



MÉMOIRE



En vue de l'obtention du Diplôme
MASTER EN AÉRONAUTIQUE

Délivré par :

L'Institut d'aéronautique et des études spatiales

Spécialité :

Communication Navigation Surveillance / Air Traffic Management

Titre :

**Conception et Simulation d'une
antenne patch ultra large bande
[1-8 GHz]**

Réalisé par :

Mohamed Mansouri
El Haithem Ezzeroug

Encadré par :

Pr: Houria Azine

2018/2019

Remerciements

On adresse nos sincère remerciements tous les membres de Institut d'Aéronautique et des Etudes Spatiales en particulier, nous tenons à remercier vivement notre promotrice de thèse Madame Azine Houria qui s'est toujours montré très disponible, de bon conseil, et qui nous laissé une grande liberté dans le choix et l'orientation de nos travaux tout en sachant me guider.

Nous tenons à remercier toute notre famille ; une pensée spéciale va à nos parents qui nous ont soutenu et conseillé durant toute notre parcours scolaire

Nous voudrions adresser nos vifs remerciements à tous les membres du jury pour avoir accepté d'examiner ce travail. Enfin, nous exprimons notre gratitude à nos amis, collègue et tous ceux qui sont directement ou indirectement impliqués dans de ce de ce mémoire et rendu agréable notre environnement de travail.

Résumé

Dans ce travail nous avons réalisé la conception et l'optimisation d'une antenne monopôle circulaire patch bibande pour les communications sans fil. La bande inférieure s'étend de 1.9 GHz à 3.3 GHz et la bande supérieure de 4.6 GHz à 7.5 GHz. L'antenne a été conçue dans le simulateur HFSS sur un substrat Isola Astra MT3.0, avec une permittivité relative de 3, une tangente de perte de 0,0027 et de 0,76 mm de hauteur. Les configurations, les simulations et les résultats finaux sont présentés.

Abstract

In this work we realized the design and optimization of a circular monopole patch antenna for wireless communications. The lower band goes from of 1.9 GHz at 3.3 GHz and the higher band goes from of 4.6 GHz at 7.5 GHz. The antenna was designed in the HFSS simulator on an Isola Astra MT3.0 substrate, the relative permittivity of 3, the loss of 0.0027 and 0.76 mm in height. Configurations, simulations and final results are determined.

ملخص

في هذا العمل، أدركنا تصميم وتحسين هوائي مزدوج أحادي القطب دائري للاتصالات اللاسلكية. يمتد النطاق الأدنى من 1.9 GHz إلى 3.3 GHz والنطاق العلوي من 4.6 GHz إلى 7.5 GHz. تم تصميم الهوائي في جهاز محاكاة HFSS على ركيزة Isola Astra MT3.0، مع سماحية نسبية قدرها 3، وظل خسارة يبلغ 0.0027 و 0.76 ملم في الارتفاع. يتم تقديم التكوينات والمحاكاة والنتائج النهائية.

Tables des matières

Remerciement	I
Résumé.....	II
Table des matières.....	III
Liste Des Figures	IV
Liste Des Tableaux.....	V
Introduction Générale.....	1

CHAPITRE I Généralités sur les antennes

I.1	Introduction.....	2
I.2	Généralités sur les antennes.....	2
I.3	Les types d'antennes.....	3
I.3.1	Les différentes sortes d'antenne.....	3
I.3.2	Antennes filaires.....	4
I.3.3	Antennes à ouverture rayonnante.....	4
I.3.4	Antennes à réflecteurs.....	4
I.3.5	Les antennes imprimées.....	5
I.4	Les caractéristiques des antennes.....	5
I.4.1	Impédance d'entrée de l'antenne.....	5
I.4.2	Le coefficient de réflexion.....	6
I.4.3	Bande passante	7
I.4.4	Diagramme de rayonnement.....	8
I.4.5	Polarisation de l'antenne.....	9
I.4.6	Gain de l'antenne.....	10
I.5	Les antennes imprimées.....	11
I.5.1	Antennes patch imprimées.....	11
I.5.2	Avantages et inconvénients des antennes patches.....	12
I.5.3	Domaine d'application des antennes imprimées.....	13
I.6	Les techniques d'alimentation.....	13
I.6.1	Alimentation avec contact.....	14
I.6.1.1	Sonde coaxiale.....	14
I.6.1.2	Ligne microbande.....	14
I.6.2	Alimentation sans contact (par proximité)	15
I.6.2.1	Ligne microbande en sandwich.....	15
I.6.2.2	Guide d'onde coplanaire.....	15
I.6.2.3	Couplage par fente.....	16
I.7	Les pertes dans les antennes	18
I.7.1	Effet de peau.....	18
I.8	Pertes dans le substrat.....	19
I.9	Conclusion.....	20

CHAPITRE II Antennes Ultra Large Bande

II.1	Introduction.....	21
II.2	La technologie Ultra Large Bande.....	21
II.3	Les applications des antennes ultra large bande	22
II.4	Caractéristique principale des systèmes ULB.....	23
II.4.1	Problème dû à la propagation par trajets multiples.....	23
II.4.2	Communications « protégées »	23
II.5	Capacité de la technologie ULB.....	24
II.6	Les monopoles planaires.....	24
II.6.1	Les monopoles planaires à plan de masse infini.....	24
II.6.2	Les monopoles planaires à plan de masse réduit.....	26
II.6.3	Exemples d'antennes monopoles imprimées.....	27
II.7	Les antennes reconfigurables.....	27
II.7.1	ce qu'une antenne reconfigurable ?	27
II.7.2	Intérêt et applications des antennes reconfigurables.....	28
II.7.3	Antennes reconfigurables en fréquence.....	28
II.7.4	Antennes reconfigurables en diagramme de rayonnement.....	29
II.7.5	Antennes reconfigurables en polarisation.....	29
II.8	Conclusion.....	29

CHAPITRE III Conception et simulation d'antenne Ultra Large Bandes

III.1	Introduction.....	30
III.2	Logiciels de Simulation Electromagnétique.....	30
III.3	Présentation du logiciel de simulation HFSS.....	31
III.4	Géométrie de base.....	31
III.5	Résultats de simulations.....	33
III.6	Etude paramétrique.....	33
III.6.1	Effet des dimensions du substrat.....	34
III.6.2	Effet de la largeur du plan de masse.....	35
III.6.3	Effet de la largeur de la ligne d'alimentation	36
III.6.4	Effet des Rayon R1/R3.....	37
III.7	L'antenne patch optimisée.....	38
III.7.1	Le coefficient de réflexion.....	39
III.7.2	Impédance d'entrée.....	40
III.7.3	Taux d'onde stationnaire (VSWR : Voltage Standing Wave Ratio) ...	41
III.7.4	Diagramme de rayonnement en 2D et 3D.....	41
III.8	Conclusion.....	44
	Conclusion générale.....	45
	Bibliographie.....	46

Liste des figures

Figure 1. 1 : Différentes sortes d'antennes.....	3
Figure 1. 11. Exemples d'antennes filaires.....	4
Figure 1. 12 : Exemples d'antennes à ouverture rayonnante.	4
Figure 1. 13 : Exemples d'Antennes à réflecteurs.	5
Figure 1. 14 : Exemple d'Antenne imprimée.	5
Figure 1.15 : Le coefficient de réflexion en fonction de la fréquence.	6
Figure 1.16 : Exemple d'un coefficient de réflexion et bande passante d'une antenne [2].....	7
Figure 1.17 : Utilisation des différentes bandes de fréquence.....	7
Figure 1.18 : Repère en coordonnées sphériques pour le calcul du champ rayonné en zone lointain.....	8
Figure 1.19 : Différents types de représentation des diagrammes de rayonnement a) 2D polaire b) 2D cartésien c) 3D.....	8
Figure 1.20 : a) Diagramme dit «omnidirectionnel» dans le plan xoy et b) Diagramme dit «directif».....	9
Figure 1.21 : Différents types de polarisation.....	10
Figure 1.22 : Description d'une antenne imprimée.....	11
Figure 1.23 : différentes formes d'élément rayonnant.....	12
Figure 1.24 : Les techniques d'alimentation.....	13
Figure 1.25 : Alimentation du patch par un câble coaxial.....	14
Figure 1.26 : Alimentation du patch par une ligne microbande.....	14
Figure 1.27 : L'alimentation par une ligne microbande axiale (a) ; décalée (b) et avec encoche(c).....	14
Figure 1.28 : Ligne microbande en sandwich.....	15
Figure 1.29 : Alimentation du patch par un guide d'onde coplanaire.....	15
Figure 1.30 : Alimentation du patch par le couplage par fente.....	16
Figure 1.31 : Les ondes guidées.....	19
Figure 1.32 : Les ondes rayonnées.....	19
Figure 1.33 : Les ondes de surface.....	19
Figure 2.1 : Les domaines dans lesquels l'UWB apporte des solutions intéressantes [24].....	22
Figure 2.11 : Propagation par trajets multiples.....	23
Figure 2.12 : Monopole sur plan de masse.....	25
Figure 2.13 : Stratégies d'optimisation de la taille du plan de masse [25].....	25
Figure 2.14 : Antenne monopôle elliptique. [26].....	26
Figure 2.15 : Antenne monopôle circulaire. [27].....	26

Figure 2.16 : Antenne monopôle large fente. [28].....	27
Figure 3.1 : Logo des principaux logiciels de simulations.....	30
Figure 3.11 : La configuration de l'antenne patch (antenne de base).....	32
Figure 3.12 : Le coefficient de réflexion S11 de l'antenne de base.....	33
Figure 3.13 : Le coefficient de réflexion S11, pour différents dimensions du substrat simulée sous HFSS.....	34
Figure 3.14 : Le coefficient de réflexion S11, pour différents valeurs de largeur du plan de masse.....	35
Figure 3.15 : Le coefficient de réflexion S11, pour différent largeur de la ligne d'alimentation secondaire simulée sous HFSS.....	36
Figure 3.16 : Le coefficient de réflexion S11, pour différent dimension des rayons R1 et R3.....	37
Figure 3.17 : Structure de l'antenne optimisée.....	38
Figure 3.18 : Coefficient de réflexion S11 de la structure simulée.....	40
Figure 3.19 : Impédance d'entrée de l'antenne proposée.....	40
Figure 3.20 : Le taux d'onde stationnaire.....	41
Figure 3.21 : Diagramme de rayonnement à la fréquence 2 GHZ (a) 2D (b) 3D.....	42
Figure 3.22 : Diagramme de rayonnement à la fréquence 2.45 GHZ (a) 2D (b) 3D.....	42
Figure 3.23 : Diagramme de rayonnement à la fréquence 5.2 GHZ(a) 2D (b) 3D.....	43
Figure 3.24 : Diagramme de rayonnement à la fréquence 7 GHZ(a) 2D (b) 3D.....	43

Liste des Tableaux

Tableau 1.1 : Types d'antennes.....	3
Tableau 1.11 : comparaison entre les méthodes d'alimentation [15].....	16
Tableau 3.1 : Dimension d'antenne proposée 27.....	31
Tableau 3.11 : Dimension du substrat.....	33
Tableau 3.12 : Les différentes valeurs de la largeur du plan de masse.....	34
Tableau 3.13 : Les valeurs de la largeur de la ligne d'alimentation	35
Tableau 3.14 : Les valeurs des Rayon R1 et R3	36
Tableau 3.15 : Les valeurs de la largeur de bande passante (en GHz) de l'antenne par rapport aux Rayon R1 et R3.....	36
Tableau 3.16 : Dimension d'antenne de base et l'antenne optimisée.....	38

Introduction générale

De nos jours, les antennes sont devenues les éléments de base pour une liaison radioélectrique. Les antennes sont utilisées en GPS, télé localisation, radar ainsi que pour nos besoins dans la vie courante. Elles se présentent sous diverses formes selon leur but d'utilisation.

Les technologies modernes s'orientent vers la miniaturisation de ces antennes tout en essayant de garder les meilleures performances.

L'antenne patch est conçue pour satisfaire ces besoins, c'est un conducteur métallique de forme particulière placé sur un substrat terminé par un plan de masse ; son caractère en miniature offre la possibilité de l'intégrer facilement dans les systèmes d'émission réception.

Profitant d'une largeur de bande instantanée au moins cent fois plus grande que celle des systèmes large bande actuels, la technologie ULB est particulièrement efficace pour transmettre de très hauts débits dans un environnement perturbant typique de la propagation en intérieur. Les puissances d'émission autorisées sont largement inférieures aux autres normes radio, limitant de ce fait les portées à la dizaine de mètres mais permettant des consommations basses voire très basses, compatibles avec les appareils portables. D'un point de vue purement technique, la technologie ULB est donc parfaitement positionnée pour le marché des radiocommunications de proximité.

Ce manuscrit se compose de trois chapitres qui ont constitué les différentes étapes du mémoire.

Dans le premier chapitre, nous rappelons des notions de base et les généralités sur les antennes pour différentes applications. Nous parlons notamment des antennes imprimées.

Dans le chapitre deux, nous proposons une présentation de la technologie ultra large bande son domaine utilisation, ces avantages et ses caractéristiques ainsi que les antennes reconfigurable

Dans le chapitre trois nous allons faire la conception d'une antenne patch de forme circulaire alimentées avec une ligne microruban, notre travail est basé essentiellement sur la variation de la forme du patch de l'antenne, la taille de substrat, la largeur du plan de masse, la ligne d'alimentation et les rayons de l'antenne de masse, afin d'arriver à de meilleure performance de l'antenne. Finalement nous présenterons les résultats de la structure optimisée.

CHAPITRE I

Généralités sur les antennes

I.1 Introduction

Dans les applications aéronautiques, aérospatiales et militaires où le faible volume, le faible poids, le faible coût, les hautes performances et la facilité de mise en œuvre sont les principales exigences, Aujourd'hui, avec l'explosion des télécommunications, ces contraintes se retrouvent dans les applications commerciales sans fils. Pour répondre à ces exigences un nouveau type d'antenne a été proposé qui est l'antenne imprimée ultra large bande.

Dans ce chapitre, nous présentons, en premier lieu, la définition des antennes. Nous donnerons ensuite leurs caractéristiques et domaines d'utilisation, leurs avantages ainsi que leurs inconvénients. Finalement, nous terminerons ce chapitre en rappelant brièvement et les différentes techniques d'alimentation des antennes patch ainsi que les pertes dans les antennes.

I.2 Généralités sur les antennes

Les antennes sont des dispositifs permettant de rayonner ou de capter les ondes électromagnétiques [1], ou, en d'autres termes, une structure de transition entre espace libre et onde guidée [2]. L'antenne d'émission transforme le courant modulé d'excitation en ondes électromagnétiques capables de se déplacer dans l'atmosphère. Tandis que l'antenne de réception convertit les ondes électromagnétiques reçues en courant susceptible d'être traité par le récepteur.

Il existe plusieurs types d'antennes qui diffèrent par leur fonctionnement, leur géométrie, et leur technologie. Il est possible d'identifier plusieurs familles à l'origine de l'ensemble des structures rayonnantes : les antennes filaires (comme le dipôle, le monopôle, l'antenne Yagi), les antennes patches (antennes à structures planaires), les antennes à ouverture (comme le cornet), et les antennes à réflecteurs (comme les paraboles).

Les antennes ont donc pour principales fonctions.

- La transmission ou la réception de l'énergie dans des directions privilégiées.
- L'adaptation correcte entre les circuits électroniques terminaux et le milieu de propagation.
- La transmission la plus fidèle possible de l'information souhaitée.

