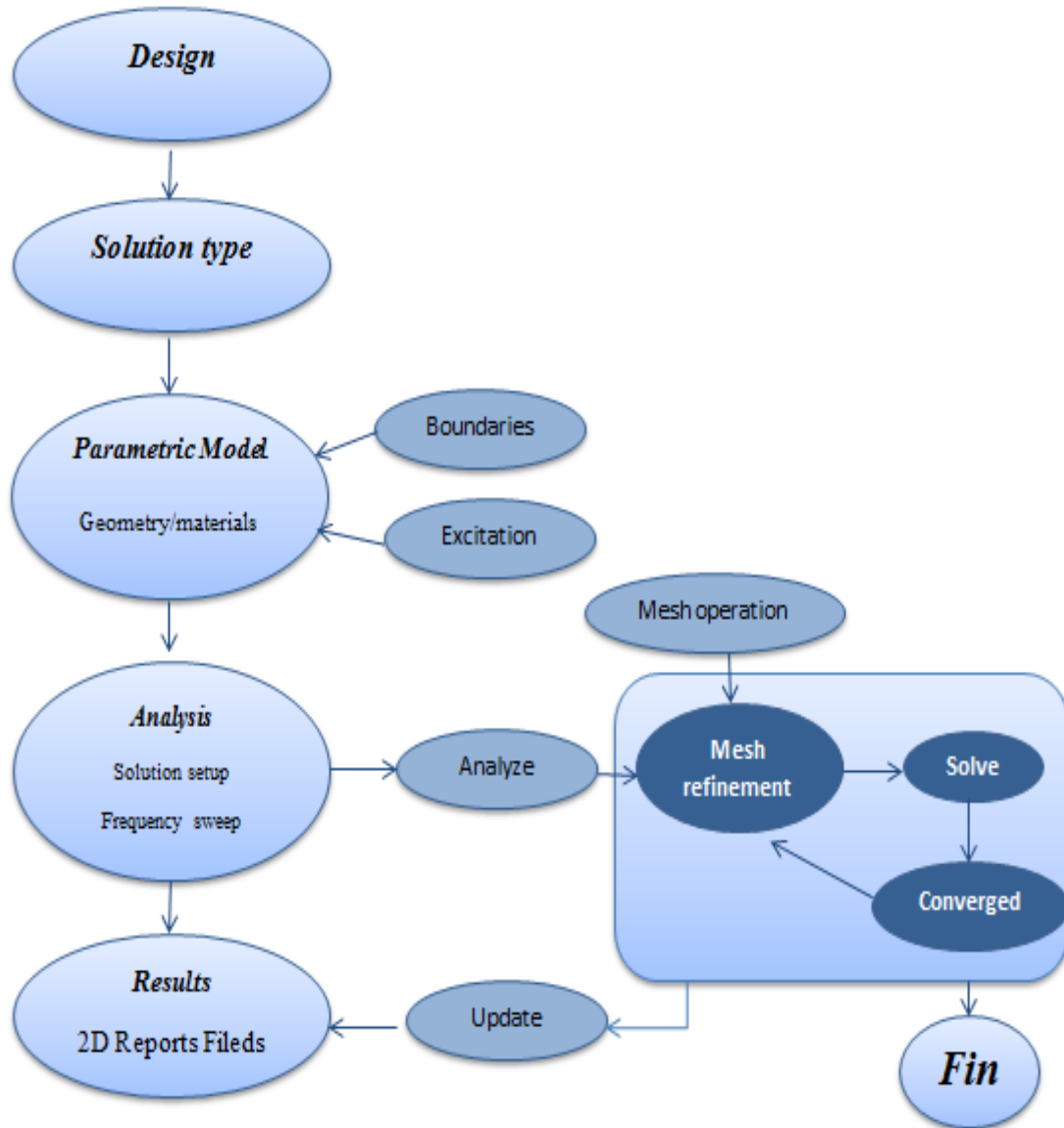


Figure (II.10): Organigramme des différentes étapes d'un design HFSS.

II.13 Conclusion:

Dans ce chapitre, nous avons présenté la technologie ULB d'une manière générale, ses caractéristiques et ses nombreux domaines d'application. Nous avons aussi fait un survol sur les antennes ULB, et nous avons présenté de différentes antennes existantes, les plus connues, possédant des caractéristiques d'adaptation sur de très larges bandes de fréquences.

L'intérêt des systèmes large bande se confirme jour après jour. Les principales caractéristiques de l'UWB, justifient l'engouement actuel du monde des télécommunications

Chapitre II: Antennes Ultra Large Bande.

pour cette technologie, et attribuent à celle-ci le statut d'un candidat potentiel et prometteur. Cependant, cette technologie impose des défis à relever, par exemple, au niveau de la conception d'antennes. Ainsi, on propose dans le chapitre suivant d'étudier la problématique de conception d'une antenne UWB ainsi que sa caractérisation et l'analyse de ses performances. Un intérêt particulier est consacré à une antenne ULB en monopole chapeau inversé (IHA).

Chapitre III:
Conception et simulation des
antennes

III.1 Introduction:

La phase de conception d'une antenne, à l'aide d'un logiciel adapté est une étape incontournable dans un souci de gain, de temps et d'optimisation de structure aux paramètres désirés. La conception permet également de prendre en compte les paramètres diélectriques et conducteurs des matériaux bas coût choisis, qui ne sont pas parfaits, et nous permet de rapprocher des futures antennes réalisées. Pour cela, nous avons choisi un outil de simulation électromagnétique HFSS qui étudie et simule des structures complexes en trois dimensions, il est exploité notamment pour calculer les paramètres S, les fréquences de résonnances ainsi que les champs électromagnétiques et la visualisation du diagramme de rayonnement en 2D/3D.

Nous développerons dans ce chapitre la phase de conception en présentant la structure des antennes réalisées ainsi que les résultats de simulation pour des antennes à cavité alimentées par un câble coaxiale.

III.2 La première antenne IHA:

Tel qu'expliqué dans l'introduction générale, le point de départ de notre travail est l'antenne du type monopole ultra-large bande qui est représentée à la **figure (III.1)**. Par sa ressemblance avec un chapeau inversé on l'appellera «Inverted Hat Antenna» ou IHA.

III.2.1 Modélisation par HFSS d'antenne IHA :

Tout d'abord nous présenterons le monopole large bande ou IHA pour lequel on appliquera un processus d'optimisation paramétrique pour trouver la réponse désirée. Puis nous allons simuler le monopole pour étudier l'effet des paramètres diélectriques des substrats sur les performances de l'antenne.

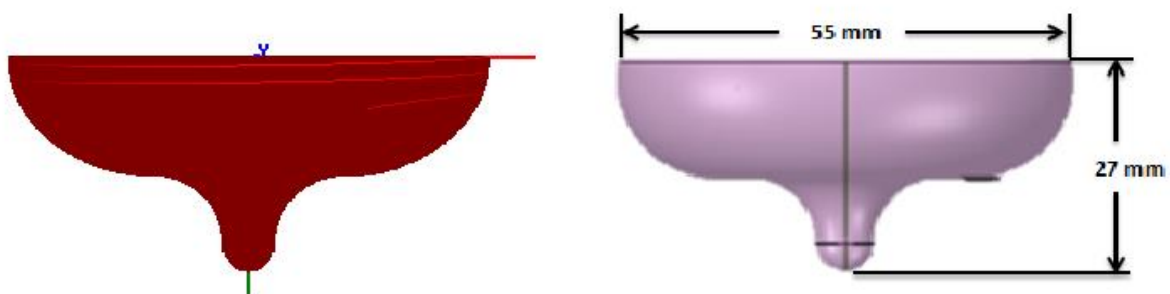


Figure (III.1): Géométrie de l'antenne à 3 ellipses.

Chapitre III: Conception et simulation des antennes.

Cette antenne est formée par une surface de révolution qui est constituée de trois segments elliptiques concaves et convexes. Chaque segment correspond au quart d'une ellipse **figure (III.2)**.

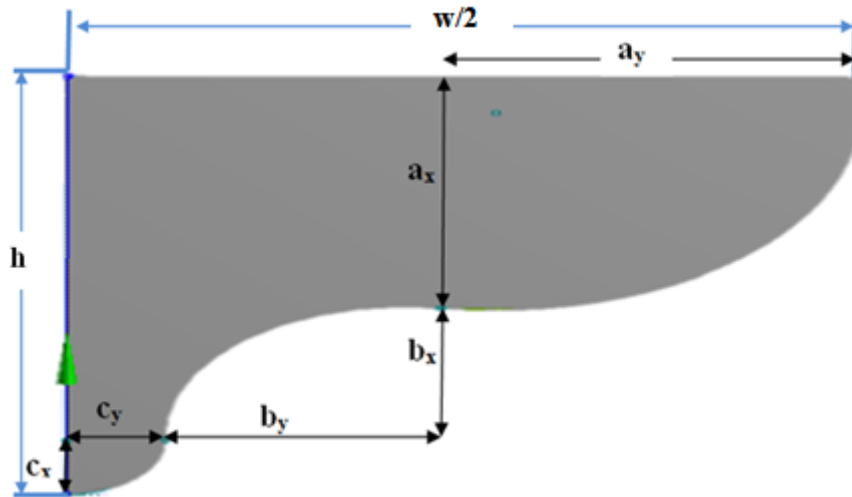


Figure (III.2): Présentation des ellipses de l'antenne avec le logiciel Ansys.

Pour être appropriée à l'unité ULB il faut que l'antenne ait une taille assez réduite. L'antenne à ouverture $w=55\text{mm}$ et hauteur $h=27\text{mm}$ est l'antenne ultra large bande la plus appropriée comme base d'étude jusqu'à présent, étant données les caractéristiques que nous désirons. Cette antenne est alimentée avec un câble coaxial d'une impédance caractéristique de 50 ohms.

III.2.2 Simulations et résultats:

Nous allons commencer par simuler la première antenne. Le but est de dimensionner correctement cette antenne pour qu'elle fonctionne à la bande de fréquence voulue.

Les résultats de simulation obtenus sont comme suit:

III.2.2.1 La modélisation géométrique (Mesh ou maillage):

Afin d'appliquer une méthode de résolution numérique, la structure géométrique doit être discrétisée en un nombre fini d'éléments. On appelle cette étape le maillage.

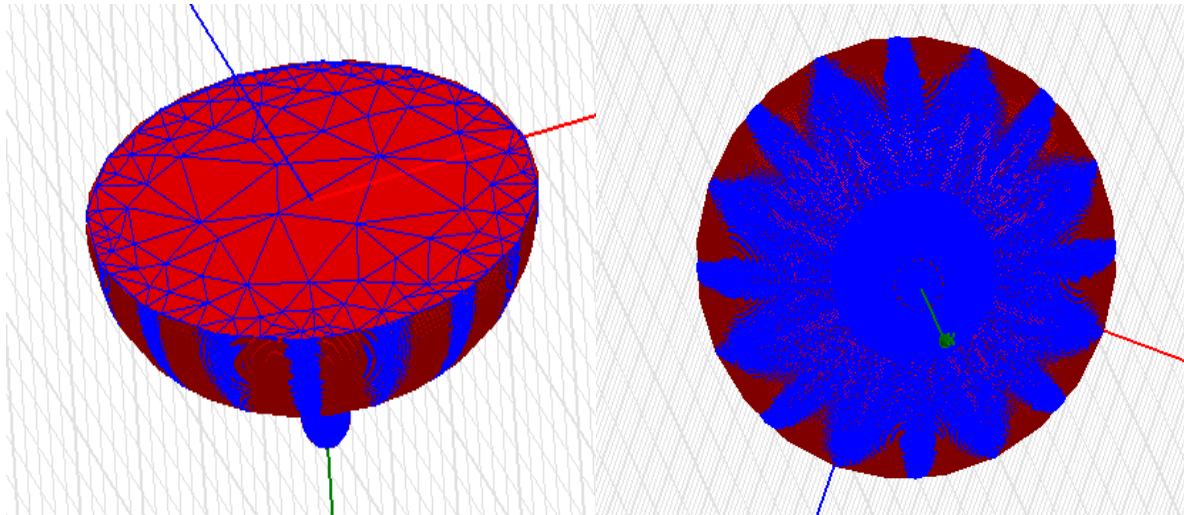


Figure (III.3): La géométrie des cellules.

