

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة سعد دحلب البليدة
Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا
Faculté de Technologie

قسم الإلكترونيك
Département d'Électronique



Mémoire de Master

Mention Électronique
Spécialité Télécommunication & Réseau

présenté par

FEGHOUL Madina Nihed

&

ZAARIR Amina

Conception et simulation d'un système antenne ULB pour application MIMO

Proposé par : Dr HEBIB Sami

Année Universitaire 2016-2017

Remerciements

Tous d'abord on remercie DIEU le tout puissant qui nous a donnés durant toutes ces années la santé, le courage et la foi en nous même pour arriver à ce jour.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude et reconnaissance à notre encadreur Dr HEBIB SAMI, pour ses qualités scientifiques et humaines, qui nous ont beaucoup aidée et guidée tout au long de ce travail, et pour le temps et la patience qui nous a accordés.

Nous tenons à associer à ces remerciements Dr BENNANI YACINE pour sa sympathie et sa gentillesse, ses encouragements et ses conseils et on le remercie également pour l'intérêt qu'il a porté à notre travail en acceptant de l'examiner.

Nous adressons aussi nos remerciements au président du jury qui a accepté de juger ce travail.

Enfin, un grand merci plein de reconnaissance, à nos parents pour leurs soutiens et encouragements et pour qui ce mémoire est dédié.

Dédicaces

A nos parents

A nos familles

ملخص:

تطور تكنولوجيا الاتصالات في حاجة الى نظام MIMO خاصة الواسعة النطاق منها. تناولت اطروحة الماستر هذه الى هذه الحاجة , حيث اهتمت بتصميم ومحاكاة نظام , MIMO في تكنولوجيا مسطحة . بالإضافة الى كون حجمه نموذجي ، هذا النظام يجب ان يغطي كامل المجال واسع النطاق (ULB) ، ويظهر عزلة عالية بين الهوائيات. نظام الهوائيات المقترح مكون من هوائيين مسطحين دائريين، ذو حجم كلي $46*46$ مم². نتائج المحاكاة لهذا النظام توافقا وحققا صحة عمل هذا النظام. **كلمات المفاتيح:** نظام الهوائيات، ULB، MIMO، عزل

Résumé:

L'essor récent des communications ULB nécessite des systèmes MIMO spécialement adaptées à cette technologie. Ce travail de master répond à ce besoin et s'intéresse à la conception et simulation d'un système MIMO en technologie planaire. En plus d'être compact, ce système doit couvrir la totalité de la bande ULB (3.1-10.6) GHz et présenter une forte isolation entre antennes.

Le système antenne proposé est composé de deux antennes imprimées de type circulaire avec une dimension globale de $46*46$ mm². Les résultats de simulation obtenus de ce système valident son bon fonctionnement.

Mots clés : Système antenne, ULB, MIMO, isolation.

Abstract :

The recent rise of the UWB communications requires MIMO systems especially suited for this technology. This master research work tries to fulfill this need by the design and simulation of MIMO systems in printed technology. In addition of being compact, this system must cover the whole UWB (3.1-10.6) GHz and presents a high isolation level between antennas.

The proposed antenna system is composed of two circular printed antennas with an overall size of $46*46$ mm². The simulation results validate the proposed concept.

Keywords : Antenna system, UWB, MIMO, isolation.

Listes des acronymes et abréviations

Blast: Bell Laboratories Layered Space Time Architecture.

BP: Bande passante.

CPW: Coplanar Wave Guide.

FCC: Federal Communications Commission.

FR4: Flame Resistant 4.

HSPA: High Speed Packet Access.

IEEE: Institute of Electrical and Electronics Engineers.

LTE: Long term evolution.

MIMO: Multiple Input Multiple Output.

MISO: Multiple Input Single Output.

RF: Radio Fréquence.

Ref: Référence.

SIMO: Single input multiple Output.

SISO: Single Input Single Input.

SNR: Signal Noise Ratio.

SMA: SubMiniature version A.

ULB: Ultra Large Bande.

WI-FI :Wireless Fidelity.

WI-MAX: Worldwide Interoperability for Microwave Access.

Table des matières

Introduction générale.....	1
CHAPITRE 1 : Généralités sur les antennes et la technique MIMO.....	3
1.1 Introduction	3
1.2 Généralités sur les antennes	3
1.2.1 Définition d'une antenne.....	4
1.2.2 Caractéristiques principales d'une antenne.....	5
1.2.2. a Impédance d'entrée.....	5
1.2.2. b Coefficient de réflexion	6
1.2.2. c Directivité.....	6
1.2.2.d Gain.....	7
1.2.2. e Bande passante.....	7
1.2.2. f Diagramme de rayonnement	8
1.2.2. g Angle d'ouverture à mi-puissance.....	8
1.3 Les systèmes MIMO	9
1.3.1 Intérêt des systèmes MIMO	9
1.3.2 Historique	10
1.3.3 Principe de la technique MIMO	11
1.3.4. Applications du système MIMO	12
1.4 Conclusion	12
CHAPITRE 2 : Etat de l'art sur les antennes ULB en technologie planaire	13
2.1 Introduction	13
2.2 La technologie ultra large bande	13
2.2.1 Historique	13
2.2.2 Définition	15
2.2.3 Avantages et inconvénients de l'ultra large bande.....	15
2.2.3.a Avantages	15
2.2.3.b Inconvénients	16

2.3 Les antennes imprimées	16
2.3.1 Structure d'une antenne imprimée.....	16
2.3.2 Techniques d'alimentation	17
2.3.2.a Alimentation par contact	18
2.3.2.b Alimentation par proximité	19
2.3.3 Avantages et inconvénients des antennes imprimées	20
2.3.3.a Avantages	20
2.3.3.b Inconvénients	21
2.3.4 Applications des antennes imprimées	21
2.4 Etat de l'art sur les antennes ULB en technologie planaire	21
2.5 Conclusion	28
CHAPITRE 3 : Conception d'une antenne imprimée ultra large bande	29
3.1 Introduction	29
3.2 Spécifications techniques (cahier des charges).....	29
3.3 Antenne octogonal.....	30
3.3.1 Description de l'antenne	30
3.3.2 Résultats de simulation	31
3.3.2 Etudes paramétriques	32
3.3.3.a Paramètre d.....	32
3.3.3.b Paramètre W_1	33
3.3.3.c Paramètre W_{plan}	34
3.4 Antenne circulaire	34
3.4.1 Description de l'antenne	34
3.4.2 Résultats de simulation	35
3.4.3 Etudes paramétriques	37
3.4.3.a Paramètre h	37
3.4.3.b Paramètre r	38
3.4.3.c Paramètre W_s	38
3.4.3.d Paramètre L_s	40
3.5 Réalisation et mesure.....	42
3.5.1 Réalisation de l'antenne	42

3.5.2 Résultat de mesure	43
3.6 Conclusion	45
CHAPITRE 4 : Conception et simulation d'un système antenne pour application	
MIMO	46
4.1 Introduction	46
4.2 Etat de l'art sur les techniques d'isolation MIMO entre antennes planaires ULB.	46
4.3 Système antenne ultra large bande à deux antennes	52
4.3.1 Etudes paramétriques du système antenne à deux antennes	53
4.3.1.a Paramètre d	53
4.3.1.b Paramètre W_{sub}	55
4.4 Techniques d'isolation	56
4.4.1 Ligne de séparation.....	56
4.4.2 Insertion de fentes dans le plan de masses	58
4.4.3 Insertion de fentes et de stubs	60
4.4.4 Ligne de neutralisation.....	62
4.4.5 ligne de neutralisation avec variation angulaire.....	65
4.5 Conclusion	67
Conclusion général	68
Annexe	69
A.1 Présentation de l'outil IE3D de <i>Zeland</i>	69
A.2 Résultats de simulation.....	70
Bibliographie	73

Liste des figures

Figure 1.1 : Système global comportant une antenne émettrice et une antenne réceptrice.....	3
Figure 1.2 : Quelques types d'antennes	4
Figure 1.3 : Antenne en mode émetteur.....	5
Figure 1.4 : Exemple d'une bande passante.....	8
Figure 1.5 : Différentes représentations du diagramme de rayonnement.....	8
Figure 1.6 : Diagramme de rayonnement montrant l'angle d'ouverture à -3dB.....	9
Figure 1.7 : Systems (SISO,MIMO,MISO,SIMO).....	10
Figure 2.1 : Exemple d'une antenne imprimée de forme quelconque.....	17
Figure 2.2 : Différentes géométries de l'élément rayonnant d'une antenne imprimée.....	17
Figure 2.3 : Alimentation par ligne imprimée (technologie micro-ruban).....	18
Figure 2.4 : Alimentation par sonde coaxiale.....	18
Figure 2.5 : Alimentation par guide d'onde coplanaire (CPW).....	19
Figure 2.6 : Alimentation par ligne micro-ruban et fente.....	20
Figure 2.7 : Alimentation par couplage électromagnétique.....	20
Figure 3.1 : Géométrie de l'antenne octogonale étudiée	30
Figure 3.2 : Modèle de simulation de l'antenne octogonale IE3D.....	31
Figure 3.3 : $ S_{11} $ de l'antenne octogonale.....	31
Figure 3.4 : Diagrammes de rayonnement aux trois fréquences de l'antenne octogonale.....	32
Figure 3.5 : $ S_{11} $ de l'antenne octogonale pour différentes valeurs de d en mm.....	33
Figure 3.6 : $ S_{11} $ de l'antenne octogonale pour différentes valeurs de W_1 en mm.....	33
Figure 3.7 : $ S_{11} $ de l'antenne octogonale pour différentes valeurs de W_{plan} en mm.....	34
Figure 3.8 : Géométrie de l'antenne circulaire étudiée.....	35
Figure 3.9 : Modèle de simulation de l'antenne circulaire IE3D.....	35
Figure 3.10 : $ S_{11} $ de l'antenne circulaire.....	36
Figure 3.11 : Diagrammes de rayonnement aux trois fréquences de l'antenne	

circulaire.....	36
Figure 3.12 : $ S_{11} $ de l'antenne circulaire pour différentes valeurs de h en mm.....	37
Figure 3.13 : $ S_{11} $ de l'antenne circulaire pour différentes valeurs de r en mm	38
Figure 3.14 : Modèle de simulation de l'antenne circulaire avec encoche.....	39
Figure 3.15 : $ S_{11} $ de l'antenne circulaire pour différentes valeurs de W_s en mm	39
Figure 3.16 : $ S_{11} $ de l'antenne circulaire pour différentes valeurs de L_s en mm.....	40
Figure 3.17 : $ S_{11} $ de l'antenne circulaire sans encoche et de l'antenne circulaire avec encoche optimisée.....	41
Figure 3.18 : Diagrammes de rayonnement aux trois fréquences de l'antenne circulaire.....	41
Figure 3.19 : Typons de l'antenne à réaliser.....	42
Figure 3.20 : Photographie de l'antenne réalisée.....	43
Figure 3.21 : Analyseur de réseau en étape de calibration	43
Figure 3.22 : Antenne connectée à l'analyseur de réseau par un câble coaxial	44
Figure 3.23 : $ S_{11} $ simulé et mesuré de l'antenne.....	44
Figure 4.1 : Modèle de simulation IE3D du système à deux antennes ULB	52
Figure 4.2 : $ S_{11} $ et $ S_{12} $ du système de la figure 4.1.....	53
Figure 4.3 : $ S_{11} $ du système antennaire pour différentes valeurs de d en mm.....	54
Figure 4.4 : $ S_{12} $ du système antennaire pour différentes valeurs de d en mm.....	54
Figure 4.5 : $ S_{11} $ du système antennaire pour différentes valeurs de W_{sub} en mm.....	55
Figure 4.6 : $ S_{12} $ du système antennaire pour différentes valeurs de W_{sub} en mm.....	56
Figure 4.7 : Technique d'isolation avec ligne de séparation.....	57
Figure 4.8 : $ S_{11} $ et $ S_{12} $ des trois configurations.....	58
Figure 4.9 : Techniques d'isolation avec insertion de fentes.....	59
Figure 4.10 : $ S_{11} $ et $ S_{12} $ de la configuration de la figure 4.9 comparés à ceux du Système sans technique.....	60
Figure 4.11 : Techniques d'isolation avec insertion de fentes et de stubs.....	61
Figure 4.12 : $ S_{11} $ et $ S_{12} $ des configurations de la figure 4.11.....	62
Figure 4.13 : Techniques d'isolation avec ligne de neutralisation.....	63

Figure 4.14 : $ S_{11} $ et $ S_{12} $ des trois configurations de la figure 4.13.....	64
Figure 4.15 : Technique d'isolation avec ligne de neutralisation et variation angulaire..	65
Figure 4.16 : $ S_{11} $ et $ S_{12} $ des deux configurations de la figure 4.15.....	66
Figure A.1 : Interface au démarrage d'IE3D.....	69
Figure A.2 : Interface montrant différentes fenêtres d'IE3D.....	70
Figure A.3 : Différentes angles de vue d'une antenne (2D et 3D).....	70
Figure A.4 : Exemple du tracé du Coefficient de reflexion $ S_{11} $ en dB.....	71
Figure A.5 : Distribution de courant	71
Figure A.6 : Diagramme de rayonnement 2D.....	72
Figure A.7 : Diagramme de rayonnement 3D.....	72

Liste des tableaux

Tableau 2.1 : Quelques antennes ULB en technologie planaire.....	27
Tableau 3.1 : Cahier des charges	30
Tableau 3.2 : Dimensions de l'antenne octogonale étudiée.....	30
Tableau 3.3 : Les dimensions de l'antenne circulaire étudiée.....	35
Tableau 3.4 : Dimensions de l'antenne retenue.....	40
Tableau 4.1 : Quelques techniques d'isolation MIMO entre antennes ULB en technologie planaire.....	51
Tableau 4.2 : Dimensions des fentes de la figure 4.9.....	59
Tableau 4.3 : Dimensions des stubs de la configuration 2.....	61
Tableau 4.4 : Dimensions des stubs de la configuration 3.....	61
Tableau 4.4 : Dimensions des lignes de neutralisation de la figure 4.15.....	66

Introduction générale

Le domaine des télécommunications a connu ces dernières années un progrès technologique qui est dû à la forte demande de la population et de l'industrie de solutions innovantes et à faible coût. Parmi les préoccupations de ce domaine on trouve principalement les antennes. En effet ces dernières sont des éléments présents dans tous les systèmes de télécommunications sans fil, car elles assurent les opérations d'émission et de réception des ondes électromagnétiques dans l'atmosphère terrestre ou dans l'espace.

Pour répondre aux besoins actuels des télécommunications, les concepteurs en hyperfréquences sont amenés à élaborer des dispositifs à base d'antennes planaires, ces antennes présentent plusieurs avantages à savoir : faible coût, simple profil, volume réduit et facilité de réalisation.

La perpétuelle évolution des télécommunications est freinée par un spectre de fréquence de plus en plus occupé. Dans ce contexte, l'utilisation des signaux ultra large bande pour transmettre l'information semble être une alternative très prometteuse.

L'objectif de ce travail est de concevoir dans un premier temps une antenne imprimée compacte fonctionnant dans la bande ULB (3.1-10.6) GHz compatible avec les dimensions standards d'un Smartphone $120 \times 50 \text{mm}^2$. Dans un second temps, un système antennaire pour application MIMO à deux éléments sera proposé en utilisant comme brique l'antenne ULB précédente.

Ce mémoire est organisé comme suit :

Le premier chapitre, est consacré à la présentation de généralités sur les antennes ainsi que sur les systèmes MIMO et leur principe de fonctionnement.

Le second chapitre présente une brève description de la technologie ULB et des antennes planaires. Il contient également un état de l'art sur les antennes ULB en technologie planaire.

Le troisième chapitre est dédié à l'étude et la simulation de deux antennes planaires adaptée aux systèmes de communications ULB. La réalisation et la mesure d'un prototype ont validés les résultats de simulations et confirmés le bon fonctionnement de l'antenne dans toute la bande ULB.

Enfin, le quatrième et dernier chapitre est consacré à l'étude et la simulation d'un système à deux antennes MIMO-ULB composé à partir de l'antenne réalisée dans le chapitre précédant. Des solutions originales avec une forte isolation entre antennes ont été proposées et simulés.

1.1 Introduction

Une antenne d'émission est un élément conducteur qui transforme une énergie électrique en énergie de rayonnement électromagnétique. Une antenne de réception traduit un rayonnement électromagnétique en courant électrique induit. La même antenne peut servir à recevoir ou à émettre si elle est alimentée en courant (réciprocité d'une antenne). Dans ce chapitre nous allons présenter d'abord les caractéristiques principales d'une antenne ainsi que ses propriétés. Nous présenterons ensuite la technique MIMO, son principe ainsi que son architecture.

1.2 Généralités sur les antennes

Si nous considérons un système de communication sans fil, nous pouvons le définir comme un ensemble constitué de deux blocs [1] : un bloc d'émission et un bloc de réception, ces deux blocs restent séparés par un canal de propagation dans lequel transite le signal électromagnétique comme l'illustre la figure 1.1, l'antenne est la partie indispensable de tout dispositif sans fil.

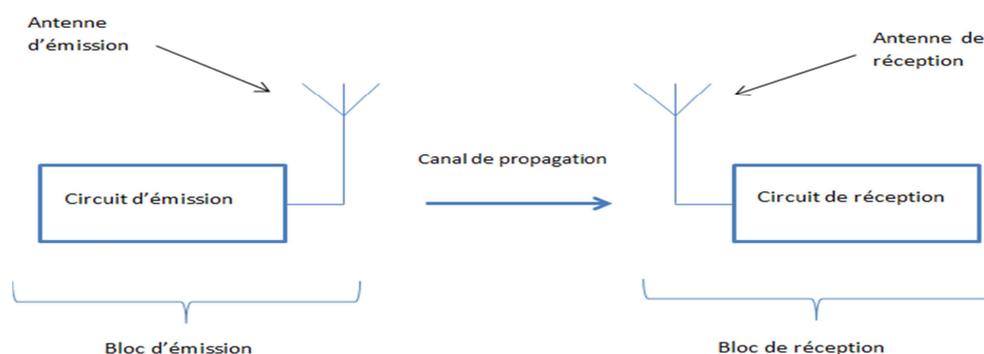


Figure 1.1. Système global comportant une antenne émettrice et une antenne réceptrice.

1.2.1 Définition d'une antenne [1-2]

Une Antenne est un transducteur (convertisseur) qui transfère l'énergie électromagnétique entre une ligne de transmission et l'espace libre, selon le standard IEEE, une antenne est définie comme « un système permettant de rayonner ou de recevoir des ondes radio » En effet, en mode émission, une antenne reçoit les signaux électromagnétiques d'une ligne de transmission et les diffuse dans l'espace libre. En mode réception, l'antenne recueille l'onde électromagnétique incidente et la convertit en une tension. Des antennes de caractéristiques identiques peuvent être utilisées indifféremment en mode réception ou en mode émission.

Principalement l'antenne a plusieurs rôles dont :

- Permettre une adaptation correcte entre l'équipement radio électrique 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.

Il y a différents types d'antennes. On va présenter quelques-uns dans la figure 1.2

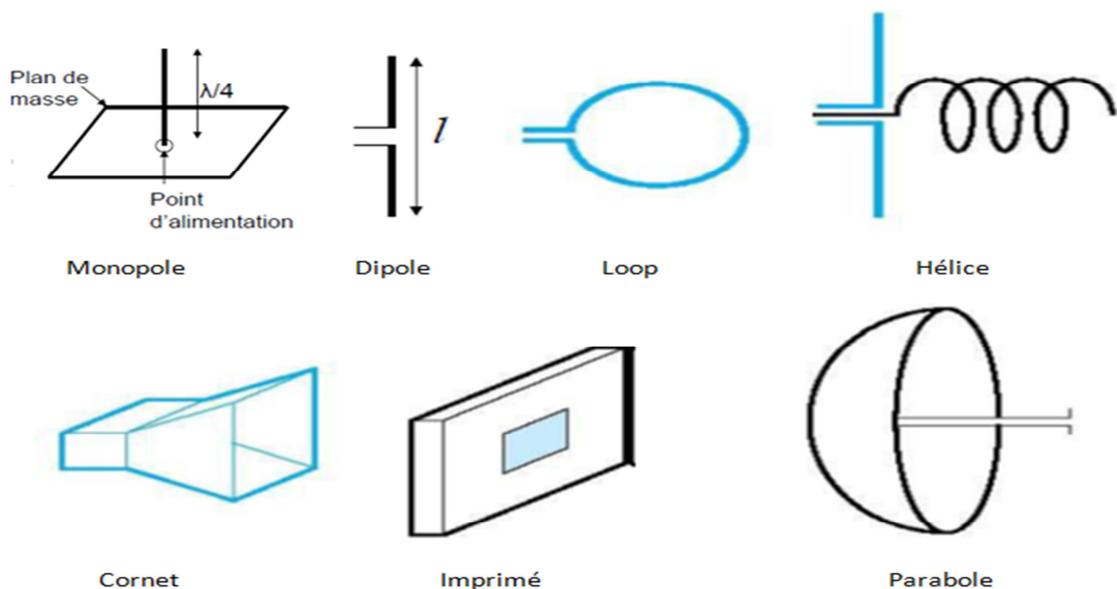


Figure 1.2. Quelques types d'antennes.

1.2.2 Caractéristiques principales d'une antenne [2-3]

La théorie des antennes est basée sur le rayonnement produit par des sources (charge, courant) à la surface d'un conducteur. Quand on veut décrire le fonctionnement d'une antenne particulière, certaines caractéristiques fondamentales communes à tous les types d'antennes sont données.

1.2.2.a Impédance d'entrée

L'impédance d'entrée (Z_e) est définie comme étant l'impédance présentée par une antenne à ses bornes. Elle est égale au rapport de la tension V_e sur le courant I_e présents à l'entrée de l'antenne (figure 1.3) et peut s'écrire comme suit :

$$Z_e = \frac{V_e}{I_e} = R + jX \text{ } [\Omega] \quad (1.1)$$

Où :

R= Résistance de l'antenne [Ω] .

X= Réactance de l'antenne [Ω].

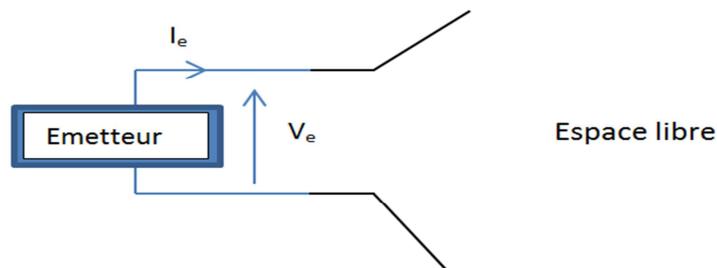


Figure 1.3. Antenne en mode émetteur.

En général, l'impédance d'entrée d'une antenne varie avec la fréquence, ainsi l'adaptation en puissance est réalisée dans la bande passante de l'antenne.

1.2.2.b Coefficient de réflexion

On dit que l'antenne est parfaitement adaptée lorsque son impédance d'entrée (Z_e) est égale à l'impédance de la ligne d'alimentation (Z_c) sinon on démontre qu'il apparaît un coefficient de réflexion Γ (ou S_{11}) tel que :

$$\Gamma = \frac{z_e - z_c}{z_e + z_c} \quad (1.2)$$

On peut également représenter Γ sous forme de paramètre S en dB tel que

$$S_{11} \text{ (dB)} = 20 \log_{10} (|\Gamma|) \quad (1.3)$$

1.2.2.c Directivité

La directivité $D(\theta, \phi)$ d'une antenne dans une direction (θ, ϕ) est le rapport entre l'intensité de rayonnement de l'antenne considérée et l'intensité de rayonnement d'une antenne isotrope, comme le montre l'équation 1.4

$$D(\theta, \phi) = \frac{U(\theta, \phi)}{U_{iso}} \quad (1.4)$$

$U(\theta, \phi)$: L'intensité de rayonnement de l'antenne considérée [w/Sr].

U_{iso} : L'intensité de rayonnement d'une antenne isotrope [w/Sr], elle est donnée par :

$$U_{iso} = \frac{P_{ray}}{4\pi} \quad (1.5)$$

P_{ray} : Puissance rayonnée d'une antenne.

La directivité maximale est donnée par :

$$D_0 = \text{MAX} (D(\theta, \phi)) \quad (1.6)$$

La directivité, grandeur sans dimension, est également exprimée par sa valeur en décibel :

$$D_0 \text{ (dB)} = 10 \log (D_0(\theta, \phi)) \quad (1.7)$$

1.2.2.d Gain

Le gain est une performance en étroite relation avec la directivité, mais qui prend en compte l'efficacité de l'antenne, définis à une direction donnée (θ, ϕ) , il est définis comme suit :

$$G(\theta, \phi) = e \cdot D(\theta, \phi) \quad (1.8)$$

e : Efficacité de rayonnement.

Le gain maximal G_0 est défini par :

$$G_0(\theta, \phi) = e \cdot D_0(\theta, \phi) \quad (1.9)$$

Le gain peut être exprimé en décibels :

$$G(\text{dB}) = 10 \log(G) \quad (1.10)$$

Une antenne isotrope n'a pas de gain, donc $G=0\text{dB}$ (c'est une antenne imaginaire qui rayonne uniformément dans toutes les directions).

Une antenne dipôle demi-onde possède un gain de 2.15 dB par rapport à l'antenne isotrope. On dit aussi qu'elle a un gain de 2.15 dBi.