I.3 Les types d'antennes

Il existe deux types d'antennes directives et omnidirectionnelles :

	Caractéristiques	Usage	Types d'antennes
Antennes directives	Gain G_0 élevé.	faisceaux hertziens.	Antennes paraboliques.
Antennes omnidirectionnelles	-Gain plus ou moins constant dans le plan horizontal ou dans un secteur donné.	- Radio / TV. - Communications mobiles.	- Brin vertical.

Tableau 1. 1. Types d'antennes.

I.3.1 Les différentes sortes d'antennes

Parmi les antennes les plus couramment utilisées nous en introduisons quatre groupes principaux qui sont : les antennes filaires, les antennes à ouverture rayonnante, les antennes à réflecteur et les antennes imprimées [3].

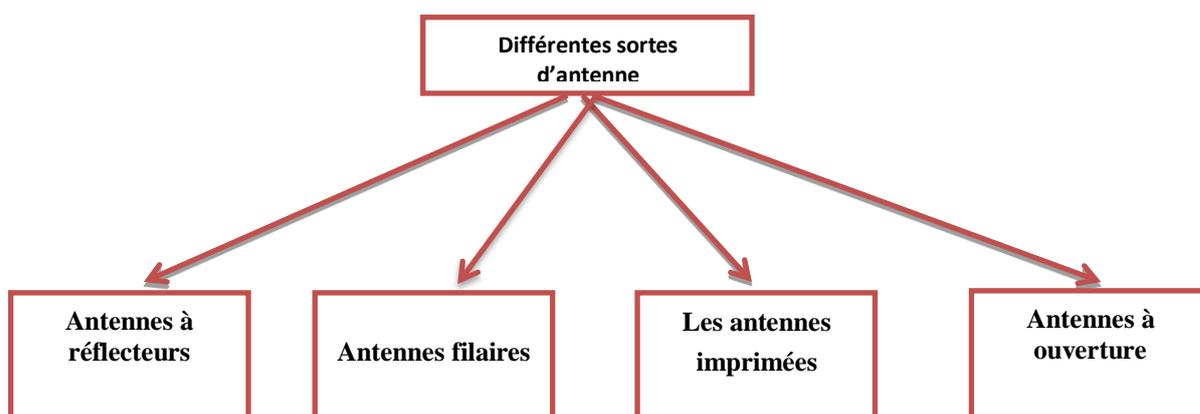


Figure 1. 1. Différentes sortes d'antennes.

I.3.2 Antennes filaires

Les antennes filaires sont les plus courantes. Elles sont utilisées pour des types de transmissions très différents : sur les véhicules, les bâtiments, les bateaux, les avions... etc. Il en existe de différents types, de type fil rectiligne dipôle, en boucle ou en hélice pour les plus communes. La combinaison de ces différentes formes de base pour former une antenne unique est également possible.

L'antenne dipôle est souvent utilisée comme antenne de référence dans les systèmes radio-mobiles. C'est en effet le type le plus simple.

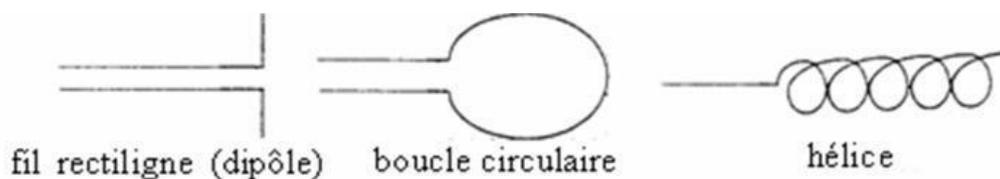


Figure 1. 11. Exemples d'antennes filaires.

I.3.3 Antennes à ouverture rayonnante

Les antennes à ouverture rayonnante sont plus récentes que les précédentes. Leur utilisation est motivée par les émissions à des fréquences plus hautes. Compte tenu de leur facilité de montage ces antennes sont très couramment utilisées dans le domaine de l'aviation. Elles peuvent être couvertes d'un matériau diélectrique les protégeant contre les conditions aléatoires de l'environnement.

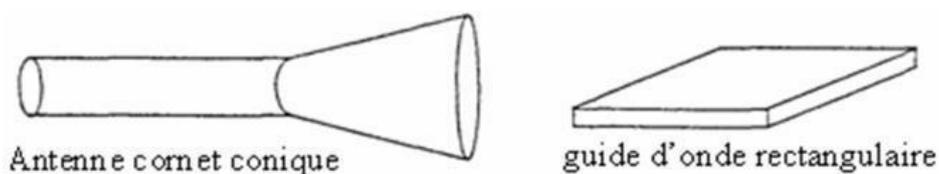


Figure 1. 12. Exemples d'antennes à ouverture rayonnante.

I.3.4 Antennes à réflecteurs

Ces antennes consistent principalement en une source illuminant une surface réfléchissante. Les applications principales de ce type d'antennes se situent dans le domaine des communications spatiales qui nécessitent des antennes capables de communiquer sur des distances importantes de plusieurs millions de kilomètre. Le réflecteur parabolique est la forme la plus connue de ce type d'antennes.

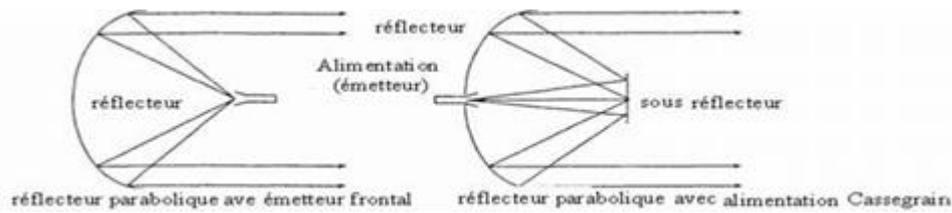


Figure 1. 13. Exemples d’Antennes à réflecteurs.

I.3.5 Les antennes imprimées

L’antenne imprimées ou plaquées appelée aussi antenne patch est un type récent d’antenne dont le développement et l’utilisation sont de plus en plus fréquents.

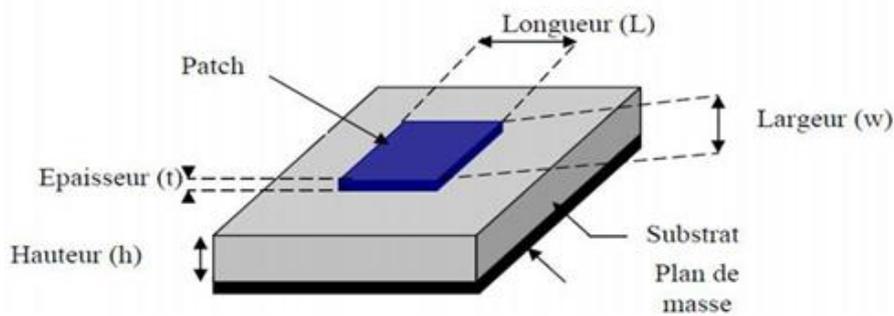


Figure 1. 14. Exemple d’Antenne imprimée.

I.4 Les caractéristiques des antennes

Une antenne se définit par les caractéristiques principales suivantes : Le coefficient de réflexion, la bande passante, le diagramme de rayonnement la polarisation et le gain de l’antenne [4].

I.4.1 Impédance d’entrée de l’antenne :

Une antenne alimentée par une ligne de transmission d’impédance caractéristique, l’impédance d’antenne peut être considérée comme une impédance complexe :

$$Z_a = R_a + jX_a \quad (1.1)$$

L’impédance d’entrée de l’antenne dépend bien évidemment de la géométrie de l’antenne mais aussi du couplage entre la ligne et l’antenne.

L’impédance d’entrée de l’antenne que l’on souhaite la plus proche possible de 50Ω en partie réelle, et nulle en partie imaginaire, dépend du type d’alimentation

1.4.2 Le coefficient de réflexion

On définit la qualité d'adaptation d'une antenne soit en donnant son impédance caractéristique (formule 1.2) (souvent 50 ohms), soit en donnant son coefficient de réflexion S_{11} (formule 1.3).

$$\mathbf{Z_e = R + j} \quad (1.2)$$

$$|\mathbf{S_{11}}|^2 = \frac{P_r}{P_t} \quad (1.3)$$

$|S_{11}|$ est le coefficient de réflexion en tension, donné par la formule et exprimé en décibels. C'est le rapport de la tension réfléchie à la tension transmise, sa valeur varie donc de 0 (aucune réflexion) à 1 (réflexion totale)

L'impédance déduite d'une mesure du coefficient de réflexion est donnée par :

$$\mathbf{Z_e = Z_c \frac{1+S_{11}}{1-S_{11}}} \quad (1.4)$$

Le paramètre S_{11} qui est le coefficient de réflexion à l'entrée de l'antenne exprime le transfert d'énergie par cette antenne. La valeur de ce paramètre varie en fonction de la fréquence. Afin d'assurer une bonne adaptation dans la bande de fréquence désirée, nous imposons le critère suivant $|S_{11}| \leq -10$ dB [28]

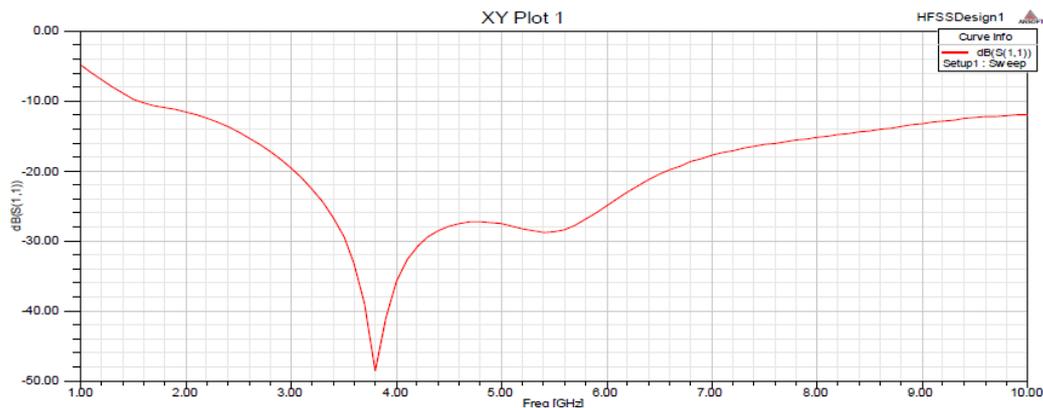


Figure 1.15 : Le coefficient de réflexion en fonction de la fréquence

I.4.3 Bande passante

La bande passante est une bande où le transfert d'énergie de l'alimentation vers l'antenne (ou de l'antenne vers le récepteur) est maximal.

Dans la plupart des cas, la bande passante est définie en fonction du coefficient de réflexion. Il n'y a pas de critères précis pour la limite du coefficient de réflexion. Cependant, un critère typique est d'avoir un coefficient de réflexion inférieur à -10 dB sur toute la bande passante.

Certaines antennes sont très sélectives (bandes passantes très étroites), d'autres peuvent être utilisées sur une très large bande de fréquences.

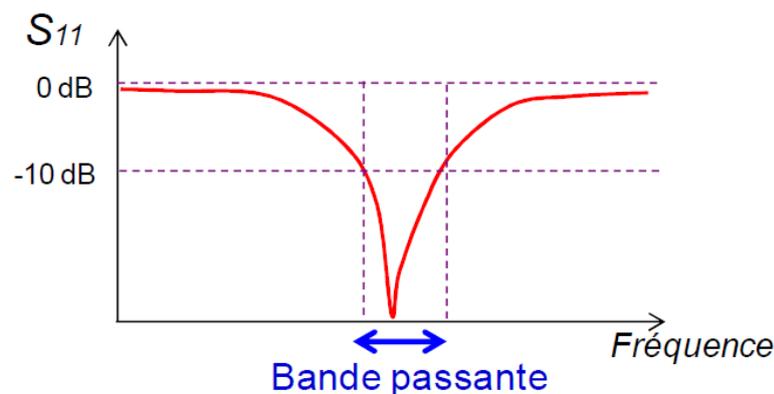


Figure 1.16 : Exemple d'un coefficient de réflexion et bande passante d'une antenne [5]

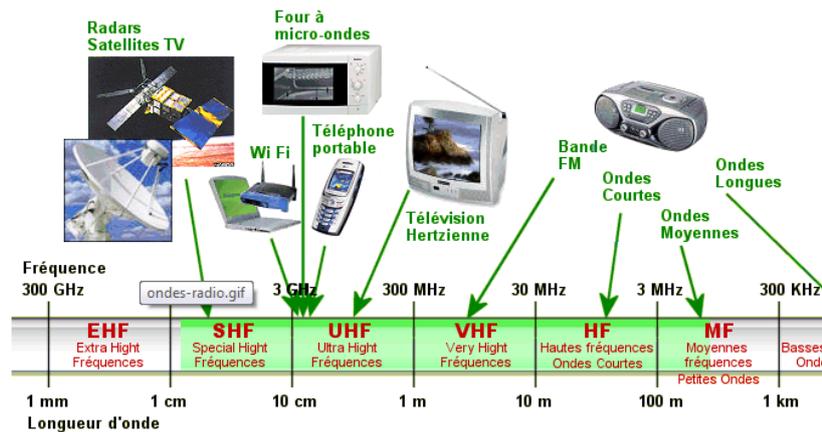


Figure1.17 : Utilisation des différentes bandes de fréquence

I.4.4 Diagramme de rayonnement

La densité de puissance rayonnée par une antenne est répartie dans l'espace autour de celle-ci en fonction de sa géométrie et de son adaptation. Les diagrammes de rayonnement sont utilisés pour représenter graphiquement cette répartition. Ils sont donnés en «zone lointaine» et généralement dans un repère en coordonnées polaires (Figure 1.18).

Le champ électromagnétique est considéré en zone lointaine si la distance entre le point où il est calculé et l'antenne respecte la condition donnée en équation (2). Les diagrammes peuvent être représentés sur des figures en 2D (polaire ou cartésien) ou en 3D (Figure 1.19). où D est la dimension la plus grande de l'antenne et λ la longueur d'onde associée à la fréquence de fonctionnement de l'antenne.

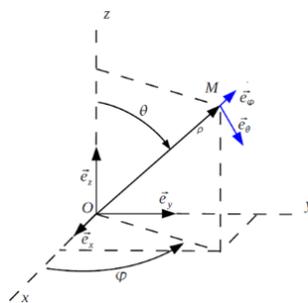


Figure 1.18 : Repère en coordonnées sphériques pour le calcul du champ rayonné en zone lointain

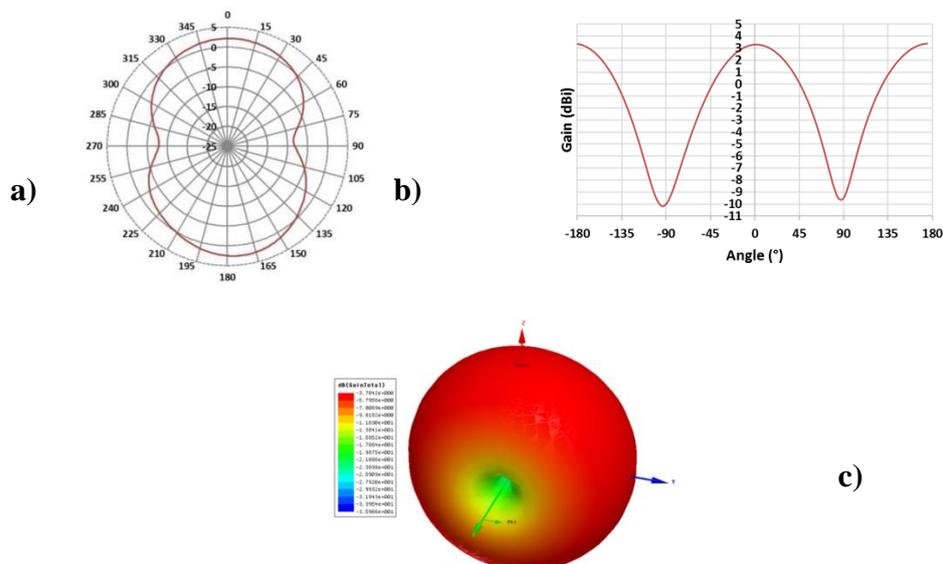


Figure 1.19 : Différents types de représentation des diagrammes de rayonnement
a) 2D polaire b) 2D cartésien c) 3D

Parmi la multitude de diagrammes possibles, trois types de diagramme peuvent être identifiés :

- Le diagramme dit isotopique si le diagramme de rayonnement de l'antenne est une sphère. En pratique l'antenne isotrope parfaite n'existe pas.
- Les diagrammes dits omnidirectionnels pour lesquels le rayonnement s'effectue dans de manière isotrope mais dans un seul plan de l'espace. Il existe des directions dans lesquelles l'antenne rayonne avec moins d'énergie. Pour certaines antennes omnidirectionnelles il existe des directions dans lesquelles l'antenne ne rayonne pas. Ces directions sont dites aveugles (figure 1.20).
- Les diagrammes dits directifs où la plus grande partie de la puissance rayonnée est concentrée dans un lobe appelé lobe principale reste de la puissance est distribuée dans de multiples lobes.