III.2.2.2 Le coefficient de réflexion S_{11} :

Le paramètre S_{11} représente le coefficient de réflexion qui joue le rôle de perturbation sur la transmission des données.

La **figure (III.4)** présente la variation du coefficient de réflexion S_{11} à l'entrée de l'antenne en fonction de la fréquence dans la bande [0-2.5] GHz.

Nous remarquons qu'une bonne adaptation est de $S_{11} = -24$ dB dans une fréquence de 0.8 GHz avec une bande passante à -10 dB de 2.1GHz.

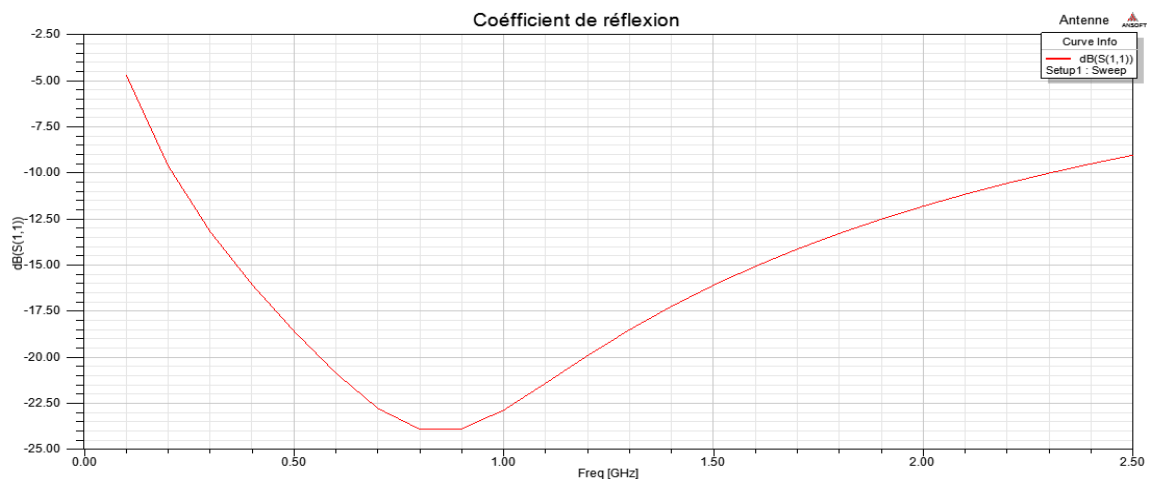


Figure (III.4): Résultats du coefficient de réflexion S_{11} .

III.2.2.3 Taux d'ondes stationnaires TOS (VSWR):

La **figure (III.5)** montre les valeurs du rapport d'ondes stationnaires calculées en fonction de la fréquence. On remarque que le VSWR à la fréquence de résonance 1.1GHz, tend vers 1dB. Ce qui montre que l'alimentation et l'antenne sont adaptées.

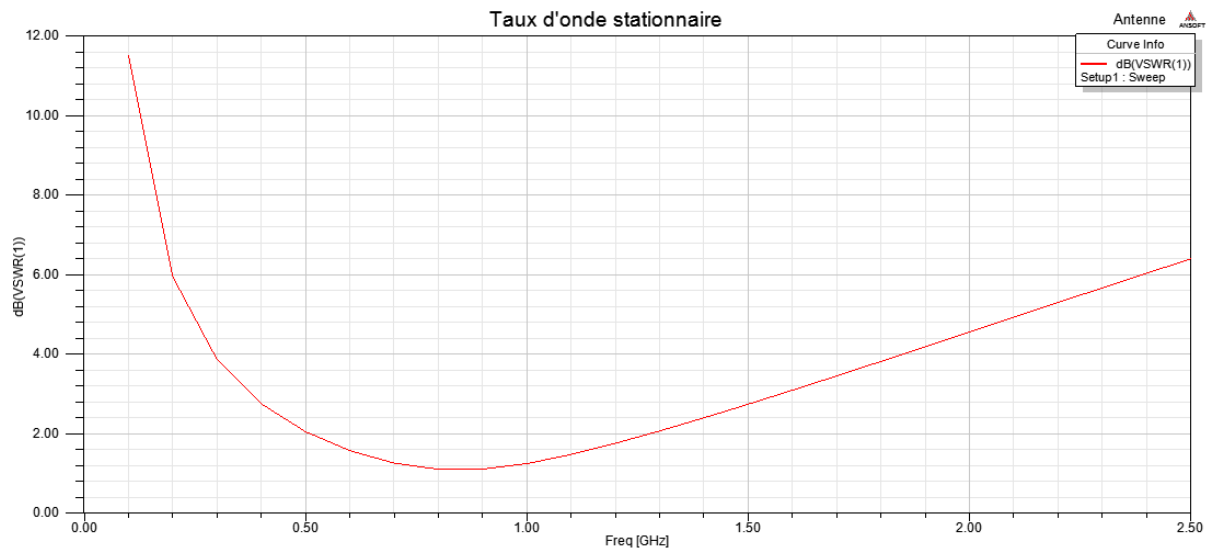


Figure (III.5): Résultats du taux d'ondes stationnaires TOS (VSWR).

III.2.2.4 Le diagramme de rayonnement et le gain:

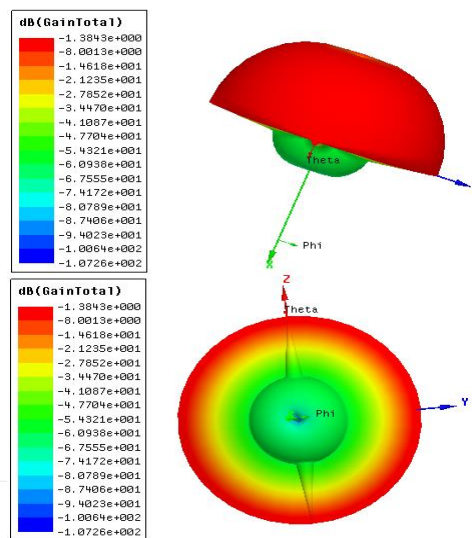


Figure (III.6): Diagrammes de rayonnement en 3D de l'antenne.

Le diagramme de rayonnement d'une antenne permet de visualiser les lobes dans deux ou trois dimensions. Il permet de localiser les zones de l'espace entourant l'antenne et les directions où le rayonnement est intense ou faible.

On constate aussi d'après la figure (III.6) que le gain de l'antenne est très faible.

III.2.2.5 Les répartitions des champs:

Champ E:

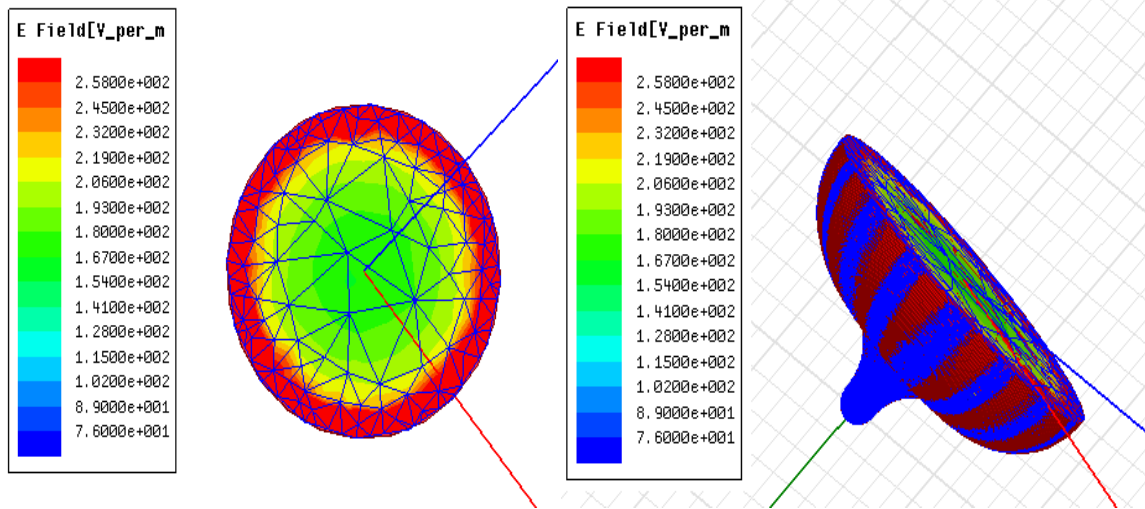


Figure (III.7): La répartition du champ électrique E.

Champ H:

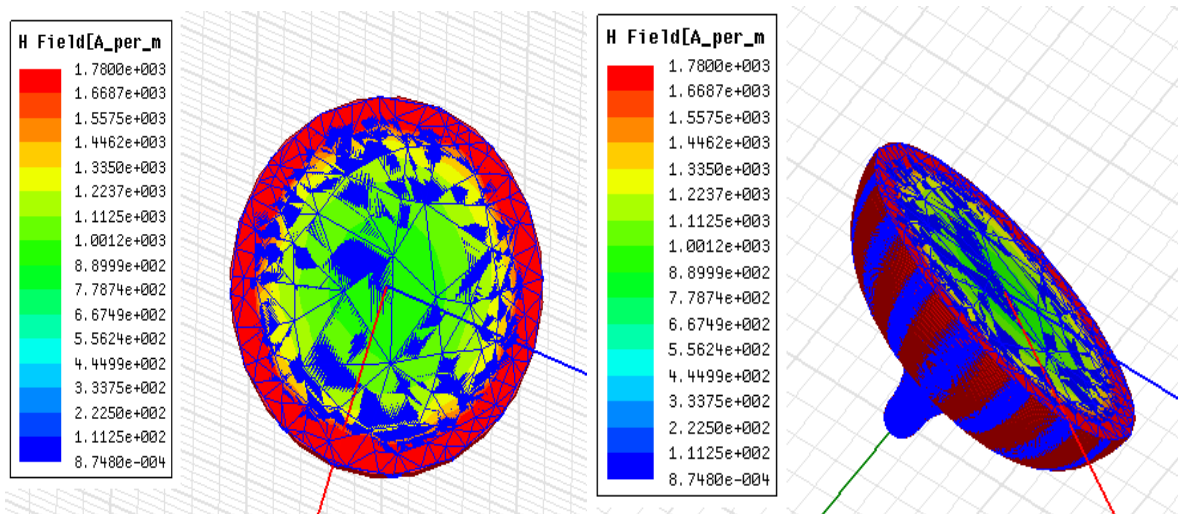


Figure (III.8): La répartition du champ magnétique H.

La **figure (III.7)** et la **figure (III.8)** représentent la répartition des champs électrique E et magnétique H sur la surface de l'IHA. A l'aide de l'échelle de couleur, on constate que les champs sont concentrés d'une façon uniforme aux extrémités du monopole.

Conclusion: Les premiers résultats de simulations sont encourageants. Ils confirment l'adaptation de l'antenne à la fréquence de travail (fréquence DME).

III.2.3 La conception de l'antenne IHA étudiée :

Dans cette section, on évoquera la conception de l'antenne IHA que nous avons étudié précédemment. A partir des considérations énoncées précédemment, on aboutit à la géométrie présentée dans la **figure (III.9)**.



Figure (III.9): Photographie de l'antenne IHA réalisée.

III.2.4 Phase de mesure:

Cette phase de mesure a été effectuée au niveau de l'université de SAAD DAHLEB BLIDA 1, institut d'électronique dans le laboratoire traitement de signal, avec un appareil de mesure que nous allons présenter ci-dessous :

III.2.4.1 Analyseur de réseau:

L'analyseur de réseau vectoriel est un appareil de mesure qui permet, comme son nom l'indique, d'analyser un circuit électronique sous test et déterminer ses paramètres S, on l'utilise dans le domaine des radiofréquences afin de caractériser les câbles et les antennes.