1.2.2.e Bande passante

La bande passante d'une antenne est la plage de fréquence dans laquelle on peut normalement l'utiliser. Elle définit le domaine de fréquence dans lequel le rayonnement de l'antenne présente les caractéristiques requises.

La largeur de bande d'une antenne peut être obtenue à partir du paramètre S_{11} en fonction de la fréquence sur une courbe donnée, on admet généralement que si ce paramètre est inférieur à -10dB la puissance de rayonnement est suffisante, et les fréquences correspondantes à ces valeurs définissent la bande passante.

La figure 1.4 montre un exemple d'un coefficient de réflexion ainsi que la bande passante déterminée pour $|S_{11}| < -10\text{ dB}$.

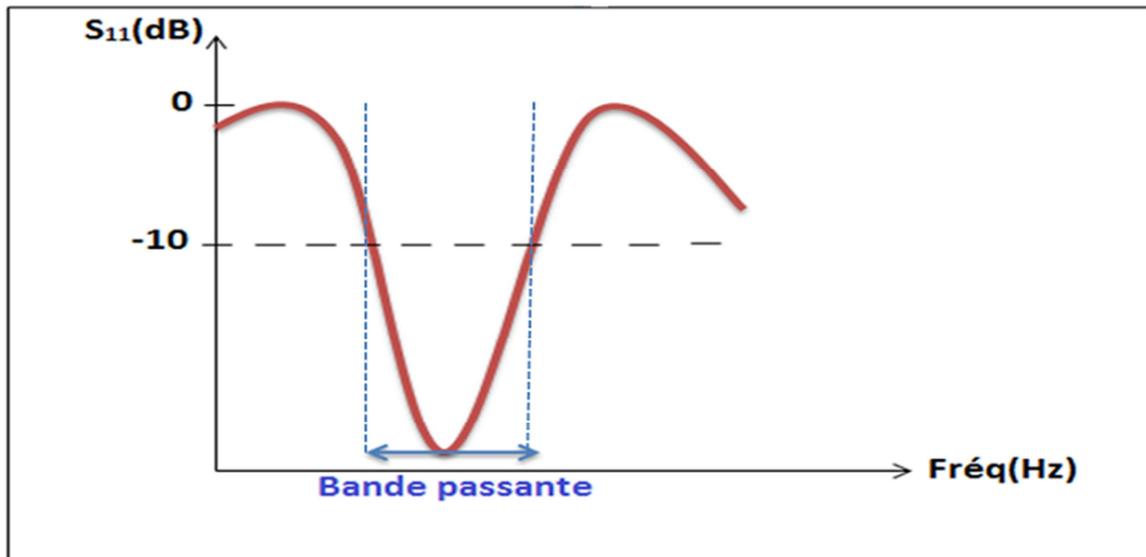


Figure 1.4. Exemple d'une bande passante.

1.2.2.f Diagramme de rayonnement

C'est une représentation qui nous donne les directions de rayonnement les plus efficaces de l'antenne ou encore, c'est la représentation graphique du gain dans le plan vertical et horizontal. Ce diagramme peut être représenté sur un plan en coordonnées cartésiennes ou polaires ou bien, dans l'espace à trois dimensions (figure 1.5). Il est généralement caractérisé, par un lob principal et des lobes de rayonnement secondaires, Comme on peut le remarqué dans la figure 1.6.

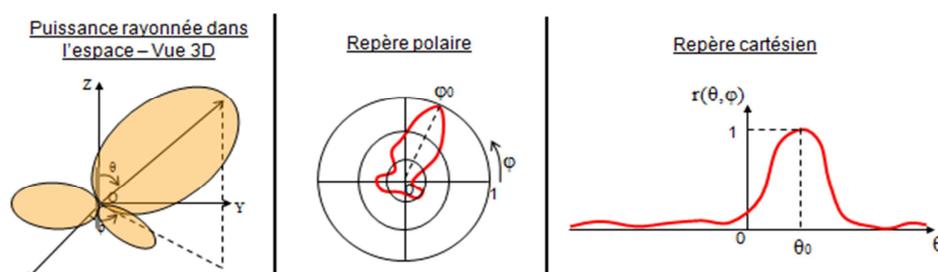


Figure 1.5. Différentes représentation du diagramme de rayonnement [2].

1.2.2.g Angle d'ouverture à mi- puissance

L'angle d'ouverture à -3 dB (ou à mi- puissance) caractérise la largeur du lobe principal. Il représente la portion de l'espace dans lequel la majeure partie de la puissance est rayonnée. Un exemple d'un diagramme de rayonnement avec son angle d'ouverture est illustré par la figure 1.6.

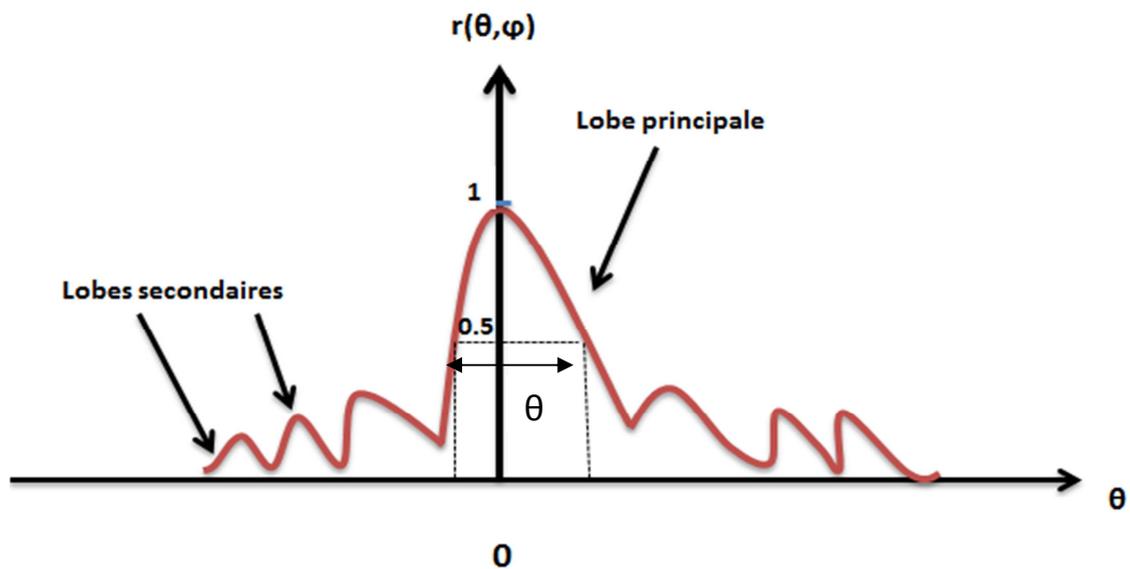


Figure 1.6. Diagramme de rayonnement montrant l'angle d'ouverture à -3dB.

Il faut noter que la description d'une antenne ne nécessite pas la connaissance de l'ensemble de tous les paramètres évoqués parce que, comme nous l'avons vu, plusieurs sont reliés entre eux. Ainsi à partir de la connaissance de certains, tous peuvent être déterminés si nécessaire.

1.3 Les systèmes MIMO

1.3.1 Intérêt des systèmes MIMO

Dans les systèmes de communication conventionnels, il y a une antenne en émission et une antenne en réception. Ces systèmes sont appelés systèmes SISO (*Single Input Single Output*). Ils souffrent d'inconvénients en termes de capacité de canal selon les critères de Shannon et Nyquist [4]. Or, de plus en plus de services dans les futurs systèmes de communications sans fil demandent plus de débit de transmission de données. Pour satisfaire cette demande, les concepteurs se mettent en face d'un grand nombre de défis et ont explorés plusieurs voies: l'augmentation de la bande passante et des niveaux de puissance de transmission. Ces méthodes se heurtent à la limitation du spectre de fréquences disponibles et la variation dans le temps et dans l'espace de l'environnement de propagation. Les systèmes MIMO (*Multiple Input Multiple Output*),

des systèmes de communications sans fil avec des antennes multiples aux deux extrémités de la liaison (Figure 1.7) sont apparus comme la technologie la plus prometteuse dans ces cas. Ils permettent d'augmenter la capacité du canal considérablement, sans pour autant augmenter la puissance de transmission ni la bande passante [5-6] et exploitent ainsi la technique de diversité spatiale.

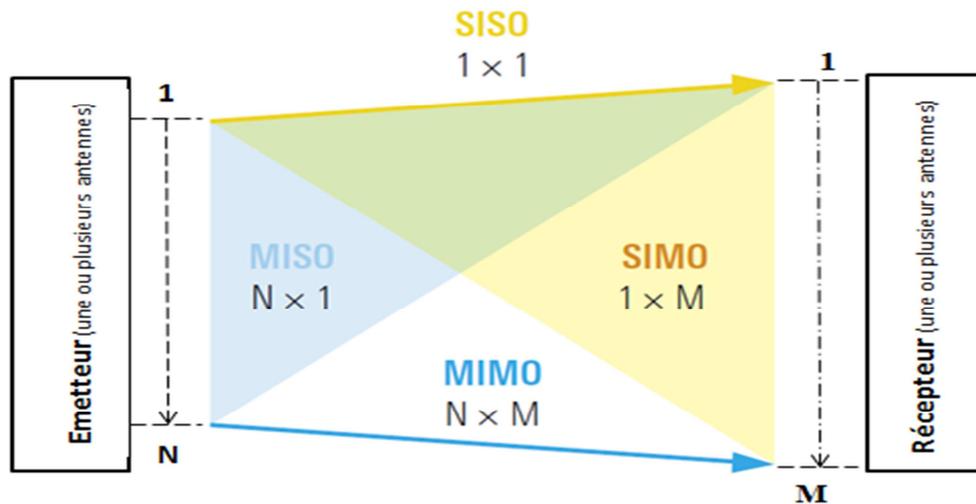


Figure 1.7. Systèmes (SISO, SIMO, MISO, MIMO).

Par ailleurs l'utilisation de plusieurs antennes en réception est mise en œuvre depuis longtemps afin de tirer parti de la diversité ainsi obtenue (on peut parler dans ce cas de systèmes SIMO : Single Input Multiple Output). L'utilisation de plusieurs antennes en émission (systèmes MISO : Multiple Input Single Output) est appliquée de manière classique pour la formation de faisceau qui associe plusieurs éléments rayonnants dans une antenne réseau de façon à augmenter le gain de rayonnement dans une direction fixe ou variable. Elle peut aussi apporter une diversité en émission par l'utilisation de codes spatio-temporels par exemple [3].

1.3.2 Historique [3,6-8]

- En 1984 Jack Winters (laboratoire Bell) déposa un brevet pour les communications sans fil utilisant des antennes multiples.
- En 1985 Jack Salz publia un article sur le MIMO basé sur les travaux de Winters.

Par la suite de 1986 à 1994, plusieurs publications sur le sujet ce sont succédées.

- En 1994 l'introduction de la notion de Multiplexage spatiale par A.Paulraj (université de Stanford).
- En 1996, Greg Rayleigh et Gérard J Foschini ont inventé des nouvelles approches permettant d'accroître l'efficacité du MIMO. Aussi, il a été démontré que la capacité du canal MIMO augmente avec le nombre d'antennes utilisées de façon proportionnelle. Ainsi que les travaux de l'équipe de Foschini la même année sur les récepteur BLAST (Bell Laboratoire).
- En 1998, les travaux de l'équipe du Dr Vahid Tarokh toujours du laboratoire Bell sur le codage spatio-temporel ont généralisé les concepts introduits précédemment par M.Almouti (AT&T Wireless service 1998).
- En 1999 les travaux de Emre Telatar (Laboratoire Bell) sur le calcul de la capacité du canal MIMO.
- En 2001 La progression des études du système MIMO a abouti à l'apparition du premier système MIMO commercial développé par Iospan Wireless Incorporation [9].
- A partir de 2006 plusieurs sociétés telle que Broadcom et Intel ont adopté de nouvelle technique de communication utilisant la technologie MIMO [9].

1.3.3 Principe de la technique MIMO

Les systèmes MIMO utilisent à la base la technique de la diversité spatiale, et tirent profit de l'environnement multi trajet, en utilisant les différents canaux de propagation crée par réflexion et/ou par diffraction des ondes. Et cela pour augmenter la capacité de transmission, d'où l'intérêt aussi d'obtenir des signaux indépendants sur les antennes. Cette technique utilise différentes fonctions de traitement de signal, telles que la combinaison linéaire des signaux, le codage spatio-temporel et le multiplexage spatial [7].

La technologie MIMO permet de :

- Améliorer la qualité du rapport signal sur bruit (SNR) et le débit de transmission.
- Lutter contre les effets du multi-trajet.

La capacité du système MIMO croit linéairement avec la valeur minimale du nombre d'antennes en émission et en réception [8].

1.3.4 Applications du système MIMO [10-11]

Le développement des techniques MIMO à constituer une innovation majeure pour les systèmes de communication mobile. La technologie MIMO s'est imposée dans de nombreuses applications comme les normes wifi (IEEE-802.11n et 802.11.ac), Wi-Max (IEEE-802.16a) et les normes de téléphonie mobile HSPA+LTE et LTE Advanced. Par exemple, en France, la LiveBox d'orange utilise du Wi-Fi en mode MIMO 4x4.

1.4 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons cité quelques généralités sur les antennes en donnant les principales caractéristiques de ces dernières. Puis nous avons présenté la technologie MIMO. Dans le prochain chapitre nous nous intéresseront à la technologie ultra large bande et aux antennes planaires.

2.1 Introduction

Le principe des communications radio utilisant la technique de l'ultra large bande (ULB) est aujourd'hui bien connue et les nombreuses études sur le sujet ont permis de définir et de réaliser des circuits électroniques spécifiques à ces applications. Récemment, la FCC a défini les règles d'utilisation du spectre de fréquence en attribuant la bande entre [3.1-10.6] GHz pour les applications ULB liées à la localisation et les systèmes de communications sans fil. Des travaux de recherche intenses dans le domaine des antennes ont abouti aux développements de plusieurs types d'antennes, différentes par le fonctionnement, leur géométrie, leur technologie. Parmi ces antennes nous citons les antennes planaires ou imprimées dont la forme et les dimensions (légères et peu encombrantes) leur permettent d'être intégrées dans les modules d'émission ou de réception sur le même substrat.

Après une brève description de la technologie ULB et les antennes de type planaire (la structure et les technique d'alimentation), un état de l'art sur les différentes antennes ULB planaires publiées dans la littérature a été présenté sous forme d'un tableau.

2.2 La technologie ultra large bande

2.2.1 Historique [12-13]

La technologie Ultra Large Bande est une appellation relativement récente pour décrire une technologie bien plus ancienne. En effet, le plus ancien système pouvant être considéré comme tel pourrait être l'émetteur <<spark gap>> de Marconi introduit en 1897, car il induisait des signaux pulsés ayant de très larges bandes passantes.

Cependant, à l'époque, ce type de transmissions créait beaucoup d'interférences, et ne permettait pas un partage coordonné du spectre de fréquences. Ainsi, le monde des communications sans fil abandonna la large bande pour des systèmes bandes étroites, accordés, plus faciles à réguler et coordonner. Durant les trois dernières décennies, pour faire face à l'encombrement des bandes de fréquences utilisées pour transmettre ces informations avec un taux d'erreurs acceptable. Ce n'est que récemment 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 –une dizaine d'années- le concept lui-même est par contre bien plus ancien :

- La grande majorité des techniques de transmission actuelles utilisent des modulations avec porteuses (Bluetooth..). Dès la fin du 19^{ème} siècle, Heinrich Hertz avait eu l'idée d'utiliser des décharges électrique pour produire des ondes électromagnétique. C'était la base de la technique ultra large bande.
- Dans les années 60, Ross et Bennett étudient pour la première fois la propagation d'ondes électromagnétique d'un point de vue temporel plutôt que d'un point de vue 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 apparait 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 (militaire).
- 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, l'organisme de régulation des communications américaine, 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).

2.2.2 Définition [14]

Depuis février 2002, la loi américaine a fixé les limites en bande et en puissance autorisées pour les systèmes ULB conformément aux réglementations proposées par la FCC. Afin d'aboutir à ce résultat, la FCC a établi une approche expérimental plutôt qu'une étude du service : elle a défini les limites en terme de largeur de bande, de domaine d'application, ainsi que de puissance. En effet cette situation assure la protection de la cible vis-à-vis des services avec lesquels elle risque d'interférer. Suivant cette réglementation, une définition officielle a été adoptée :

- a) Sa bande passante est au minimum de 500 MHz (à -10dB)
- b) Sa bande passante relative est supérieure à 0.2

$$BP_{\text{relative}} = 2 \cdot \frac{f_{\text{max}} - f_{\text{min}}}{f_{\text{max}} + f_{\text{min}}} \cdot 100 > 20\% \quad (2.1)$$

Où f_{max} et f_{min} , désignent respectivement les fréquences hautes et basses du spectre de signal, lorsque $|S_{11}| < -10$ dB. Les deux conditions ne sont pas forcément remplies en même temps.

- c) La bande passante relative réelle est égale à 109.5%.

Il reste à signaler que la FCC permet d'ouvrir des bandes de fréquences en fonction des limites de puissance établies. Pour les systèmes de communication, la bande autorisée est de 3.1 GHz à 10.6 GHz.

2.2.3 Avantages et inconvénients de l'ultra large bande [15]

2.2.3.a Avantages

- Bonne capacité de pénétration dans les murs et obstacles.
- Réduction des évanouissements causés par les trajets multiples.

- Possibilité d'une architecture commune pour les applications de communications, de localisation et radar.
- Meilleure utilisation du spectre, débits plus grands.

2.2.3.b Inconvénient

- le principal inconvénient de cette technologie est l'existence d'interférence dû aux fréquences utilisées qui sont déjà employées par d'autres systèmes.

2.3 Les antennes imprimées

Le concept des antennes imprimées est apparu dans les années 1950 avec G.A. Deschamps. Mais il faudra attendre les années 1970 pour voir apparaître les premières réalisations qui seront essentiellement réservées à des applications militaires, et les années 1990 pour un véritable passage au stade industriel.

Il n'y a pas, pour le moment, de terme français établi par l'usage pour désigner l'antenne élémentaire dont le nom anglais est « patch » (« pavé » ou « pastille », en français). On utilise le plus souvent « antenne imprimée » ou « antenne micro-ruban » car les premières antennes imprimées rectangulaires étaient constituées par une partie de ligne micro-ruban rayonnante. Nous utilisons ici de façon alternée les termes imprimé et planaire [16].

2.3.1 Structure d'une antenne imprimée

Une antenne imprimée est constituée d'un dépôt métallique appelé élément rayonnant (environ 17.5 à 35 μm d'épaisseur) d'une forme aléatoire, ce dernier est déposé sur un matériau non conducteur, appelé substrat diélectrique qui est caractérisé par sa permittivité relative (ϵ_r), et sa tangente de perte ($\tan \delta$), tandis que la face inférieure du substrat (appelé plan de masse) est le plus souvent complètement ou partiellement métallisé. La figure 2.1 montre la structure générale d'une antenne imprimée [16].

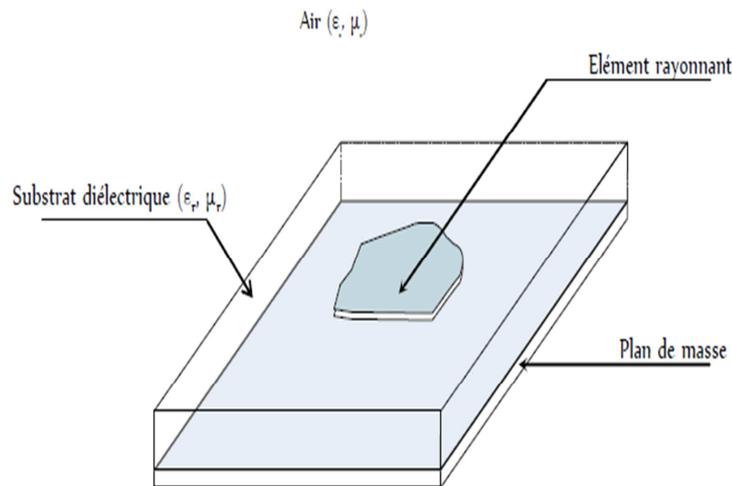


Figure 2.1. Exemple d'une antenne imprimée de forme quelconque[17].

On a plusieurs formes de ces éléments rayonnants :

Carrée, rectangulaire, circulaire, elliptique, ou plus complexe, comme le montre la figure 2.2. Nous notons que leur dimension est de l'ordre de $\lambda/2$ à λ .

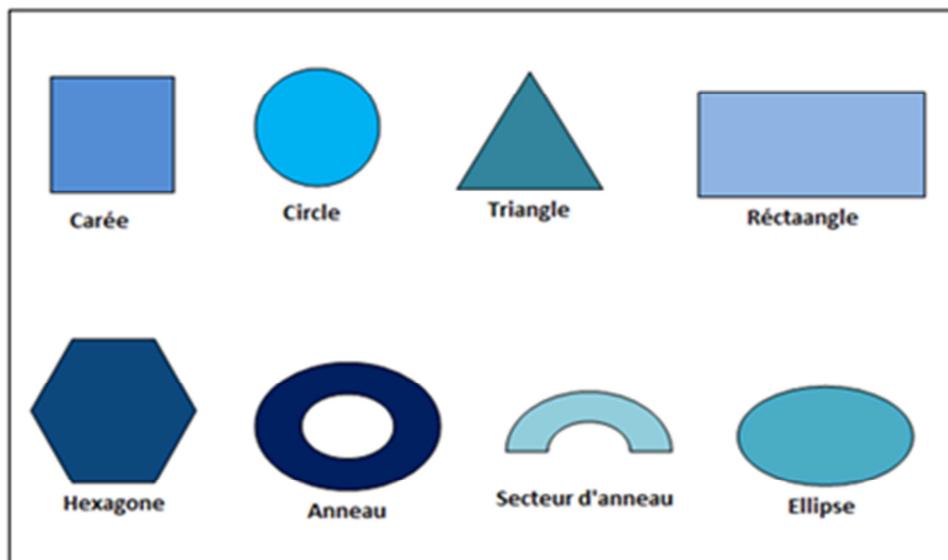


Figure 2.2. Différentes géométries de l'élément rayonnant d'une antenne imprimée.

2.3.2 Techniques d'alimentation [16-17]

La méthode d'alimentation de l'antenne dépend de la manière dont l'antenne est intégrée dans le dispositif. Elle peut être classée en 2 catégories :

2.3.2.a Alimentation par contact

On peut distinguer deux principales catégories

- Alimentation par ligne imprimée (figure 2.3)

Une ligne imprimée est reliée au patch et lui amène de l'énergie. Elle a l'inconvénient de générer un rayonnement parasite.

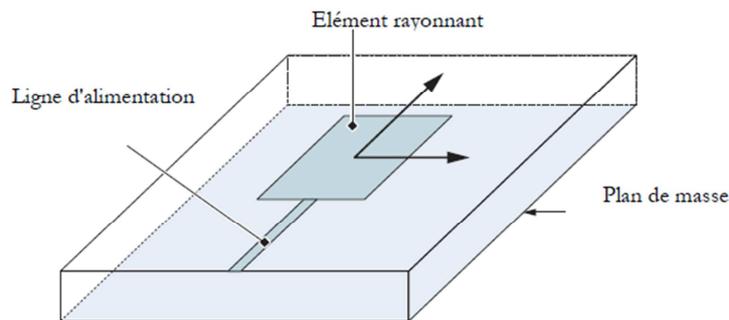


Figure 2.3. Alimentation par ligne imprimée (technologie micro-ruban) [17].

- Alimentation par sonde coaxiale (figure 2.4)

Un connecteur standard (SMA) est soudé au plan de masse qui est perforé pour permettre à l'âme central d'être relié à l'élément rayonnant en traversant le diélectrique. L'énergie est amenée par un guide coaxial.

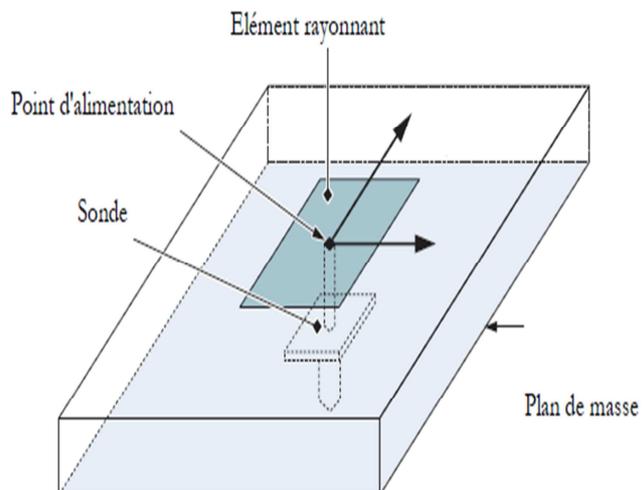


Figure 2.4. Alimentation par sonde coaxiale [17].

2.3.2.b Alimentation par proximité

On peut distinguer trois importantes catégories

- Alimentation par guide d'ondes coplanaire (figure 2.5)

Le guide d'onde coplanaire est une ligne de transmission efficace qui présente l'avantage de placé la ligne d'alimentation au même niveau que le plan de masse. Il est constitué d'un ruban central métallique placé entre deux plans de masse parallèle entre eux. Déposé sur la même face d'un substrat diélectrique. Cette technique n'est pas adaptée pour alimenter une structure d'antenne symétrique.