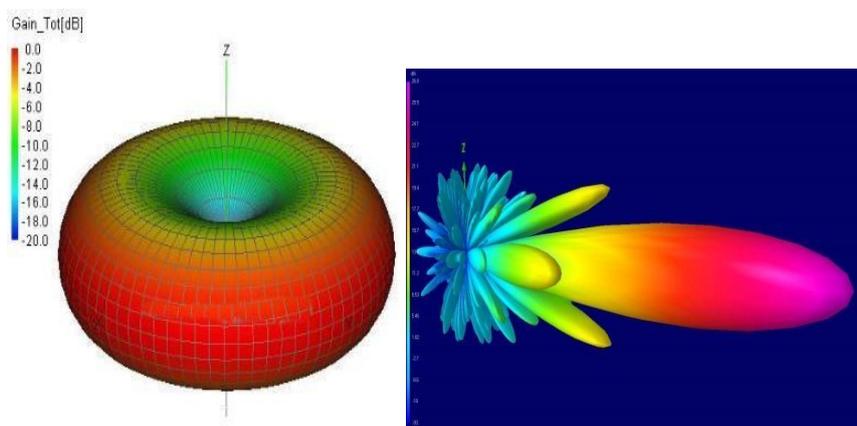


Figure 1.20 : a) Diagramme dit « omnidirectionnel » dans le plan xOy et b) Diagramme dit « directif »

I.4.5 Polarisation de l'antenne

Les ondes électromagnétiques propagent des champs vectoriels, on dit qu'elles sont polarisées. Le champ magnétique d'une onde plane se déduit directement du champ électrique qui est le seul à être utilisé pour définir la polarisation :

- **Polarisation rectiligne :** Le champ électrique reste parallèle à une direction fixe, orthogonale à la direction de propagation. La direction de polarisation résulte de l'orientation des courants sur la surface de l'élément. La position du point d'alimentation sur l'antenne est très importante pour la détermination de la direction de la polarisation qui est parallèle à la direction

des courants sur l'élément .Par conséquent, la polarisation (tout comme l'orientation des courants sur les éléments) est parallèle à l'axe oy

- **Polarisation circulaire :** La polarisation est dite circulaire si l'extrémité du vecteur du champ électrique, en un point de l'espace, décrit un cercle lorsque les ondes se propagent.

Les antennes n'ont pas toutes une polarisation rectiligne. Selon leur structure et la manière de l'alimentation, il est possible d'obtenir une polarisation elliptique ou circulaire (par exemple, en excitant l'antenne en deux points par deux sources égales mais déphasées de 90°)

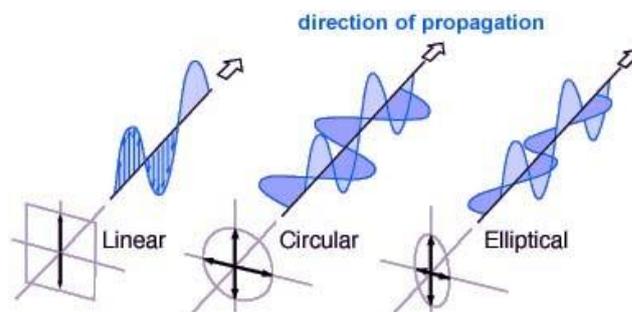


Figure 1.21 : Différents types de polarisation [3].

I.4.6 Gain de l'antenne

Le champ lointain rayonné par une antenne est généralement caractérisé par son diagramme de directivité $D(\theta, \varphi)$ qui caractérise l'aptitude d'une antenne à concentrer son énergie dans une ou plusieurs directions privilégiées.

Le gain d'une antenne est une caractéristique importante de ses performances au sein d'un système. Il se définit comme le rapport de l'intensité maximum de rayonnement obtenue au sommet du lobe principal sur l'intensité de rayonnement dans la même direction qui serait produite pour une source électromagnétique isotrope alimentée par la même puissance d'entrée

I.5 Les antennes imprimées

I.5.1 Antennes patch imprimées

Une antenne à éléments rayonnants imprimés voire «figure1.22», communément appelée antenne patch est une ligne micro-ruban (microstrip) de forme particulière. Elle effectue ainsi deux fonctions fondamentales qui définissent le principe d'antenne de manière générale, il s'agit bien du rayonnement (émission) et de la réception d'une onde électromagnétique. Elle se compose de trois parties :

- **Le plan de masse (ground plane)** est une surface conductrice (cuivre) recouvrant la partie inférieure du substrat. Elle permet de faire rayonner la partie supérieure.
- **Un substrat diélectrique (diélectrique substrat)** composé d'un matériau isolant, d'épaisseur généralement faible devant la longueur d'onde et de permittivité relative ($2,2 < \epsilon_r < 12$). Il est utilisé pour augmenter la puissance rayonnée par l'antenne et réduire les pertes par effet de joule et amélioré la bande passante de l'antenne. Parfois, il est préférable d'utiliser des substrats diélectriques d'épaisseur importante et de faible permittivité pour avoir une grande efficacité et une large bande passante.
- **L'élément rayonnant (patch)** est une partie métallique de forme et de taille à définir selon l'application, à géométrie variable (circulaire, rectangulaire, triangulaire ...etc.).Il doit être relié au reste du circuit par une ligne de transmission qui doit être adaptée d'impédance à l'antenne et au reste du circuit afin d'éviter le phénomène de réflexion. Dans la pratique, le rectangle et le disque représentent les formes de l'élément rayonnant les plus utilisées. Il est constitué d'une partie conductrice qui va rayonner. La forme et les dimensions conditionnent la fréquence de fonctionnement de l'antenne. [7]

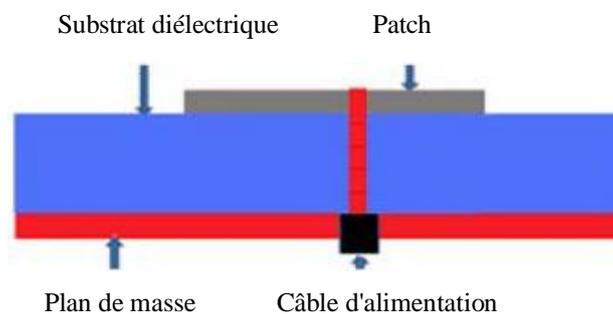


Figure 1.22 : Description d'une antenne imprimée

L'élément rayonnant de l'antenne patch peut prendre plusieurs formes qui peuvent être rectangulaire, carrée circulaire .Les formes suivantes « Figure 1.23 » sont les plus

courantes car elles présentent une grande facilité d'analyse et de fabrication, mais également un diagramme de rayonnement très intéressant.

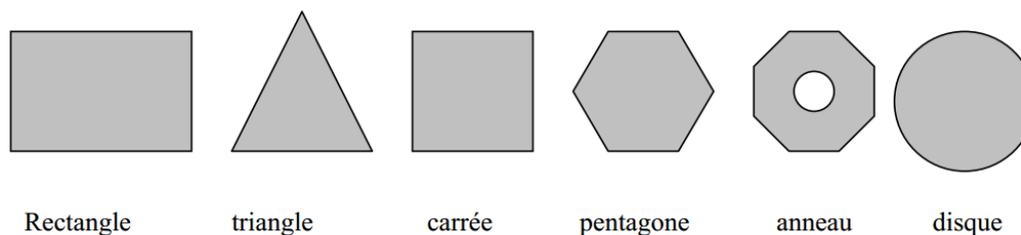


Figure 1.23 : différentes formes d'élément rayonnant.

Parmi toutes les formes des éléments rayonnants, le rectangle est le plus facile à appréhender pour la compréhension des mécanismes de rayonnement des antennes patch.

Les antennes imprimées possèdent comme on a déjà souligné une facilité d'intégration et elles sont largement utilisées, leur applications couvrent un large domaine de fréquences (100 MHz à 100 GHz).

I.5.2 Avantages et inconvénients des antennes patches

- Faible poids, masse, épaisseur, et volume.
- Possibilité d'être intégrées dans des appareils électroniques transportable.
- Faible cout et facilité de fabrication.
- Capables d'émettre à deux ou trois fréquences.
- Simples, robustes, et moins encombrantes et adaptables aux surfaces planes et non planes. [8] [9]

Néanmoins ces antennes présentent des limitations à savoir :

- Faible rendement, puissance d'émission (<100W) et un faible gain (6dB).
- Facteur de qualité Q trop élevé (50 jusqu'à 75) et bande passante étroite (de 1 à 5 %).
- Faible pureté de polarisation.
- Pertes de rayonnement par onde de surfaces dans le substrat diélectrique.

Donc la conception des antennes doit répondre à des compromis en termes de performance et de complexité de réalisation. [10]

Les antennes patch ont un facteur de qualité (Q) très élevé. Q représente les pertes lié à l'antenne et un grand facteur de qualité mène à une largeur de bande étroite et un faible rendement. Le facteur de qualité peut être réduit en augmentant l'épaisseur du substrat diélectrique. [11]

I.5.3 Domaine d'application des antennes imprimées

Les domaines d'applications des antennes imprimées sont de plus en plus variés, les principales applications sont :

- La téléphonie mobile,
- Les radars
- Les télécommunications spatiales
- La télémétrie des missiles et la télésurveillance
- guidage des missiles et télédétection

I.6 Les techniques d'alimentation

L'alimentation des antennes imprimée, repose essentiellement sur deux classes d'excitation ; excitation avec contact et excitation sans contact. Dans les méthodes d'excitation avec contact, la puissance est acheminée aux patchs rayonnants en utilisant un élément de contact tels le câble coaxial et la ligne microbande. Dans la deuxième classe d'excitation, le couplage électromagnétique est utilisé pour transmettre la puissance de la ligne microbande au patch rayonnant. Les trois techniques d'alimentation les plus utilisées sont la ligne microbande, sonde coaxiale, couplage par fente [12], [14].

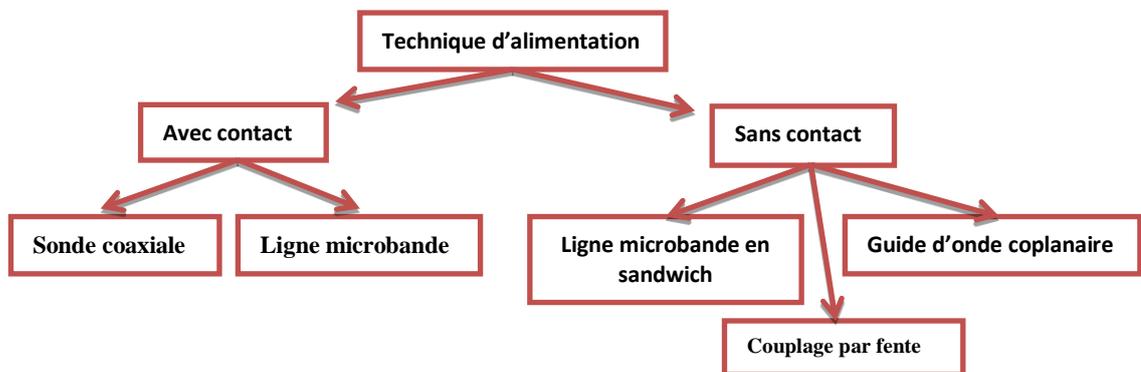


Figure 1.24 : Les techniques d'alimentation

I.6.1 Alimentation avec contact

I.6.1.1 Sonde coaxiale

Le câble de la sonde coaxiale traverse le plan de masse et le substrat. Le conducteur central est connecté sur l'élément rayonnant, et le conducteur extérieur est connecté au plan de masse [13] comme monter dans la figure (1.25), Cette alimentation est très utilisée avec les patches de formes circulaire et annulaire.

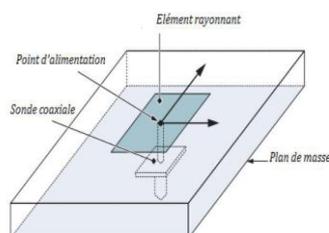


Figure 1.25 : Alimentation du patch par un câble coaxial.

I.6.1.2 Ligne microbande

Faite par une ligne microbande de largeur plus petite par rapport au patch, cette ligne est gravée avec le patch en même temps (figure 1.26). Elle est très utilisée dans les réseaux d'antennes imprimées de différentes formes [13].

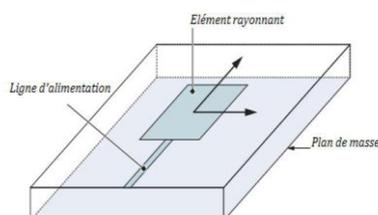


Figure 1.26 : Alimentation du patch par une ligne microbande.

L'alimentation peut se faire par la connexion directe à une ligne microbande (Figure 1.27), dont le point de jonction est situé sur l'axe de symétrie de l'élément ou décalé par rapport à cet axe de symétrie, si cela permet une meilleure adaptation d'impédance. L'alimentation axiale avec encoche donne de bons résultats [15], [16], Elle est très utilisée dans les réseaux d'antennes imprimées de différentes formes.

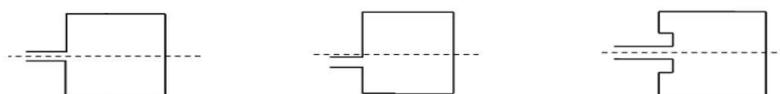


Figure 1.27 : L'alimentation par une ligne microbande axiale(a), décalée (b) et avec Encoche (c)

I.6.2 Alimentation sans contact (par proximité)

I.6.2.1 Ligne microbande en sandwich

Une antenne plaquée peut être aussi alimentée par couplage électromagnétique de la ligne micro-ruban à l'élément rayonnant. Dans ce cas, le résonateur et la ligne d'alimentation sont situés du même côté du plan de masse (Figure 1.28). L'antenne est formée de deux substrats, avec une ligne micro-ruban sur le substrat inférieur qui se termine en circuit ouvert sous le patch imprimé sur le substrat supérieur.

Le couplage électromagnétique a l'avantage de permettre la réalisation du patch rayonnant sur un substrat relativement épais, afin d'améliorer la bande passante, pendant que la ligne d'alimentation est imprimée sur un substrat plus mince, afin de réduire les rayonnements et les couplages parasites [14].