Pour nos mesures, nous avons utilisé l'analyseur de réseau Rohde & Schwarz de type ZVL fonctionnant dans la gamme de fréquences 9 kHz à 3GHz (**figure (III.10)**).

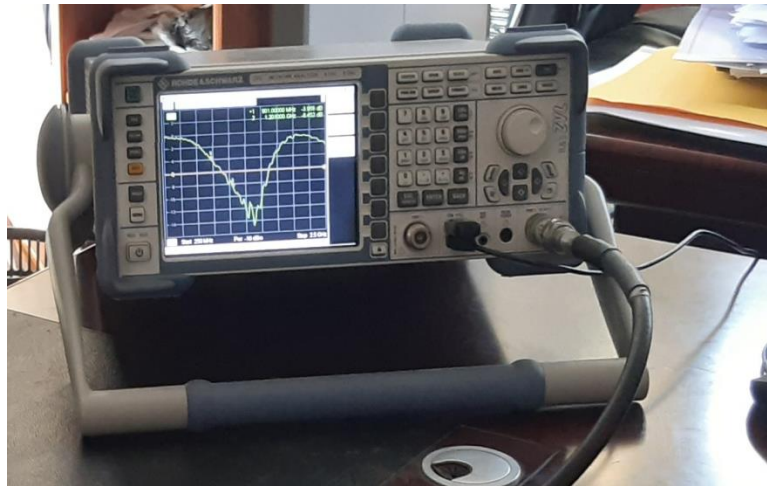


Figure (III.10): Analyseur de réseau vectoriel ZVL.

III.2.4.2 Résultats de mesure:

La **figure (III.11)** représente l'antenne proposée alimentée par une ligne coaxiale flexible avec l'instrument de mesure (analyseur de réseau vectoriel).



Figure (III.11): Photographie de mesure de l'antenne réalisée.

La **figure (III.12)** présente le coefficient de réflexion simulé et mesuré de l'antenne étudiée dans la bande de fréquence [0-2.5 GHz]. Une bonne concordance entre la simulation et la mesure est observée. Le module de coefficient de réflexion simulé de l'antenne conçue est inférieur à -10 dB pour la bande [0.2-2.3 GHz] et celui mesuré couvre la bande [0.75-1.75 GHz]. Et le plus important est que les deux résultats sont inclus dans la bande de fréquence du système DME.

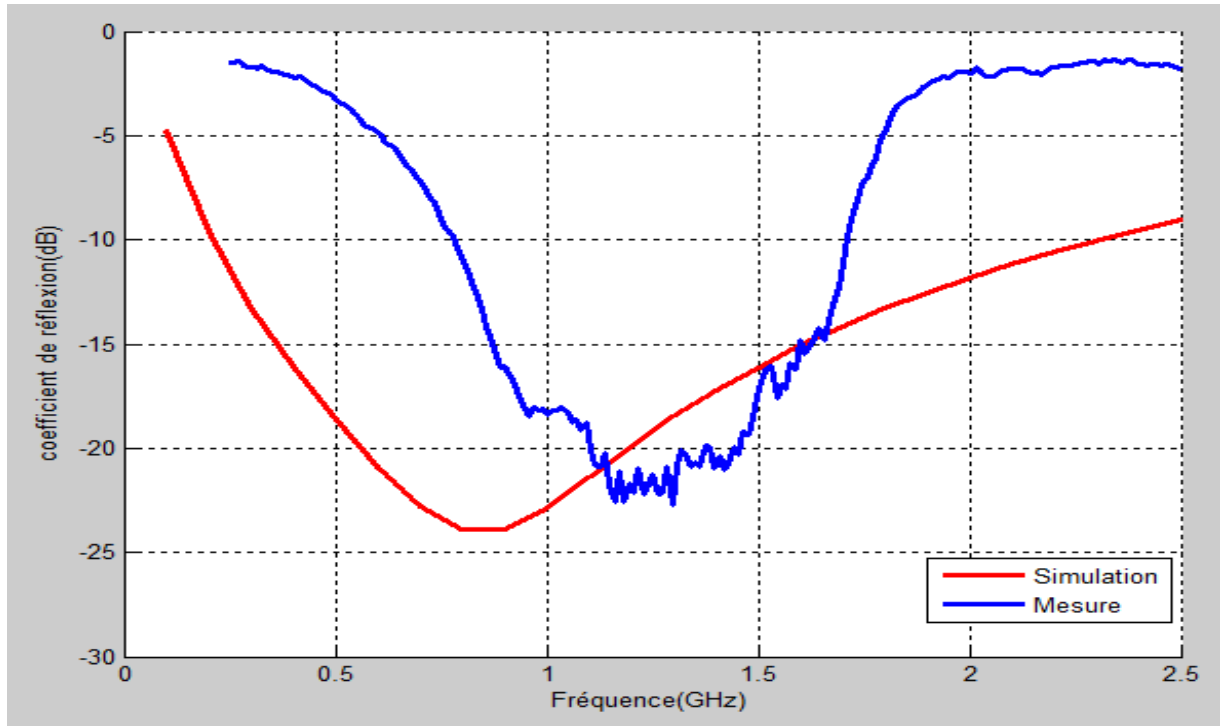


Figure (III.12): Comparaison du coefficient de réflexion simulé et mesuré.

III.3 La première antenne avec cavité:

Dans la partie qui suit, nous allons placer l'antenne dans une cavité cylindrique comme le montre la **figure (III.13)**.

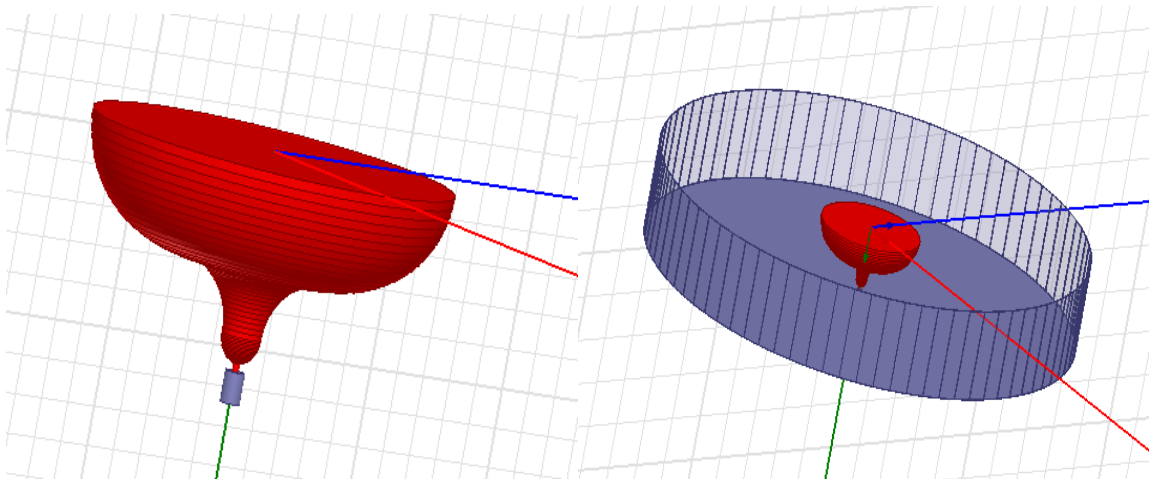


Figure (III.13): Antenne IHA avec cavité.

Les simulations et optimisations de l'antenne ont été réalisées principalement avec la méthode des éléments finis, en particulier avec le logiciel Ansoft HFSS.

Les résultats de la simulation seront affichés dans la section qui suit.

III.3.1 Résultats des optimisations:

III.3.1.1 La modélisation géométrique (Mesh):

La qualité du maillage est cruciale pour garantir une bonne précision des résultats. Plus la taille des mailles est petite, meilleure devrait être la précision des résultats. Néanmoins, il convient de ne pas réduire inutilement la taille du maillage, sous peine d'augmenter le nombre de mailles et le temps de calcul.

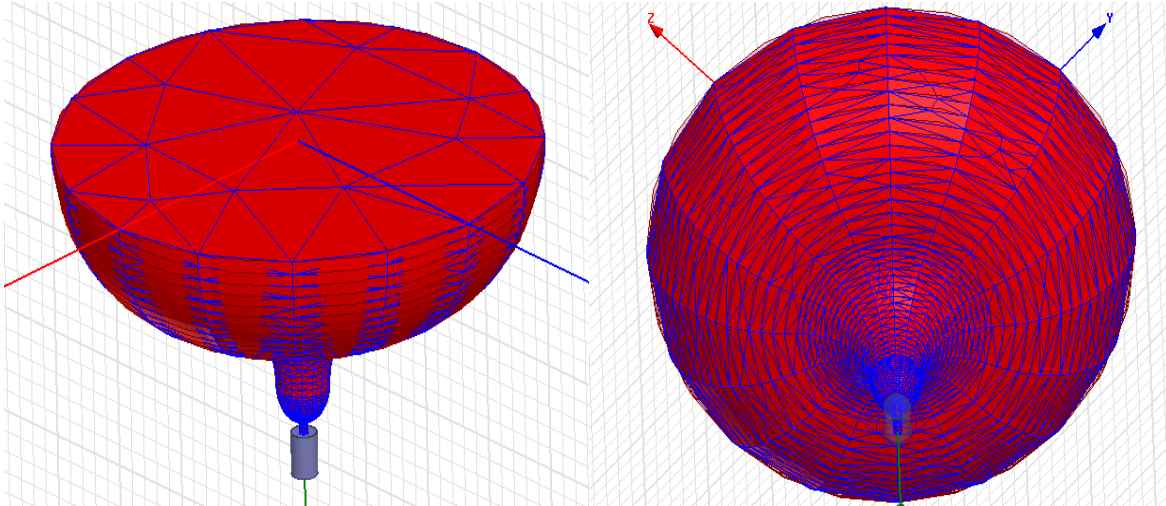


Figure (III.14): La géométrie des cellules.

III.3.1.2 Le coefficient de réflexion S_{11} :

Le profil de l'IHA est optimisé de manière à obtenir la largeur de bande requise par l'application DME, avec des niveaux de pertes de retour autour de -10dB sur toute la bande.

En premier lieu nous allons commencer par le premier facteur qui est le rayon de la cavité. Les résultats seront présentés dans la **figure (III.15)**.

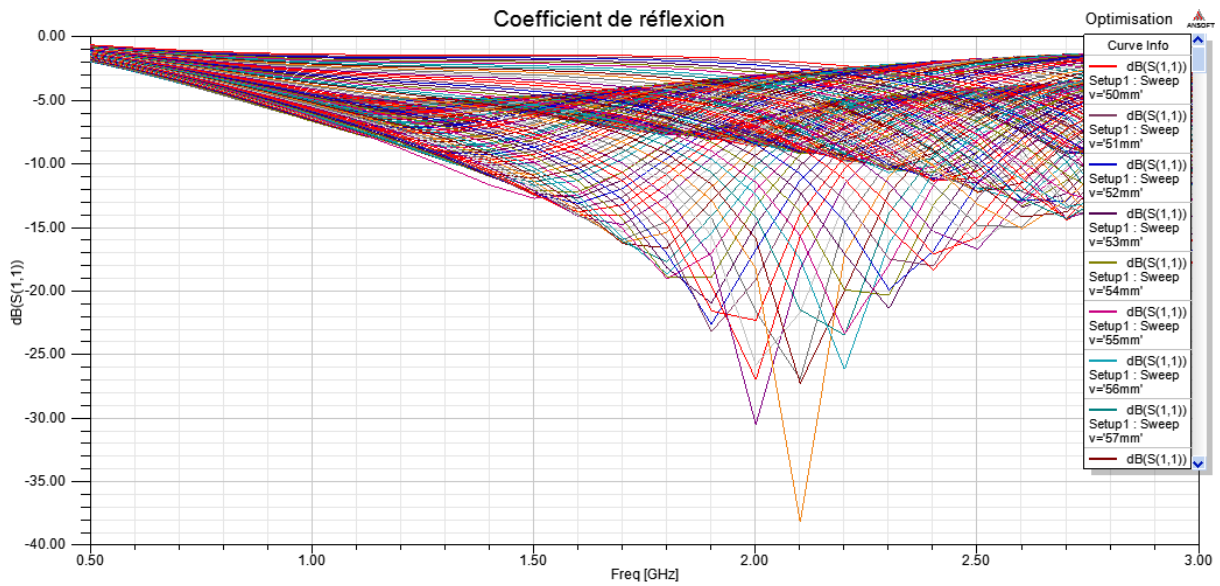


Figure (III.15): Coefficient de réflexion pour différentes variations du diamètre de la cavité.