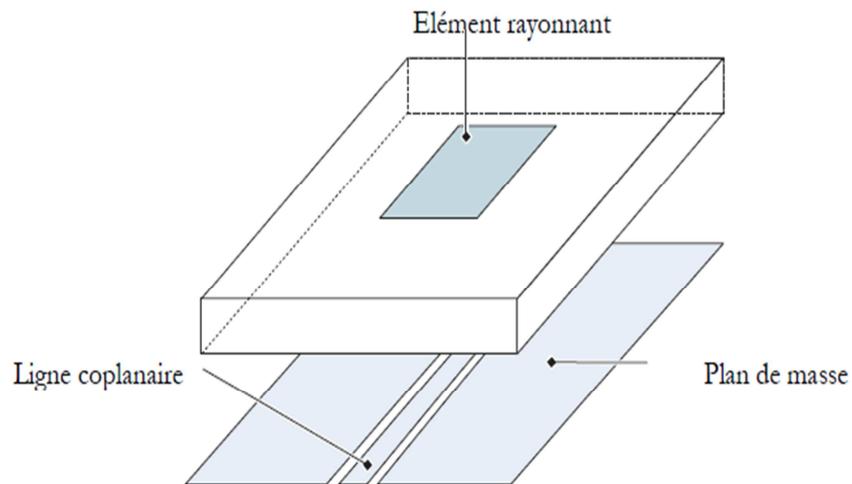


Figure 2.5. Alimentation par guide d'ondes coplanaire (CPW) [17].

- Alimentation par fente (figure2.6)

Une ligne est disposée au dos du plan de masse, qui est entaillé d'une fente sous l'élément rayonnant afin que l'énergie amenée par la ligne soit communiquée à l'antenne.

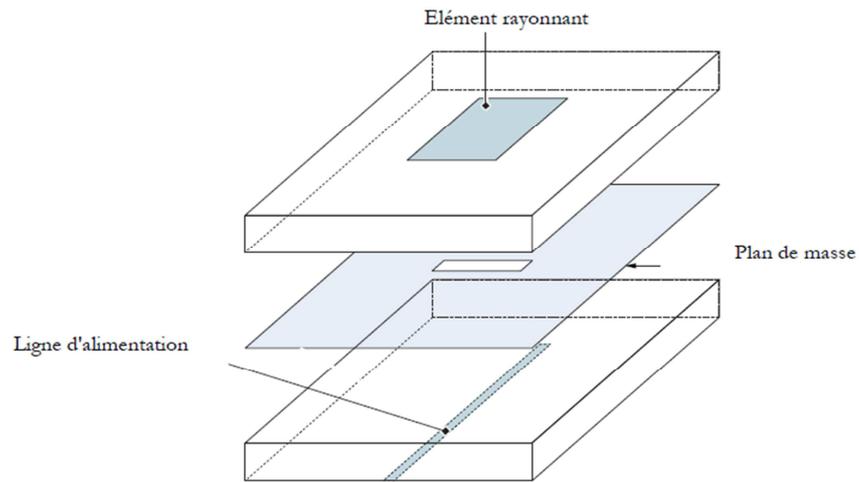


Figure 2.6. Alimentation par ligne micro ruban et fente [17].

- Alimentation par couplage

L'alimentation par couplage, moins répandue, utilise le couplage direct d'une ligne micro ruban située entre l'élément rayonnant et le plan de masse positionnée entre deux couches de diélectrique, placé l'un au dessus de l'autre.

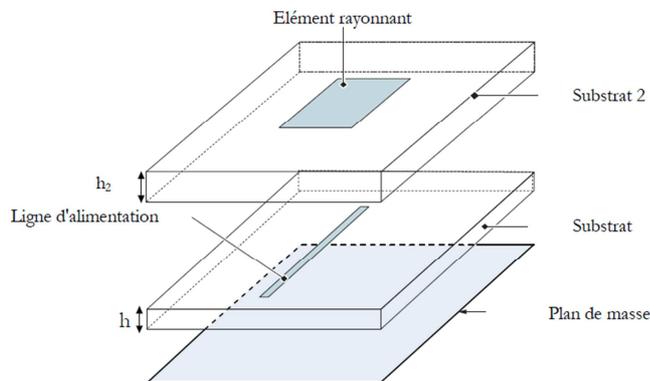


Figure 2.7. Alimentation par couplage électromagnétique [17].

2.3.3 Avantages et inconvénients des antennes imprimées [18]

2.3.3.a Avantages

La technologie des antennes planaire est issue de celle des circuits imprimés ce qui leur confère certains avantages tels que :

- Simple profil, volume réduit.

- Conformité (si le substrat est flexible), peut être placée sur des missiles, fusées et les satellites sans modifications importantes.
- Facilité de réalisation.
- Faible coût.

2.3.3.b Inconvénient

Le principal inconvénient de ce type d'antenne est sa bande passante qui est relativement étroite.

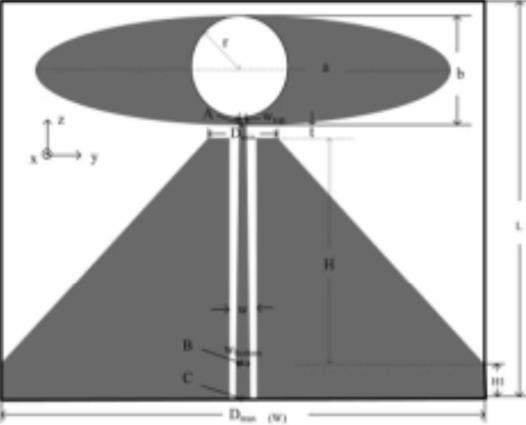
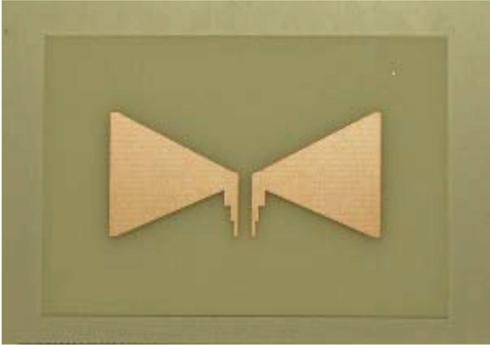
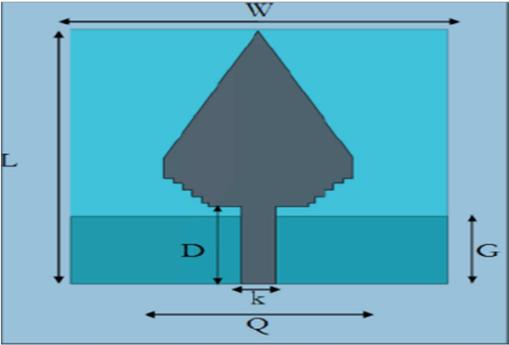
2.3.4 Applications des antennes imprimées [16]

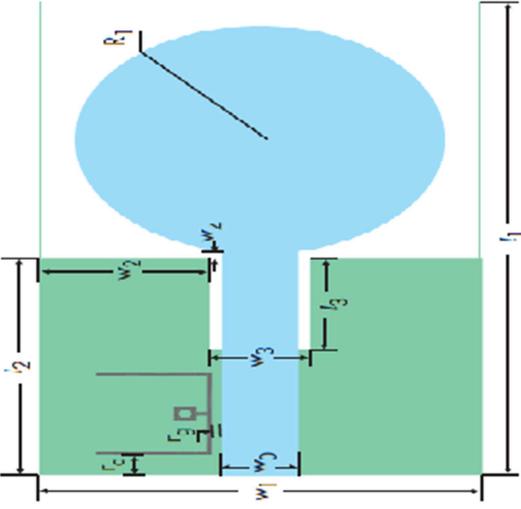
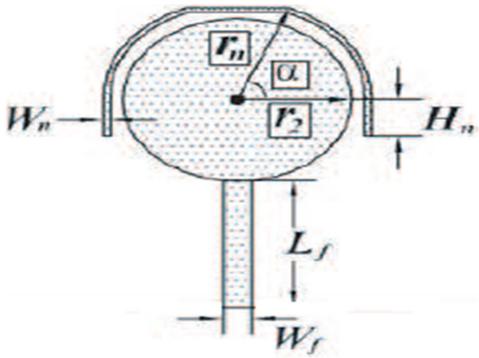
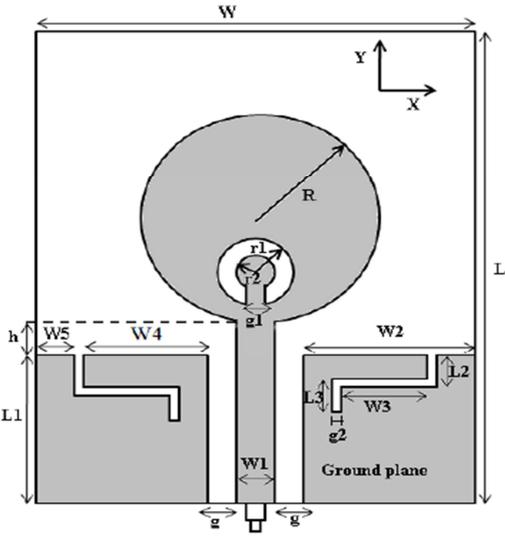
Il existe différentes applications réussies :

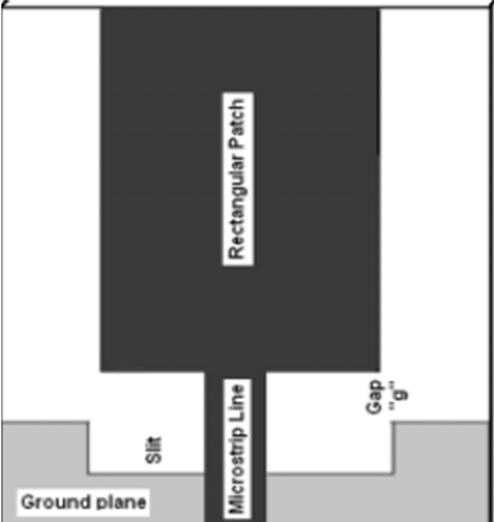
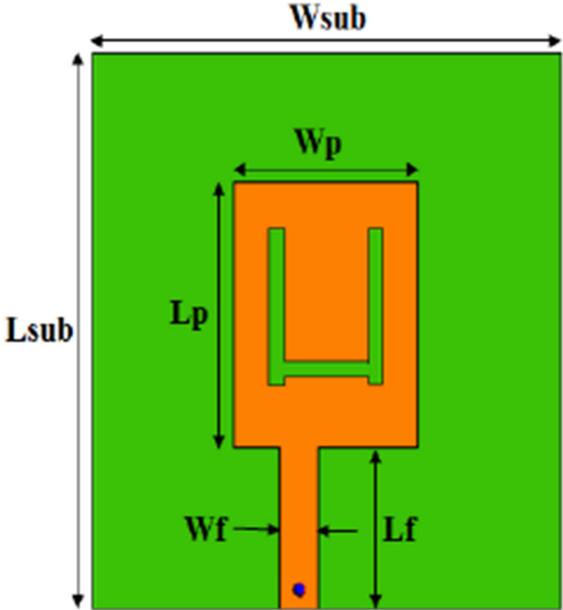
- Télécommunication par satellites.
- Commande et contrôle.
- Télémétrie (télémesure) par missile.
- Equipements portatifs.
- Antenne d'émission utilisée en médecine.
- Récepteur satellite de navigation.

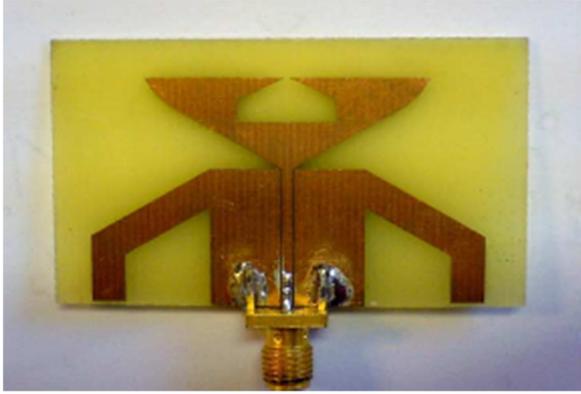
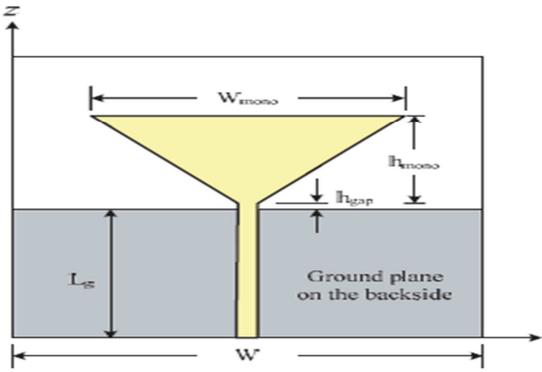
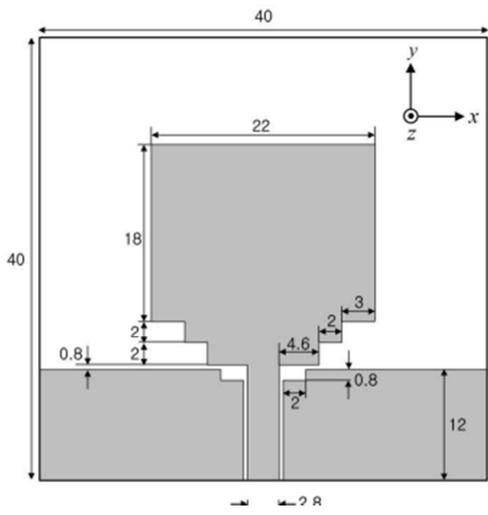
2.4 Etat de l'art sur les antennes ULB en technologie planaire

Dans la littérature, on peut trouver plusieurs travaux de recherche sur la conception d'antennes imprimées ULB, car ces deux technologies combinées sont un bon candidat pour le futur des télécommunications. Les antennes jugées pertinentes sont cités dans le tableau 2.1.

Type d'antenne	Taille (mm ²)	Aperçu de l'antenne	Réf
Elliptique (CPW)	26.4x17.1		[12]
Antenne papillon (Version planaire de l'antenne biconique)	30x30		[13]
Antenne diamant	30x30		[17]

	20x35		[15]
Antenne circulaire et ses variantes	50x50		[19]
	34x40		[20]

<p>Antenne Rectangulaire et ses variantes</p>	<p>30x30</p>		<p>[21]</p>
	<p>33x35.5</p>		<p>[22]</p>

<p>Antenne Triangulaire et ses variantes</p>	<p>28x46</p>		<p>[23]</p>
	<p>30x27</p>		<p>[24]</p>
<p>Antenne à sous bande coupé</p>	<p>40x40</p>		<p>[25]</p>

<p>Antenne à fente en forme de croix</p>	<p>20x19</p>		<p>[26]</p>
<p>Antenne Vivaldi</p>	<p>48x64</p>		<p>[27]</p>
<p>Antenne cupcake</p>	<p>27x28</p>		<p>[28]</p>

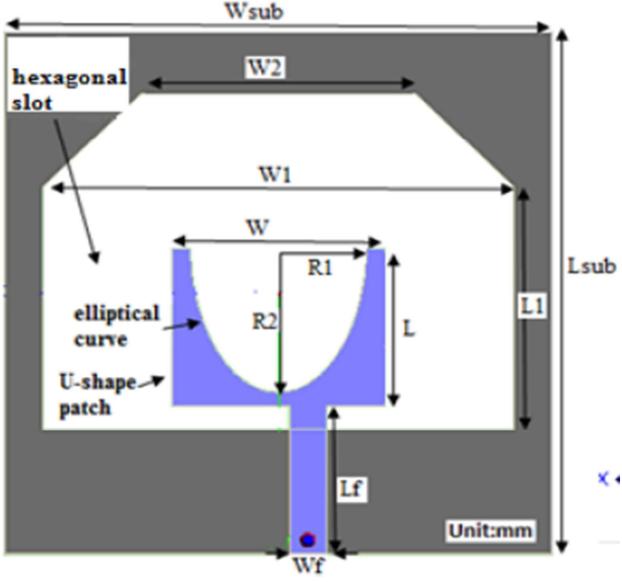
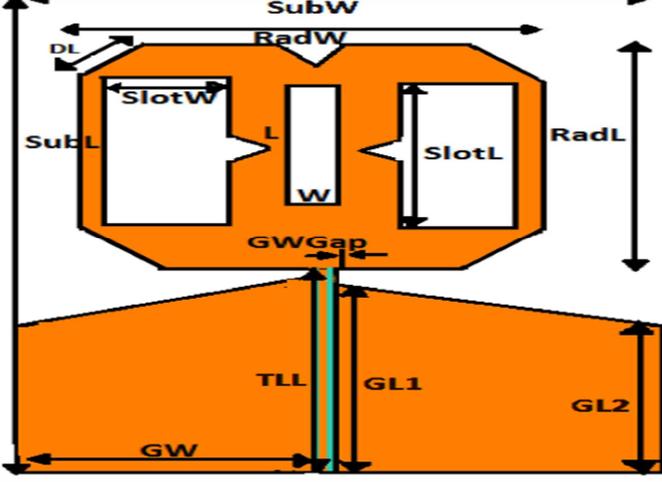
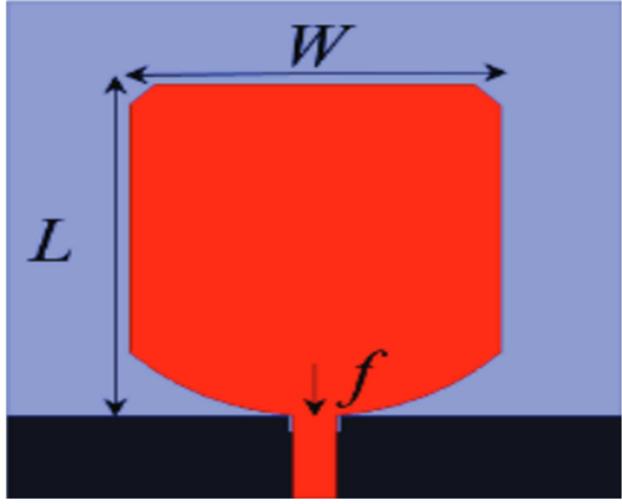
<p>Antenne Hexagonale</p>	<p>28x28</p>		<p>[29]</p>
<p>Antenne de forme quelconque</p>	<p>32x40</p>		<p>[30]</p>
	<p>50x60</p>		<p>[31]</p>

Tableau 2.1. Quelques antennes ULB en technologie planaire.

Les solutions planaires sont nombreuses, leurs dimensions varient entre ($20 \times 20 \text{mm}^2$ et $50 \times 60 \text{mm}^2$), la majorité ont une géométrie complexe qui rend la réalisation compliquée.

2.5 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté la technologie ultra large bande et décrit les antennes imprimées, ainsi qu'un petit état de l'art sur les antennes imprimées ULB, dans le chapitre suivant nous décrirons la simulation et la conception de l'antenne brique de notre système antennaire et ceci après avoir présentés les différentes études paramétriques qui nous conduit aux choix de cette antenne.

3.1 Introduction

Comme déjà mentionné dans le chapitre précédent, les antennes ULB peuvent présenter différentes configurations.

Dans ce chapitre nous allons proposer deux antennes ULB compactes en technologie micro-ruban : l'antenne octogonale et l'antenne circulaire.

L'étude commence par la conception et la simulation électromagnétique des deux structures à l'aide de simulateur électromagnétique. Des études paramétriques sur les deux structures ont été présentées et discutées. Enfin, un prototype a été réalisé et mesuré afin de valider les résultats obtenus. Il possède une taille de $45 \times 42 \text{ mm}^2$ et permettant ainsi une intégration aisée dans des terminaux mobiles de taille d'un Smartphone.

3.2 Spécifications techniques (cahier des charges)

En plus d'être en technologie imprimée, l'antenne à concevoir dans ce projet doit satisfaire les spécifications résumées dans le tableau 3.1. Le substrat utilisé pour cette conception est le FR4 ($\epsilon_r=4.4$, épaisseur=1.6mm et $\tan\delta=0.0013$) pour sa disponibilité au laboratoire DIC.

Bande passante	[3.1-10.6]GHz
Taille	La plus compacte possible
Adaptation	$ S_{11} < -10$ dB
Diagramme de rayonnement	Relativement stable

Tableau 3.1. Cahier des charges.

3.3 Antenne octogonale

3.3.1 Description de l'antenne

L'antenne de base est une antenne imprimée classique octogonale proposée dans [32], de longueur L_{oct} et de largeur W_{oct} (figure 3.1). Elle est alimentée par une ligne micro-ruban de longueur L_{ligne} et de largeur W_{ligne} . Le substrat utilisé est le FR4 ($\epsilon_r=4.4$, épaisseur=1.6mm et $\tan\delta=0.0013$).

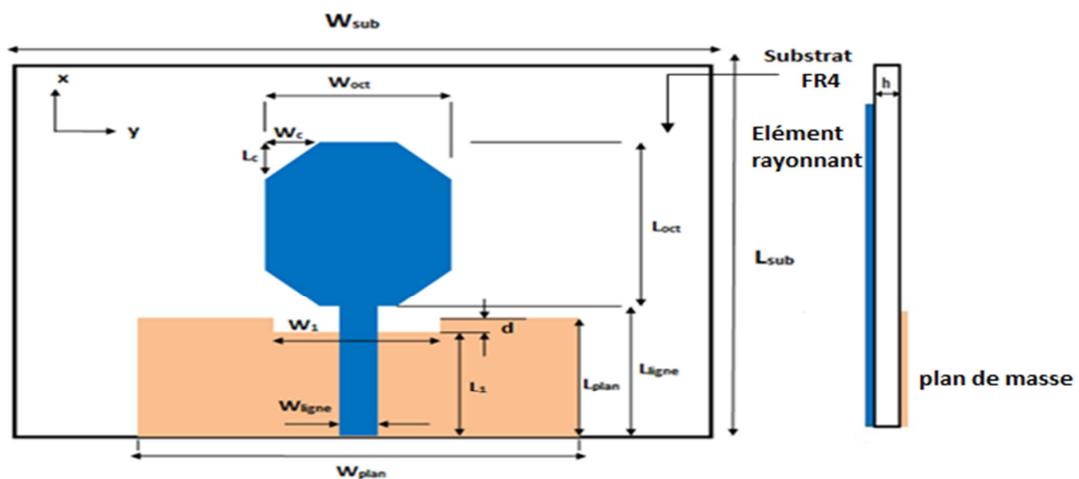


Figure 3.1. Géométrie de l'antenne octogonale étudiée.

Les dimensions en mm sont données dans le tableau 3.2.

L_{sub}	W_{sub}	L_{plan}	W_{plan}	L_{oct}	W_{oct}	L_{ligne}	W_{ligne}	L_1	W_1	D	L_c	W_c
40	40	11.25	30	18.75	15	11.75	3	10.75	9	0.5	3.75	3.75

Tableau 3.2. Dimensions de l'antenne octogonale étudiée[32].

3.3.2. Résultats de simulation

Comme montré sur le tableau 3.2, la largeur de la ligne d'excitation micro-ruban est égale à 3mm afin d'assurer une impédance caractéristique de 50Ω . Le logiciel de simulation électromagnétique utilisé est le *Zeland IE3D* à base de la méthode des moments adaptée aux structures planaires. Plus de détails sur le logiciel IE3D sont donnés en annexe. Le modèle de simulation de l'antenne octogonale est illustré par la figure 3.2. Il est à noter que les simulations des antennes imprimées dans ce travail ont été réalisées en supposant un diélectrique infini. Cette supposition, motivée par un temps simulation réduit, ne perturbe pas les résultats obtenus.

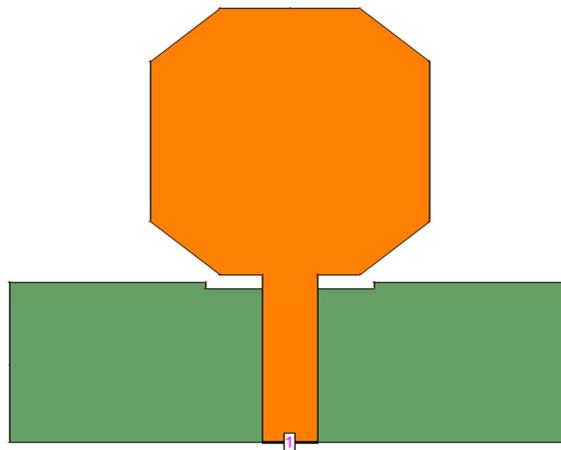


Figure 3.2. Modèle de simulation de l'antenne octogonale IE3D.

La figure 3.3 illustre l'évolution du module du coefficient de réflexion simulé (en dB) en fonction de la fréquence de l'antenne de la figure 3.1.