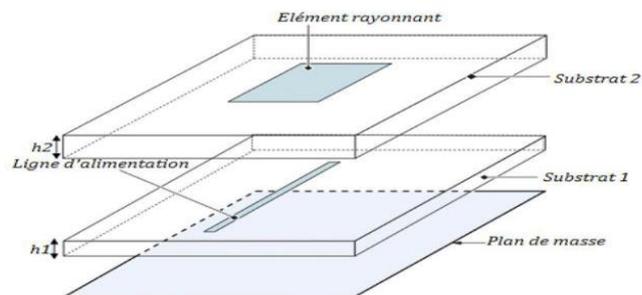


Figure 1.28 : Ligne microbande en sandwich.

I.6.2.2 Guide d'onde coplanaire

L'élément rayonnant se trouve sur la face supérieure du substrat de fente rayonnante. La ligne d'alimentation et le plan de masse se trouvent à la même façade inférieure du substrat (Figure 1.29).

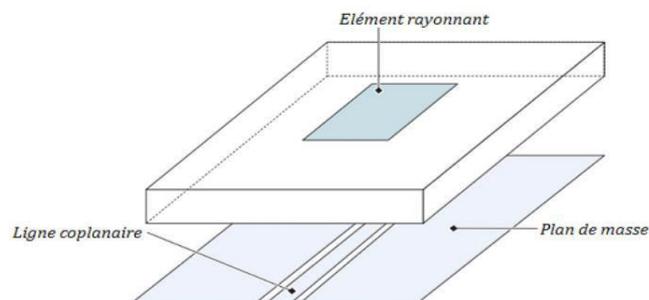


Figure 1.29 : Alimentation du patch par un guide d'onde coplanaire.

I.6.2.3 Couplage par fente

Une ligne est disposée au-dessus du plan de masse, qui est entaillé d'une fente sous le patch afin que l'énergie amenée par la ligne soit communiquée à l'antenne (Figure 1.30) [17].

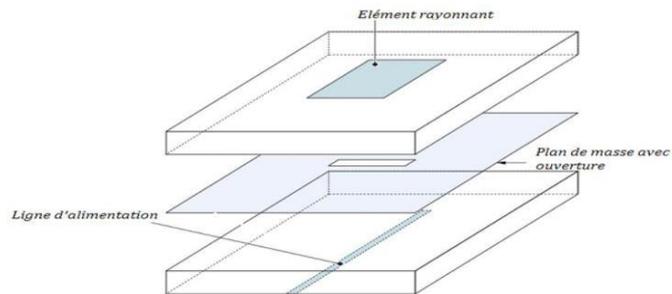


Figure 1.30. Alimentation du patch par le couplage par fente.

Une comparaison entre l'alimentation avec contact (sonde coaxiale et la ligne microbande) et l'alimentation sans contact (par couplage, guide d'onde coplanaire, et le couplage par fente), est résumée dans le tableau 1.11

Méthode		Avantages	Inconvénients
Alimentation avec contact	Sonde coaxiale	<ul style="list-style-type: none"> -Pas de pertes par rayonnement de ligne -Sélection possible d'un mode privilégié -Obtention d'une impédance d'entrée adéquate par positionnement de la sonde -Prédiction aisée de l'impédance d'entrée pour des substrats faible hauteur -Technique de perçage simple jusqu'à 10 GHz 	<ul style="list-style-type: none"> -Rayonnement parasite de la sonde de type monopolaire. -Partie selfique ramenée par l'âme du connecteur à prendre en compte. -Technique de perçage et de soudure plus délicate en millimétrique. -Rapidement cher et compliqué industriellement pour exciter chaque élément d'un réseau à forte directivité.
	Ligne microbande	<ul style="list-style-type: none"> -Procédé technologique le plus simple par gravure sur la même face de l'antenne et du circuit d'alimentation -Adaptation de l'aérien possible par <u>contact pénétrant</u> 	<ul style="list-style-type: none"> -Rayonnement parasite de la discontinuité ligne aérien -Rayonnement parasite possible du circuit de distribution en millimétrique -<u>Structure fixée après gravure</u>
Alimentation Sans contact	Par couplage	<ul style="list-style-type: none"> -Dessin du circuit d'alimentation modifiable par rapport aux aériens -Bande passante plus large par augmentation de la hauteur ($h_1+h_2>h_1$) 	<ul style="list-style-type: none"> -Deux couches de substrat requises -Difficulté pour l'intégration de dispositifs actifs et pour la dissipation de chaleur
	Guide d'onde coplanaire	<ul style="list-style-type: none"> -Procédé technologique simple -Facilités pour intégrer des dispositifs actifs et dissiper la chaleur résultante -Faible rayonnement arrière -Transitions simples pour l'intégration de dispositifs actifs et circuits MMIC 	<ul style="list-style-type: none"> -Génération de modes de propagation parasites sur les guides d'onde coplanaire
	Couplage par fente	<ul style="list-style-type: none"> -Réalisation du circuit de distribution et de l'aérien indépendantes -Séparation électromagnétique des deux couches -Possibilité d'élargir la bande passante en associant la résonance de l'élément rayonnant à celle de la fente 	<ul style="list-style-type: none"> -Technologie plus coûteuse et complexe (positionnement des 2 couches, 4 faces de métallisation) -Intégration sur un support mécanique nécessitant des précautions -Rayonnement arrière parasite de la fente lorsque celle-ci résonne au voisinage de l'élément

Tableau 1.11 comparaison entre les méthodes d'alimentation [18].

I.7 Les pertes dans les antennes

La résistivité finie des couches métalliques entraîne des pertes par effet Joule dans les conducteurs. Or au fur et à mesure que celles-ci augmentent, le champ magnétique généré par l'inductance induit des courants dont la densité est distribuée de façon non-uniforme, et ce à la fois dans le conducteur et le substrat. Ces derniers, qui sont à l'origine de la majeure partie des pertes aux fréquences micro-ondes, sont essentiellement connus liés à l'effet de peau.

I.7.1 Effet de peau

Lorsqu'un courant alternatif circule dans un conducteur, un champ magnétique est créé autour de ce dernier. L'effet le plus important est sans aucun doute la propriété du courant à se concentrer sur les couches superficielles d'un conducteur lorsque la fréquence augmente. Ce phénomène est appelé effet de peau ou "skin effect". La densité du courant $J(z)$ décroît de façon exponentielle dans le conducteur [19]. Cette propriété permet de définir une grandeur caractéristique appelée "l'épaisseur de peau δ ". δ est inversement proportionnel à la fréquence et s'écrit:

L'épaisseur de peau détermine, en première approximation, la largeur de la zone où se concentre le courant dans un conducteur. Elle permet de calculer la résistance effective à une fréquence donnée. Dans ce calcul, on néglige la partie réelle devant la partie imaginaire : la conductivité des métaux étant très élevée.

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}} = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu}} = \frac{1}{\sqrt{\sigma\mu\pi f}}$$

- δ : épaisseur de peau en mètre [m]
- ω : pulsation en radian par seconde [rad/s]
- f : fréquence du courant en hertz [Hz]
- μ : perméabilité magnétique en henry par mètre [H/m]
- ρ : résistivité en ohm-mètre [$\Omega.m$] σ : conductivité électrique en siemens par mètre [S/m]

Pour un conducteur de diamètre significativement plus grand que δ , on peut calculer la résistance effective à une fréquence donnée en considérant que seule la partie extérieure d'épaisseur δ contribue à la conduction.

Le champ magnétique généré par l'antenne étant lui-même variable en fonction du temps, le courant qui circule dans le patch, induit un courant image dans le substrat, on appelle cela l'effet de proximité. Ce courant, appelé courant de Foucault "Eddy current", est orienté de telle façon à ce qu'il s'oppose aux variations initiales du champ magnétique. [19].

1.8 Pertes dans le substrat

Les caractéristiques de rayonnement des antennes imprimées ont largement été étudiées dans la littérature [20]. On distingue trois types d'ondes responsables d'une augmentation du couplage.

- Les ondes guidées (Figure 1.31). Elles traduisent une propagation du champ électromagnétique dans le substrat entre deux plans conducteurs, à savoir entre l'élément rayonnant (patch et ligne microruban) et le plan de masse. Cette propriété est très utile pour la propagation du signal le long d'une ligne microruban.

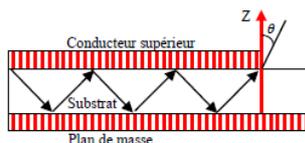


Figure 1.31 : Les ondes guidées.

- Les ondes rayonnées (Figure 1.32). Elles proviennent du rayonnement émis par les différentes parties métalliques composant l'antenne. Celles-ci se propagent dans l'espace libre, le signal se disperse librement dans l'espace et contribue au rayonnement de l'antenne. Pour les antennes imprimées la totalité du couplage dans ce cas est liée aux ondes rayonnées.

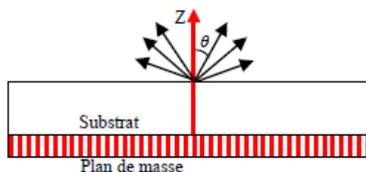


Figure 1.32 : Les ondes rayonnées.

- Les ondes de surface (Figure 1.33). Une étude complète sur les antennes imprimées doit prendre en compte les perturbations liées aux ondes de surface qui ont traversé le substrat avec un angle d'incidence θ variant entre $\pi/2$ et $\arcsin(1/\sqrt{\epsilon_r})$. Ces ondes se propagent dans le diélectrique, c'est à dire entre le plan de masse et l'interface air-diélectrique. Lorsqu'elles atteignent les extrémités de la structure micro ruban

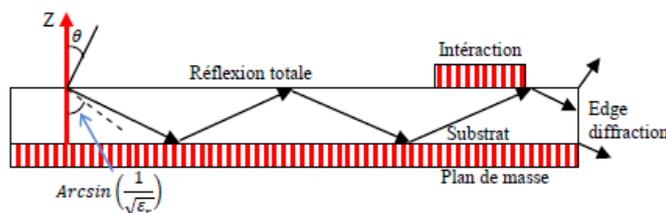


Figure 1.33 : Les ondes de surface.

Le choix des substrats est donc primordial afin de limiter au maximum les différentes pertes et d'optimiser les rendements des antennes conçues. En effet, le rendement des antennes sera d'autant meilleur que la constante diélectrique est faible et l'épaisseur du substrat limitée afin d'éviter les pertes dues aux ondes de surface qui sont inhérentes aux couches diélectriques. L'énergie perdue sous forme d'ondes de surface sera réduire l'efficacité de l'antenne.

I.9 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté la forme générale d'une antenne les sorte et les type d'antenne, on a présenté les paramètres essentiels de l'antenne tels que le gain, la directivité, le coefficient de réflexion l'impédance.

Nous avons présenté les types d'alimentation des antennes patch ainsi que leur avantage et inconvénient set en dernier lieu nous avons donné un aperçu sur les pertes que subit une antenne.

Dans les chapitres qui suivent nous allons nous intéresser aux deux technologies récentes les antennes ultra large bande ainsi que les antennes reconfigurables.

II. CHAPITRE II

Antennes Ultra Large Bande

II.1 Introduction

La technologie ultra large bande (ULB) est une technologie sans fil qui peut être exploitée à très faible densité de puissance pour la communication à des débits de données élevés sur de courtes distances. Elle consiste à utiliser des signaux dont le spectre s'étale sur une large bande de fréquences. On parle souvent d'une bande allant de 500 MHz jusqu'à plusieurs GHz.

Ce chapitre est consacré à la présentation la technologie Ultra Large Bande(ULB),ainsi que sur ses principales Caractéristique sur le domaine de la communication sans fil ainsi que les avantage quelle offre en matière de sécurité et lieu d'utilisation.

Ensuite nous présenterons les monopoles planaire qui sont potentiellement des antennes possédant un caractère large bande les diffèrent type de monopole ULB. Finalement, nous terminerons ce chapitre par une briefe présentation des antennes reconfigurable et les différent type de reconfigurabilité ainsi que c'est avantage.

II.2 La technologie Ultra Large Bande

La technologie à ultra large bande (ULB) est une technologie sans fil qui peut être exploitée à très faible densité de puissance pour la communication à des débits de données élevés sur de courtes distances. Elle est mise au point à l'origine pour des applications militaires et on a commencé à l'utiliser dans des applications civiles. Puis suscitant un intérêt grandissant au sein de la communauté scientifique et industrielle, elle fut transportée aux applications de télécommunications.

La technologie ULB a l'avantage de permettre la transmission de très grands volumes de données avec une faible densité spectrale de puissance. Les transmissions ULB se font sur des fréquences déjà allouées à d'autres applications. Pour éviter des interférences entre communications sans fil, il est nécessaire que la puissance des signaux ULB soit plus faible que celles des signaux utilisés dans des services déjà existants. La faible densité de puissance des transmissions ULB permet donc leur coexistence avec celles des services déjà existants. Cette faible puissance rend les signaux ULB plus difficiles à intercepter et les communications plus sécurisées. Son utilisation est très développée dans les domaines du radar, de la géolocalisation ou bien de l'observation du spectre (radio télescope), mais aussi pour les réseaux sans fil personnels (Wireless Personal Area Network WPAN).

L'engouement suscité par cette technologie a été possible grâce à deux évènements. Jusqu'en 1994, la technologie était essentiellement cantonnée aux applications de défense.

Avec la levée de la confidentialité sur ces travaux, les industriels et la recherche ont pu effectuer des recherches importantes sur le sujet. En 2002 l'organisme de régulation des systèmes de communications des États-Unis, la Fédéral Communications Commission (FCC), autorise l'utilisation sans licence aux USA de la bande de fréquence de 3.1 à 10.6GHz, ce qui a donné un souffle supplémentaire aux activités de recherche et de développement. Cette allocation offre de la flexibilité car la réglementation n'impose pas de technique particulière de transmission à la différence des standards existants actuellement [21].

II.3 Les applications des antennes ultra large bande

Comme nous avons pu l'évoquer précédemment, les applications des antennes ultra large bande (ULB ou Ultra Wide Band/ UWB en anglais) sont nombreuses. Cette technologie commence à pénétrer tous les domaines. On peut définir principalement trois grands domaines (Figure 2.1): la détection, la géolocalisation, et les communications sans fil (Wireless). Une application peut être qualifiée de très large bande lorsque le rapport $\Delta f/f_c$ est élevé. Il s'agit du rapport entre la largeur de bande fréquentielle Δf utile et la fréquence centrale f_c . Dans un cadre ULB, ce rapport doit être égal ou supérieur à 0,2 conformément à ce qui est communément admis [22]. En février 2002, la FCC a défini quatre types d'applications pour l'ULB :

- Bande de fréquences 24 GHz et 77 GHz : applications liées aux véhicules.
- Bande de fréquence <1 GHz : radar "See Through Wall".
- Bande 1.99-10.6 GHz : Applications médicales (imagerie).
- Bande 3.1-10.6 GHz : Système de communications sans fil et applications liées à la localisation. [21].

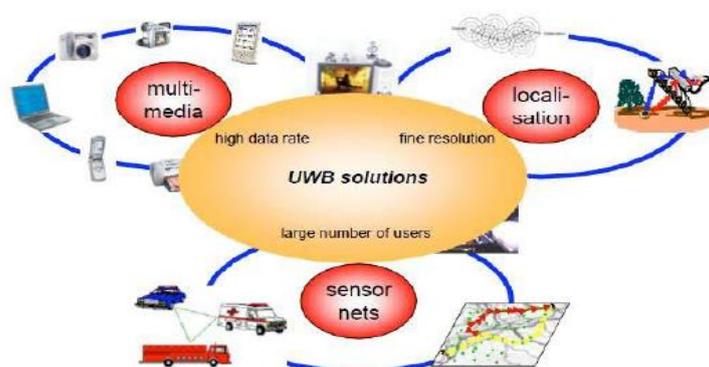


Figure 2.1 : Les domaines dans lesquels l'UWB apporte des solutions intéressantes [23].