On voit bien que les résultats de cette optimisation sont très loin de la fréquence de résonance, donc on a opté pour une deuxième optimisation; les résultats sont comme suit:

III.3.1.3 Le coefficient de réflexion S_{11} :

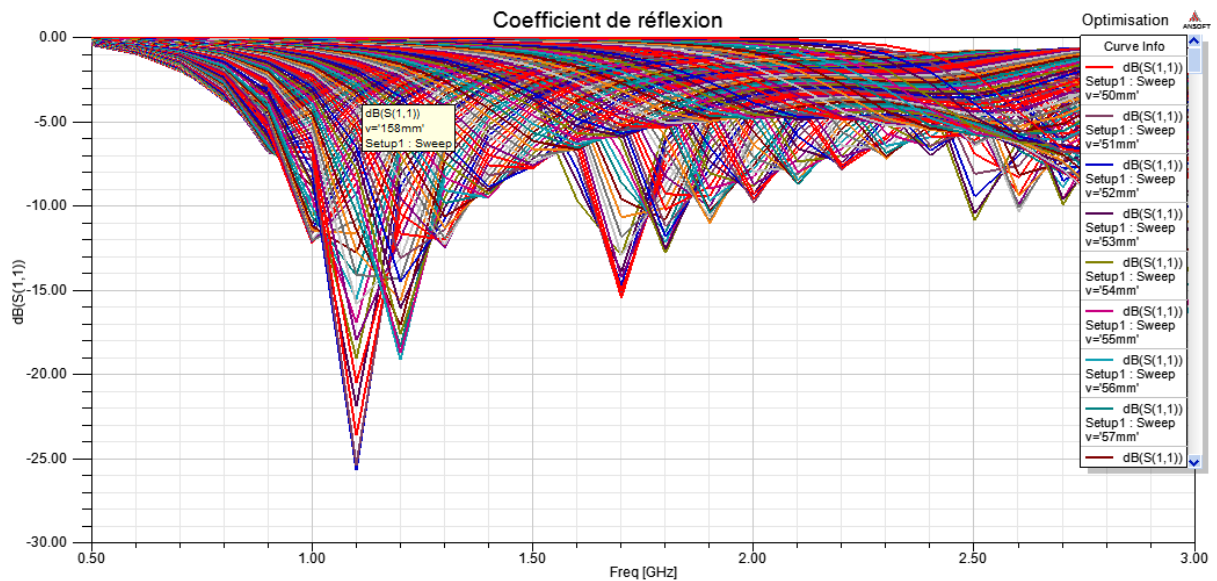


Figure (III.16): S_{11} pour différentes variations de diamètre de la cavité.

Ces dimensions ont été choisies pour limiter le volume de l'antenne dans le fuselage de l'avion.

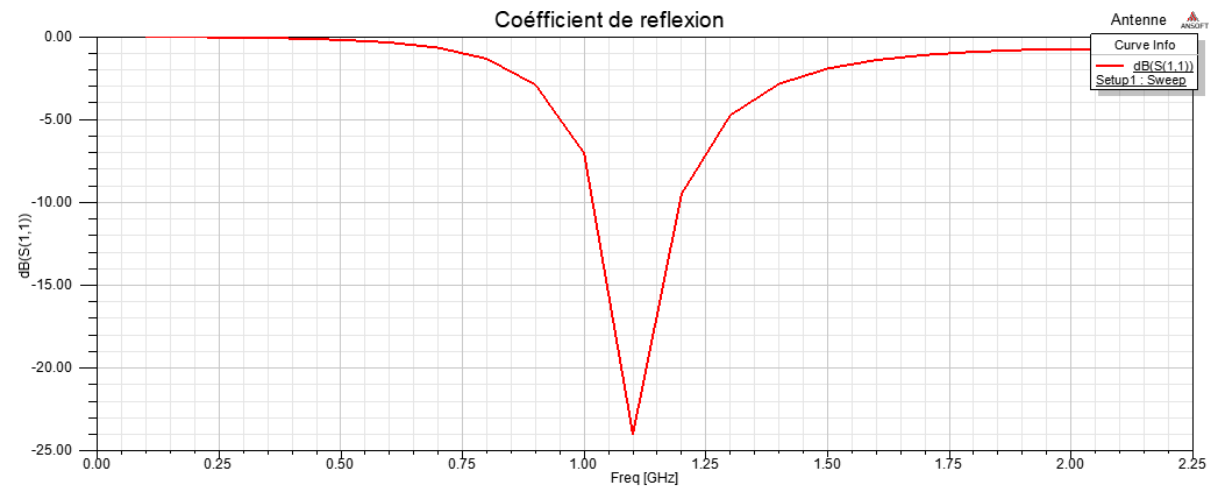


Figure (III.17): Coefficient de réflexion de l'antenne conçue avec cavité.

Donc placer l'antenne dans une cavité nous a permis d'avoir un pique souhaité à 1.1GHz (fréquence de résonance), mais on remarque bien que la bande passante a diminué de 2.1 GHz jusqu'à 0.2 GHz.

III.3.1.4 Le diagramme de rayonnement et le gain:

La **figure (III.18)** montre les résultats de simulation du diagramme de rayonnement, on remarque le rayonnement de l'antenne dans trois directions et une amélioration de gain d'antenne est observée. Une antenne avec cavité donne alors de meilleurs résultats qu'une antenne sans cavité.

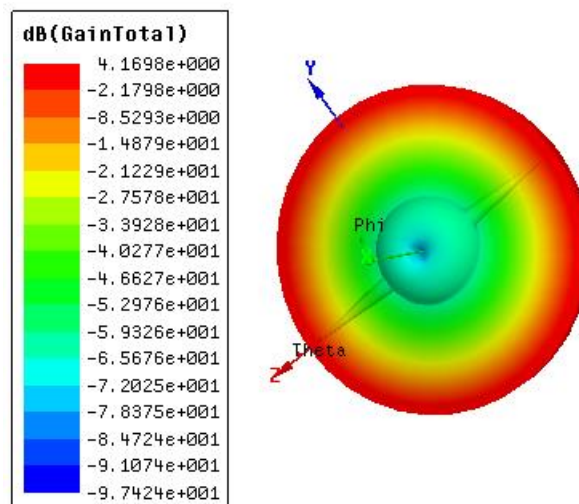


Figure (III.18): Modèles de rayonnement 3D de l'antenne avec cavité.

Conclusion: D'après les résultats de simulation, la bande passante relative est égale à 0.18 GHz, donc on remarque bien que la bande est inférieure à la bande exigée dans les antennes ULB ($BP_{relative} = 0.2$ GHz). L'antenne a une place capitale dans les systèmes ULB.

Chapitre III: Conception et simulation des antennes.

Toutefois, les challenges sont plus nombreux et plus importants lorsqu'on fabrique une antenne ULB que lorsqu'on crée une antenne à bande étroite.

Dans la partie qui suit, plusieurs séries de simulation furent réalisées ; sur cette base nous allons vous présenter une nouvelle antenne avec de nouvelles dimensions et des résultats meilleurs que les précédents.

III.4 Deuxième antenne avec cavité :

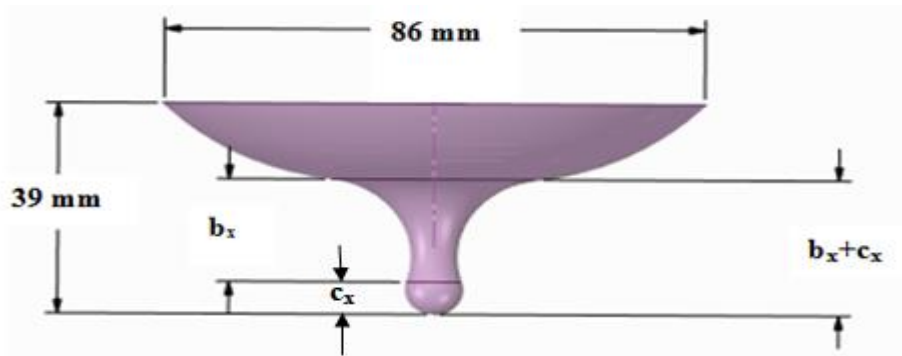


Figure (III.19): Géométrie de la nouvelle antenne avec le logiciel Ansys.

L'antenne conçue a un diamètre de 86 mm et une hauteur de 39 mm, comme le montre la figure (III.20).

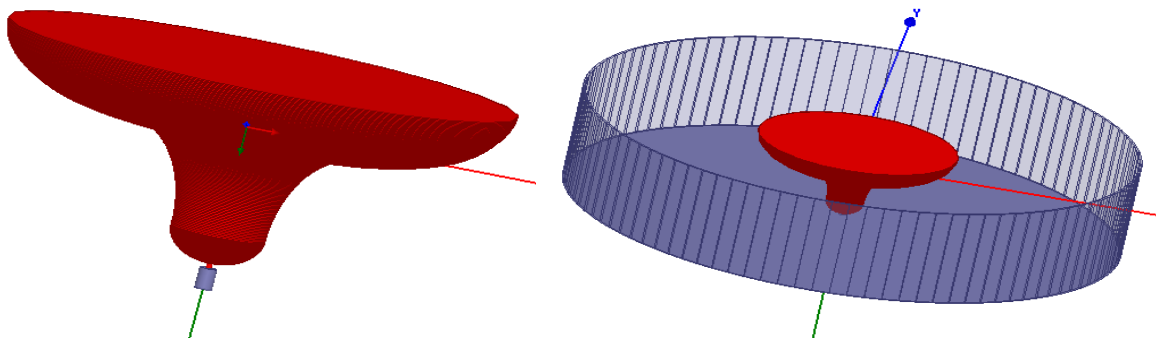


Figure (III.20): L'antenne IHA conçue avec le logiciel HFSS.

III.4.1 Simulation et résultats de la deuxième antenne étudiée:

Les résultats de simulation obtenus sont comme suit:

III.4.1.1 La modélisation géométrique (Mesh):

La figure (III.21) représente la géométrie du maillage de l'antenne. Le maillage est trop fin aux extrémités de l'ouverture et devient moins fin en allant vers le centre de l'ouverture. De même pour la partie extérieure.

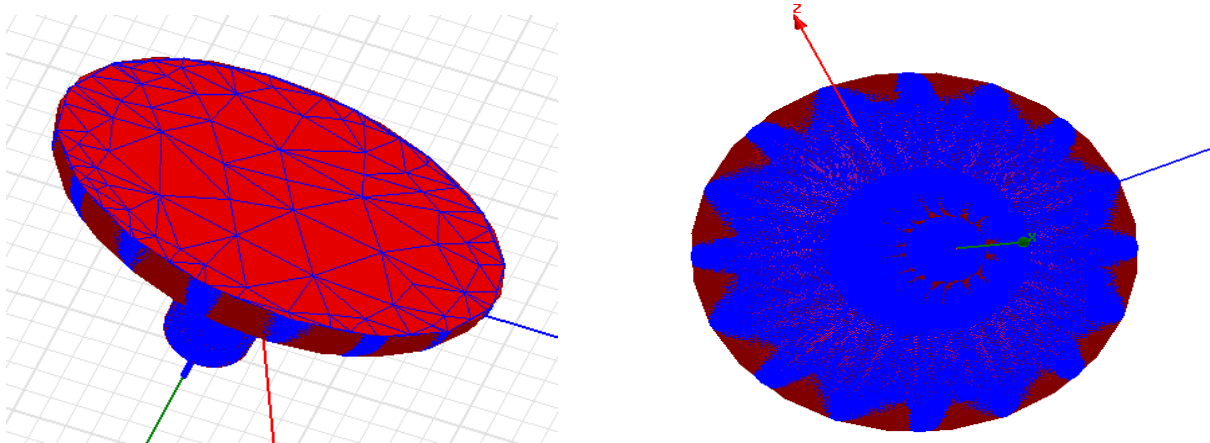


Figure (III.21): La géométrie des cellules.