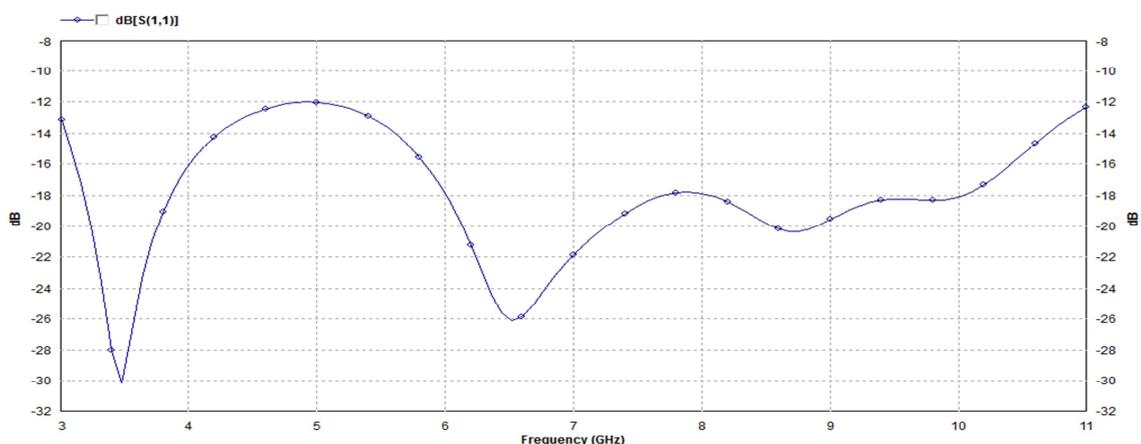


Figure 3.3. $|S_{11}|$ de l'antenne octogonale.

D'après la figure 3.3, l'évolution du module du coefficient de réflexion S_{11} en fonction de la fréquence, montre la présence d'une large bande passante qui s'étale de 3GHz à 11 GHz ($BP_{relative} > 114\%$).

La figure 3.4, montre les diagrammes de rayonnement en 2D de l'antenne octogonale pour les fréquences 3.1 GHz, 6.85 GHz et 10.6 GHz. Deux plans ont été tracés : le plan E ($\varphi=0^\circ$) et le plan H ($\varphi=90^\circ$).

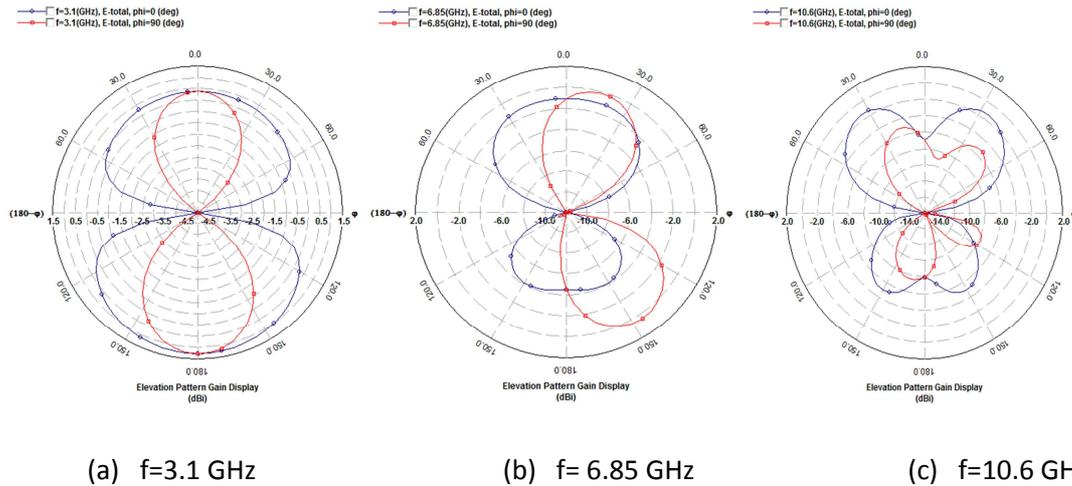


Figure 3.4. Diagrammes de rayonnement aux trois fréquences de l'antenne octogonale.

Les diagrammes de rayonnement obtenus en simulation sont assez stables et similaire pour les trois fréquences.

3.3.3 Etudes paramétriques

Dans cette partie plusieurs études paramétriques sur l'antenne octogonale seront présentées et discutées. Seules les performances en termes d'adaptation seront considérées en faisant varier uniquement trois paramètres : d (profondeur de l'encoche), W_1 (Longueur de l'encoche) et W_{plan} (Longueur du plan de masse). Un seul paramètre sera changé à la fois les autres dimensions seront fixées (tableau 3.2).

3.3.3.a Paramètre d

Dans cette partie l'influence de la profondeur de l'encoche présente dans le plan de masse, (d) va être étudiée.

Les coefficients de réflexion pour les valeurs de d de 0mm à 1.75mm avec un pas de 0.25mm, sont montrés par la figure 3.5.

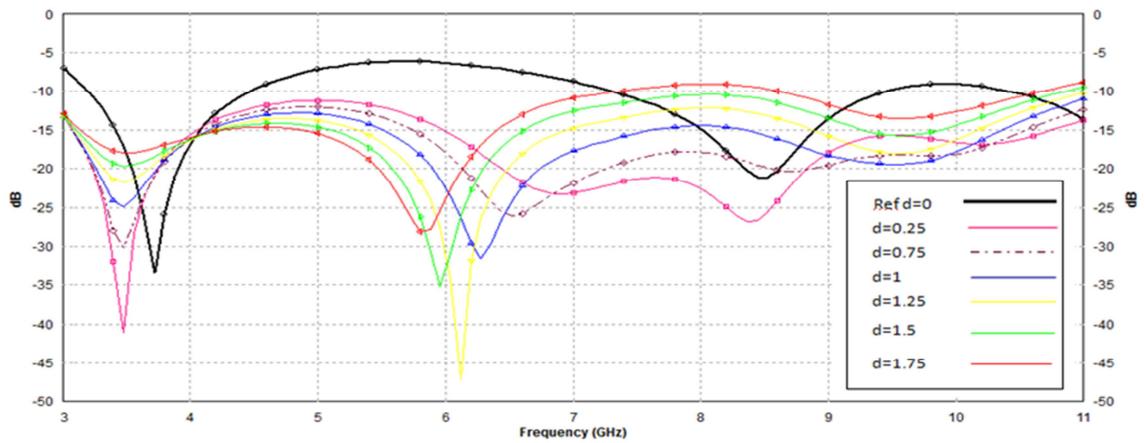


Figure 3.5. $|S_{11}|$ de l'antenne octogonale pour différentes valeurs de d en mm.

D'après les résultats de la figure 3.5, une bonne adaptation est assurée sur une très large bande passante pour les valeurs de d inférieures à 1mm, la non présence de l'encoche ($d=0$ mm) montre une désadaptation de l'antenne sur la majeure partie de la bande.

3.3.3.b Paramètre W_1

La figure 3.6 montre la variation du coefficient de réflexion en fonction du paramètre W_1 qui est la longueur de l'encoche, pour les valeurs de W_1 de 0mm à 15mm avec un pas de 3mm.

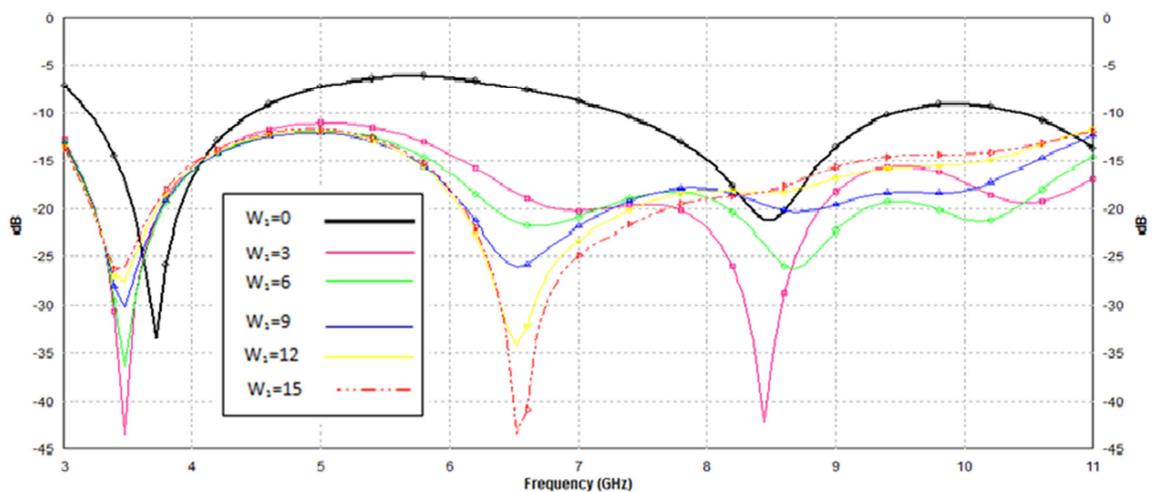


Figure 3.6. $|S_{11}|$ de l'antenne octogonale pour différentes valeurs de W_1 en mm.

D'après les résultats présents dans la figure 3.6, une bonne adaptation est assurée sur une très large bande pour toutes les valeurs de W_1 , avec une légère différence pour les fréquences de résonances. Pour $W_1=0\text{mm}$ la valeur du $|S_{11}|$ remonte en dessus de -10 dB pour les bande (4-7) GHz et (9-10.2) GHz.

3.3.3.c Paramètre W_{plan}

Dans cette partie, le paramètre W_{plan} (Longueur du plan de masse) est varié pour constater son influence sur l'adaptation. Les coefficients de réflexion $|S_{11}|$ pour les valeurs de $W_{\text{plan}} = 16, 18, 22, 26, 30$ mm sont montrés par la figure 3.7.

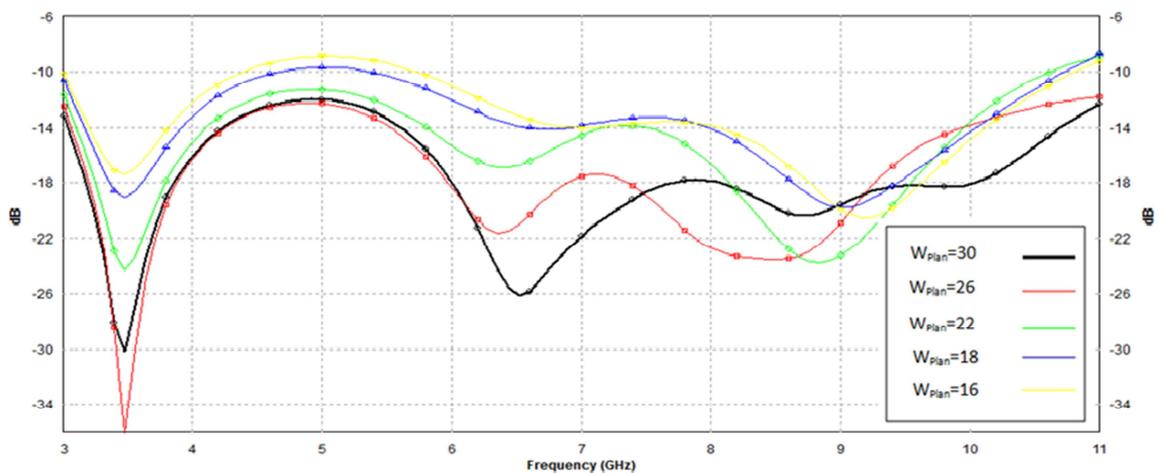


Figure 3.7. $|S_{11}|$ de l'antenne octogonale pour différentes valeurs de W_{plan} en mm.

D'après les résultats obtenus dans la figure 3.7, l'adaptation se détériore pour les valeurs $W_{\text{plan}} < 22\text{mm}$.

D'après l'étude de l'antenne octogonale on constate qu'elle répond au cahier des charges (tableau 3.1).

3.4 Antenne circulaire

3.4.1 Description de l'antenne

L'antenne de base est une antenne circulaire, qui est utilisée dans plusieurs applications ultra large bande pour sa simple géométrie et la largeur de sa bande [33].

Cette antenne (figure.3.8) de dimensions $L_{sub} \times W_{sub}$, elle est alimentée par une ligne micro-ruban de longueur L et de largeur W , son impédance est de 50Ω . ses derniers sont résumées dans le tableau 3.4. Le substrat utilisé est le FR4 ($\epsilon_r=4.4$, épaisseur= 1.6mm et $\tan\delta=0.0013$).

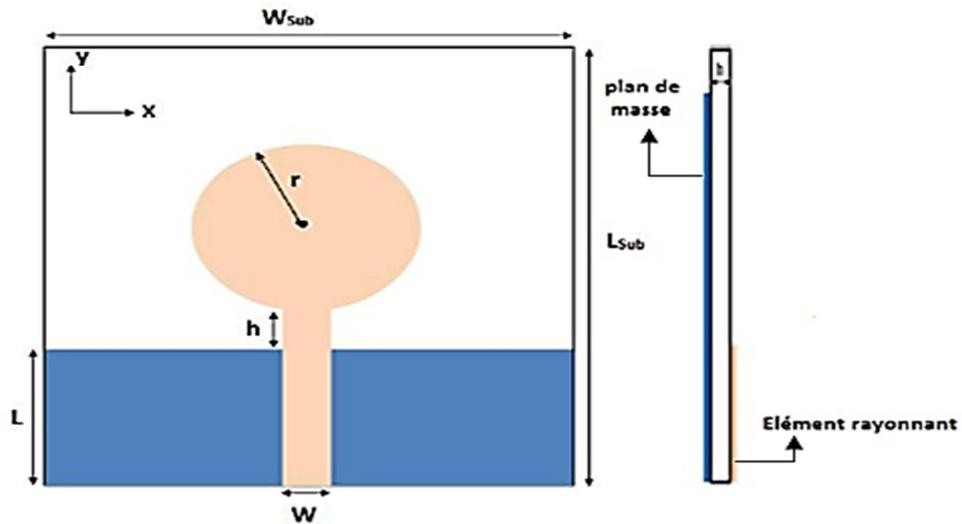


Figure 3.8. Géométrie de l'antenne circulaire étudiée.

L_{sub}	W_{sub}	L	W	h	r
50mm	42mm	20mm	3mm	0.4mm	9mm

Tableau 3.3 .Les dimensions de l'antenne circulaire étudiée.

3.4.2 Résultats de simulation

La figure suivante montre le modèle de simulation IE3D de l'antenne circulaire.

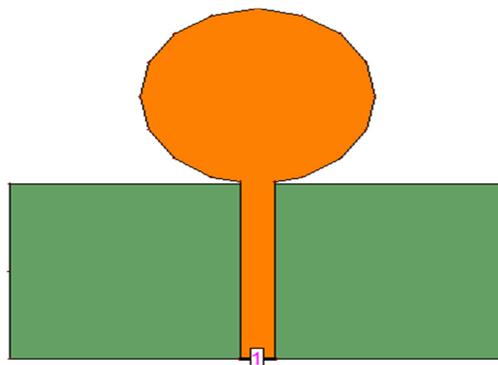


Figure 3.9. Modèle de simulation de l'antenne circulaire IE3D.

La figure 3.10 illustre l'évolution du module du coefficient de réflexion en (dB).

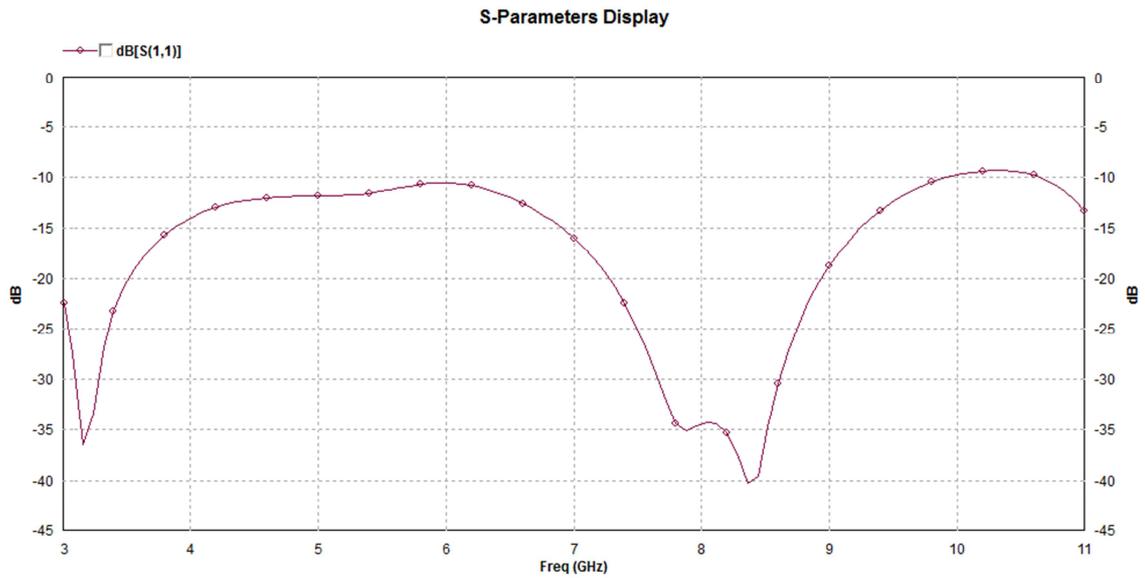


Figure 3.10. $|S_{11}|$ de l'antenne circulaire.

La variation du module du coefficient de réflexion en fonction de la fréquence de cette structure, représentée sur la figure 3.10, montre une large bande passante qui s'étale de 3GHz à 9.9GHz ($BP_{relative}=106\%$).

La figure 3.11 illustre les diagrammes de rayonnement de l'antenne circulaire dans le plan E ($\varphi=0^\circ$) et le plan H ($\varphi=90^\circ$) pour trois différentes fréquences 3.1GHz, 6.8GHz et 10.6GHz.

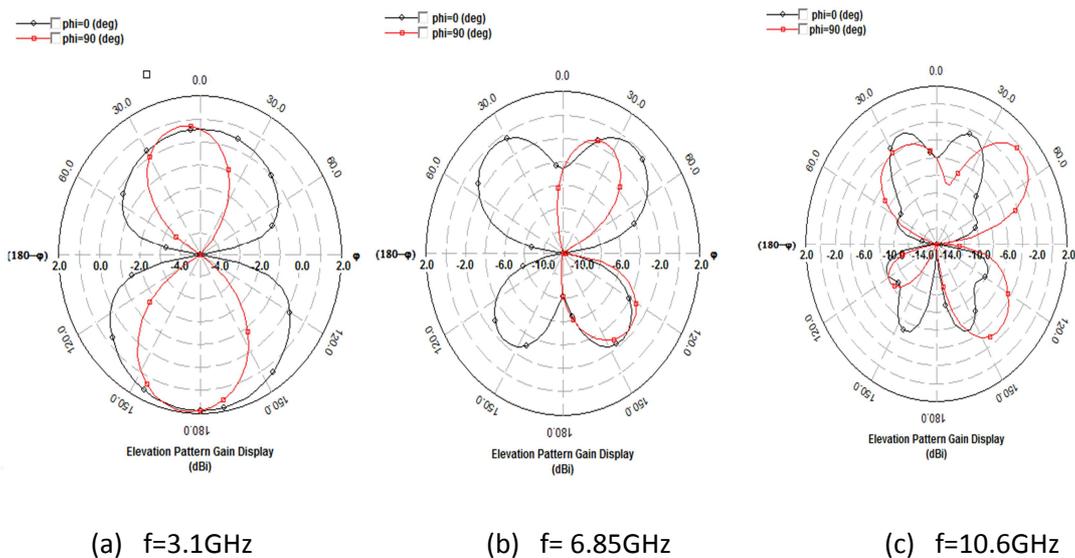


Figure 3.11. Diagrammes de rayonnement aux trois fréquences de l'antenne circulaire.

Les diagrammes de rayonnement obtenus en simulation sont relativement similaires aux trois fréquences sélectionnées avec une légère allure multi lobes pour la fréquence 10.6GHz.

3.4.3 Etudes paramétriques

Dans le but d'optimiser la bande passante, plusieurs études paramétriques sur l'antenne circulaire seront présentées et discutées. Seules les performances en termes d'adaptation seront considérées. Dans un premier lieu, l'étude portera uniquement sur deux paramètres : h (distance entre l'élément rayonnant et le plan de masse) et r (rayon de l'élément rayonnant). En second lieu, une encoche va être insérée et une étude paramétrique sera réalisée sur ses deux paramètres L_s et W_s . Pour les études paramétriques de cette partie, un seul paramètre est changé à la fois en gardant les autres dimensions inchangées (tableau 3.3).

3.4.3.a Paramètre h

Dans cette partie, l'influence de la distance ' h ' va être étudiée, elle représente la distance entre l'élément rayonnant circulaire et le plan de masse. Les coefficients de réflexion $|S_{11}|$ en fonction de la fréquence pour les valeurs de $h=0, 0.1, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6$ mm sont illustrés dans la figure 3.12.

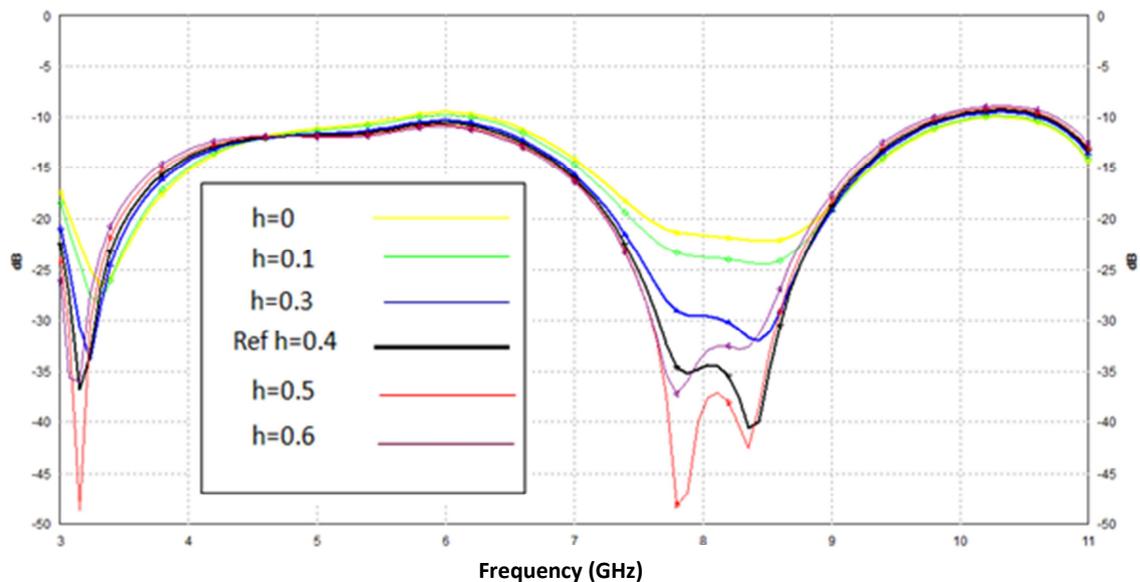


Figure 3.12. $|S_{11}|$ de l'antenne circulaire pour différentes valeurs de h en mm.

D'après la figure 3.12 une bonne adaptation est assurée sur la bande (3.1-10) GHz et elle se détériore à partir de 10GHz pour toutes les valeurs de h supérieur à 0mm. Par ailleurs, une valeur optimale $h=0.3\text{mm}$ se distingue parmi les autres, pour son bon compromis adaptation/bande passante. Cette valeur sera retenue pour la prochaine étude au lieu de la valeur initiale du tableau 3.3 ($h=0.4\text{mm}$).

3.4.3.b Paramètre r

Cette étude consiste à varier le paramètre r qui est le rayon de l'élément rayonnant. Les coefficients de réflexion $|S_{11}|$ en fonction de la fréquence pour les valeurs de $r = 7, 8, 9, 10$ et 11mm sont illustrés dans la figure 3.13.

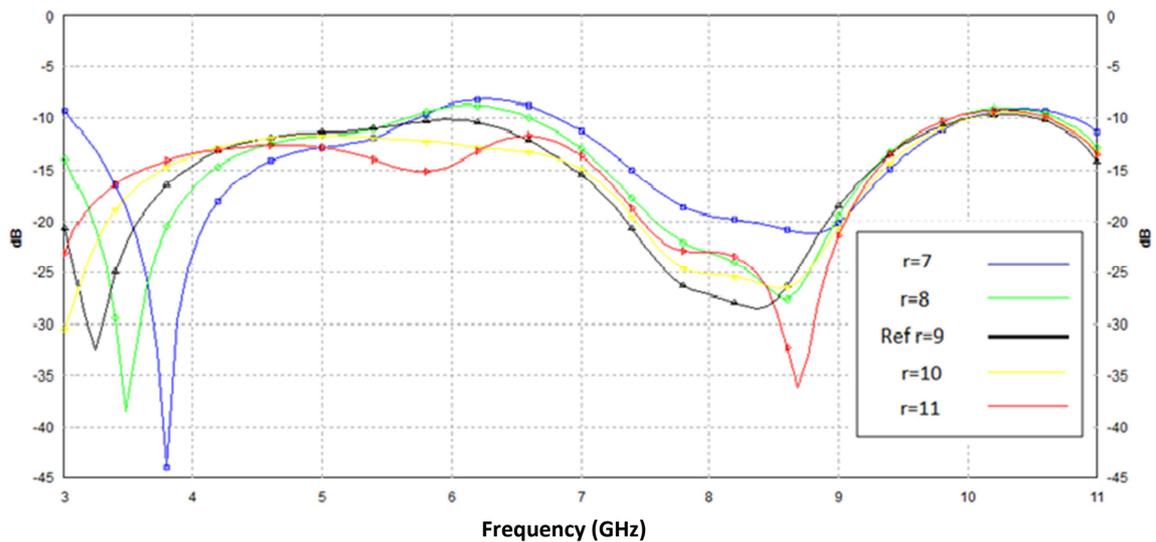


Figure 3.13. $|S_{11}|$ de l'antenne circulaire pour différentes valeurs de r en mm.