II.4 Caractéristique principale des systèmes ULB

Par rapport aux autres systèmes de transmission classique, les systèmes 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 (en pleine rue par exemple).

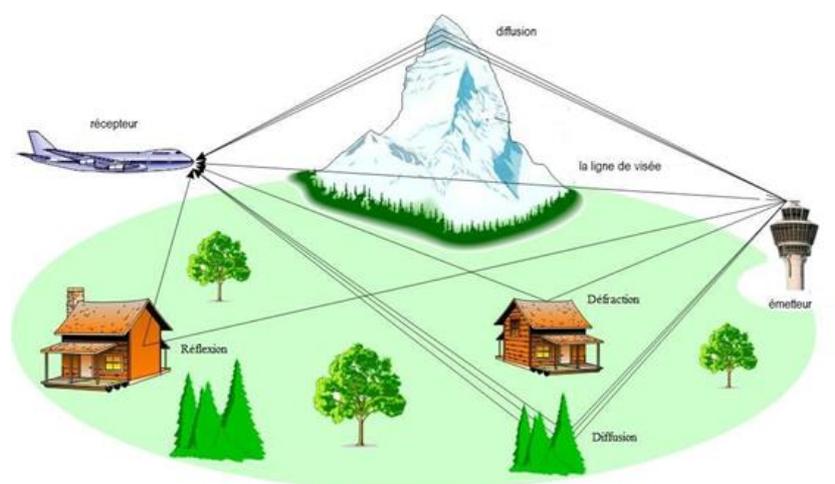


Figure 2.11 : Propagation par trajets multiples.

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. 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.5 Capacité de la technologie ULB

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

$$C = B \log_2 (1 + SNR) \quad (2.1)$$

Où B désigne la bande passante du système et (SNR) le rapport signal sur bruit.

De cette formule, on déduit que la capacité d'un système croît linéairement avec la bande passante mais croît 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. Comme conséquence à cette faible densité spectrale de puissance, les signaux ULB sont plus difficiles à détecter et les communications ULB sont par conséquent mieux sécurisées. D'autre part, cette propriété limite la portée des communications ULB à quelques dizaines de mètres. Les applications visées par l'ULB sont donc des applications à courte portée et à haut débit, comme les réseaux WIFI par exemple.

II.6 Les monopoles planaires

Il existe beaucoup de travaux sur les monopoles planaires sur plan de masse infinis (ou pouvant être considérés comme tels). Les structures triangulaires et circulaires, et dans une moindre mesure carrées, sont potentiellement des antennes possédant un caractère large bande et leur optimisation amène à des formes de monopoles très variées [24].

D'une manière générale, le rayonnement de ces antennes est quasi omnidirectionnel dans le plan azimutal.

II.6.1 Les monopoles planaires à plan de masse réduit

Dès lors que l'on réduit la taille du plan de masse, le principe des images n'est plus adapté à la compréhension de ces antennes. Le plan de masse devient une partie intégrante de l'antenne et peut si l'on y prend pas garde, lui aussi rayonner.

Il y a des différentes stratégies utilisées pour réduire la taille de ce plan de masse. Il existe principalement deux modes d'alimentation pour ces antennes

Le couplage entre l'élément rayonnant et la ligne d'alimentation limite les courants de retour en direction du connecteur et facilite l'intégration de l'antenne.

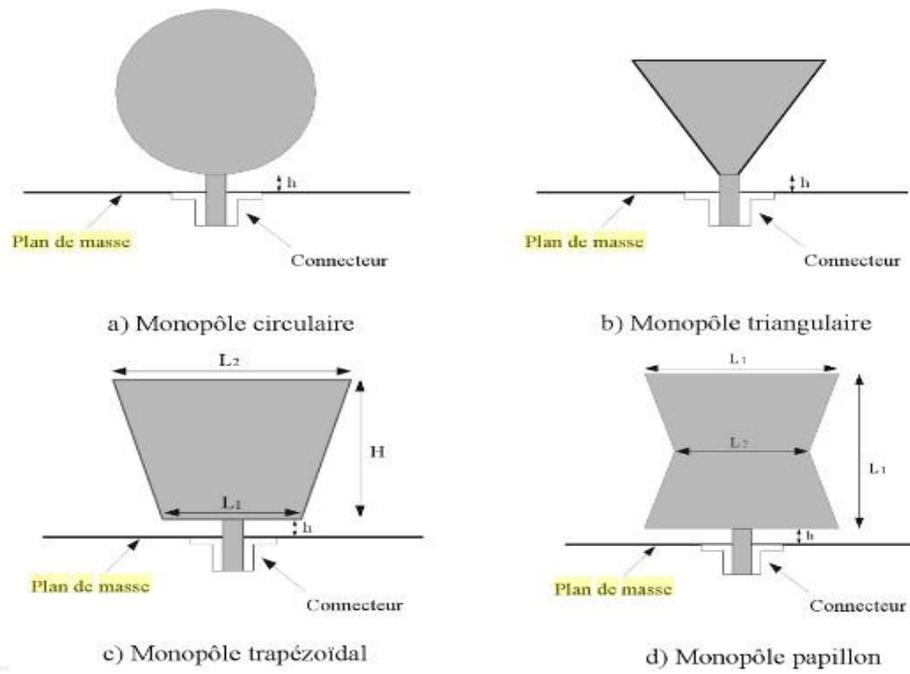


Figure 2.12 : Monopole sur plan de masse

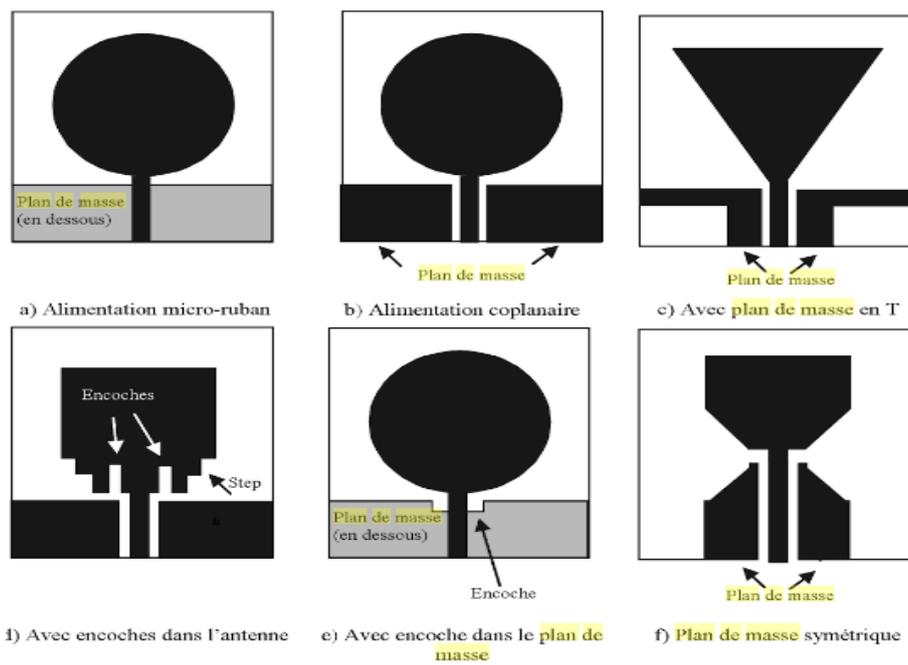


Figure 2.13 : Stratégies d'optimisation de la taille du plan de masse [25]

II.6.2 Exemples d'antennes monopoles imprimées

Nous allons dans ce paragraphe, présenter les différents types d'antennes monopole ULB qui sont communément utilisées. Ces antennes ont été classées selon leurs particularités géométriques ou la spécificité du mode d'alimentation. Toutes ces antennes possèdent une bande passante assez élevée.

La première catégorie est celle des antennes elliptiques ULB coplanaires (**Figure 2.14.**) dans le sens où le plan de masse et la ligne microruban sont imprimés sur la même face du substrat.



Figure 2.14 : Antenne monopôle elliptique. [26]

Les caractéristiques large bande de cette antenne résultent des différents modes de propagation établis entre la ligne coplanaire et l'ellipse.

La seconde catégorie est celle des antennes circulaires imprimées sur un substrat et alimentées par une ligne microruban dont le plan de masse se situe sur l'autre face du substrat. (**Figure 2.15**)

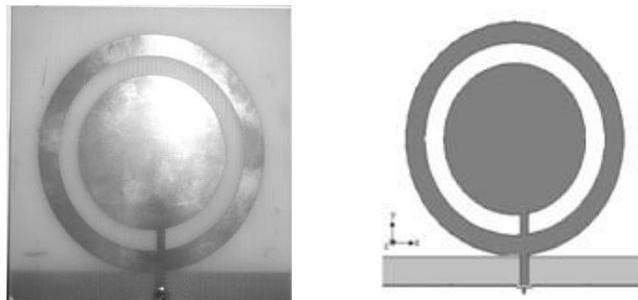


Figure 2.15 : Antenne monopôle circulaire. [27]

Le caractère large bande de cette antenne provient de la variation de la distribution des courants à la surface du disque en fonction de la fréquence.

La dernière catégorie d'antenne ULB est composée d'une ligne microruban en forme de fourche située entre deux substrats de même nature (**Figure 2.16**). Un plan de masse sur lequel une fente est réalisée est imprimé de chaque côté de l'antenne.

Les propriétés large bande de l'antenne sont essentiellement dues à l'utilisation conjointe de cette large fente et de la ligne en forme de fourche.

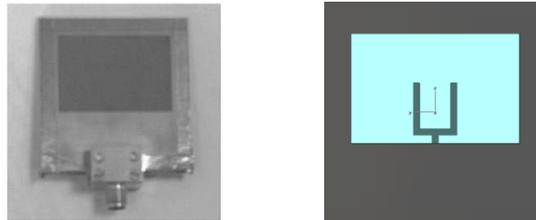


Figure 2.16 : Antenne monopôle large fente. [28]

Même si une grande variété d'antennes monopôles ULB existe dans la littérature ces exemples représentent les dispositifs les plus largement répandus.

II.7 Les antennes reconfigurables

II.7.1 Qu'est-ce qu'une antenne reconfigurable ?

Le terme antenne reconfigurable a été introduit pour la première fois en 1998. Une antenne reconfigurable étend les capacités d'une antenne classique en offrant la capacité de changer sa configuration, c'est-à-dire de changer une à plusieurs de ses caractéristiques fondamentales par un moyen électrique, mécanique ou autre, et cela en fonction des besoins et du contexte environnemental. La reconfiguration de l'antenne est réalisée en modifiant la distribution du courant électrique, en conséquence les propriétés du champ électromagnétique et de l'impédance, donc les propriétés d'émission et de réception [29], et ceci de façon discrète ou continue.

Il existe une très large variété d'antennes reconfigurables et donc plusieurs façons de les classer. Cette catégorisation peut être faite selon la propriété physique qui les rend reconfigurables (modifications des lignes de champ, modification de propriétés diélectriques ou diamagnétiques d'éléments de l'antenne, déformation géométrique, etc.), du type de composants reconfigurables employés ou encore de leur structure géométrique. Une autre façon de les classer est de les distinguer selon les fonctions de la reconfigurabilité qu'elles offrent, la technologie apparaissant ainsi comme le résultat d'un besoin : reconfiguration en fréquence ; reconfiguration du rayonnement ; reconfiguration de la polarisation ; et toute combinaison des trois configurations précédentes. [29]

II.7.2 Intérêt et applications des antennes reconfigurables

L'intérêt principal des antennes reconfigurables réside dans leurs capacités à apporter des fonctionnalités et des degrés de liberté supplémentaires aux systèmes de communication et de télédétection, de manière à améliorer leurs performances.

Par exemple dans le cas d'une liaison entre un dispositif portable et une station de base, l'antenne du dispositif portable est fortement contrainte dans sa conception par l'énergie et la place disponible, ainsi que par les restrictions de cout, et il n'est pas courant que plusieurs antennes puissent être utilisées pour accroître la diversité. Typiquement, le dispositif se trouve dans des conditions imprévisibles ou difficiles et la liaison n'est pas optimale. Dans ce contexte, des antennes reconfigurables peuvent être particulièrement utiles, une antenne accordable va permettre de changer de bande d'opération, de filtrer les interférences ou encore d'accorder la fréquence de résonance de l'antenne pour tenir compte d'un nouvel environnement.

Les antennes reconfigurables trouvent aussi leur intérêt dans des systèmes complexes et exigeants en reconfiguration comme la radio logicielle (ou SDR : Software Defined Radio) qui permet de mélanger adaptations matérielles et logicielles avec une grande flexibilité. Plus avancée encore, la radio cognitive permet de rajouter de l'intelligence artificielle et de la conscience de son environnement aux SDR. La radio cognitive peut éventuellement dialoguer avec une autre radio cognitive, optimiser les liaisons en limitant des interférences avec des utilisateurs proches, ou prendre en compte l'encombrement spectral à un instant donné, en scannant une large bande. [30].

II.7.3 Antennes reconfigurables en fréquence

La reconfiguration en fréquence peut être obtenue par commutation ou de façon continue. La commutation consiste à permettre à l'antenne de commuter entre plusieurs bandes. Les antennes à commutation sont celles qui permettent d'avoir les excursions en fréquence les plus élevées, car il est possible de commuter des sections d'antennes de longueur différentes et de changer la fréquence de résonance de manière inversement proportionnelle à la modification de la longueur électrique effective. Les antennes accordables en fréquence offrent la possibilité de faire varier de façon continue une ou plusieurs fréquences de résonance. Si la commande n'est pas continue mais à états discrets, elles permettent alors des commutations en fréquence également.

II.7.4 Antennes reconfigurables en diagramme de rayonnement

Par définition, les antennes reconfigurables en diagramme de rayonnement modifient la forme, la direction et le gain des diagrammes de rayonnement afin de privilégier ou non certaines directions. Les réseaux d'antennes sont généralement utilisés pour obtenir cette fonctionnalité, mais ils ne seront pas abordés ici. Seules les structures possédant un unique élément rayonnant seront présentées [31].

II.7.5 Antennes reconfigurables en polarisation

La reconfiguration en polarisation de l'antenne correspond à la modification de sa polarisation, linéaire ou circulaire. Pour ces antennes, l'objectif est de modifier l'orientation vectorielle du champ émis et cela sans altérer ni les fréquences résonantes, ni la forme du diagramme de rayonnement. D'une façon générale, il faut réussir à modifier le sens et ou la phase de circulation des courants sur l'élément rayonnant sans en modifier l'allure ou les cheminements.[31].

II.8 Conclusion

Dans ce chapitre nous nous sommes d'abord attachés à rappeler les notions fondamentales qui régissent le fonctionnement des antennes monopole ultra large bande puis nous nous sommes centrés sur les antennes reconfigurable et l'intérêt qu'elle suscite

Dans le chapitre suivant, nous allons entamer la simulation d'une antenne monopole ultra large bande.

III. CHAPITRE III

Conception et simulation d'antenne Ultra Large Bandes

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 nous permet de rapprocher des futures antennes réalisées. Pour cela, nous avons choisi l'outil de simulation électromagnétique HFSS.

Dans ce chapitre, on se propose de mettre en lumière les principaux paramétriques de dimensionnement de l'antenne choisie suivant les caractéristiques désirées. Nous allons faire une étude paramétrique on faisant varier les dimensions de l'antenne afin de trouver les meilleurs résultats possible et optimiser la structure de base de l'antenne proposée.