III.4.1.2 Le coefficient de réflexion S_{11} :

La largeur de bande de fréquence de l'antenne sous -10 dB s'étale sur une bande de fréquence allant de 0.6 à 1.6GHz. Nous remarquons une très bonne adaptation de $S_{11} = -26.5$ dB à une fréquence de 1.2 GHz.

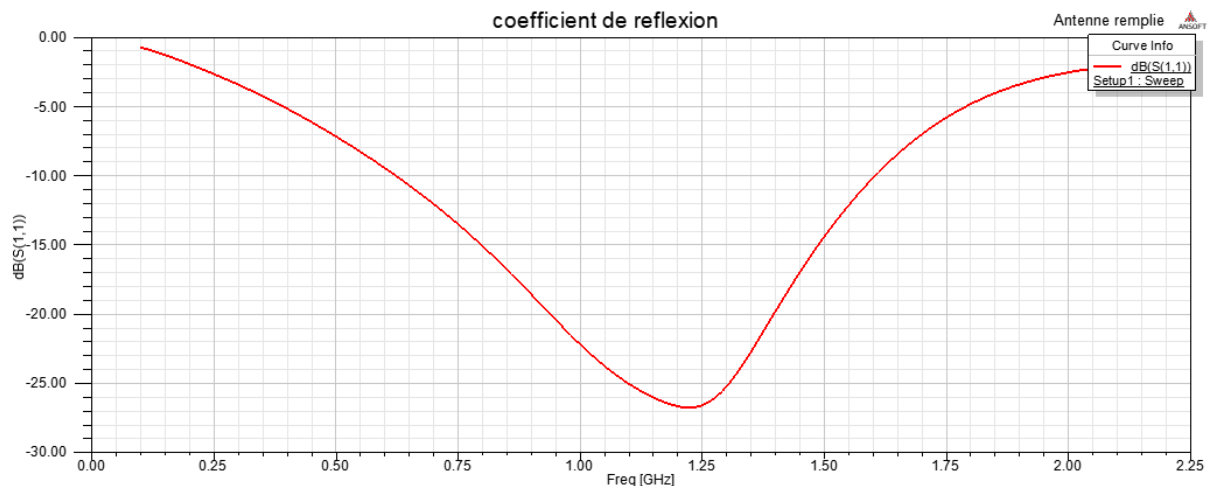


Figure (III.22): Résultats du coefficient de réflexion de la nouvelle IHA.

III.4.1.3 Taux d'ondes stationnaires TOS (VSWR):

La (figure III.23) montre les valeurs du rapport d'ondes stationnaires calculées en fonction de la fréquence. Dans ce cas, le TOS a une valeur de 1 dB à la fréquence de résonance 1.1 GHz, donc l'antenne et l'alimentation sont bien adaptées.

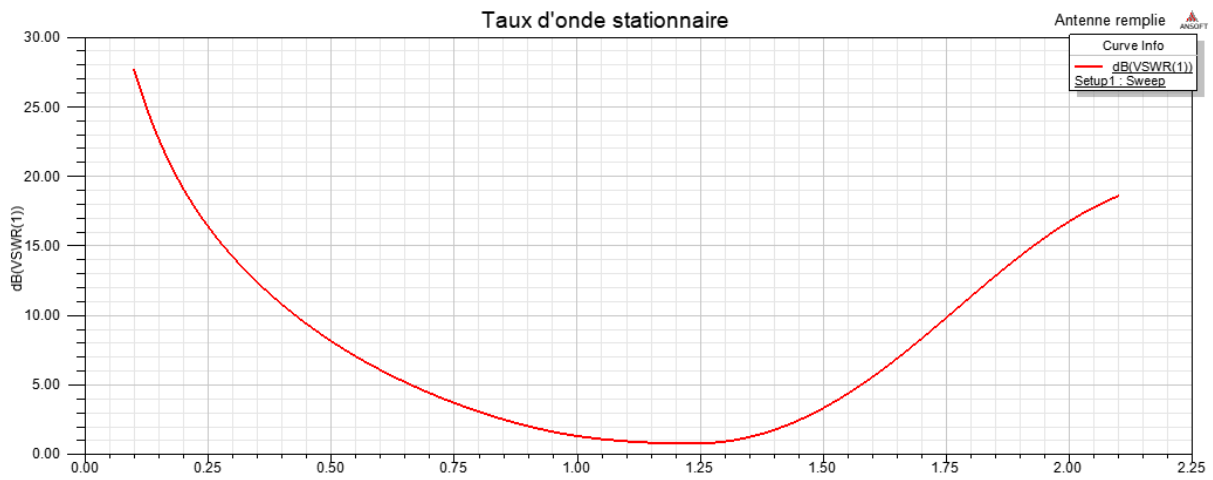


Figure (III.23): Taux d'ondes stationnaires TOS.

III.4.1.4 Le diagramme de rayonnement et le gain:

Le diagramme de rayonnement 3D du gain de l'antenne pour le plan E est représenté sur la **figure (III.24)**. L'antenne simulée a un gain maximal de 3.26 dB.

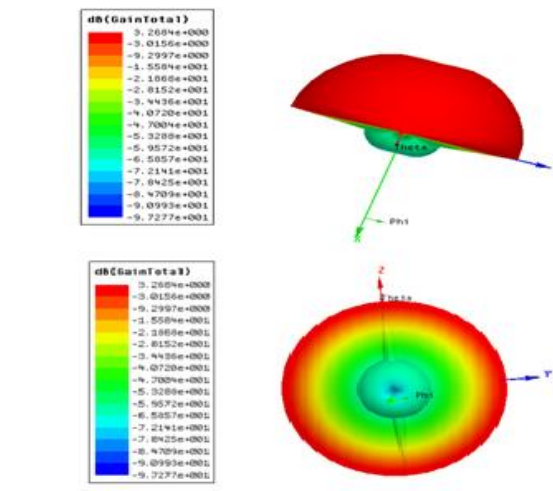


Figure (III.24): Diagramme de rayonnement en 3D.

III.4.1.5 Les répartitions des champs:

Champ E:

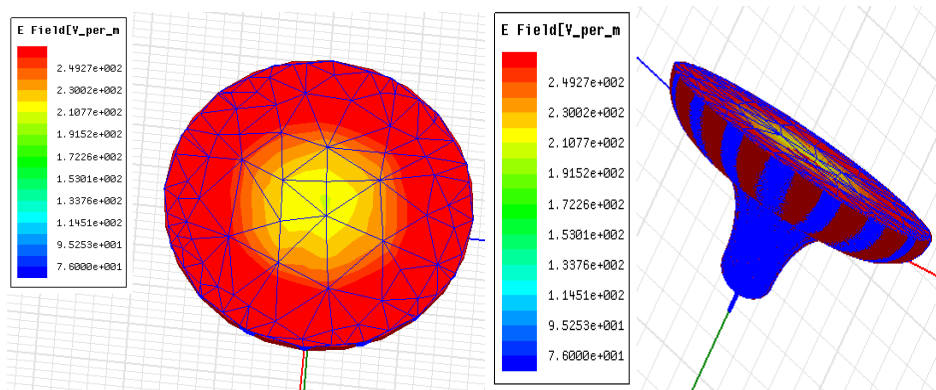


Figure (III.25): La répartition du champ électrique E.

Champ H:

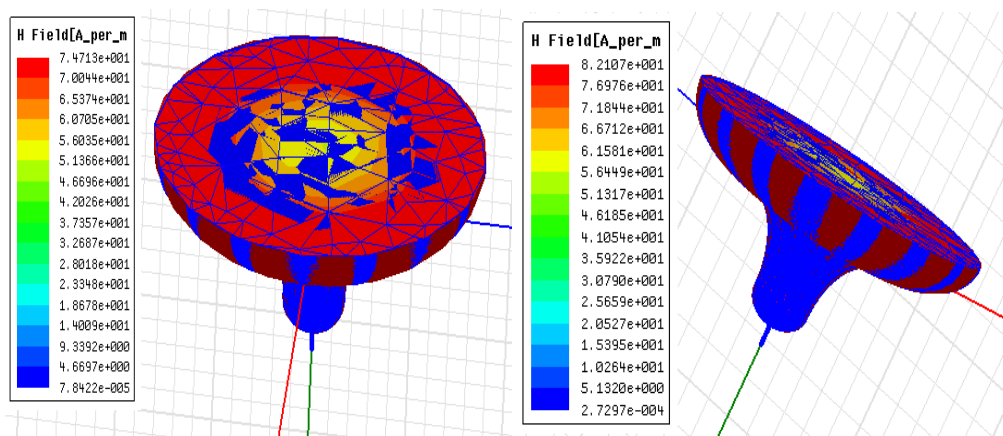


Figure (III.26): La répartition du champ magnétique H.

La distribution des champs électrique et magnétique représenté dans la **figure (III-25)** et la **figure (III.26)** sur l'IHA illustre la cartographie des champs dans l'antenne. On observe que le champ E est concentré au niveau de la surface plane de l'antenne (aux extrémités et au centre). Tandis que le champs H est concentré seulement aux extrémités de cette dernière. Ce qui explique que le rayonnement de ce type d'antenne s'effectue principalement sur presque la totalité de la surface plane.

Conclusion : Les résultats de la simulation étaient bons, mais vu que la taille et le poids de l'antenne sont devenus une préoccupation majeure dans les applications du monde réel, on a pensé donc à diminuer le poids de l'antenne précédente en la vidant à l'intérieur mais en gardant les mêmes dimensions et bien sûr sans influencer sur les paramètres diélectriques. L'antenne en question sera présentée ci-dessous:

III.5 Antenne vidée:

L'IHA illustrée à la **figure (III.27)** s'étend jusqu'à 86 mm de largeur d'ouverture, et 39 mm de hauteur. Le poids de l'antenne est sensiblement réduit par rapport à l'antenne précédente.

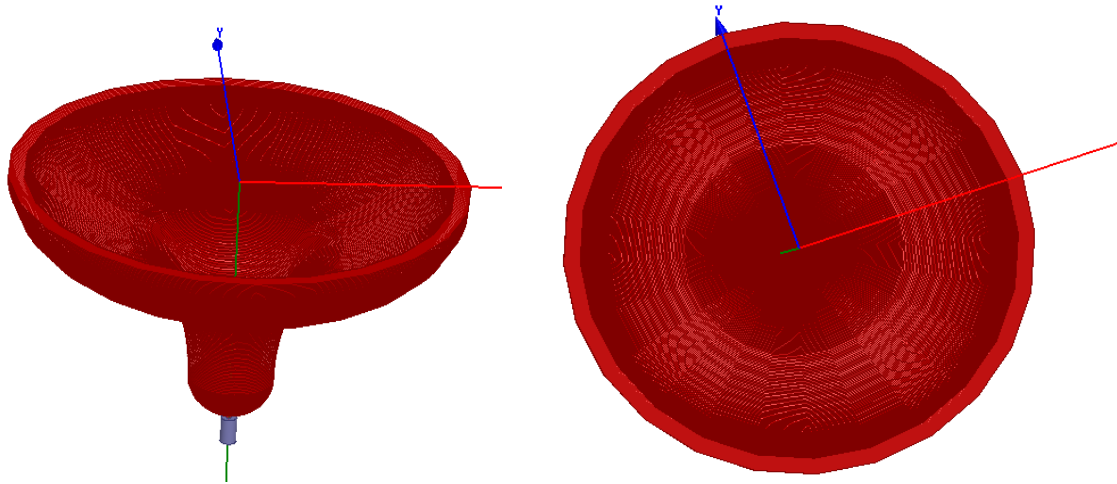


Figure (III.27): L'antenne IHA vidée avec le logiciel HFSS.