Les résultats de la figure 3.13 montre que pour r inférieur à 9mm l'adaptation se détériore et qu'une valeur optimale est enregistrée pour $r=10\text{mm}$ qui sera retenue pour les prochaines études.

3.4.3.c Paramètre W_s

La présence d'une encoche dans le plan de masse de l'antenne octogonale [32] a améliorée ses performances. La même technique a été utilisée pour l'antenne circulaire (figure3.14) afin de voir la possibilité de corriger la désadaptation enregistrée à partir de 9.9GHz. La première étude consiste à faire varier W_s en fixant $L_s=3\text{mm}$.

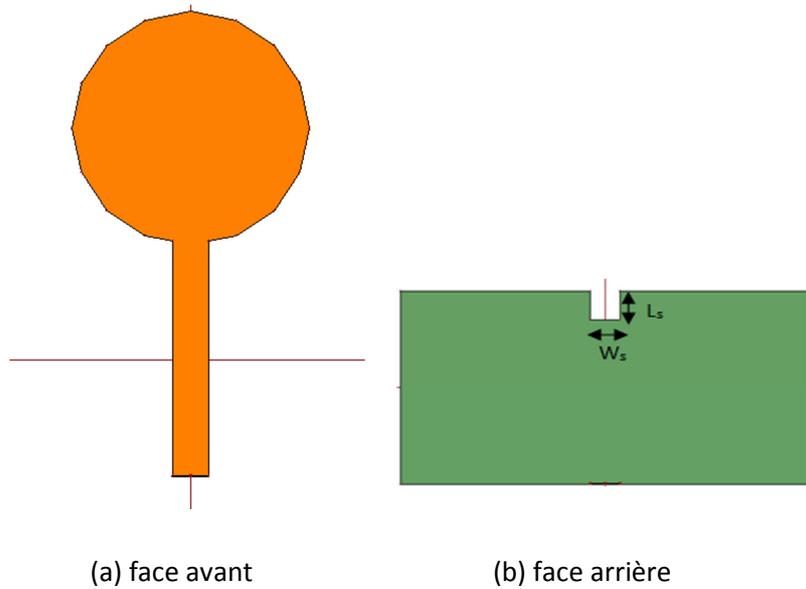


Figure 3.14. Modèle de simulation de l'antenne circulaire avec encoche.

Les coefficients de réflexion $|S_{11}|$ en fonction de la fréquence pour les valeurs de $W_s = 0, 3, 6$ et 9mm sont illustrés dans la figure 3.15.

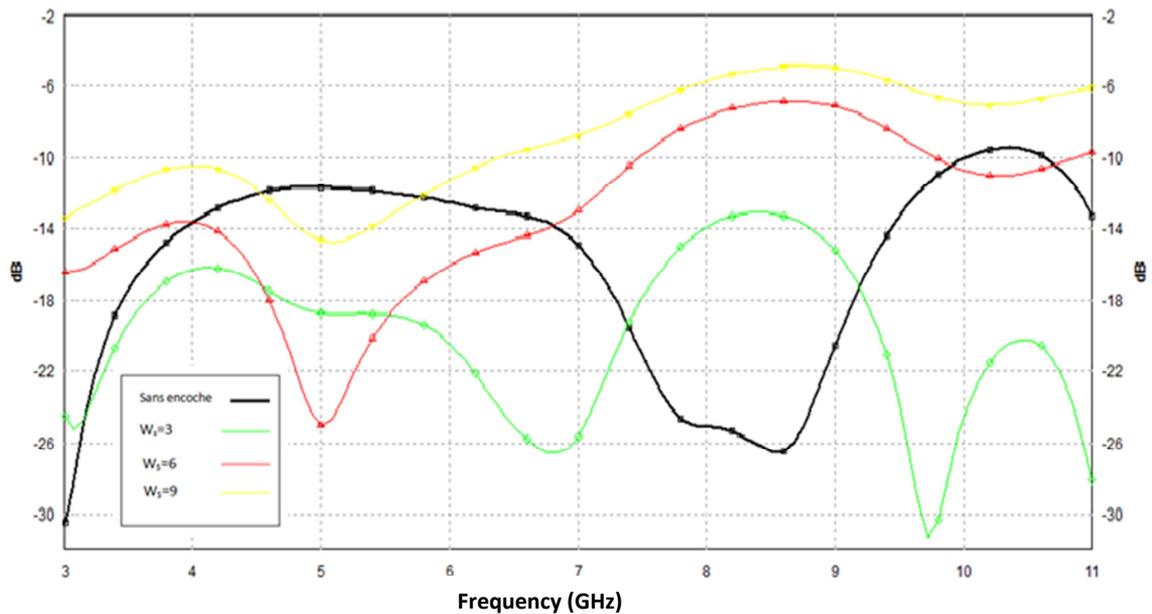


Figure 3.15. $|S_{11}|$ de l'antenne circulaire pour différentes valeurs de W_s en mm.

D'après cette étude (figure 3.15), nous constatons que la largeur de la bande passante s'améliore en général avec l'insertion de l'encoche. Cependant, pour des valeurs W_s supérieures à 6mm l'adaptation commence à se détériorer. Pour cette raison, la valeur $W_s=3\text{mm}$ est retenue pour la prochaine étude.

3.4.3.d Paramètre L_s

Dans cette étude, le paramètre W_s est fixé à 3mm tandis que le paramètre L_s est varié. Les coefficients de réflexion $|S_{11}|$ en fonction de la fréquence pour les valeurs de $L_s=0, 3, 6$ et 9mm sont illustrés dans la figure 3.16.

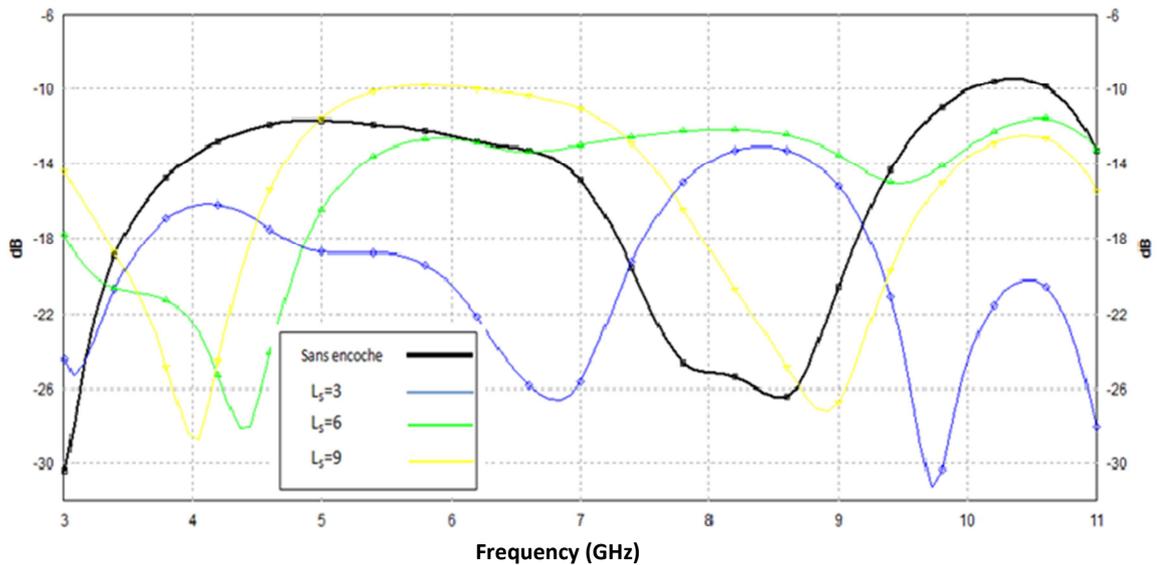


Figure 3.16. $|S_{11}|$ de l'antenne circulaire pour différentes valeurs de L_s en mm.

Nous constatons que l'encoche améliore l'adaptation de l'antenne, pour $L_s=3$ et 6mm. Pour $L_s=9$ mm, le $|S_{11}|$ se détériore à partir de 5GHz.

D'après les études paramétriques effectuées, l'antenne qui répond le plus au cahier des charges est celle avec une encoche dont les dimensions sont résumées dans le tableau 3.4.

L_{sub}	W_{sub}	L	W	h	r	W_s	L_s
50mm	42mm	20mm	3mm	0.3mm	10mm	3mm	3mm

Tableau 3.4. Dimensions de l'antenne retenue.

La figure 3.17 illustre le coefficient de réflexion de l'antenne circulaire initiale sans encoche avec les dimensions du tableau 3.3 comparé à celui de l'antenne optimisée avec encoche avec les dimensions du tableau 3.4.

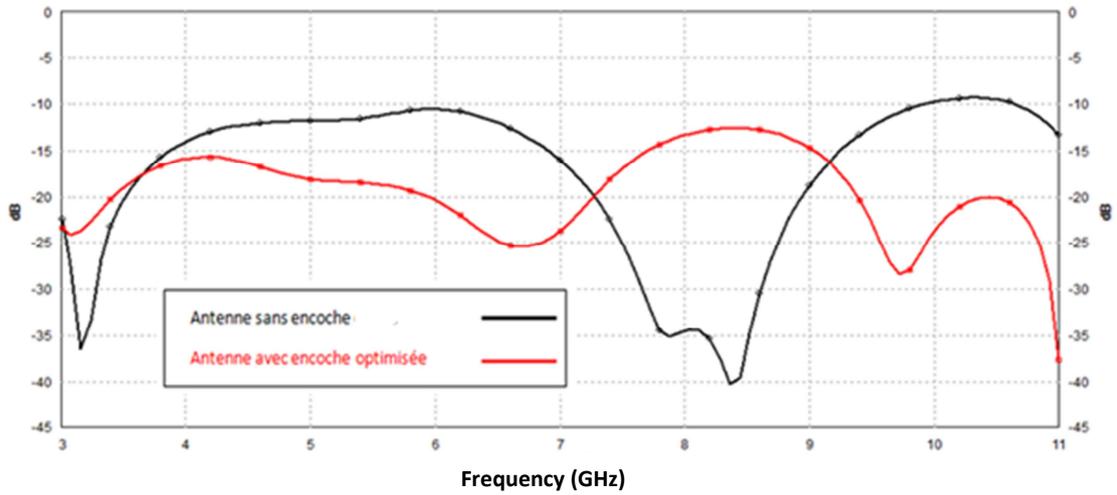
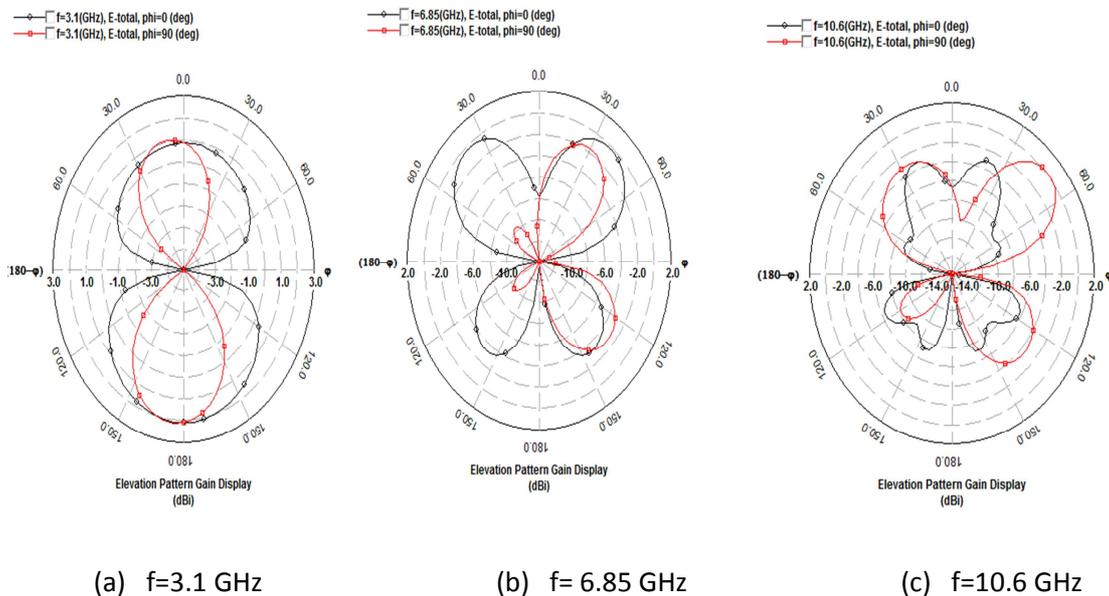


Figure 3.17. $|S_{11}|$ de l'antenne circulaire sans encoche et de l'antenne circulaire avec encoche optimisée.

La figure 3.17 montre une amélioration considérable des performances en termes d'adaptation et bande passante.

La figure 3.18 illustre les diagrammes de rayonnement de l'antenne circulaire optimisée avec encoche dans le plan E ($\varphi=0$) et le plan H ($\varphi=90^\circ$) pour trois différentes fréquences 3.1GHz, 6.8GHz et 10.6GHz, respectivement.



(a) $f=3.1$ GHz

(b) $f=6.85$ GHz

(c) $f=10.6$ GHz

Figure 3.18. Diagrammes de rayonnement aux trois fréquences de l'antenne circulaire.

Les diagrammes de rayonnement obtenus en simulation sont relativement similaires aux trois fréquences sélectionnées avec une légère allure multi lobes pour la fréquence 10.6GHz.

Pour ses bonnes performances, l'antenne circulaire avec encoche optimisée a été retenue pour la phase réalisation et mesure.

3.5 Réalisation et mesure

3.5.1 Réalisation de l'antenne

L'antenne retenue pour la réalisation est celle de la figure 3.14, dont les dimensions sont données dans le tableau 3.4.

Afin de réaliser l'antenne sur le substrat FR4 ($\epsilon_r=4.4$, épaisseur=1.6mm et $\tan\delta=0.0013$) disponible au laboratoire DIC, nous avons généré les masques de la figure 3.19.



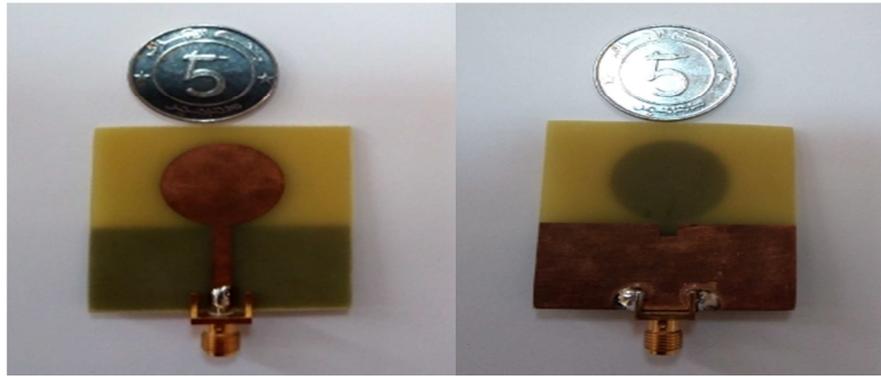
(a) Face avant



(b) Face arrière

Figure 3.19. Typons de l'antenne à réaliser.

L'antenne a été réalisée par l'entreprise ALMITECH située à Alger. Une fois l'antenne récupérée, nous avons soudé un connecteur de type SMA à l'endroit de l'excitation de l'antenne, comme le montre la figure 3.20.



(a) face avant

(b) face arrière

Figure 3.20. Photographie de l'antenne réalisée.

3.5.2 Résultats de mesure

Les mesures du coefficient de réflexion ont été réalisées avec l'analyseur de réseau KEYSIGHT PNA Network Analyzer N5224A (10MHz -43.5GHz) disponible au CDTA (Centre de Développement de Technologie Avancé), (figure 3.21).

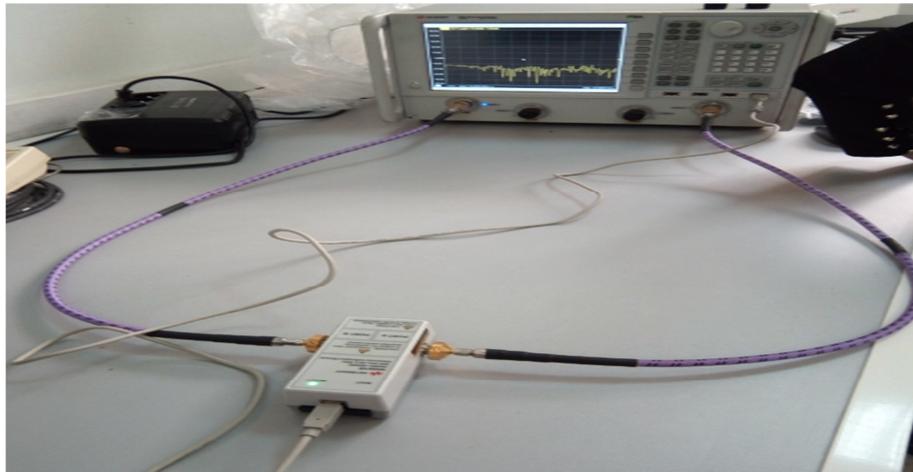


Figure 3.21. Analyseur de réseau en étape de calibration.

Une fois l'analyseur de réseau est calibré de façon automatique [3-11] GHz par un dispositif de calibration (figure3.21), l'antenne a été connectée au port 1 comme le montre la figure 3.22.

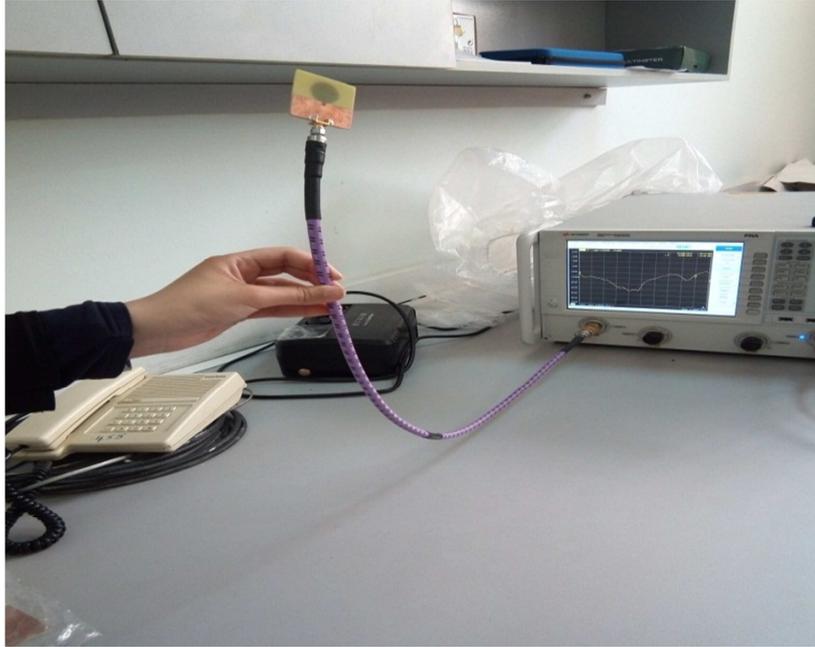


Figure 3.22. Antenne connectée à l'analyseur de réseau par un câble coaxial.

Les résultats de la mesure obtenus confrontés aux résultats de simulation sont présentés dans la figure 3.23.

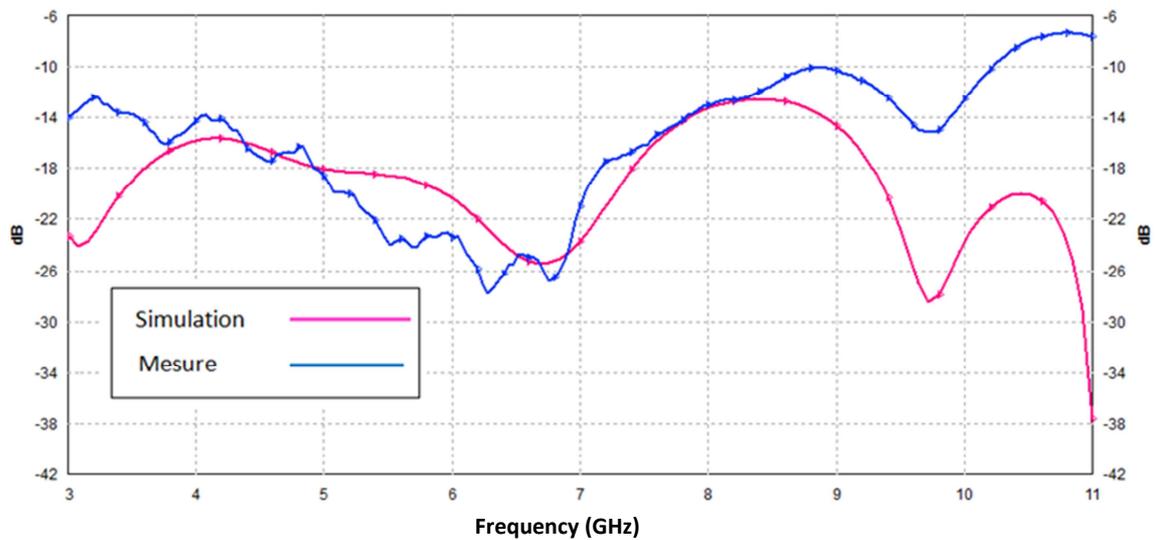


Figure 3.23. $|S_{11}|$ simulé et mesuré de l'antenne.

La variation du coefficient de réflexion mesuré en fonction de la fréquence montre que l'antenne réalisée est bien ultra large bande (3.1-10.2) GHz. Ceci valide le bon fonctionnement fréquentiel de l'antenne réalisée.

Toutefois, certaines différences entre simulation et mesure peuvent être observées dans quelques bandes de fréquences. Ceci peut être expliqué par les incertitudes de

réalisation et de la mesure. La taille du substrat considérée infinie dans la simulation peut également être la source de ce léger décalage.

3.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons simulé et étudié deux types d'antennes ultra large bande : octogonale et circulaire. Pour ses bonnes performances, l'antenne circulaire avec une encoche dans le plan de masse a été retenue pour réalisation. Les résultats de mesure obtenus, similaires à ceux prédits par la simulation électromagnétique, confirment le bon fonctionnement de l'antenne réalisée. Enfin, cette antenne sera considérée comme brique de base pour la construction du système antenne pour application MIMO.

Chapitre 4 Conception et simulation d'un système antennaire pour application MIMO

4.1 Introduction

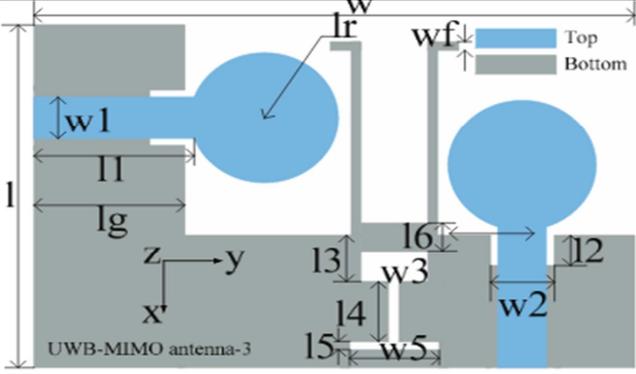
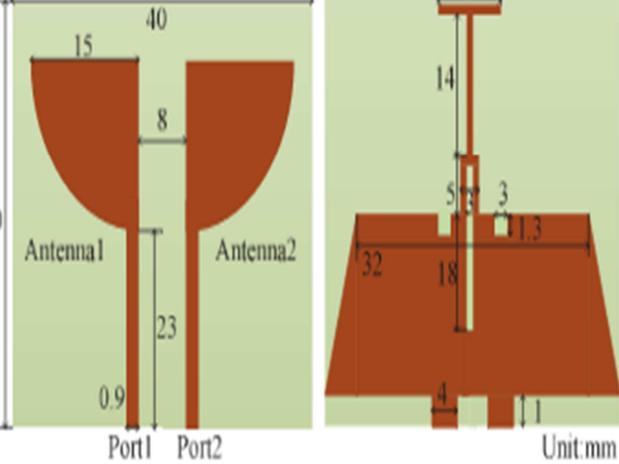
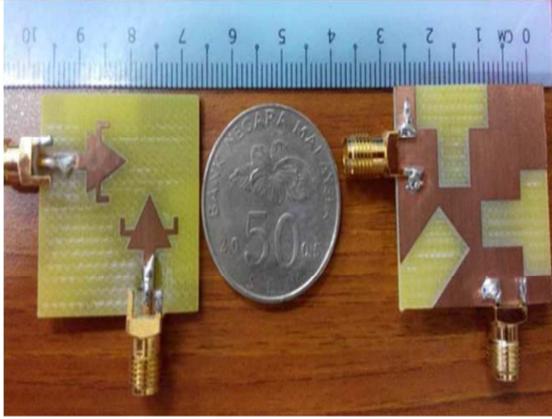
Dans ce chapitre, nous étudions la problématique d'intégration de deux antennes dans le même terminal mobile, et les techniques permettant d'améliorer l'isolation entre antennes. Tout d'abord, un état de l'art sur les techniques d'isolation MIMO entre antennes planaire ULB est exposé. Puis un système multi-antennaire à deux antennes est construit à base de l'antenne ULB conçue dans le troisième chapitre. Plusieurs techniques d'isolation entre ces deux antennes ont été testées. La technique de ligne de neutralisation plus variation angulaire a été sélectionnée pour ses bonnes performances en termes d'adaptation, bande passante et d'isolation.