III.2 Logiciels de Simulation Electromagnétique

Actuellement, les concepteurs des antennes utilisent souvent des logiciels de simulation électromagnétique. Ces logiciels permettent soit une conception multicouche en 2D (c'est le cas, par exemple, de Momentum développé par Keysight Technology) soit une conception 3D comme (comme HFSS d'Ansys, FEKO d'Altair et CST Microwave studio). La différence entre ces logiciels, hormis l'Interface Homme Machine (IHM), réside dans les méthodes numériques qu'ils utilisent pour calculer la réponse électromagnétique des structures modélisées.



Figure 3.1: Logo des principaux logiciels de simulations

III.3 Présentation du logiciel de simulation HFSS

Le logiciel HFSS (High Frequency Structure Simulation) d'Ansoft Corporation est un simulateur électromagnétique de haute performance pour les modèles en 3D. Il intègre des simulations, des visualisations et une interface pour résoudre rapidement et de façon efficace les problèmes électromagnétiques en 3D. Son code de calcul est basé sur la méthode des éléments finis. En général, cette méthode divise l'espace de résolution du problème en plusieurs milliers de régions plus petites et représente le champ dans chaque sous-région (élément) avec une fonction locale.

Il permet d'obtenir des graphiques performants pour donner à l'utilisateur des résultats et une perspicacité aux problèmes électromagnétiques en 3D [32].

Le HFSS peut être utilisé pour calculer des paramètres tels que les paramètres S, les fréquences de résonance et les champs.

C'est un outil permettant le calcul du comportement électromagnétique d'une structure. Le simulateur possède des outils de post traitement pour une analyse plus détaillée. Il permet le calcul des :

- Quantités de base dans le champ proche et le champ lointain,
- impédances caractéristiques des ports et leurs constantes de propagation,
- les paramètres S normalisés par rapport à une impédance de port spécifique afin de générer une solution du champ électromagnétique.

III.4 Géométrie de base

Une nouvelle structure d'antenne était proposée dans l'article [33], Les dimensions totales de l'antenne sont de $44.8 \times 42 \times 0.76 \text{ mm}^3$. La structure étudiée est constituée d'un patch en forme circulaire, ce patch est conçu par soustraction de deux cercle de rayons R1 et R2 et la création d'un troisième cercle R3 , comme illustrée dans la Figure 3.11 L'élément rayonnant est alimenté par une ligne microruban d'une impédance caractéristique 50Ω , l'antenne est conçue sur un substrat Isola Astra MT3.0 avec une permittivité relative de 3 et une tangente des pertes de 0.0027 et d'épaisseur $h = 0.76\text{mm}$.

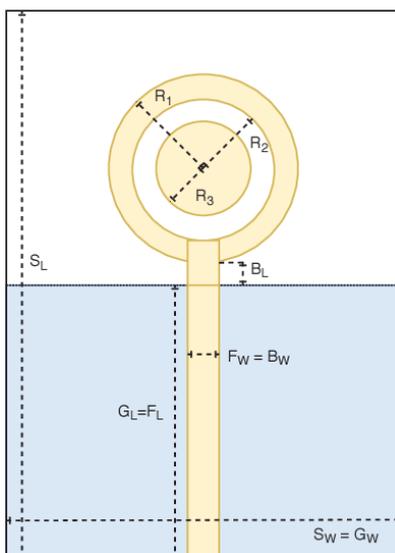


Figure 3.11 : La configuration de l'antenne patch (antenne de base). [33]

Les paramètres géométriques de cette antenne sont représentés dans le tableau 3.1 avec une dimension totale de $44.8 \times 42 \times 0.76 \text{ mm}^3$. Les valeurs de ces paramètres sont mentionnées dans le tableau ci-dessous.

Paramètres	Dimensions (mm)	Paramètres	Dimensions (mm)
S_L	44.8	B_L	0.7
S_w	42	R1	11.4
F_L	19.7	R2	9.4
F_w	1.91	R3	8.2

Tableau 3.1 : Dimension d'antenne proposée dans l'article [33]

III.5 Résultats de simulations

Nous allons représenter pour cette antenne le coefficient de réflexion, qui va nous permettre de visualiser la bande passante désirée. La Figure 3.12 représente le coefficient de réflexion S_{11} obtenu dans l'article [33]. On peut constater que cette antenne peut couvrir les deux bandes suivantes [1.9-3.1 GHz], et [4.8-7.1 GHz]. La largeur de bande $W_b = F(m_1) - F(m_2) = (3.15 - 1.88)$ GHz donc $W_b = 1.27$ GHz

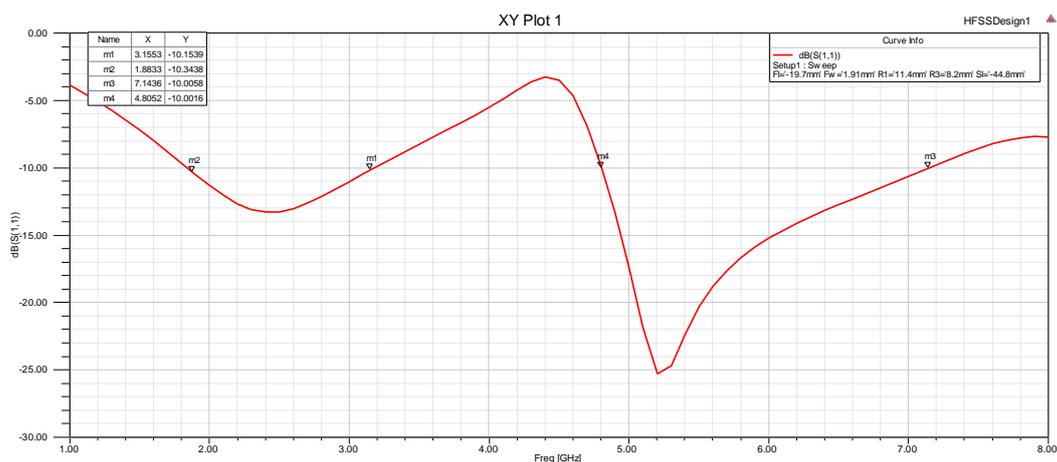


Figure 3.12 : Le coefficient de réflexion S_{11} de l'antenne de base

III.6 Etude paramétrique

Quelques paramètres définissant la géométrie de l'antenne [33] seront variés, afin d'améliorer et d'optimiser les performances de la structure, notamment la bande passante de cette antenne. Les paramètres sont :

- Les dimensions du substrat
- La largeur du plan de masse
- La largeur de la ligne d'alimentation
- Les Rayon R1/R3

III.6.1 Effet des dimensions du substrat

Dans cette partie de la conception, nous essayons de varier les dimensions du substrat dans l'outil HFSS avec une variable noté « $S_{Li} * S_{Wi}$ ». Les valeurs de simulation des dimensions du substrat sont données dans le tableau ci –dessous.

Paramètre $S_L * S_W$	$S_{L1} * S_{W1}$	$S_{L2} * S_{W2}$	$S_{L3} * S_{W3}$	$S_{L4} * S_{W4}$	$S_{L5} * S_{W5}$	$S_{L6} * S_{W6}$
Dimension du Substrat (mm ²)	43.6*42	43.9*42	44.2*42	44.5*42	44.8*42	45.1*42

Tableau 3.11 : Dimension du substrat.

La figure 3.13 montre les variations du coefficient de réflexion S11 en fonction de la fréquence pour différentes dimensions du substrat simulé sous HFSS.

D'après la figure si dessous on peut observer que les meilleures dimensions du substrat sont ($S_{L3} * S_{W3}$ et $S_{L5} * S_{W5}$), presque la même bande passante la dimension ($S_{L3} * S_{W3}$) est légèrement meilleure.

Donc de préférence est de prendre les plus petites dimensions du substrat ($S_{L3} * S_{W3} = 44.2 * 42$).

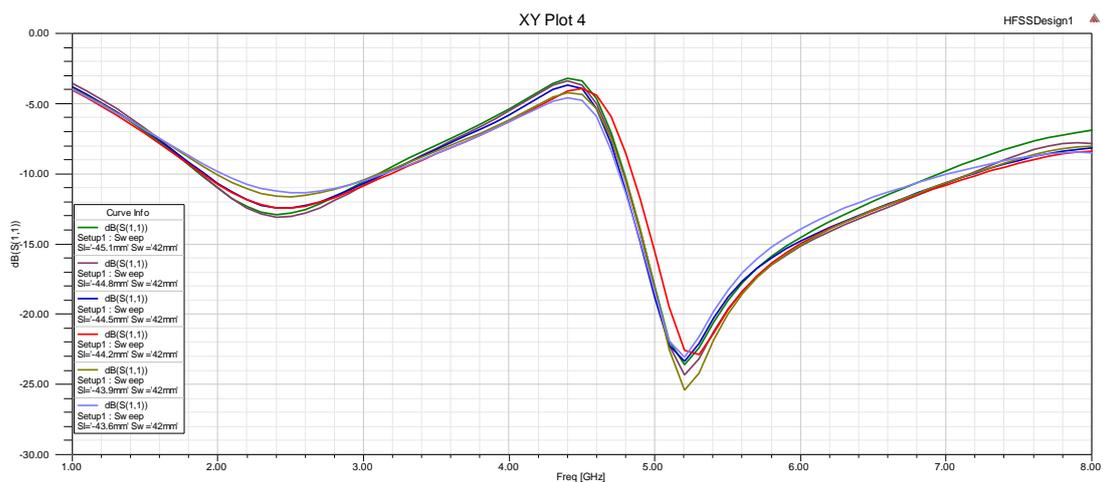


Figure 3.13 : Le coefficient de réflexion S_{11} , pour différents dimensions du substrat simulée sous HFSS.

III.6.2 Effet de la largeur du plan de masse

Une grande variation dans la largeur du plan de masse est faite pour voir l'influence de ce paramètre sur l'antenne. Le tableau 3.12 ci-dessous présente les différentes valeurs de la largeur du plan de masse « F_L ».

Paramètre « F_L »	F_{L1}	F_{L2}	F_{L3}	F_{L4}	F_{L5}	F_{L6}
largeur du plan de masse (mm)	19.5	19.6	19.7	19.8	19.9	20

Tableau 3.12 : Les différentes valeurs de la largeur du plan de masse.

La figure 3.14 montre les variations du coefficient de réflexion S_{11} en fonction de la fréquence pour différentes valeur de la largeur du plan de masse simulées sous HFSS. on peut observer que la meilleure largeur du plan de masse est celle de (F_{L1} et F_{L3}) la largeur de bande est presque la même et F_{L1} est légèrement meilleur, donc on prend la plus petite largeur du plan de masse qui est 19.5mm.

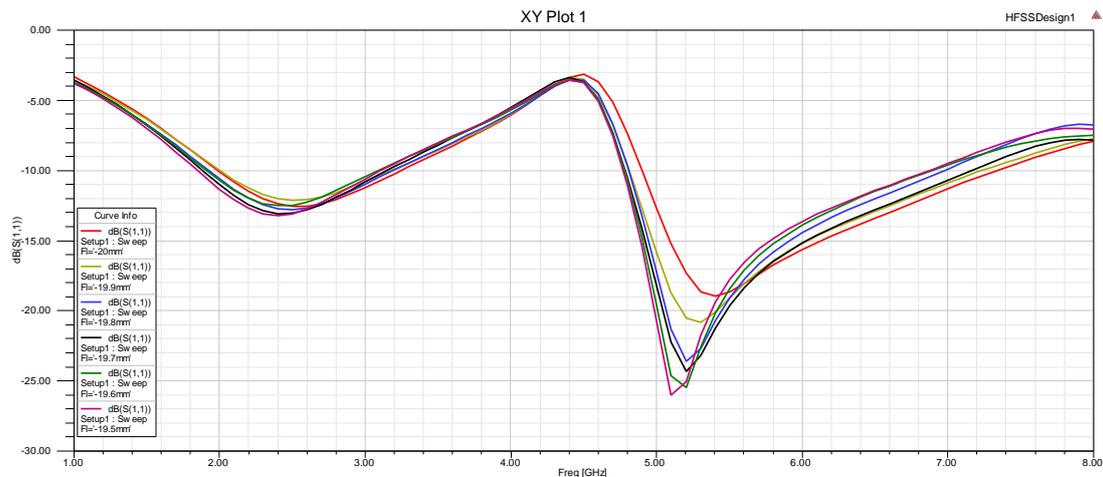


Figure 3.14 : Le coefficient de réflexion S_{11} , pour différents valeurs de largeur du plan de masse

III.6.3 Effet de la largeur de la ligne d'alimentation

Maintenant nous allons varier la largeur de la ligne d'alimentation Pour étudier l'effet de cette ligne, nous varions la valeur de F_w , afin de trouver la meilleure largeur, cette variation est paramétrée dans le tableau ci-dessous.

Paramètre « F_w »	F_{w1}	F_{w2}	F_{w3}	F_{w4}	F_{w5}	F_{w6}
largeur de la ligne d'alimentation (mm)	1.908	1.909	1.91	1.911	1.912	1.913

Tableau 3.13 : Les valeurs de la largeur de la ligne d'alimentation

La figure 3.15 montre les variations du coefficient de réflexion S_{11} en fonction de la fréquence pour différentes valeurs de la largeur de la ligne d'alimentation secondaire simulée sous HFSS. On peut observer que la meilleure largeur de la ligne d'alimentation est 1.913 mm, pour cette valeur la bande passante sera plus large (1.83-3.14GHz).

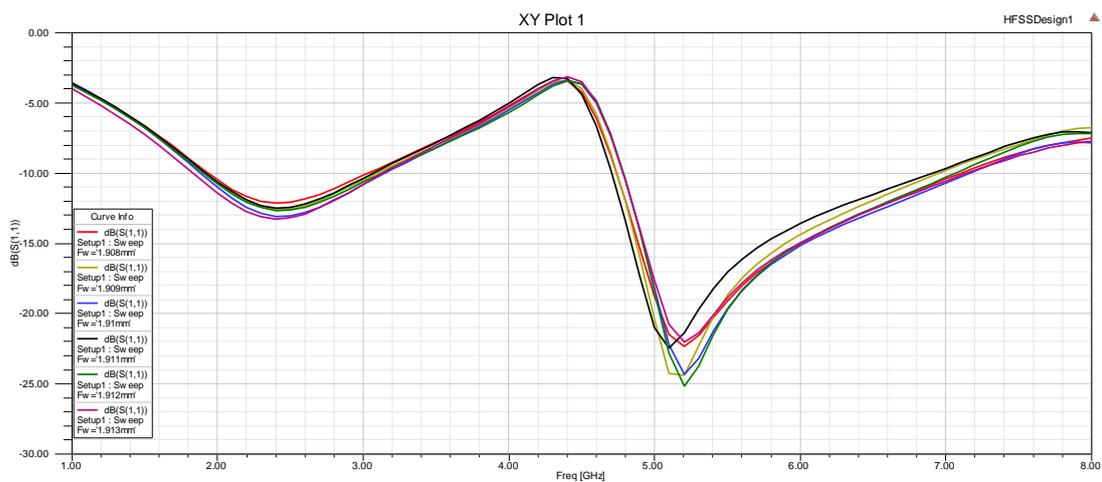


Figure 3.15 : Le coefficient de réflexion S_{11} , pour différent largeur de la ligne d'alimentation secondaire simulée sous HFSS.

III.6.4 Effet des Rayon R1/R3

Jusqu'à maintenant on a réussi à mettre en œuvre trois paramètres qui augmentent les performances de notre antenne qui sont :

- les dimensions du substrat,
- la largeur du plan de masse
- et la largeur de la ligne d'alimentation.