III.5.1 La modélisation géométrique (Mesh):

Un maillage est un ensemble de sommets reliés entre eux par des arêtes. Le choix de la finesse du maillage est une question essentielle dans les simulations par éléments finis : plus le maillage est fin, moins il contribue aux écarts entre simulation et réalité, mais plus le coût du calcul augmente.

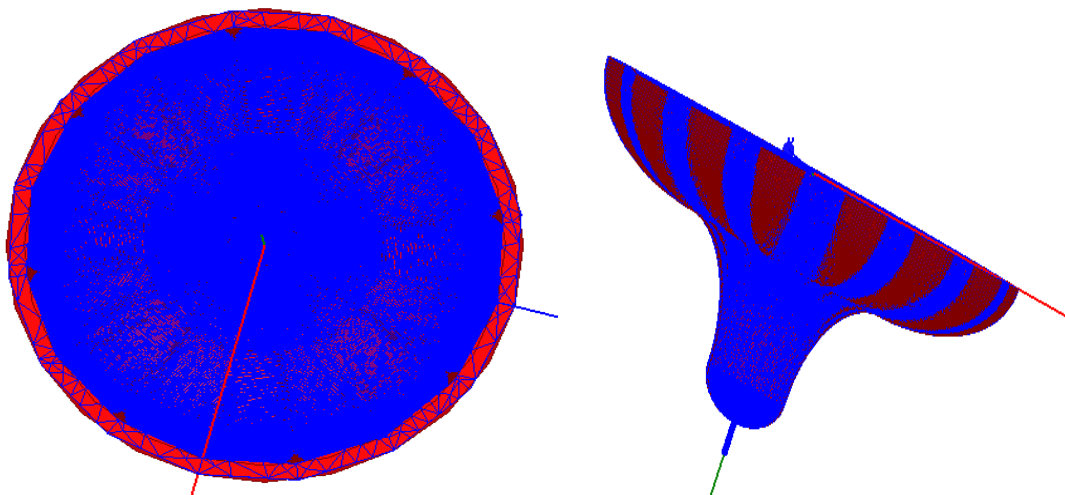


Figure (III.28): Maillage de l'antenne vidée.

III.5.2 Le coefficient de réflexion S_{11} :

Les résultats du paramètre S_{11} de l'antenne est illustré sur la **figure (III.29)** dans une gamme de fréquence [0-2.5GHz]. Nous pouvons voir que l'adaptation est de l'ordre de -23 dB autour de la fréquence 1.1 GHz. Le coefficient de réflexion est inférieur à -10 dB de 0.6 à 1.55 GHz. On peut donc dire que l'antenne présente une grande largeur de bande.

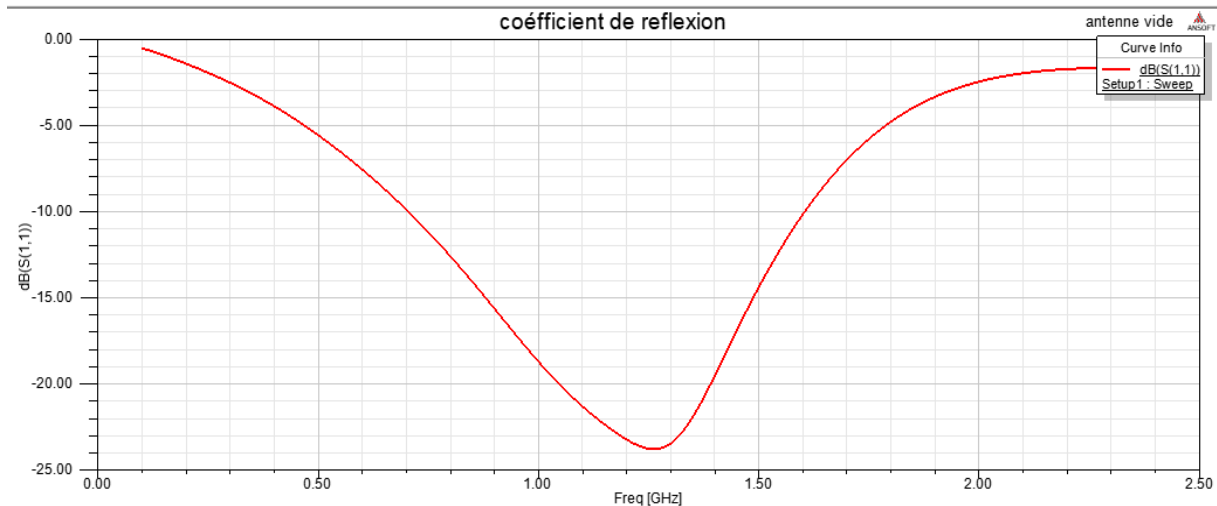


Figure (III.29): Le coefficient de réflexion de l'antenne vidée.

III.5.3 Taux d'ondes stationnaires TOS (VSWR):

La **figure (III.30)** représente les variations du VSWR en fonction de la fréquence. On constate donc une bonne adaptation.

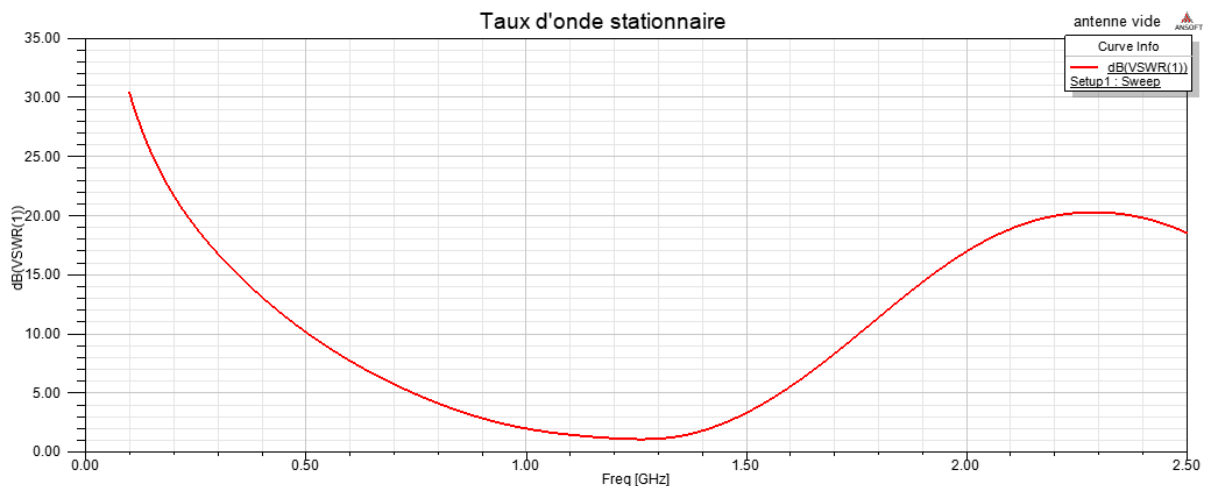


Figure (III.30): Taux d'ondes stationnaires de l'antenne vidée.

III.5.4 Le diagramme de rayonnement et le gain:

La **figure(III.31)** montre le tracé du diagramme de rayonnement en 2D/3D. Cette antenne offre un gain de 3.14 dB et un rayonnement omnidirectionnel dans le champ H. On voit bien que l'antenne est plus rayonnante que les deux antennes étudiées précédemment.

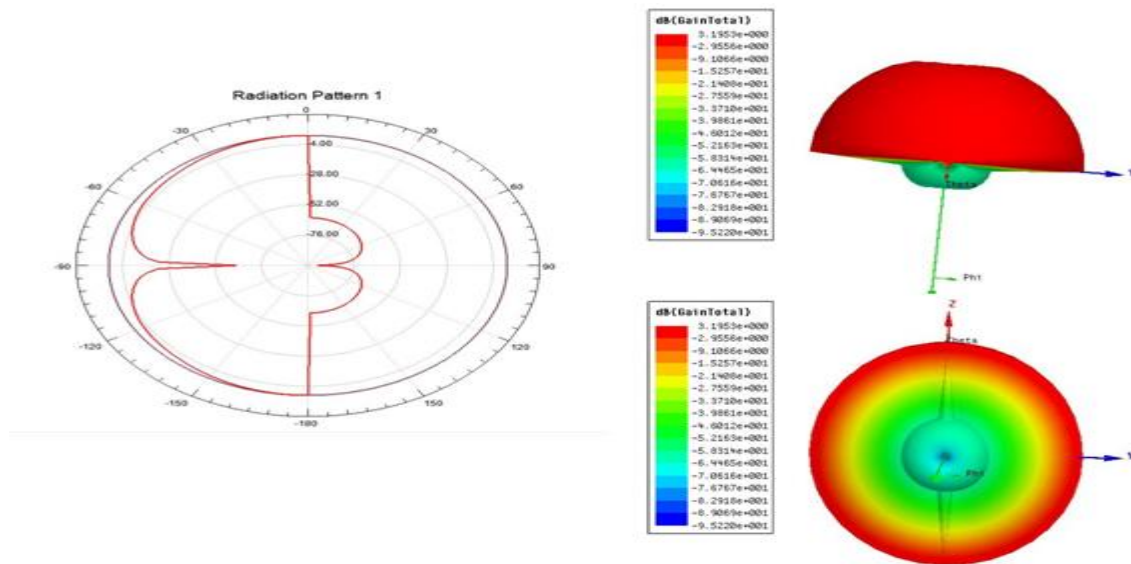


Figure (III.31): Le diagramme de rayonnement en 2D/3D de l'antenne vidée.

III.5.5 Les répartitions des champs:

D'après la **figure (III.32)** et la **figure (III.33)**, on peut conclure que le champ E est réparti sur toute l'épaisseur de l'antenne or que le champ H reste faible tout au long de cette dernière ainsi que sa partie intérieure.

Champ E:

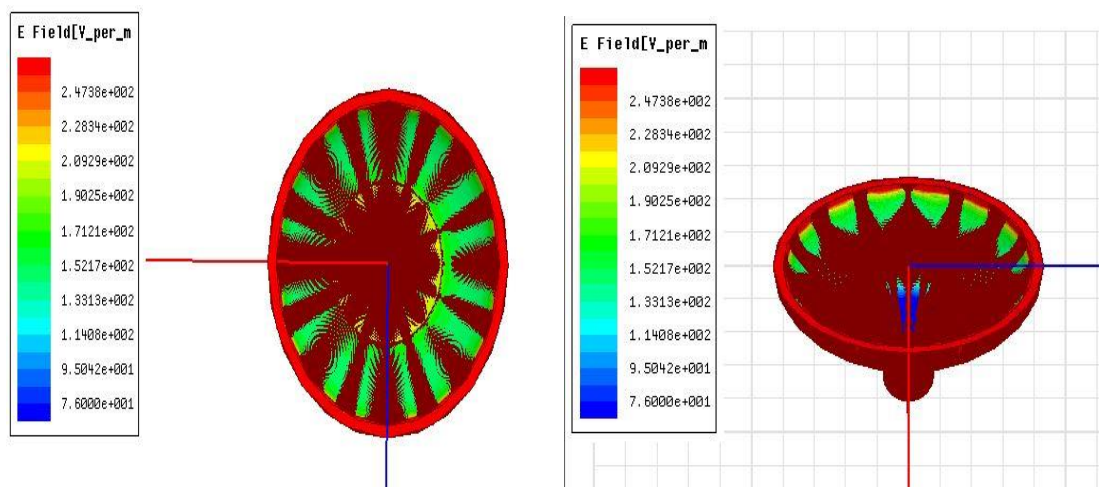


Figure (III.28): La répartition du champ E.