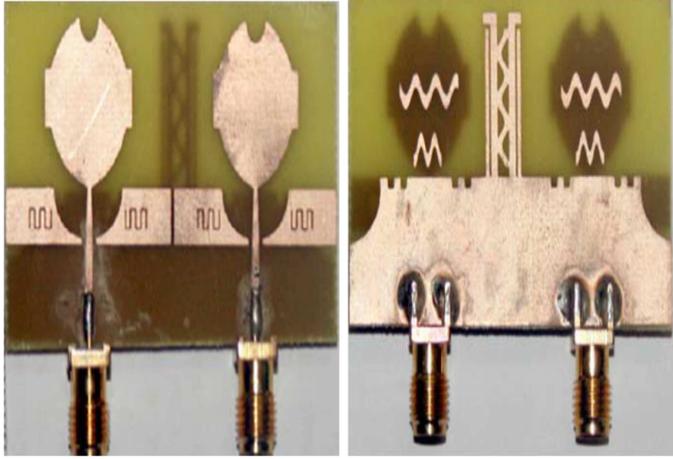
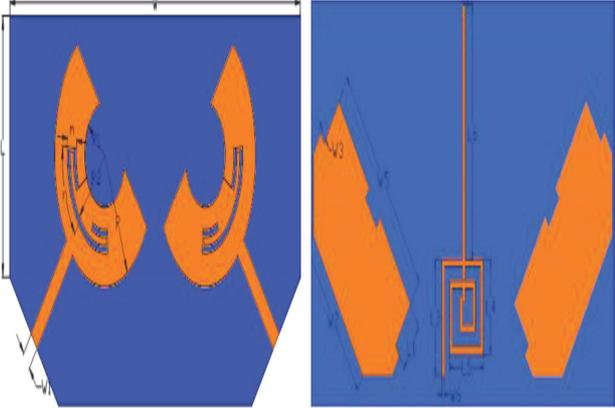
4.2 Etat de l'art sur les techniques d'isolation MIMO entre antennes planaires ULB

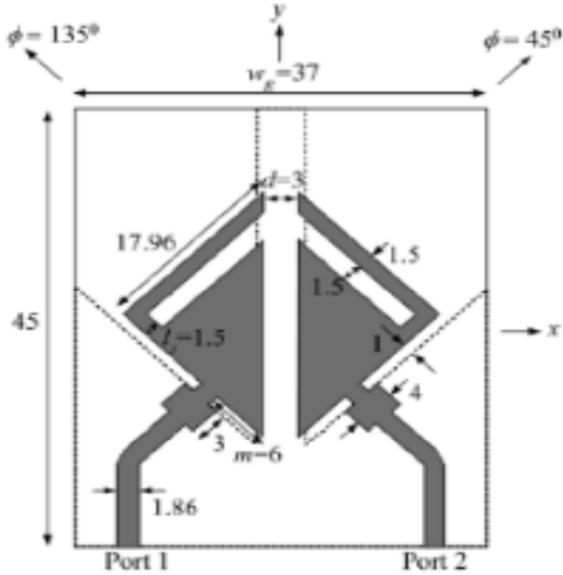
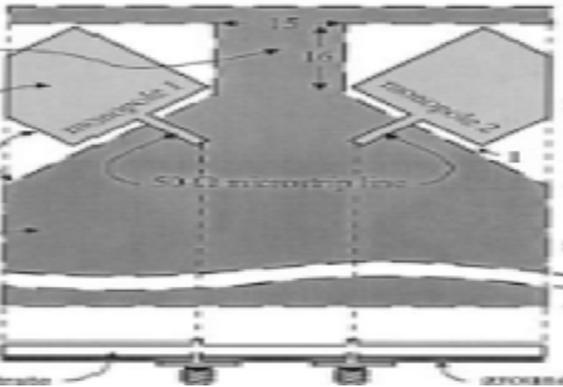
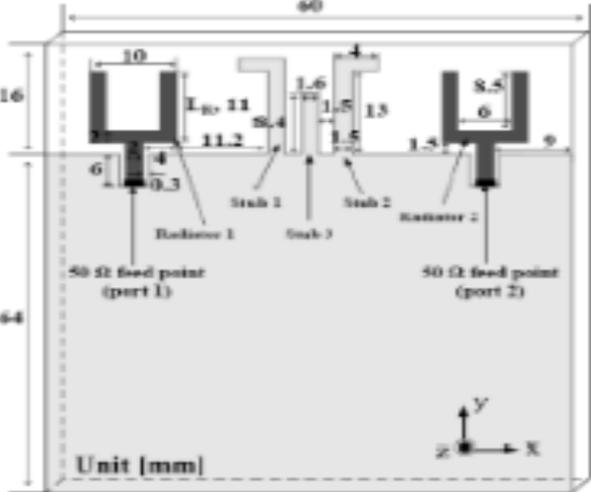
Les technologies multi-antennaires ont permis l'évolution des systèmes de communication conventionnels. Néanmoins, les avantages de performances de ces technologies, sont accompagnés par des défis techniques significatifs.

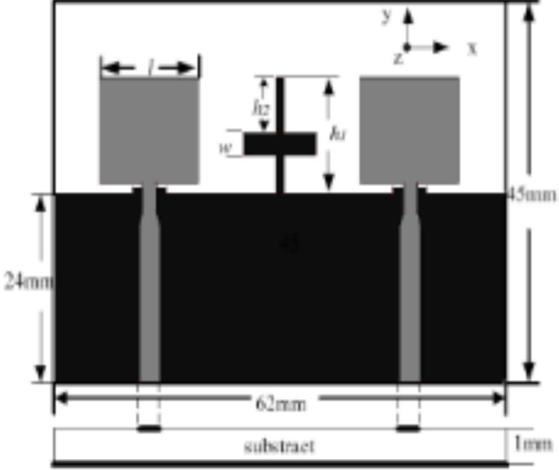
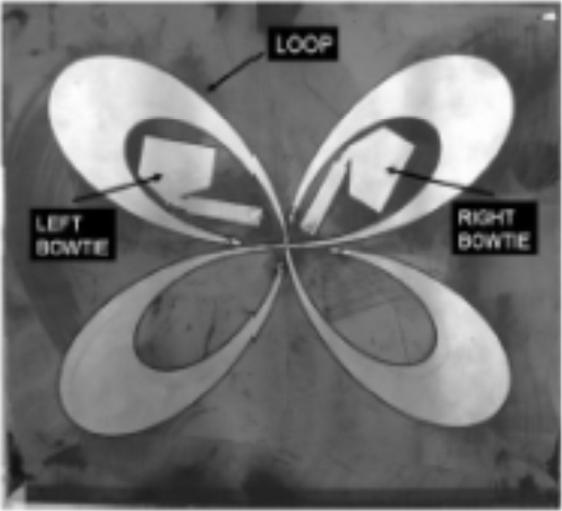
Les antennes dans les systèmes MIMO souffrent d'un couplage mutuel important, et d'une faible isolation qui limitent leurs performances, de plus la taille globale d'un terminal mobile force les antennes à être faiblement espacées.

Le tableau 4.1 présente quelques travaux de recherche publiés dans la littérature sur les techniques d'isolation entre antennes planaires dans les systèmes MIMO ULB.

Technique	Aperçu du système	caractéristiques	Ref
Insertion d'une fente et d'un stub 1		<p>52x35mm²</p> <p>$S_{12} < -18.6\text{dB}$</p> <p>BP : 3.28-12GHz</p>	[33]
Insertion d'une fente et d'un stub 2		<p>50x40mm²</p> <p>$S_{12} < -18\text{dB}$</p> <p>BP=3.1-10.6 GHz</p>	[34]
Insertion d'une fente et d'un stub + déplacement de l'élément rayonnant		<p>30x30mm²</p> <p>$S_{12} < -10\text{dB}$</p> <p>BP : 3-7 GHz</p>	[35]

<p>Découplage entre antennes 1</p>		<p>40x31mm² S₁₂ < -20dB BP : 3-10GHz</p>	<p>[36]</p>
<p>Découplage entre antennes 2</p>		<p>30x28mm² S₁₂ < -20dB BP : 2.85 -11.79 GHz</p>	<p>[37]</p>
<p>Utilisation d'une ligne méandre entre les antennes</p>		<p>55x26mm² S₁₂ < -10dB BP : 3-10 GHz</p>	<p>[38]</p>

<p>Utilisation de la variation spatiale et angulaire 1</p>		<p>37x45mm² $S_{12} < -20\text{dB}$ BP : 3.1-5 GHz</p>	<p>[39]</p>
<p>Utilisation de la variation spatiale et angulaire 2</p>		<p>48x80mm² $S_{12} < -20\text{dB}$ BP : 2.3-7.7 GHz</p>	<p>[40]</p>
<p>Insertion d'un stub de forme quelconque.</p>		<p>60x64mm² $S_{12} < -20\text{dB}$ BP : 2.27-10.2 GHz</p>	<p>[41]</p>

<p>Insertion d'un stub sous forme de croix</p>		<p>62x45 mm² $S_{12} < -18\text{dB}$ BP : 3.3-10.5 GHz</p>	<p>[42]</p>
<p>Insertion d'un stub sous forme de 'y' inversé</p>		<p>85x35mm² $S_{12} < -10\text{dB}$ BP : 2-12 GHz</p>	<p>[43]</p>
<p>Utilisation des éléments hétérogènes</p>		<p>125x125 mm² $S_{12} < -15\text{dB}$ BP : 3.6-8.5 GHz</p>	<p>[44]</p>

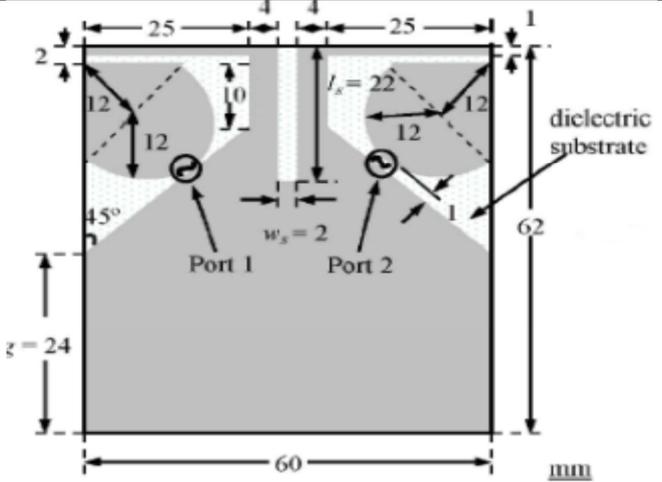
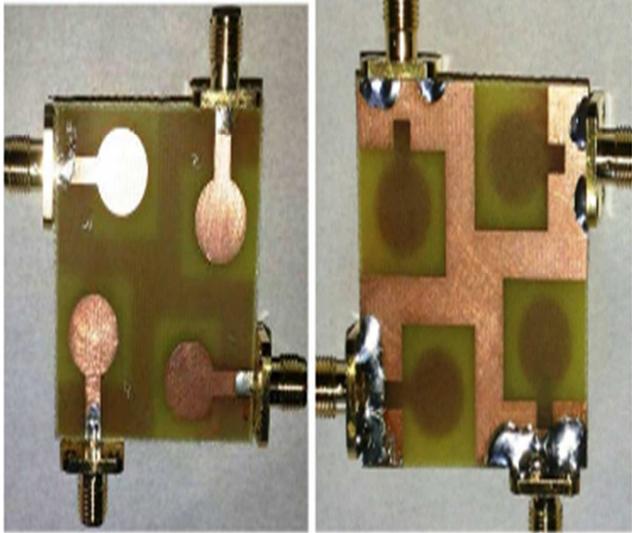
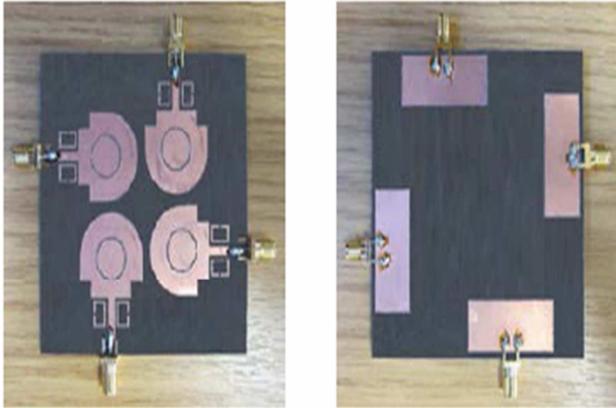
<p>Utilisation d'un plan de masse modifié</p> <p><i>defected ground structure (DGS)</i></p>		<p>62x60mm²</p> <p>$S_{12} < -20\text{dB}$</p> <p>BP : 3.1-5.8 GHz</p>	<p>[45]</p>
<p>Variation angulaire et prolongement de plan de masse</p>		<p>40x40 mm²</p> <p>$S_{12} < -15\text{dB}$</p> <p>BP=3-10.6 GHz</p>	<p>[46]</p>
<p>Insertion d'un résonateur multi-mode au milieu des antennes</p>		<p>78x78mm²</p> <p>$S_{12} < -20\text{dB}$</p> <p>BP=2.96-11.56GHz</p>	<p>[47]</p>

Tableau 4.1. Quelques techniques d'isolation MIMO entre antennes ULB en technologie planaire.

Le tableau 4.1 résume quelques techniques d'isolation pour les systèmes MIMO ULB. Dans ce chapitre nous allons essayer d'appliquer quelques-unes de ces techniques pour la conception de notre système à deux antennes. L'isolation requise doit être supérieure à 10 dB ($|S_{12}| < -10\text{dB}$).

4.3 Système antennaire ultra large bande à deux antennes

Le système antennaire étudié dans cette partie utilise comme brique de base l'antenne réalisée dans le chapitre précédent. Les deux antennes partagent le même plan de masse et ont les mêmes dimensions (voir tableau 3.4). Elles sont séparées initialement par une distance $d=22\text{mm}$, la taille du système est donc de $88 \times 45\text{mm}^2$ (figure 4.1.).

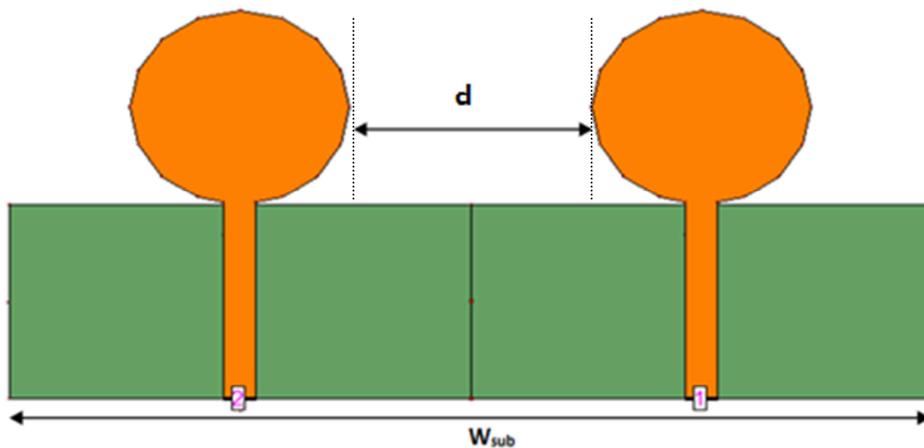


Figure 4.1. Modèle de simulation IE3D du système à deux antennes ULB.

Pour des raisons de symétrie de la structure considérée, seulement deux paramètres S seront affichés, le $|S_{11}|$ pour le coefficient de réflexion, et le $|S_{12}|$ pour l'isolation entre antennes. L'isolation est considérée comme acceptable si $|S_{12}| < -10\text{ dB}$.

La figure 4.2 illustre les résultats de simulation en $|S_{11}|$ et $|S_{12}|$ de la configuration à deux antennes de la figure 4.1.

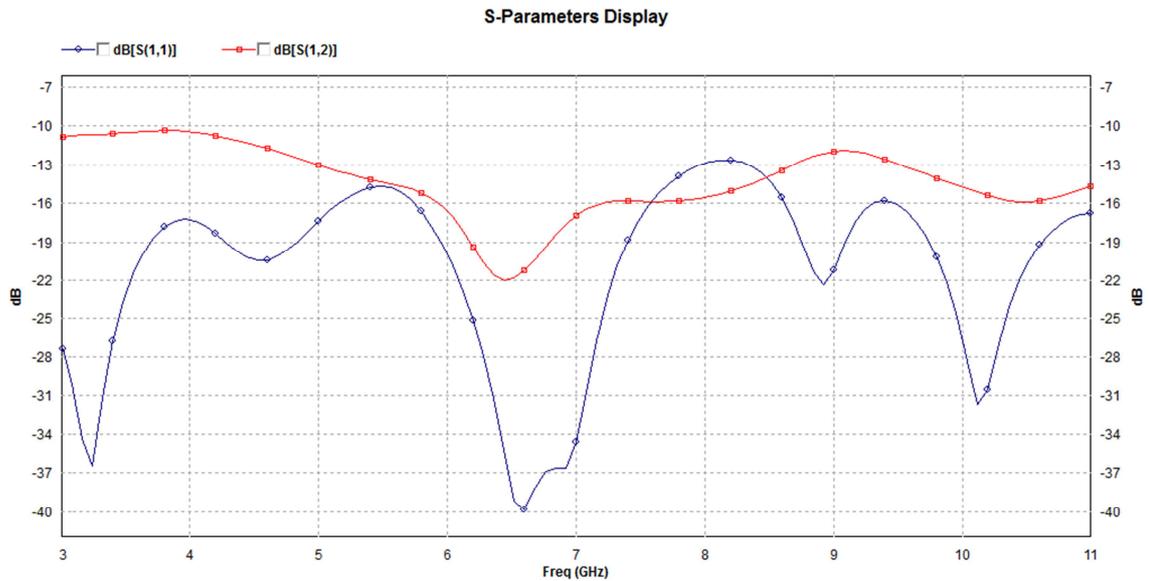


Figure 4.2. $|S_{11}|$ et $|S_{12}|$ du système de la figure 4.1.

La simulation a permis d'aboutir à des résultats satisfaisants concernant les performances en isolation. En termes d'adaptation, le coefficient de réflexion du système à deux antennes est resté similaire à celui d'une seule antenne. Ceci peut être expliqué par l'écart important entre antennes.

Cependant, pour une intégration dans un Smartphone par exemple, la taille globale du système à deux antennes de la figure 4.1 est encombrante. Pour remédier à cet inconvénient, des études paramétriques seront présentées par la suite.

4.3.1 Etudes paramétriques du système antennaire à deux antennes

Dans cette partie, des études paramétriques sur les dimensions du plan de masse ainsi que sur la distance entre les deux antennes seront présentées. L'objectif est de réduire la taille globale du système précédant sans dégrader l'adaptation, la bande passante et l'isolation entre antennes. Deux paramètres clés ont été optimisés : la distance entre les antennes (d) et la longueur du plan de masse (W_{sub}).

4.3.1.a Paramètre d

Les figures 4.3 et 4.4 présentent l'effet de la variation du paramètre d , qui est la distance entre les deux antennes, sur le coefficient de réflexion ($|S_{11}|$) et l'isolation ($|S_{12}|$) respectivement.

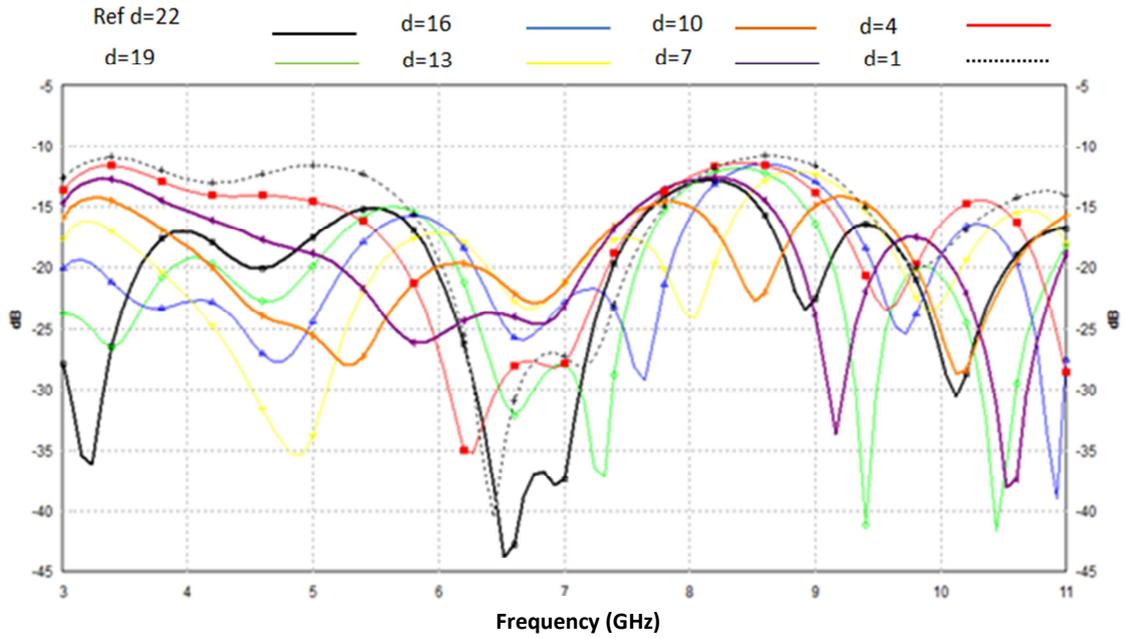


Figure 4.3. $|S_{11}|$ du système antenne pour différentes valeurs de d en mm.

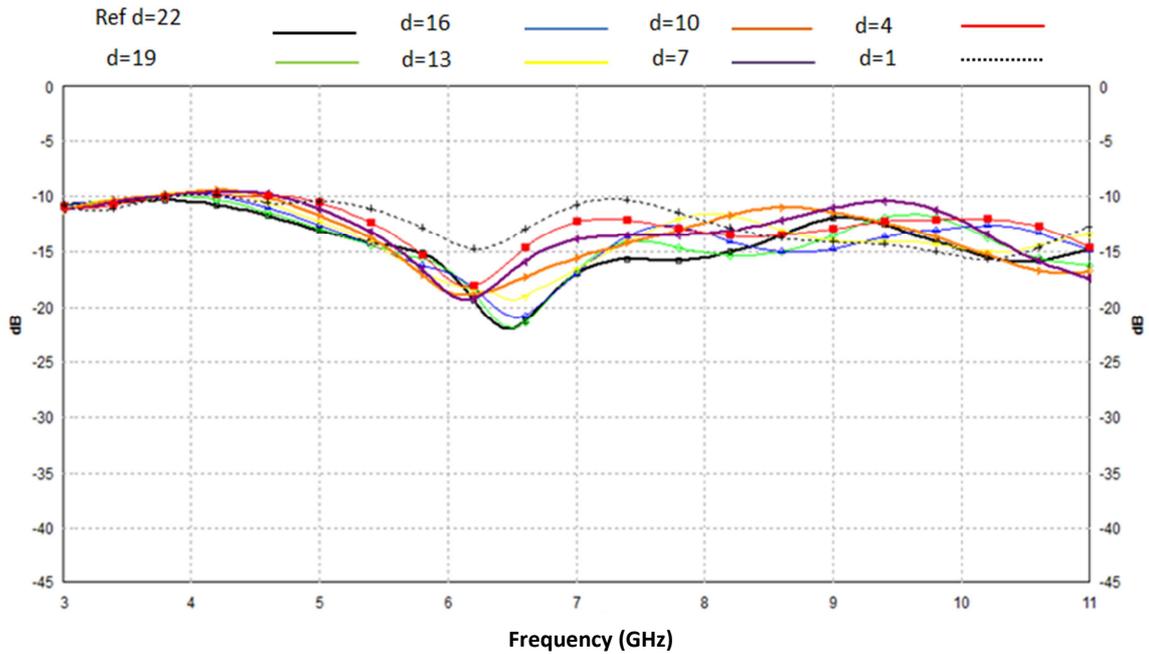


Figure 4.4. $|S_{12}|$ du système antenne pour différentes valeurs de d en mm.

D'après les résultats présentés dans les figures 4.3 et 4.4, on constate que la variation du paramètre d influe sur l'adaptation, mais la bande passante reste inchangée ($|S_{11}| < -10$ dB). En basses fréquences (jusqu'à 5.5GHz), le paramètre d influe peu sur l'isolation tandis qu'à partir de 5.6GHz l'influence de d sur cette performance est plus visible. La valeur $d=4$ mm représente la valeur limite pour laquelle l'isolation est gardée supérieure

à 10dB sur toute la bande. Ainsi, cette valeur, représentant le meilleur compromis taille/isolation, sera retenue pour la prochaine étude.

4.3.1.b Paramètre W_{sub}

Dans cette partie, on s'intéresse à l'influence du paramètre W_{sub} sur l'adaptation et l'isolation du système. Le paramètre d est cependant fixé à 4 mm.

Les figures 4.5 et 4.6 présentent les coefficients de réflexion du système antennaire $|S_{11}|$ et l'isolation $|S_{12}|$ pour différentes valeurs de $W_{sub}=46, 50, 54, 58, 62, 66$ mm.