Maintenant on va passer à la deuxième étape qui consiste à varier R1 et R3 afin d'étudier leur effet sur l'antenne choisie, le tableau 3.14 montre les paramètres variés.

Rayon R1 (mm)	11.4	11.5	11.6	11.7	11.8
Rayon R3 (mm)	8.2	8.3	8.4	8.5	8.6

Tableau 3.14 : Les valeurs des Rayon R1 et R3

R1(mm)	11.4	11.5	11.6	11.7	11.8
R3(mm)					
8.2	1.19	1.2	0.99	1.07	1.29
8.3	1.14	1.24	1.27	1.15	1.21
8.4	1.15	0.99	1.12	1.14	1.18
8.5	1.1	1.25	1.2	1.14	0.95
8.6	1.14	1.15	1.34	1.2	1.36

Tableau 3.15 : Les valeurs de la largeur de bande passante (en GHz) de l'antenne par rapport aux Rayon R1 et R3

Le tableau 3.15, nous montre les différents résultats obtenus en simulant différentes dimensions de R1 et R3, on peut constater que on a 3 résultats qui sont meilleurs que les résultats de l'antenne de base (bande passante de l'antenne de base $W_b=1.27\text{GHz}$) qui sont le (11.8/8.2), (11.6/8.6) et (11.8/8.6)(mm) cette dernière est la combinaison la plus optimale et qui donne une largeur de bande passante $W_o = 1.36\text{ GHz}$.

D'après la figure 3.16, on peut observer que la meilleure largeur de bande passante est de 1.36 GHz (1.93-3.29GHz) qui correspond au rayon (R1/R3) (mm) de (11.8/8.6).

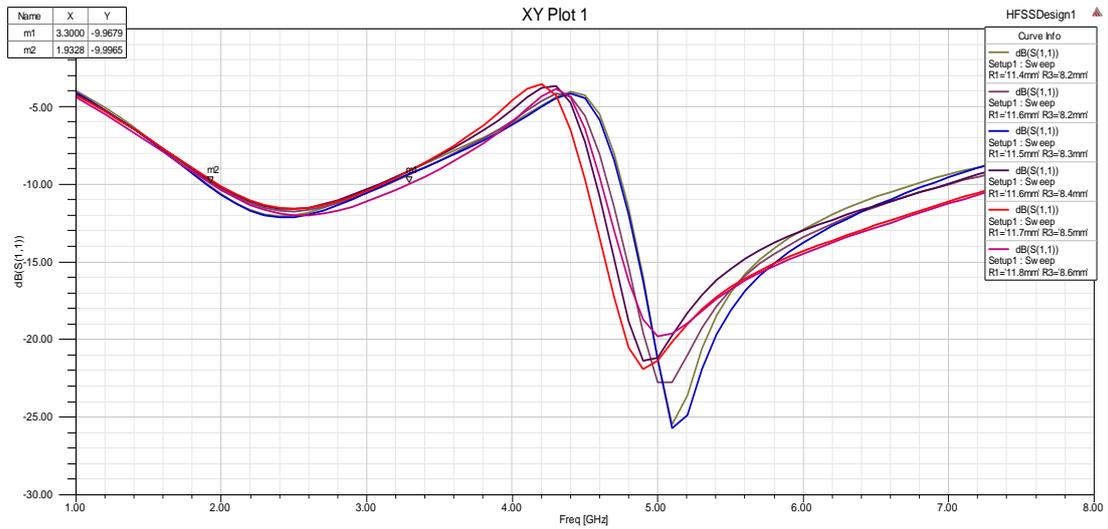


Figure 3.16 Le coefficient de réflexion S11, pour différent dimension des rayons R1 et R3

III.7 L'antenne patch optimisée

A partir des études et simulations paramétriques menées précédemment, nous avons réussie à déduire les paramètres finaux qui donnent la bande passante la plus large, qui sont paramétré dans le tableau ci-dessous.

Paramètre	$S_L * S_W$ (mm ²)	F_L (mm)	Fw (mm)	R1 (mm)	R3 (mm)
Antenne de base	44.8*42	19.7	1.91	11.4	8.2
Antenne optimisé	44.2*42	19.5	1.913	11.8	8.6

Tableau 3.16 : Dimension d'antenne de base et l'antenne optimisée

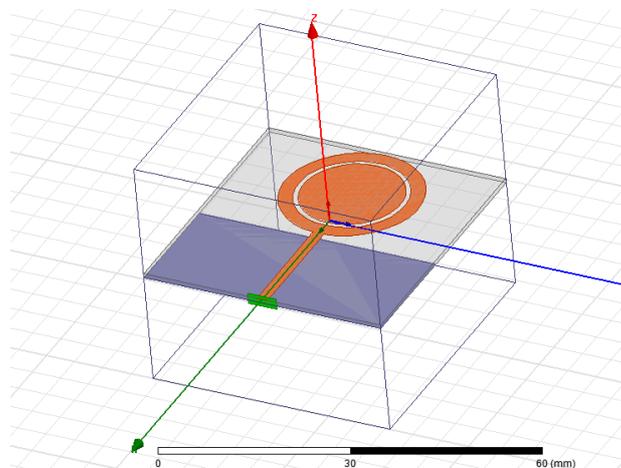


Figure 3.2 : Structure de l'antenne optimisée.

L'antenne finale conçue à partir de notre étude paramétrique et représentée dans la figure 3.7, elle possède un plan de masse fini de largeur $F_L=19.5$ mm, les dimensions de substrat $S_L*S_W=44.2*42\text{mm}^2$, la longueur de la ligne d'alimentation $B_L+F_L= 20.4$ mm et sa largeur $F_w=1.913$ mm, le rayon des cercles (R_1 et R_3) du patch sont respectivement 11.8 mm et 8.6 mm.

III.7.1 Le coefficient de réflexion

Le résultat obtenu pour le coefficient de réflexion de la structure d'antenne optimisée dans la bande [2-8 GHz] est représenté dans la Figure 3.17. Cette antenne présente deux pics en fréquence $f_{r1} = 2.55$ GHz, $f_{r2} = 5$ GHz. Pour des coefficients de réflexion respectivement en dB $|S_{11}| = -12$ dB, -19.77 dB avec deux bande passante la première allant de [1.93 à 3.29 GHz] et la deuxième allant de [4.61 à 7.49 GHz]. Donc en faisant une comparaison avec le résultat du papier [33], on peut constater qu'on a réussi à augmenter la bande passante de l'antenne de 1.27 GHz (antenne de base) à 1.36 GHz (antenne optimisée).

On a pu réduire :

- la taille du substrat de $44.8*42$ mm² à $44.2*42\text{mm}^2$
- la taille de la largeur du plan de masse de 19.7 mm à 19.5 mm

Par contre la taille de certain paramètre a été augmentée, telle que :

- la largeur de la ligne d'alimentation a été augmentée de 1.9 mm à 1.913 mm
- les deux rayons de notre antenne R_1 et R_3 qui était 11.4 mm et 11.8mm 8.2 mm et 8.6 mm

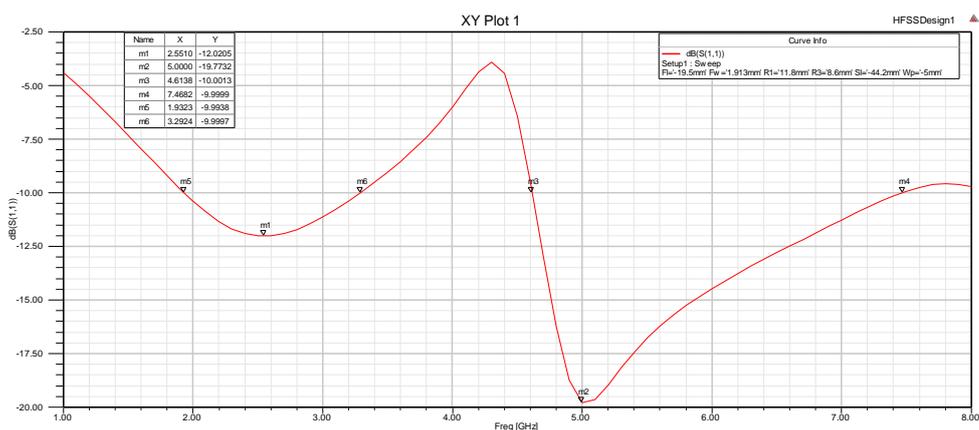


Figure 3.17 : Coefficient de réflexion S_{11} de la structure simulée.

III.7.2 Impédance d'entrée

La géométrie de l'antenne et son mode d'alimentation influent sur l'impédance d'entrée de l'antenne. On cherche généralement à se placer au plus près d'une résonance et à annuler la partie imaginaire. L'impédance d'entrée de l'antenne est une valeur complexe dans la figure 3.18 suivant montre une impédance de partie réelle $\approx 50 \Omega$ et de partie imaginaire ≈ 0 .

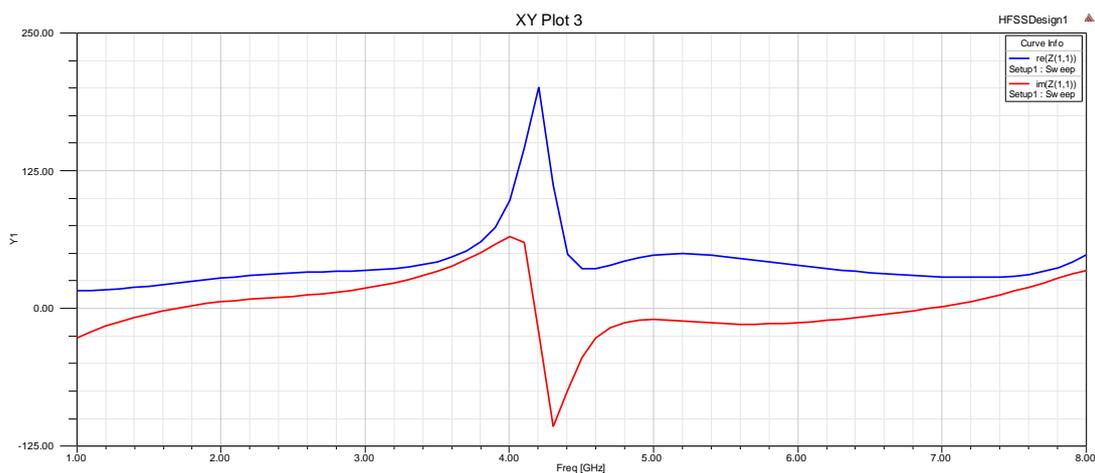


Figure 3.18 : Impédance d'entrée de l'antenne proposée.

Cette figure montre une adaptation de l'antenne obtenue dans la bande [1GHz-8GHz], on constate qu'il y a une bonne adaptation pour la fréquence (2 GHz) ou la partie l'imaginaire de l'impédance est proche de 0, même pour le pic de fréquence (5.2GHz), où son impédance d'entrée vaut $Z=50\Omega$.

La partie imaginaire est proche de 0 et la partie réelle est proche de 50Ω dans les deux bandes passantes suivantes [1.8GHz-3.4GHz] et [4.6GHz-7.4GHz]. On dit qu'il y a une adaptation d'impédance entre la ligne d'alimentation et l'élément rayonnant.

III.7.3 Taux d'onde stationnaire (VSWR : Voltage Standing Wave Ratio)

Le taux d'onde stationnaire, nous donne l'appréciation de l'adaptation. C'est un indicateur du bon fonctionnement du système d'alimentation d'une antenne. Il n'exprime pas les qualités de l'antenne proprement dite mais le fait que celle-ci peut être raccordée à un émetteur sans risque pour ce dernier.

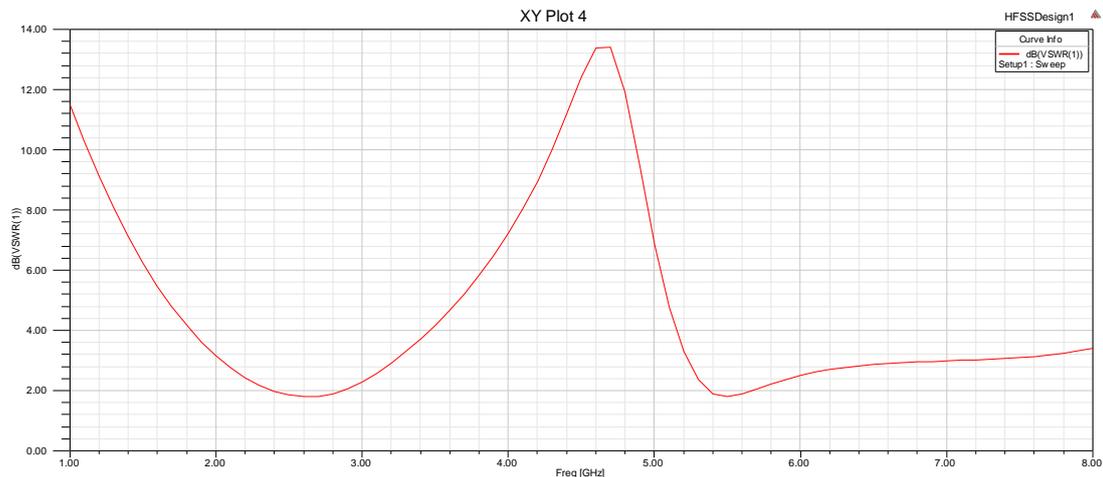


Figure 3.19 : Le taux d'onde stationnaire.

La figure 3.19, représente le VSWR dans la gamme de fonctionnement de l'antenne étudiée. D'après la figure, on constate que nous avons une bonne adaptation sur les deux bandes passantes [2-3.3GHz] et [5.2-7.8GHz]

III.7.4 Diagramme de rayonnement en 2D et 3D

Il existe une multitude de façons de représenter le rayonnement d'une antenne : diagramme en champ, en puissance, gain, directivité, en polaire ou cartésien, en linéaire ou en décibels, en 2D ou 3D.

On étudie dans ce paragraphe les caractéristiques de rayonnement d'une antenne imprimée. Le diagramme de rayonnement est une caractéristique importante d'une antenne. En effet, le diagramme de rayonnement d'une antenne nous renseigne sur la façon avec laquelle l'antenne dirige son rayonnement dans une direction ou une autre dans l'espace et aussi il permet de visualiser ces lobes dans deux ou trois dimensions dans le plan horizontal ou dans le plan vertical incluant ainsi le lobe le plus important. On a tracé les diagrammes dans les deux plans principaux de l'antenne: le plan H et le plan E.

Les figures (3.20, 3.21, 3.22, 3.23) représentent le diagramme de rayonnement simulé dans le plan E ($\varphi = 0^\circ$) et dans le plan H ($\varphi = 90^\circ$) pour différentes fréquences (2 GHz, 2.45 GHz et 5.2 GHz et 7 GHz) de la bande passante, respectivement.