Champ H:

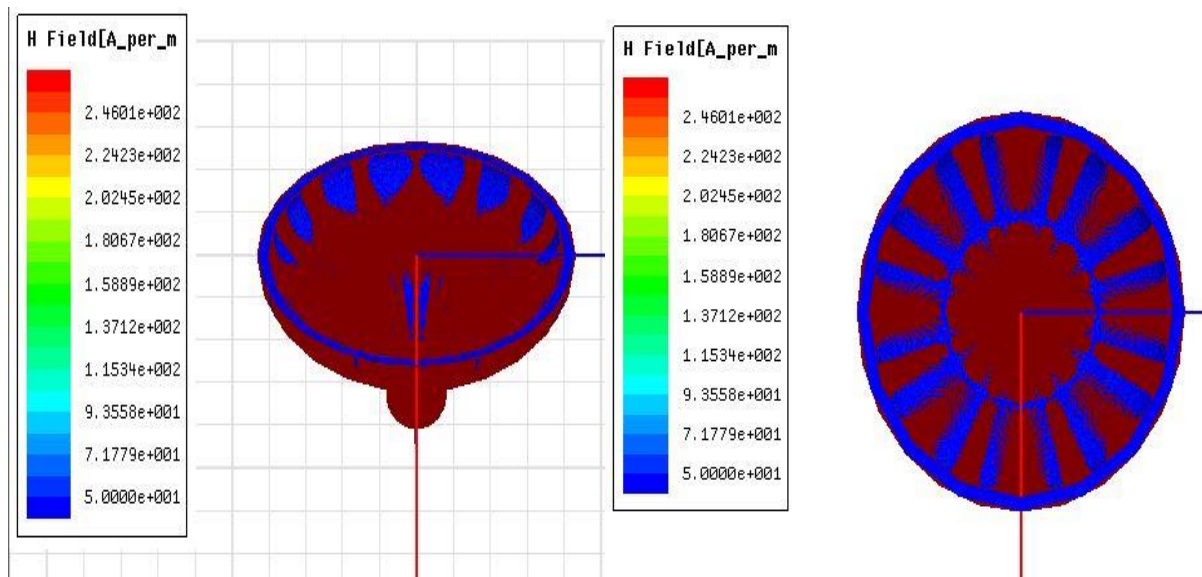


Figure (III.29): La répartition du champ H.

III.5.6 La conception de l'antenne IHA:

La **figure (III.34)** présente l'antenne vidée étudiée en cours de conception dans la machine tour numérique 3 axes assistées par ordinateur.



Figure (III.30): Photographie de conception de l'antenne vidée.

La **figure (III.35)** présente l'antenne IHA vidée avec sa cavité.

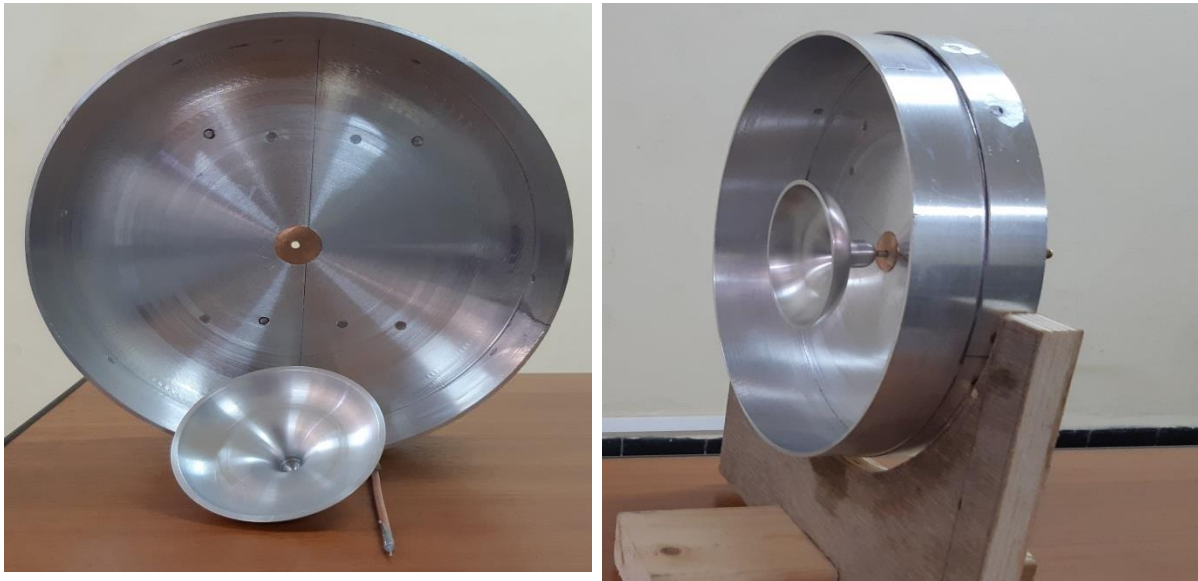


Figure (III.31): Photographie de l'antenne vidée avec cavité.

III.5.7 Résultats de mesure:

III.5.7.1 Mesure de coefficient de réflexion :

La **figure(III.36)** présente l'antenne vidée dans sa cavité sur un support en bois, alimentée par une ligne coaxiale avec l'analyseur de réseau vectoriel.

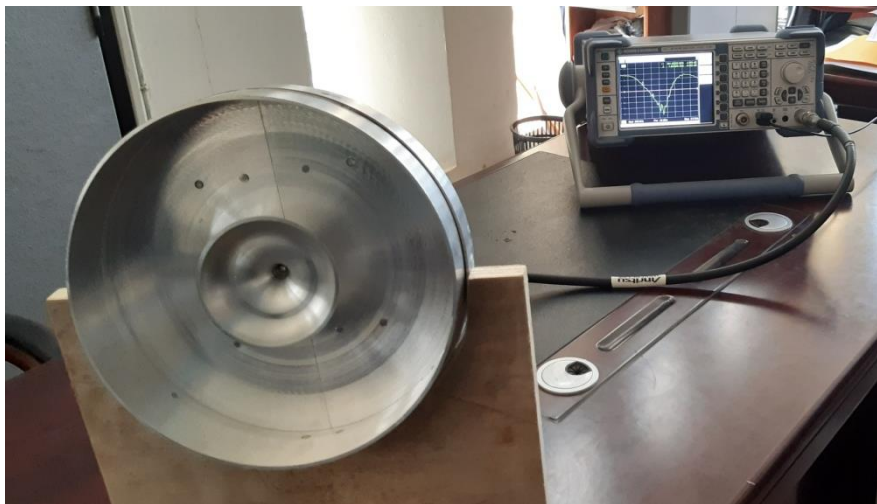


Figure (III.32): Photo d'un montage expérimental de l'antenne étudiée.

Le graphe suivant montre la comparaison entre les résultats de simulation des deux dernières antennes avec les résultats de mesure de la dernière antenne du coefficient de réflexion. On remarque bien que ce dernier reste inchangé aussi bien avec la deuxième

Chapitre III: Conception et simulation des antennes.

antenne qu'avec la dernière au niveau de l'adaptation (-26.5 dB). Et aussi que la deuxième antenne a une meilleure adaptation d'impédance que l'antenne vidée.

Au niveau de la largeur de bande les trois résultats sont presque similaires à -10 dB. Donc on remarque bien que les résultats de mesure sont en bon accord avec les résultats de simulation.

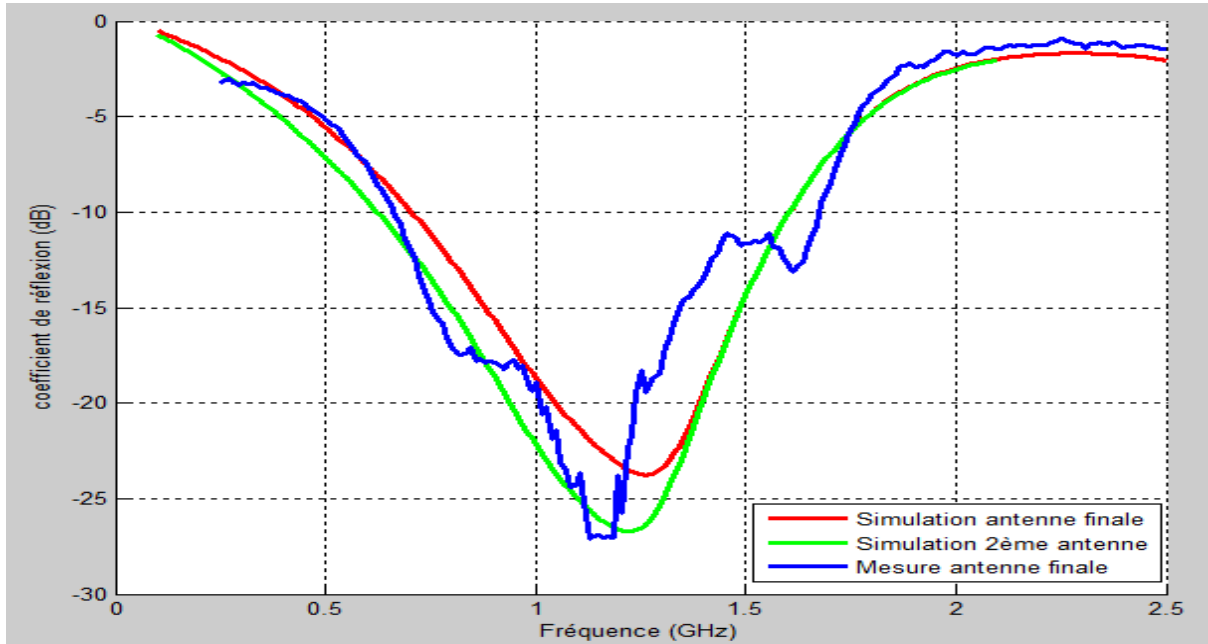


Figure (III.33): Comparaison entre les résultats de simulation et les résultats de mesure.

III.5.7.2 Mesure du diagramme de rayonnement:

La **figure (III.38)** présente l'antenne vidée dans sa cavité alimentée par un câble coaxial avec un appareil de mesure de diagramme de rayonnement.



Figure (III.34): Photographie du montage de mesure du diagramme de rayonnement.

Chapitre III: Conception et simulation des antennes.

Les mesures ont été faites au niveau de l'école supérieure des techniques aéronautique, dans le laboratoire de l'hyper fréquence avec l'appareil de mesure "Antenna Training and Measuring System".

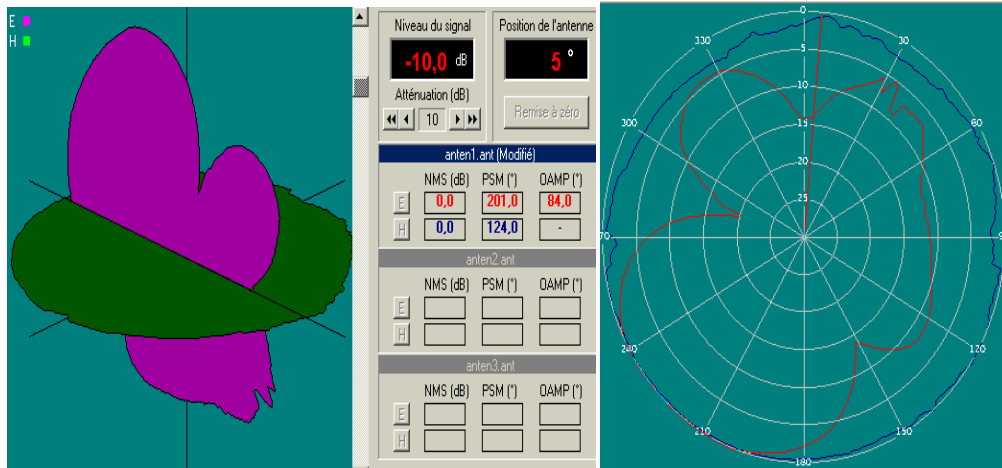


Figure (III.39): Diagramme de rayonnement mesuré en 2D des champs E et H.