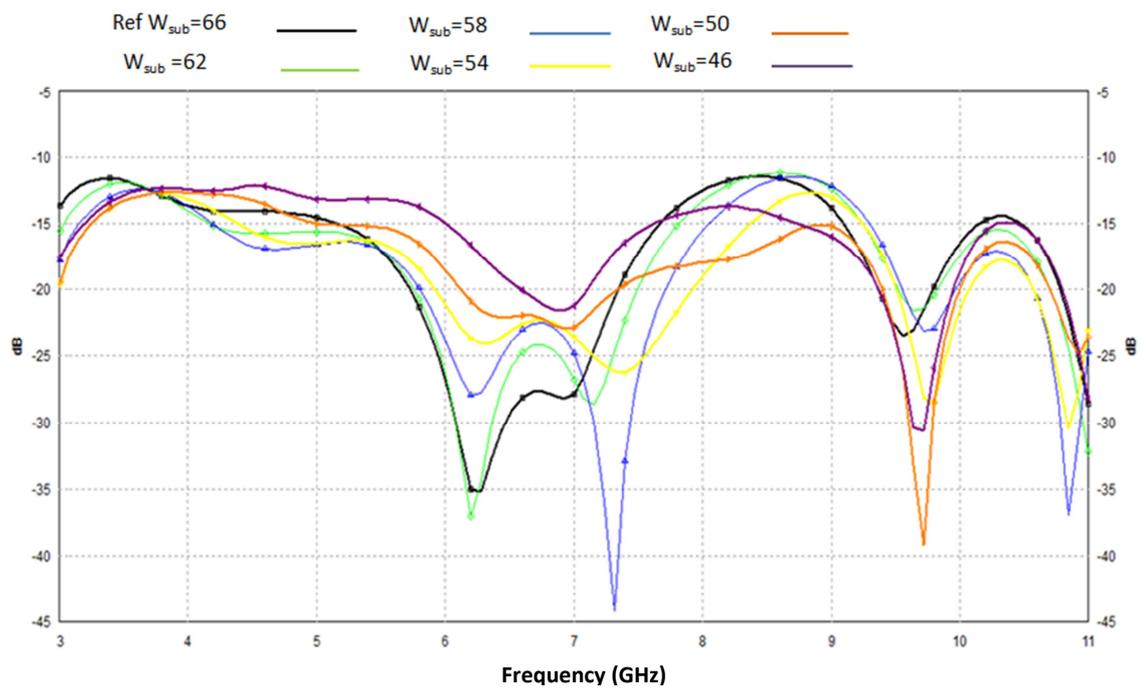


Figure 4.5. $|S_{11}|$ du système antennaire pour différentes valeurs de W_{sub} en mm.

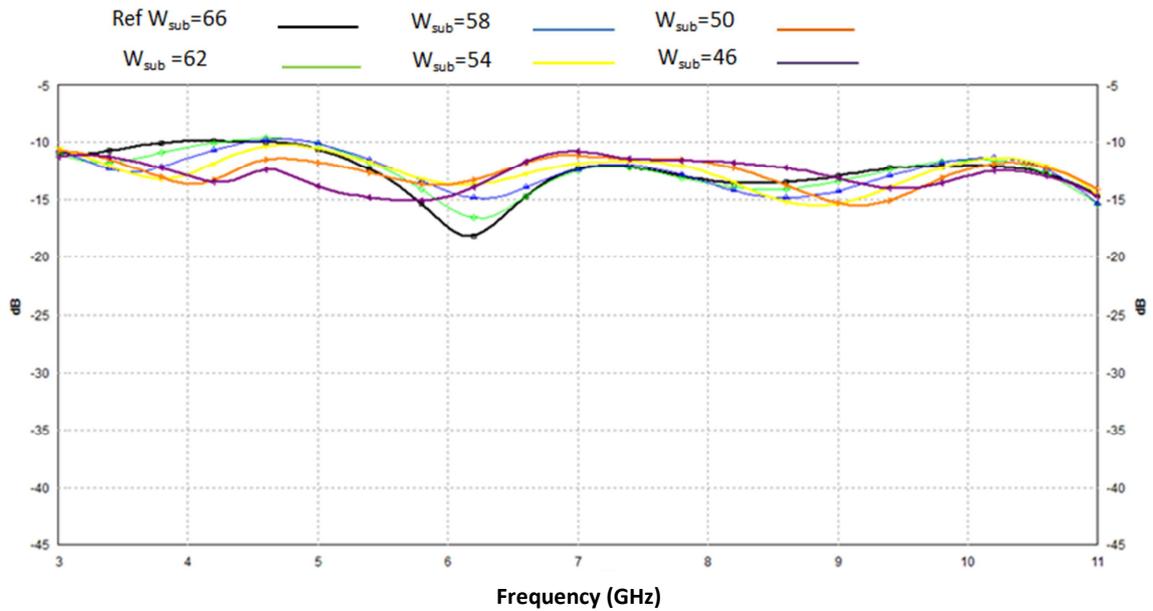


Figure 4.6. $|S_{12}|$ du système antennaire pour différentes valeurs de W_{sub} en mm.

D'après les études paramétriques effectuées les valeurs retenues pour notre système sont : $d=4\text{mm}$ et $W_{sub} = 46\text{mm}$. Ces deux valeurs engendrent le système antennaire possédant le meilleur compromis en termes de taille/adaptation et isolation.

Afin d'optimiser d'avantage l'isolation du système précédant, plusieurs techniques vont être testées et discutées.

4.4 Techniques d'isolation

Dans cette partie plusieurs techniques d'isolation vont être appliquées au système antennaire précédant afin de voir la possibilité d'améliorer l'isolation jusqu'à 15dB.

4.4.1 Ligne de séparation

Afin d'améliorer l'isolation de notre système antennaire qui initialement supérieure à 10dB dans toute la bande d'intérêt, une ligne de séparation est insérée entre les deux antennes (voir figure 4.7). Cette ligne de longueur 20mm et de largeur 1mm est imprimée sur la face supérieure (face de l'élément rayonnant). Dans un premier temps, cette ligne n'est pas connectée au plan de masse, puis dans un deuxième temps, elle va être connectée.

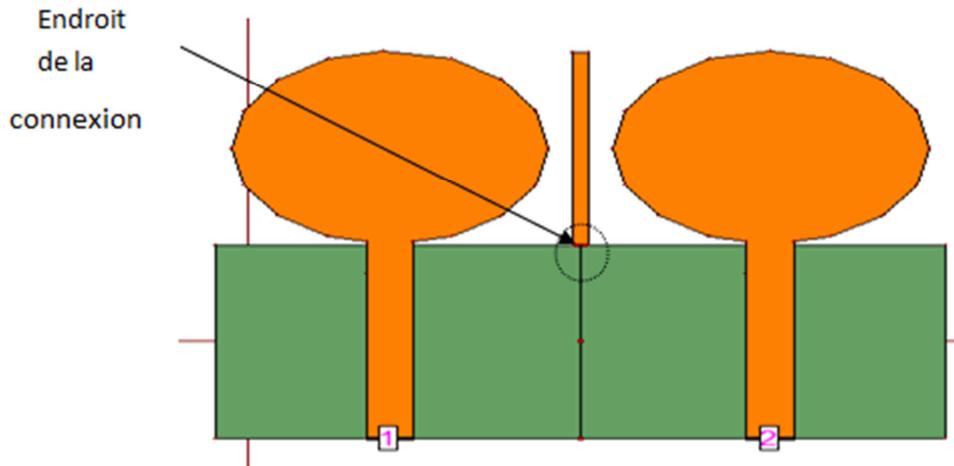


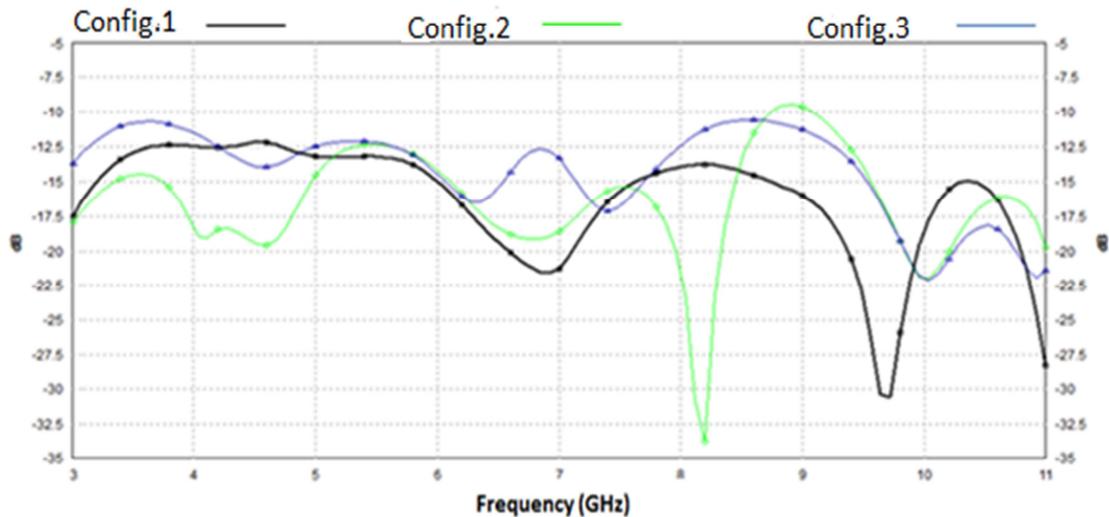
Figure 4.7. Technique d'isolation avec ligne de séparation.

La figure 4.8 illustre les coefficients de réflexion et l'isolation de trois configurations suivantes:

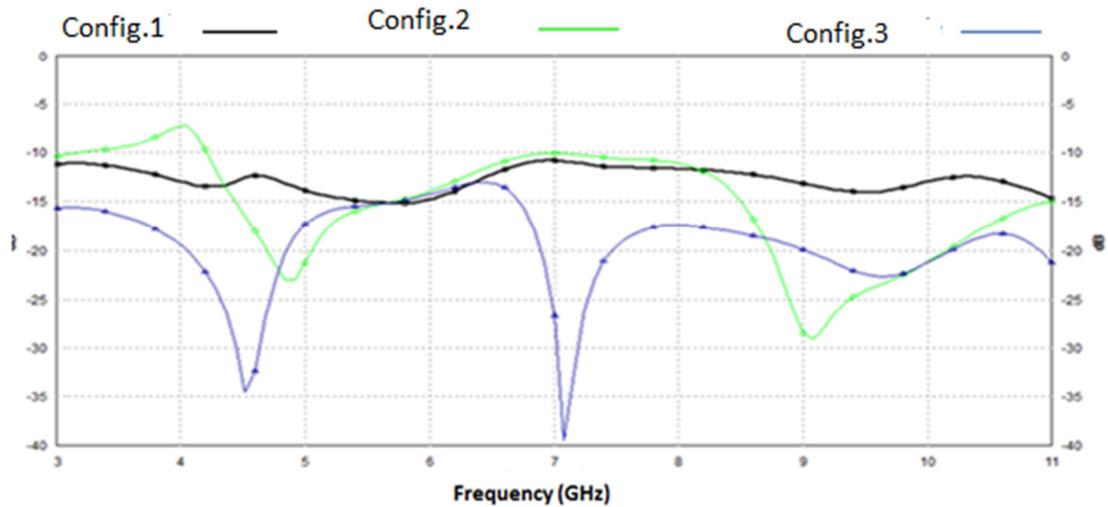
Config.1: système de référence sans technique.

Config.2: système avec la ligne de séparation sans connexion au plan de masse.

Config.3: système avec la ligne de séparation avec connexion au plan de masse.



(a) $|S_{11}|$ en dB



(b) $|S_{12}|$ en dB

Figure 4.8. $|S_{11}|$ et $|S_{12}|$ des trois configurations.

D'après les résultats de la figure 4.8, on constate que la config. 3 (ligne de séparation avec connexion) apporte une amélioration considérable de l'isolation. En effet, cette dernière est supérieure à 15 dB pour les bandes : [3-5.3] GHz et [6.9-11] GHz.

D'autres simulations (non présentées dans ce document) ont été réalisées : soit en jouant sur la longueur/largeur de la ligne de séparation soit en mettant deux lignes de séparation. Les résultats de ces simulations n'ont pas abouti à un meilleur résultat que celui de la config.3.

4.4.2 Insertion de fentes dans le plan de masse

Dans cette partie, différentes fentes vont être insérées dans le plan de masse du système antennaire [33] pour voir la possibilité d'améliorer l'isolation. Une configuration intéressante a été trouvée (voir figure 4.9) comportant 5 fentes de dimensions différentes (voir tableau 4.2).

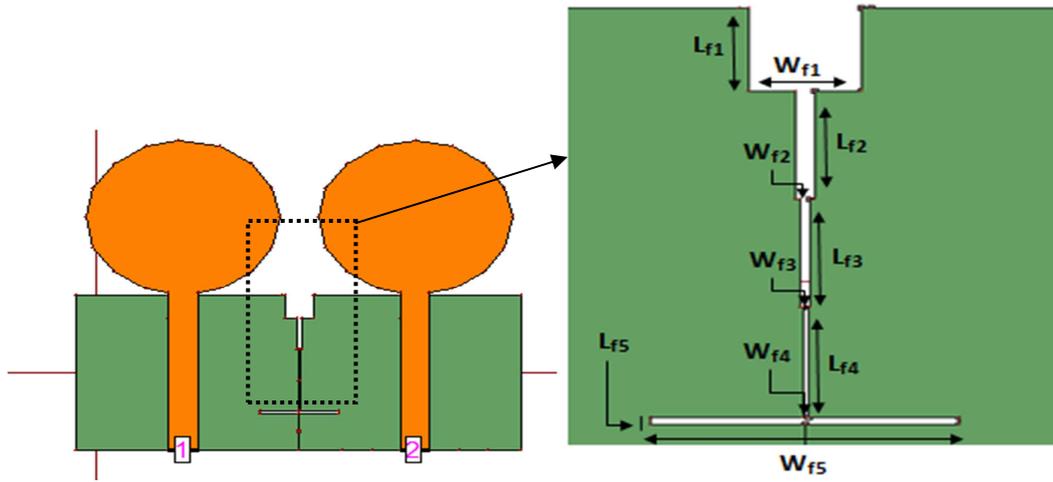
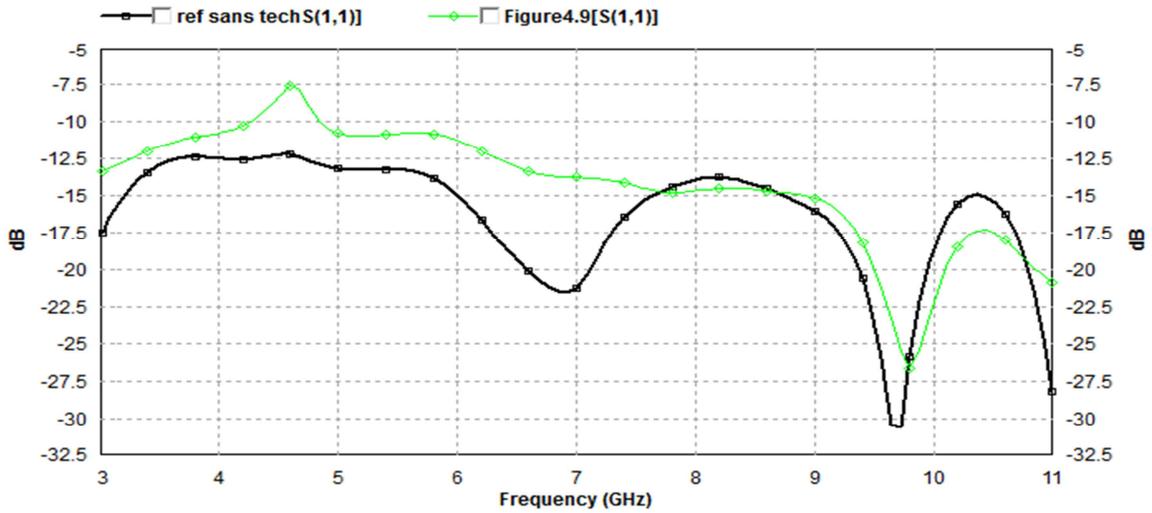


Figure 4.9. Technique d'isolation avec insertion de fentes.

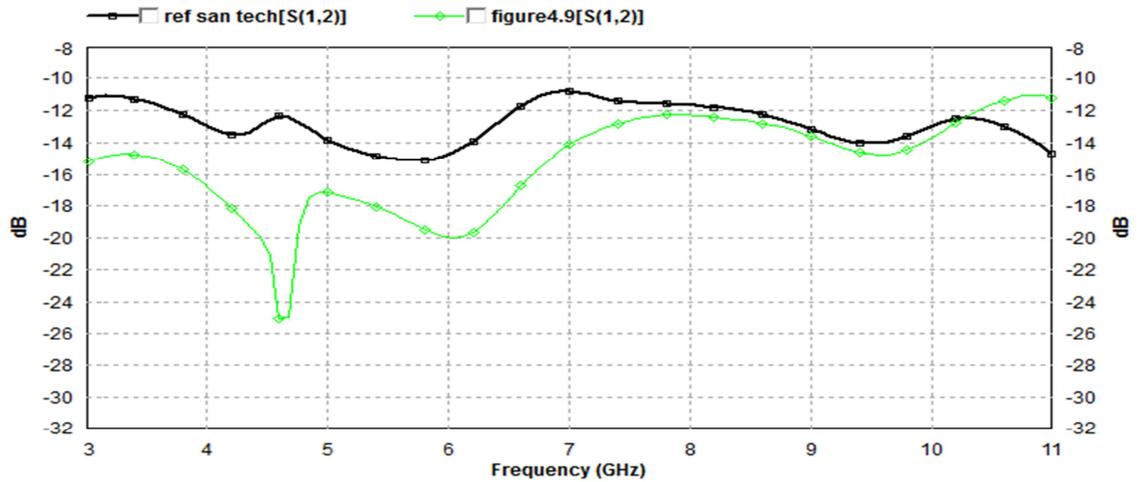
Fente ₁	Fente ₂	Fente ₃	Fente ₄	Fente ₅
$W_{f1}=3\text{mm}$	$W_{f2}=0.5\text{mm}$	$W_{f3}=0.25\text{mm}$	$W_{f4}=0.125\text{mm}$	$W_{f5}=8.125\text{mm}$
$L_{f1}=3\text{mm}$	$L_{f2}=4\text{mm}$	$L_{f3}=4\text{mm}$	$L_{f4}=4\text{mm}$	$L_{f5}=0.25$

Tableau 4.2. Dimensions des fentes de la figure 4.9.

La figure 4.10 montre les coefficients de réflexion et l'isolation de la configuration de la figure 4.9 confrontés avec ceux de la configuration sans technique (notée ref).



(a) $|S_{11}|$ en dB



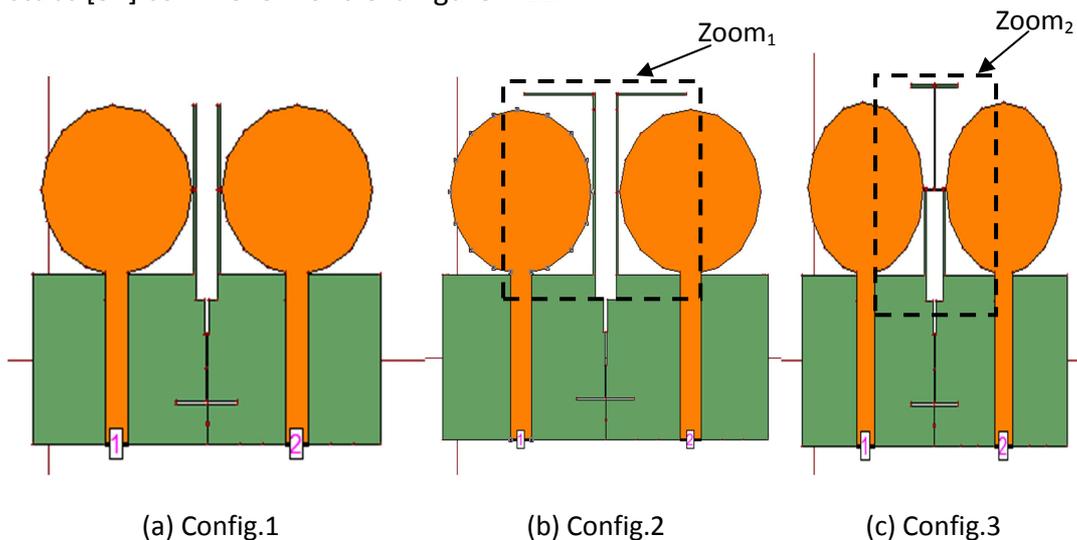
(b) $|S_{12}|$ en dB

Figure 4.10. $|S_{11}|$ et $|S_{12}|$ de la configuration de la figure 4.9 comparés à ceux du système sans technique.

Il est à noter que la configuration avec fentes (fig. 4.9), proposée dans cette partie, a apporté une amélioration de l'isolation et cela surtout pour les fréquences basses ([3-7 GHz]).

4.4.3 Insertion de fentes et stubs

Dans cette étude on a gardé la configuration de la figure 4.9 et on lui a inséré plusieurs stubs [34] comme le montre la figure 4.11.



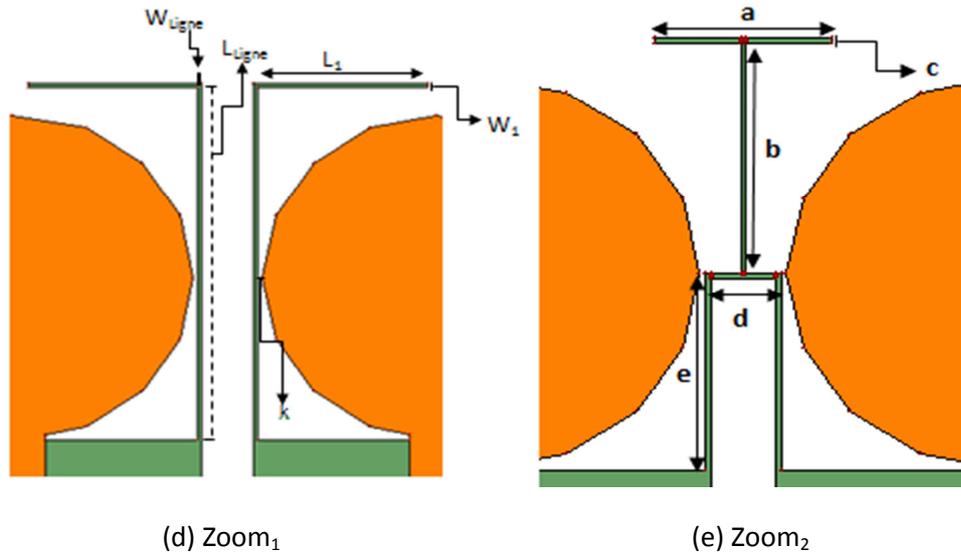


Figure 4.11. Techniques d'isolation avec insertion de fentes et de stubs.

Les dimensions des différents stubs de la configuration 2 et 3 sont résumées dans les tableaux 4.3 et 4.4.

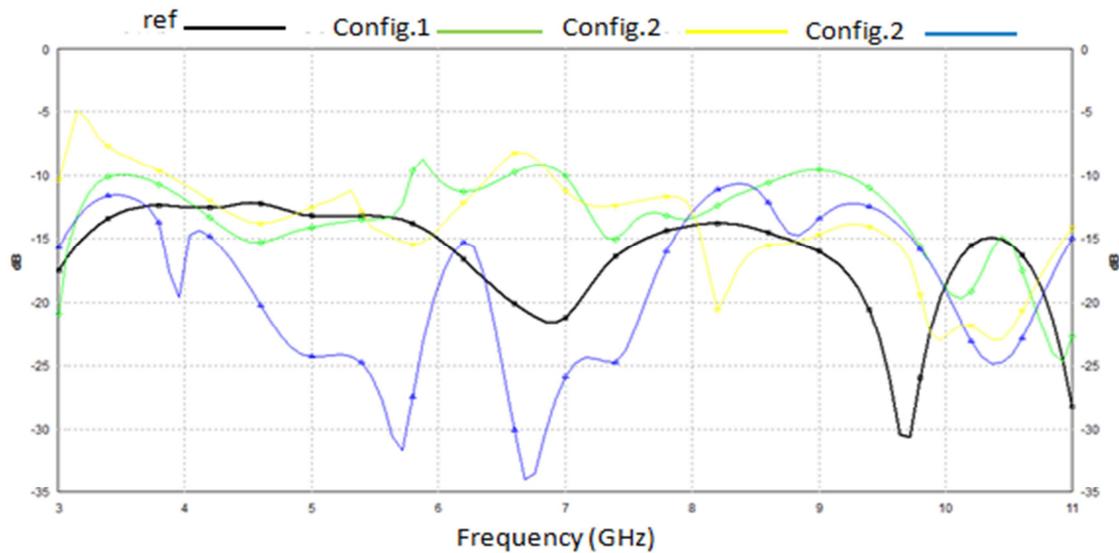
W_{Ligne}	L_{Ligne}	k	W_1	L_1
0.25mm	20mm	0.25mm	10mm	0.25mm

Tableau 4.3. Dimensions des stubs de la configuration 2.