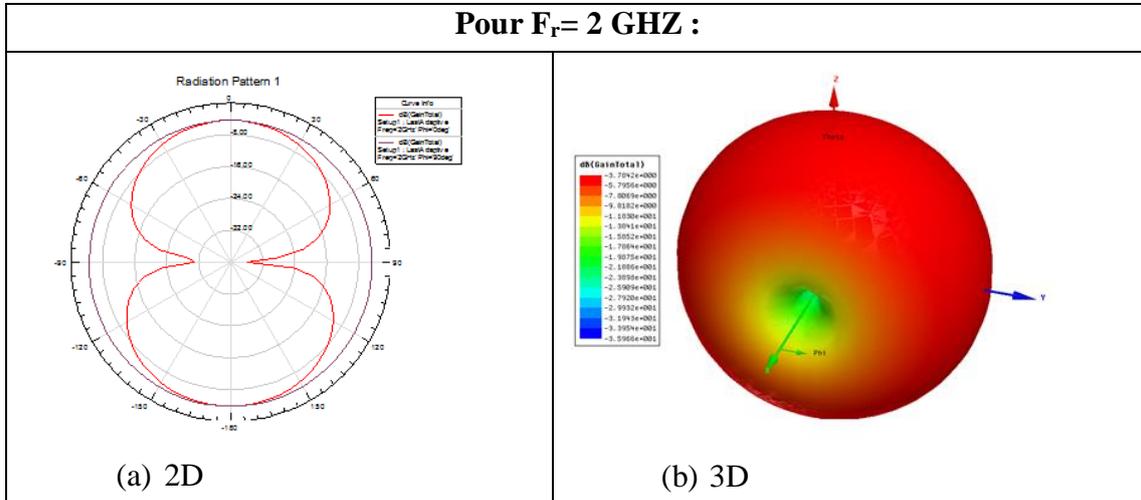


Figure 3.20. Diagramme de rayonnement à la fréquence 2 GHz
(a) 2D (b) 3D

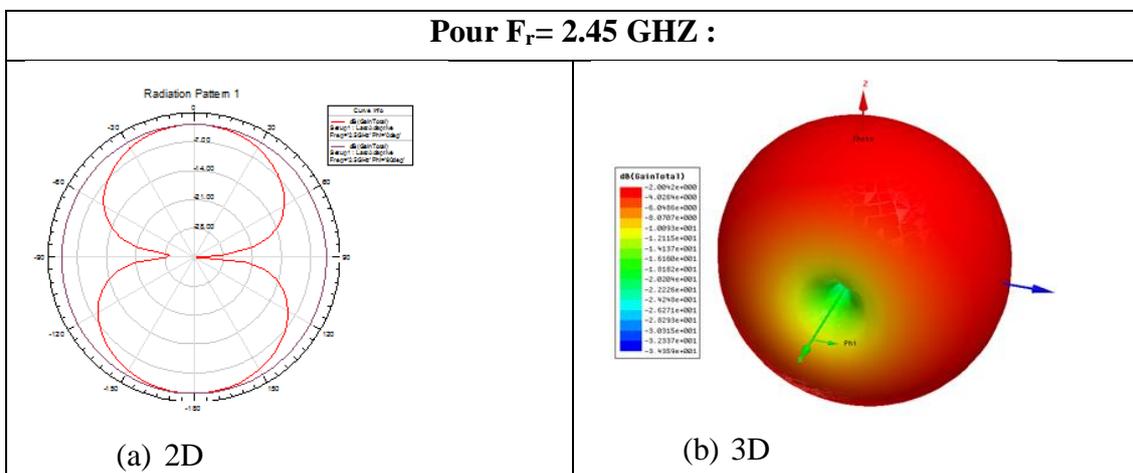


Figure 3.21. Diagramme de rayonnement à la fréquence 2.45 GHz
(a) 2D (b) 3D

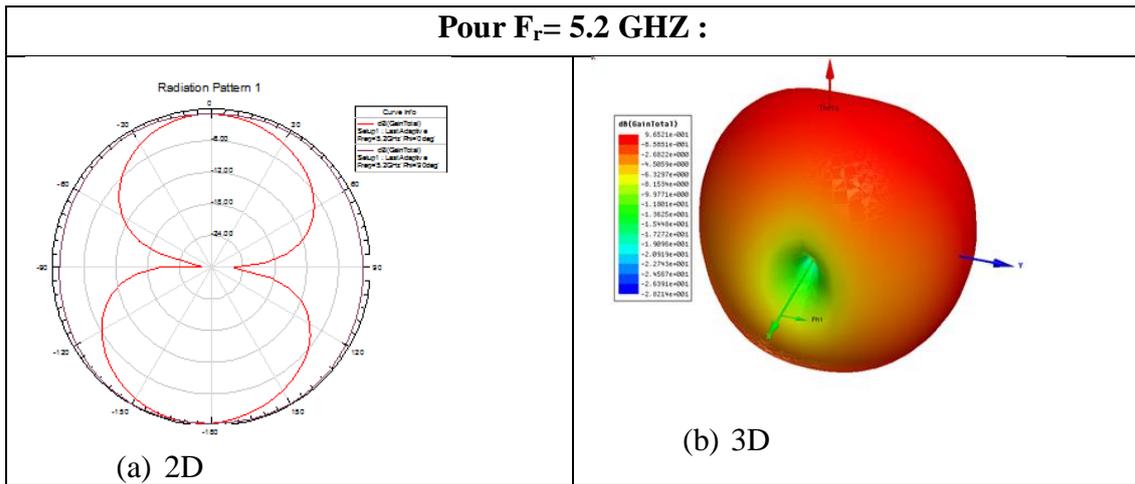


Figure 3.22. Diagramme de rayonnement à la fréquence 5.2 GHz
(a) 2D (b) 3D

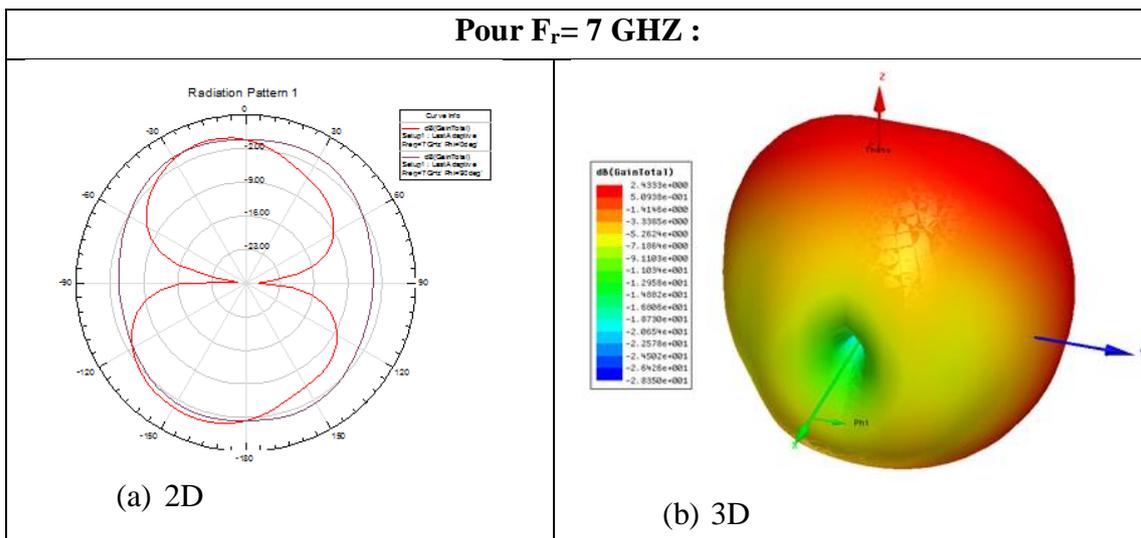


Figure 3.23. Diagramme de rayonnement à la fréquence 7 GHz
(a) 2D (b) 3D

On a constaté que :

- Le diagramme de rayonnement en 2D à 2 GHz et 2.45 GHz :
 - possède deux lobes principaux dans le plan E dans la direction ($\theta = 0^\circ$, $\theta = 180^\circ$)
 - il est omnidirectionnel dans le plan H.
 - l'ouverture à mi- puissance Θ_{-3dB} de l'antenne est égale 55° pour $f = 2$ GHz on a un gain max de -4.3 dB et pour $f = 2.45$ GHz on a un gain max de -2.8 dB.

- Par contre pour la fréquence de 5.2 GHz, le diagramme de rayonnement possède :
 - deux lobes principaux dans le plan E dans la direction ($\theta = 5^\circ$, $\theta = 185^\circ$),
 - et que le diagramme reste omnidirectionnel dans le plan H. pour le gain max de l'antenne il est de -0.9 dB on peut remarquer que l'ouverture à mi- puissance Θ_{-3dB} de l'antenne est égale 50° .

- Pour la fréquence 7 GHz on remarque que :
 - le nombre de lobes du diagramme de rayonnement augmente à quatre lobes dans le plan E,
 - et une légère déformation dans le diagramme de rayonnement plan H et qu'il est moins omnidirectionnel pour l'ouverture à mi- puissance Θ_{-3dB} de l'antenne est égale à 40° avec un gain max d'antenne à -0.15 dB.

III.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons utilisé l'étude paramétrique afin d'améliorer les performances d'une antenne patch Ultra Large Bande et de l'optimisé on utilisant le simulateur électromagnétique HFSS, après, nous avons présenté les résultats de simulation suivis par des commentaires et des discussions. Les performances étudiées sont :

- la bande passante en dB.
- la variation de l'impédance d'entrée en fonction de la fréquence.
- Variation du coefficient de réflexion en fonction de la fréquence.
- Le taux d'onde stationnaire en fonction de la fréquence.
- Diagramme de rayonnement (2D, 3D).

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 les antennes en générale, en étudiant ses éléments fondamentaux, ses caractéristiques. Ainsi que la technologie des antennes imprimées ultra large bande et leur caractéristique particulières

L'objectif principal de ce travail était la simulation et l'optimisation d'une antenne imprimée ultra large bande sous forme circulaire adaptée sur les deux bandes de fréquences [1.93GHz-3.3GHz] [4.6GHz-7.5GHz]. Nous avons apporté quelques modifications sur cette structure pour élargir sa bande passante à l'aide du logiciel de simulation hyperfréquence HFSS.

L'étude s'est portée sur une variation des dimensions du substrat, de la largeur du plan de masse, de la ligne d'alimentation et des rayons R1 et R3. Pour ce faire, on a utilisé une étude paramétrique qui consiste à fixer tous les paramètres et faire varier un seul paramètre pour étudier son influence sur les performance de l'antenne. Cette étude nous a permis d'atteindre notre objectif. On a réussie à augmenter la bande passante de 1.27 GHz à 1.37 GHz, sans réduire les performances sur les autres caractéristiques telles que le taux d'onde stationnaire, l'impédance d'entrée, la taille de l'antenne et le diagramme de rayonnement.

Bibliographie

- [1] IEEE Standard Definitions of Terms for Antennas. IEEE Std 145-1993. IEEE Press, 1993.
- [2] C.A.Balanis, Modern Antenna Handbook. John Wiley and Sons, 2008.
- [3] « les antennes » 13^eédition Dunood : RAYMOUD Brant, ROERTPiat.
- [4] Abdellatif HAFIANE, Etude du couplage d'antennes imprimées par la méthode des différences finies et extraction du modèle électrique. Thèse de Doctorat, université de Marne la Vallée (France), 2003.
- [5] A. Boyer « Cours_antennes_oct11_v4_5RT », INSA Toulouse, octobre 2011.
- [6] G. Kossiavas, R. Staraj, C. Luxey, A. Papiernik, "Antennes imprimées- Bases et principes", Technique de l'ingénieur, Référence E3310, 05/ 2007.
- [7] Leila Chouitti, "contribution à l'étude d'antenne imprimées rectangulaires doubles bandes et multi-bandes tenant compte de l'effet de couplage", Thèse magistère, Institu d'électronique, Université de Constantine, 2009.
- [8] I .J .Bahl and P.Bhartia, "Microstript Antenna", Dedham, Artech House, 1980.
- [9] D.M. POZAR "Microstipt Antennas ", IEEE, Vol.80 N° 1, pp .79-91, January 1992.
- [10]G. Kumar and KP.Ray, "Broad band microstript antennas" Aartech house baston. Londen 2003.
- [11] Y. Qian and al, "A microstript patch antenna using novel photonic band gap structures", Microwave J, Vol. 42, pp. 66-67, Jan 1999.
- [12] D. Khedrouche, " Modélisation des antennes microbandes par une analyse tridimensionnelle rigoureuse en utilisant une méthode intégrale," Thèse de Doctorat, Université de Constantine, 06/ 2009.
- [13] M. Titaouine, " Analyse des antennes microrubans de forme arbitraire par la méthode des moments et le modèle généralisé de la cavité", Thèse de Doctorat, Université de Sétif, 09/ 2007.
- [14] D. Aissaoui, " Analyse a l'aide de modèles équivalents d'antennes imprimées alimentées par ligne adaptées ", Mémoire de Magister, Université de Abou Baker BelkaidTlemcen , 03/2007.
- [15] B .Zaoui , "Modélisation d'une antenne microruban compacte", Master academique , Université EchahidHamma Lakhdar El oued,06/2015.
- [16] L. I. Basilio, M. A. Khayat, J. Williams, S. A. Long, "The dependence of the input impedance on feed position of probe and microstrip line fed patch antennas ", IEEE trans. AntennasPropagat. , vol. 49, pp. 45-47, 01/ 2001.

- [17] O. Picon, Coll, "Les Antennes, théorie, conception et applications", Dunod, Paris, 978-2-10-051989-7, 2009.
- [18] A. Boufrioua, "Contribution à l'étude des antennes a patch résistifs et parfaitement conducteur tenant compte d'une source d'excitation et des nouvelles formes asymptotiques de courant " , thèse de Doctorat, Institut d'électronique, Université de Constantine, 11 /2006.
- [19] Ph. Basset, "Conception, réalisation et test d'un microsystème de transport alimenté à distance", Thèse Université de Lille 1, 2003.
- [20] N. Uzunoglu, "Radiation properties of microstrip dipoles", IEEE Trans. AP-27, pp. 853–858, 1979.
- [21] H. Schantz, "The Art and Science of Ultra wideband Antennas", Artech House 2005.
- [22] Federal Communication Commission (FCC). First report and order, Revision of Part 15 of the Commission's Rules. Regarding Ultra-Wideband Transmission Systems. 2002.
- [23] A. Chami, "Miniaturisation et intégration d'antennes imprimées pour systèmes communicants ULB pulsés", Thèse Université de Nice-Sophia Antipolis, 2011.
- [24] AGRAWALL N.-P., KUMAR G., RAY K.-P., « " Wide-bande Planar monopole Antennas ", IEEE Transactions on antennas and Propagation, vol. 46, n°2, février 1998.
- [25] CHO Y.-J., CHOI D.-H., LEE S.-K., PARK S.-O., " A miniature UWB Planar Monopole Antenna with 5-GHz Band-Rejection Filter and the time-Domain Characteristics", IEEE Transactions on antennas and Propagation, vol. 54, n°5, mai 2006.
- [26] H. R. Khaleel, H. M. Al-Rizzo, D. G. Rucker and S. Mohan, "A Compact Polyimide-Based UWB Antenna for Flexible Electronics", IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 11, pp. 564–567, 2011.
- [27] K. P. Ray et S. S. Thakur, "Printed Annular Ring with Circular Patch Monopole UWB Antenna", International Conference on Advances in Computing and Communications, 2012.
- [28] G. Le Ray C. Marchais et A. Sharaiha, "Stripline slot antenna for uwb communications", IEEE Antennas and Wireless Propagation Lett., 5, 2006.
- [29] Huff, G.H., et al., Directional reconfigurable antennas on laptop computers: Simulation, measurement and evaluation of candidate integration positions. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 52, issue 12, pp. 3220-3227, 2004.
- [30] Talbi Abdesslem .Conception et réalisation d'antenne reconfigurable en diagramme de rayonnement.

[31] Trong Duc Nguyen .Conception d'antenne intelligente reconfigurable pour la radio cognitive.

[32] D. M. Pozar , S. M. Voda, "A rigorous analysis of a micro strip line fed patch Antenna",IEEE Transactions on Antennas and Propagations, Vol. AP-35, N°. 12, 12/1987.

[33] Nuno Cascalho; Pedro Pinho; Victor Cruz ; Nuno Borges Carvalho ,Dual-band printed circular monopole for Wi-Fi