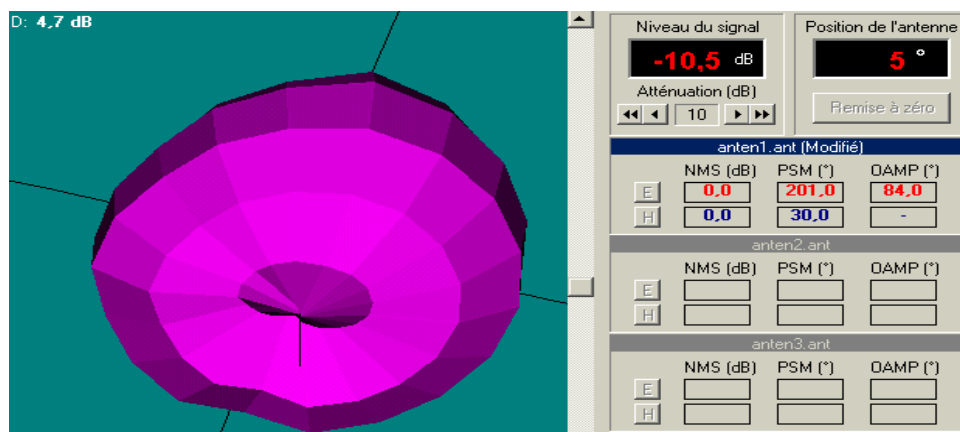


Figure (III.35): Diagramme de rayonnement mesuré en 3D.

La **figure (III.39)** représente les résultats de mesure du diagramme de rayonnement et on observe un rayonnement omnidirectionnel dans le plan H, et un très bon rayonnement dans presque toutes les directions dans le plan E.

Comme le montre les figures ci-dessus le diagramme de rayonnement mesuré est presque identique à celui simulé auparavant, la petite perturbation de rayonnement remarquée à la **figure (III.39)** est causée par le mur présent juste derrière l'antenne. En dehors de cela, un très bon accord est vérifié entre la simulation et la mesure.

III.6 Phase de comparaison :

Dans cette partie nous allons comparer les paramètres diélectriques des trois antennes étudiées. Le **tableau (III.1)** présente les résultats :

Tableau (III.1): Comparaison des paramètres diélectriques des trois antennes étudiées.

		Bande Passante	Fréquence de résonance (F_c)	TOS	Adaptation	Gain
Antenne 1	Sans cavité	2.1 GHz	0.8 GHz	1.2	-24 dB	-1
	Avec cavité	0.2 GHz	1.1 GHz	1.2	-24dB	4.16
Antenne 2 avec cavité		1 GHz	1.2 GHz	1	-26.5 dB	3.26
Antenne 3 avec cavité		0.95 GHz	1.1 GHz	1	-23 dB	3.19

D'après le tableau, la meilleure bande passante est celle de la première antenne sans cavité, le gain maximal a été offert par la première antenne avec cavité, la meilleure adaptation est celle de la deuxième antenne comme le montre le **tableau (III.1)**. Mais en générale la troisième antenne est considérée comme meilleure antenne, car premièrement elle répond aux exigences des antennes ultra large bande avec une bande passante relative égale à 2 GHz et deuxièmement elle est la plus légère comparée aux deux autres antennes étudiées.

III.7 Conclusion:

Nous avons présenté dans ce chapitre trois antennes avec de différentes dimensions qui appartiennent toutes les trois à la catégorie des antennes ultra large bande.

Ce chapitre a donc conduit à la conception, la modélisation et l'optimisation des antennes IHA. Nous avons également présenté les résultats des simulations de ces antennes obtenus par HFSS, qu'il s'agit des différents paramètres des antennes notamment le maillage, le paramètre S_{11} , le taux d'ondes stationnaires, le gain ainsi que la distribution des champs E et H.

Les résultats de simulation montrent que les antennes proposées permettent de répondre aux exigences de l'ultra large bande. Après la conception et la mesure, une bonne concordance entre la simulation et la mesure est observée.

Conclusion générale

Conclusion générale :

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 l'essentiel de la théorie des antennes, en étudiant quelques éléments fondamentaux caractérisant l'antenne en générale. Ainsi que la technologie des antennes ultra large bande et leurs caractéristiques particulières dans le domaine des antennes.

Ce mémoire apporte des contributions importantes par rapport aux antennes à profil bas dans le domaine de l'aéronautique. Le travail se concentre sur la conception d'une antenne à profil bas type chapeau inversé (IHA) soumise à des contraintes de taille et à des exigences de performance. A cette fin, deux nouveaux designs ont été développés selon différentes conceptions.

Dans un premier temps, nous avons choisi un type d'antenne pouvant s'intégrer facilement dans le fuselage d'aéronef, et pouvant diminuer sa traînée totale, éliminant ainsi les dommages et les incidents du milieu extérieur.

Dans un second temps, notre choix s'est porté vers les antennes ultra large bande pour répondre aux exigences de l'équipement de mesure de distance (DME) et ses performances en terme de largeur de bande. Afin de valider ces performances des séries de simulations et optimisations ont été faites avec un logiciel de simulation HFSS. Les simulations prévoient des performances conformes aux spécifications.

Finalement, malgré les difficultés rencontrées, nous avons réussi à concevoir deux antennes de dimensions différentes (la première avec une ouverture $w=\frac{\lambda}{5}$ et une autre vidée avec une ouverture $w=\frac{\lambda}{3}$) avec deux designs différents et deux matériaux (bronze et aluminium) selon la disponibilité. Elles ont été implémentées dans des cavités pour l'amélioration des performances de bande passante et de gain pour répondre aux exigences des antennes ULB.

Ces antennes ont été confrontées à des appareils de mesure pour mesurer les deux paramètres essentiels (coefficient de réflexion et diagramme de rayonnement) et les comparés avec les résultats de simulations. Les différences entre les résultats simulés et mesurés sont minimes.

Les résultats obtenues sont satisfaisants et vérifient bien les exigences des antennes ULB, toutes les caractéristiques de l'antenne (coefficient de réflexion, le gain et le rayonnement) obéissent aux normes. Si les mesures ont été faites dans une chambre anéchoïque les perturbations seront minimales et les résultats seront meilleurs.

Ce travail nous a permis d'approfondir nos connaissances dans le domaine des antennes en générale et plus précisément les antennes ultra large bande. Ainsi la maîtrise du logiciel *HFSS* appliqué à l'optimisation des antennes.

Notre objectif spécifique est de faire des évaluations de l'antenne vidée proposée une fois installée sur l'aéronef. À l'aide des outils informatiques, des simulations sur un aéronef vont permettre de mieux analyser la performance de la nouvelle antenne.

Références bibliographiques

- [1] **Odile Picon et Coll** : « Théorie des antennes, conception et application ». Paris; Dunod-2009 (ISBN 978-2-10-054245-1)
- [2] **C.A Balanis** : «Antenna theory: analysis and design». United States of America; John Wiley and Sons, Inc-1997
- [3] **Fabien FERRERO**: «Reconfiguration dynamique d'antennes imprimées en directivité et polarisation»; Thèse de doctorat de l'université de Nice-Sophia Abtipolis, spécialité électronique-2007
- [4] **Xin Wang, Lan Yao, Fujun Xu, Dongchun Zhou et Yiping Qiu**: «Design and characterization of conformal microstrip antennas integrated into 3D orthogonal woven fabrics»; Journal of Engineered Fibers and Fabrics-2012, Vol 7-issue 2
- [5] **A.R Von Hippel**: «Dielectric materials and applications». Cambridge; MIT Press-1954
- [6] **F.M Mbango**: «Contribution à la caractérisation de matériaux utilisés en microélectronique radiofréquence». Grenoble; Thèse de l'université Joseph FOURIER-2008
- [7] **Z.Zhou et K.L Melde**: «A comprehensive technique to determine the broadband physically consistent material characteristics of microstrip lines». IEEE; Trans Microw Theory and Technics-2010 (58_1)
- [8] **A.Pelov**: «Mobility models for wireless networks»; Thèse de l'université de Strasbourg-2009
- [9] **R.Garg, P.Bhartia, I.Bahl et A.Ittipiboon**: «Microstrip antenna design handbook». London; Artech House-2001
- [10] **D.M Pozar**: «Microwave and RF wireless Systems». United States of America; John Wiley and Sons-2001
- [11] **Marc LABORDE**: Le réseau de création et d'accompagnement pédagogiques . France; Académie de Montpellier-2015
- [12] Manuel IVAO. ELH FPR; Septembre 2011
- [13] **Didier MORIEUX**: «Equipement de bord»; AviaForm disponible sur <http://dmorieux.pagesperso-orange.fr/dme0001.htm>

- [14] **Jimmy Wales:** «Distance Measuringt Equipment»; Wikipédia disponible sur <https://fr.m.wikipedia.org/wiki/DME>
- [15] **Vioux daniel:** «Instrument de radionavigation»; l'Avionnaire disponible sur <http://www.lavionnaire.fr/RadioNavDME.php>
- [16] Radionavigatio «062»; Institut Aéronautique Jean MERMOZ.
- [17] **H.G Schantz:** «A brief history of UWB antennas». Brownsboro; IEEE UWBST conference-2003
- [18] **L.Bennett et G.F Ross:** «Time domain electromagnetics and its applications»; Proceedings of the IEEE-March 1978, Vol 7, pp 299-318.
- [19] **Z.N.C et M.Y.W Chia:** «Broadband planar antennas: Design and applications»; John Wiley and Sons, Ltd-2006, pp 180-190.
- [20] **V.H Rumsey:** «Frequency independent antennas».1957, pp 114-118.
- [21] **A.Chami:** «Miniaturisation et intégration d'antennes imprimées pour systèmes communicants ULB pulsés»; Thèse de l'université de Nice-Sophia Antipolis-2011
- [22] **H.Ben Ibrahim Gaha:** «Analyse et conception des antennes fractales applications aux télécommunications large bande»; Thèse de INPT-ENSEEIH de Toulouse et UTM-ENI de Tunis-2007
- [23] **M.Silva Pimenta:** «Antennes souples à base de méta-matériaux de type conducteurs magnétiques artificiels pour les sandards de systèmes de géo-localisation»; Thèse de l'université de Nice-Sophia Antipolis-2013
- [24] **H.G Schantz:** «A brief history of UWB antennas». Reston; Proceedings of conference on Ultra Wideband Systems and Technologies-2003
- [25] **Ch.J Wang ET K.L Hsiao:** «CPW-Fed monopole antenna for multiples system integration»; IEEE Trans "antennas propag"-2014, Vol 62, pp 1007-1011.
- [26] **D.Bechevet:** «Contribution au développement de tag RFID UHF et micro-ondes sur matériaux plastique». Thèse de l'institut national polytechnique de Grenoble-2005
- [27] **Nicolas FORTINO:** «Conception et caractérisation d'antennes imprimées pour systèmes Ultra Large Bande impulsionnels»; Université de Nice-Sophia Antipolis UFR

sciences et l'école doctorale des sciences et technologie de l'information et de la communication-16 Février 2006

[28] **J.D. Dyson:** «The equiangular antennas»; IRE on antennas and propagation-1959, pp 181-187.

[29] **Alex BELARBI:** «Les antennes indépendantes de la fréquence»; Conservatoire national des arts et métiers, centre régional de Marseille-Septembre 2003.

[30] **R.H Duhamel et DE Isabell:** «Broadband logarithmically periodic antenna structure»; IRE international convention record-March 1957, Vol 5, part 1,pp 119-128.

[31] **H.G Schantz:** «A brief history of UWB antennas». Brownsboro; IEEE conference on Ultra Wideband System and Technoloies-2003, pp 209-213.

[32] **K.Das Sisir:** «Antenna and wave propagation»; Tata Mc Graw-Hill education-2016, pp 116.

[33] **K.Wong Daniel:** «Fondamentals of wireless communication engineering technologies»; John Wiley and sons-2011

[34] **Kishore Kamal:** «Antenna and wave propagation»; IK international, Ltd Ltd-2009, pp 93.