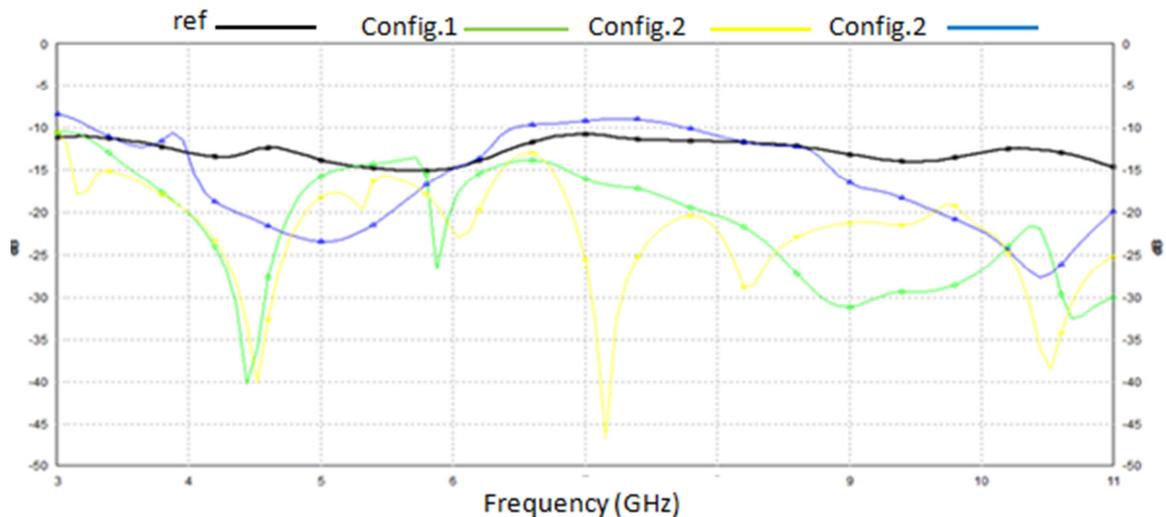
a	b	c	d	e
8.25mm	11.75mm	0.25mm	3mm	10mm

Tableau 4.4. Dimensions des stubs de la configuration 3.

La figure 4.12 illustre les coefficients de réflexion et l'isolation des trois configurations de la figure 4.11 comparés au système sans technique d'isolation (notée ref).



(a) $|S_{11}|$ en dB



(b) $|S_{12}|$ en dB

Figure 4.12. $|S_{11}|$ et $|S_{12}|$ des trois configurations de la figure 4.11.

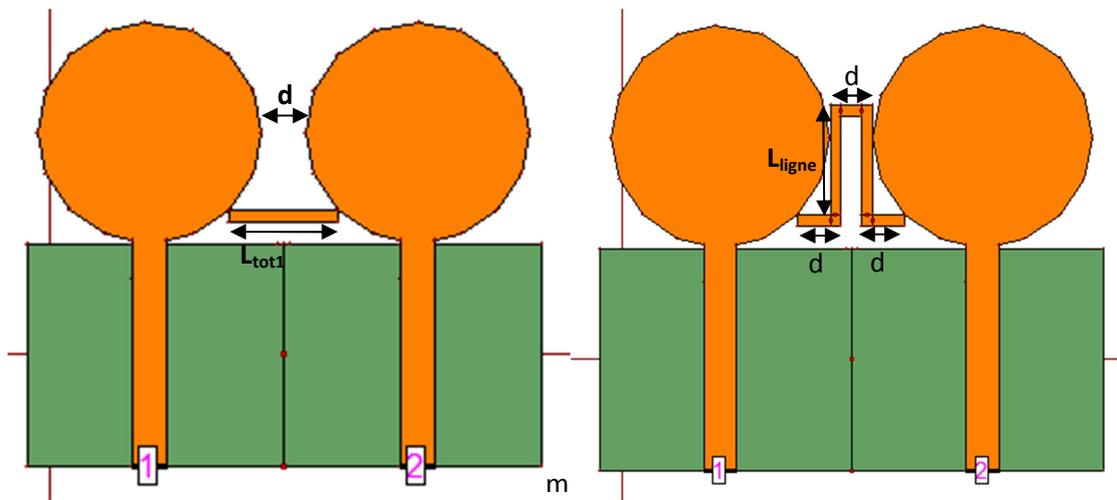
Les trois configurations ont permis d'améliorer globalement l'isolation entre antennes. Cependant, l'adaptation a été légèrement détériorée dans quelques bandes de fréquences.

4.4.4 Ligne de neutralisation

Afin d'améliorer d'avantage l'isolation de notre système antennaire qui est à -10dB dans la bande ULB, une ligne de neutralisation est insérée entre les deux antennes (figure 4.13). Cette ligne est imprimée sur la face supérieure (face de l'élément rayonnant) et elle connecte électriquement les deux antennes. L'idée de base de cette

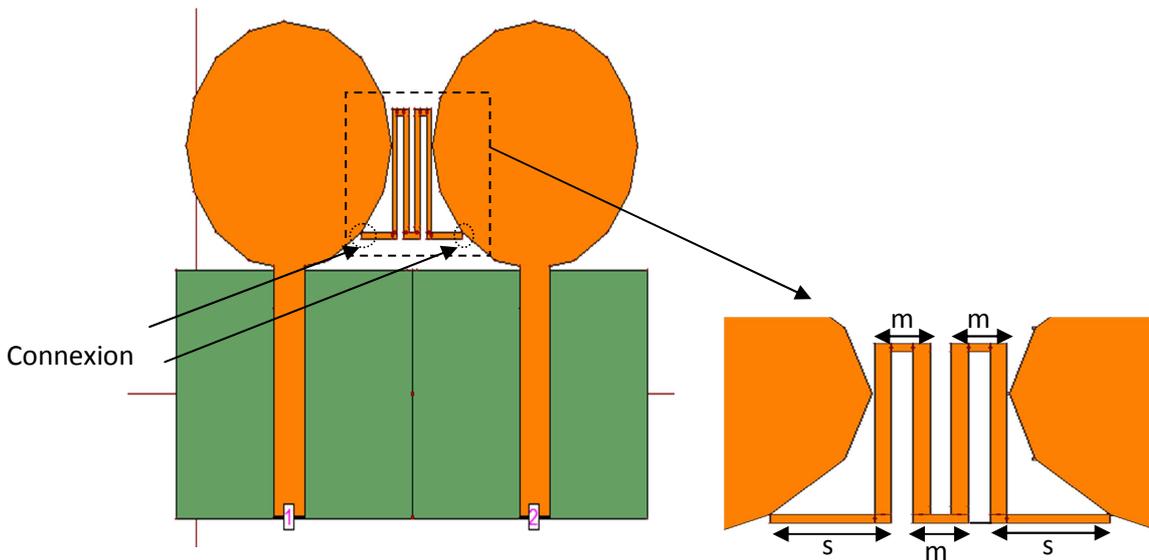
méthode est de compenser le couplage électromagnétique complexe naturellement existant entre les deux antennes proches par un effet de couplage opposé.

Plusieurs configurations de la ligne de neutralisation peuvent être considérées (voir figure 4.13), la distance entre les deux antennes est toujours constante et égale à $d=4\text{mm}$. Les longueurs totales des lignes de neutralisation (L_{tot}) pour les trois configurations de la figure 4.13 sont données respectivement : $L_{\text{tot1}} = 9.85\text{mm}$, $L_{\text{tot2}} = 33\text{mm}$ ($3d+2L_{\text{ligne}}$), $L_{\text{tot3}}=55.80\text{mm}$ ($2s+ 4L_{\text{ligne}}+3M$).



(a) Config.1

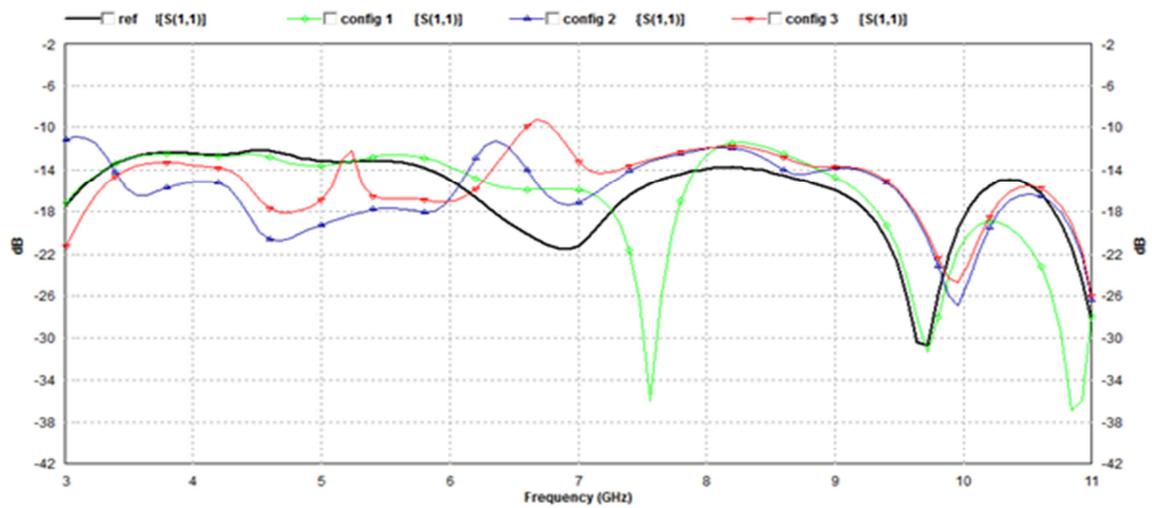
(b) Config.2



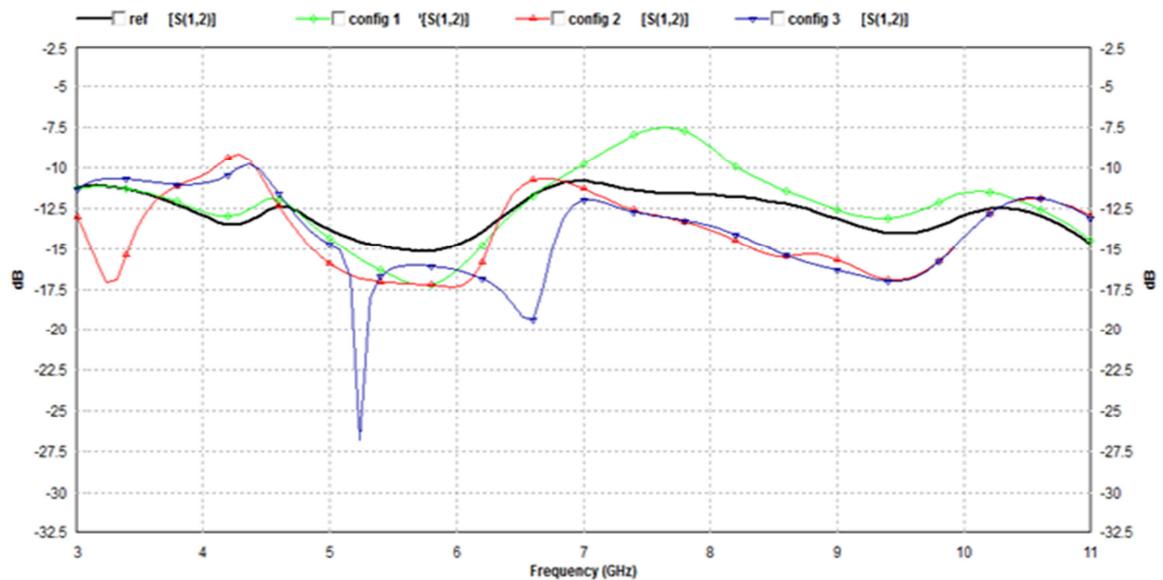
(c) Config.3

Figure 4.13. Techniques d'isolation avec ligne de neutralisation.

La figure 4.14 illustre les coefficients de réflexion et l'isolation des trois configurations de la figure 4.13 confrontés à ceux du système sans techniques (notée ref).



(a) $|S_{11}|$ en dB



(b) $|S_{12}|$ en dB

Figure 4.14. $|S_{11}|$ et $|S_{12}|$ des trois configurations de la figure 4.13.

D'après les résultats de la figure 4.14, on constate que la ligne de neutralisation a permis d'améliorer l'isolation pour quelques bandes de fréquences.

Dans la prochaine étape, une autre technique supplémentaire sera testée avec la ligne de neutralisation afin de voir la possibilité d'améliorer l'isolation dans toute la bande d'intérêt.

4.4.5 Ligne de neutralisation avec variation angulaire

Dans cette partie la technique de variation angulaire a été appliquée en plus de l'insertion d'une ligne de neutralisation. Deux configurations ont été proposées (voir figure 4.15).

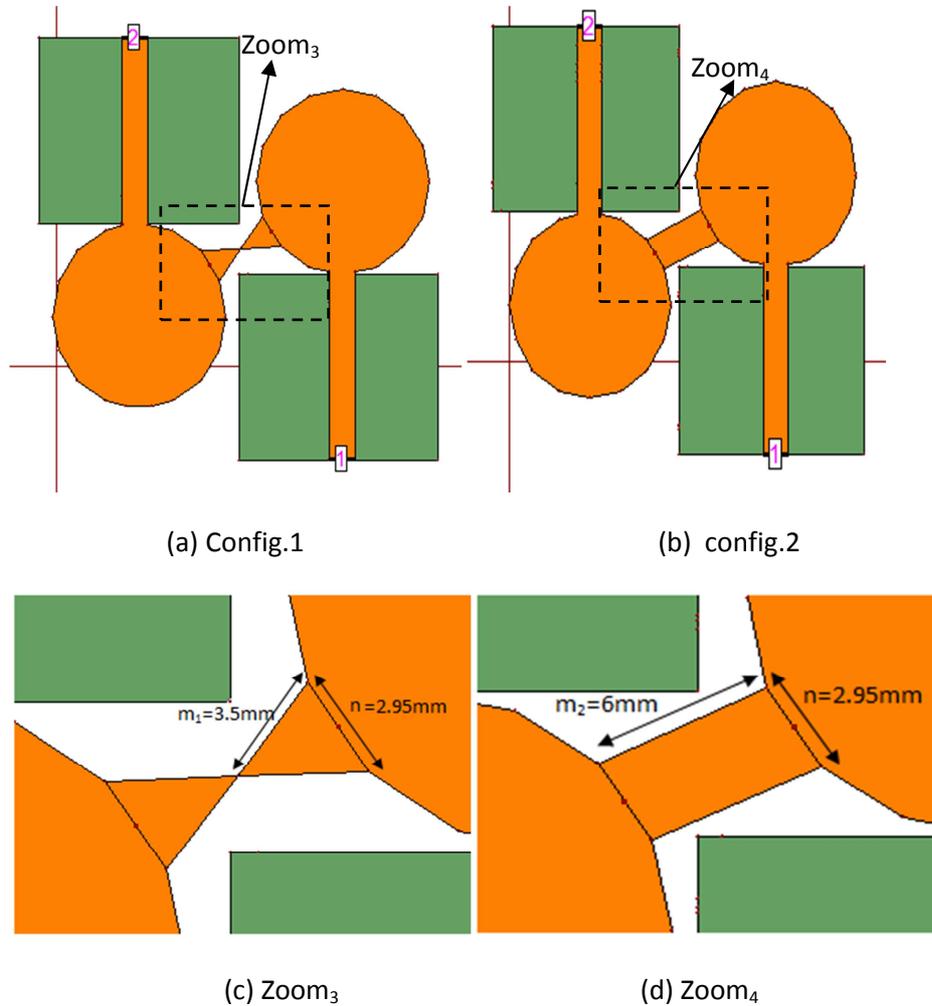
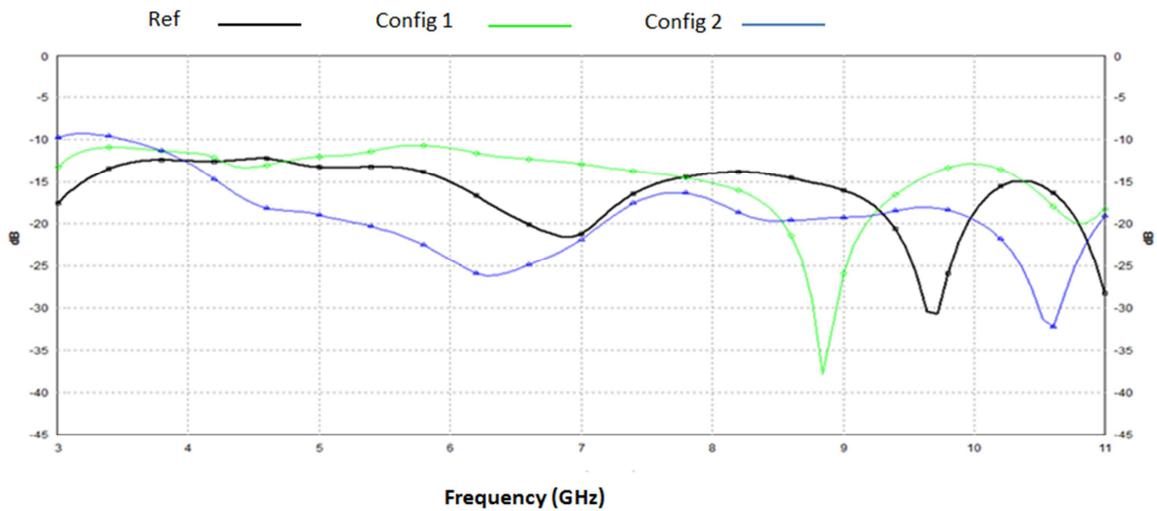
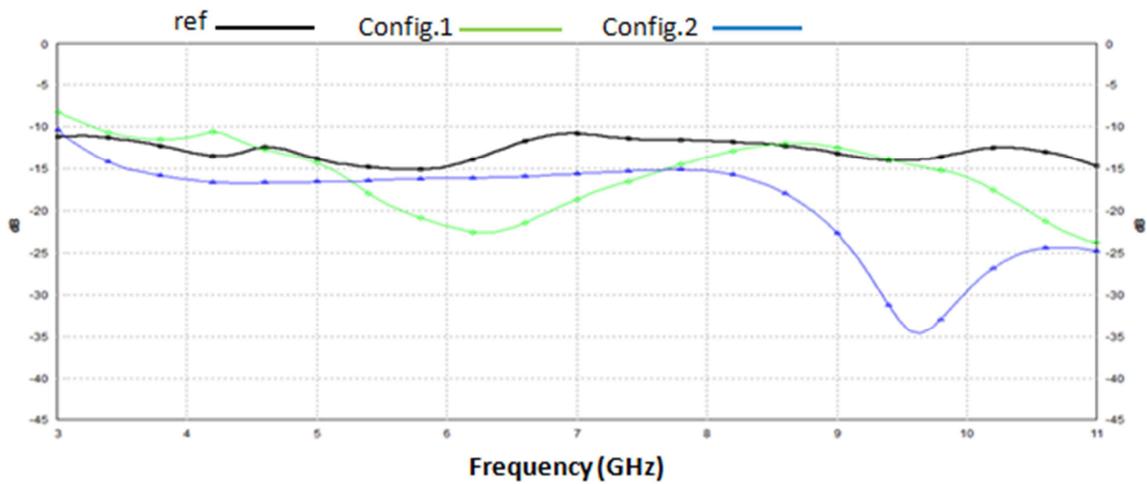


Figure 4.15. Techniques d'isolation avec ligne de neutralisation et variation angulaire.

La figure 4.16 illustre les coefficients de réflexion et d'isolation des deux configurations de la figure 4.15 confrontés à ceux du système sans technique (notée ref).



(a) $|S_{11}|$ en dB



(b) $|S_{12}|$ en dB

Figure 4.16. $|S_{11}|$ et $|S_{12}|$ des deux configurations de la figure 4.15.

D'après les résultats de la figure 4.16, la configuration 2 présente de meilleures performances en termes d'adaptation et d'isolation par rapport à la configuration 1.

Après avoir exploité plusieurs techniques d'isolation, la configuration 2 utilisant la technique ligne de neutralisation avec une variation angulaire semble celle qui présente le meilleur compromis en termes d'adaptation, bande passante et isolation. En effet, pour cette solution, l'isolation est supérieure à 15dB dans toute la bande ULB.

4.5 Conclusion

Au début de ce chapitre, un état de l'art sur les différentes techniques d'isolation entre antennes dans les systèmes antennaires MIMO a été présenté. Ensuite, quelques-unes de ces techniques ont été utilisées pour l'amélioration de l'isolation d'un système composé de deux antennes ULB initialement conçue dans le chapitre 3. Les résultats de simulation électromagnétique ont montré le gain apporté par ces techniques pour l'augmentation de l'isolation entre antennes dans la bande d'intérêt. Une solution qui semble être pertinente est obtenue en utilisant la technique de ligne de neutralisation associée avec une variation angulaire. Pour cette solution, l'isolation dans la bande ULB est supérieure à 15 dB.

Conclusion générale

Les travaux présentés dans ce projet de fin d'étude ont portés sur la conception et la simulation d'un système antenne ULB pour application MIMO.

Le premier chapitre décrit brièvement quelques généralités sur les antennes en donnant leurs caractéristiques principales. Ensuite, l'intérêt du système MIMO ainsi que son historique, son principe et ses applications ont été présentés.

Le second chapitre, s'intéresse à la technologie ULB et aux antennes imprimées en présentant à la fin un état de l'art sur les antennes ULB en technologie planaire.

Le troisième chapitre présente deux antennes imprimées ultra large bande. Après simulation et affichage des performances de ces deux antennes, la solution la plus optimale a été réalisée et mesurée.

Le quatrième et dernier chapitre expose un état de l'art sur les différentes techniques d'isolation utilisées dans les systèmes antennaires MIMO. Ensuite, la simulation électromagnétique de plusieurs configurations de systèmes à deux antennes ULB, en utilisant comme brique de base l'antenne réalisée dans le chapitre précédent, a été présentée et discutée. Quelques techniques originales ont permis d'améliorer l'isolation entre antenne de notre système.

Comme perspectives de ce travail, la réalisation et la mesure de quelques prototypes de systèmes à deux antennes permettront de valider les résultats de simulation obtenus dans le quatrième chapitre. La mesure des digrammes de rayonnement dans une chambre anéchoïque validera les performances en rayonnement des solutions réalisées.

A.1 Présentation de l'outil IE3D de Zeland

IE3D de Zeland est un outil électromagnétique complet pour la simulation, l'optimisation et la conception en 3D des antennes et des circuits numériques. L'IE3D a été adopté comme une norme industrielle dans la simulation électromagnétique.

Depuis son introduction officielle en 1993 à IEEE international Micro-wave symposium (IMS IEEE 1993), des améliorations ont été apporté au logiciel IE3D [48].

L'IE3D est devenue l'outil de simulation électromagnétique le plus polyvalent. Il est facile à utiliser, efficace et précis. Il est largement utilisé pour la conception de circuits hyperfréquences/millimétriques, interconnexion et packaging de circuits intégrés CI, antennes planaires, antennes filaires et autres antennes radiofréquence sans fils Les figures A.1 et A.2 montrent l'interface principale du logiciel IE3D.

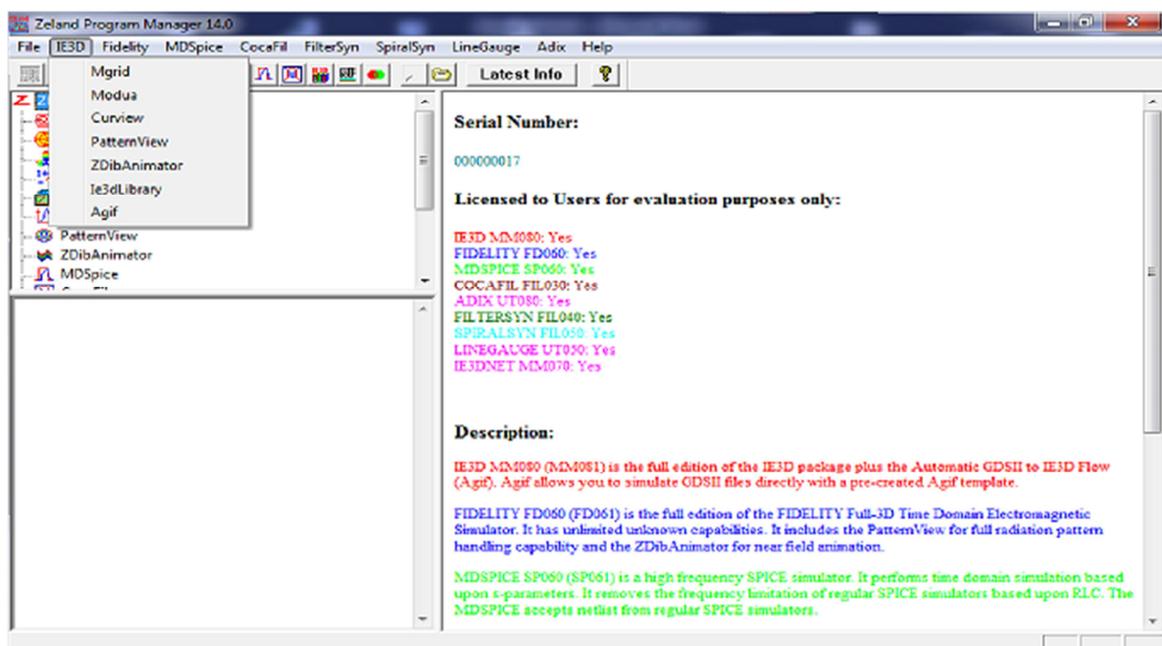


Figure A.1. Interface au démarrage d'IE3D.

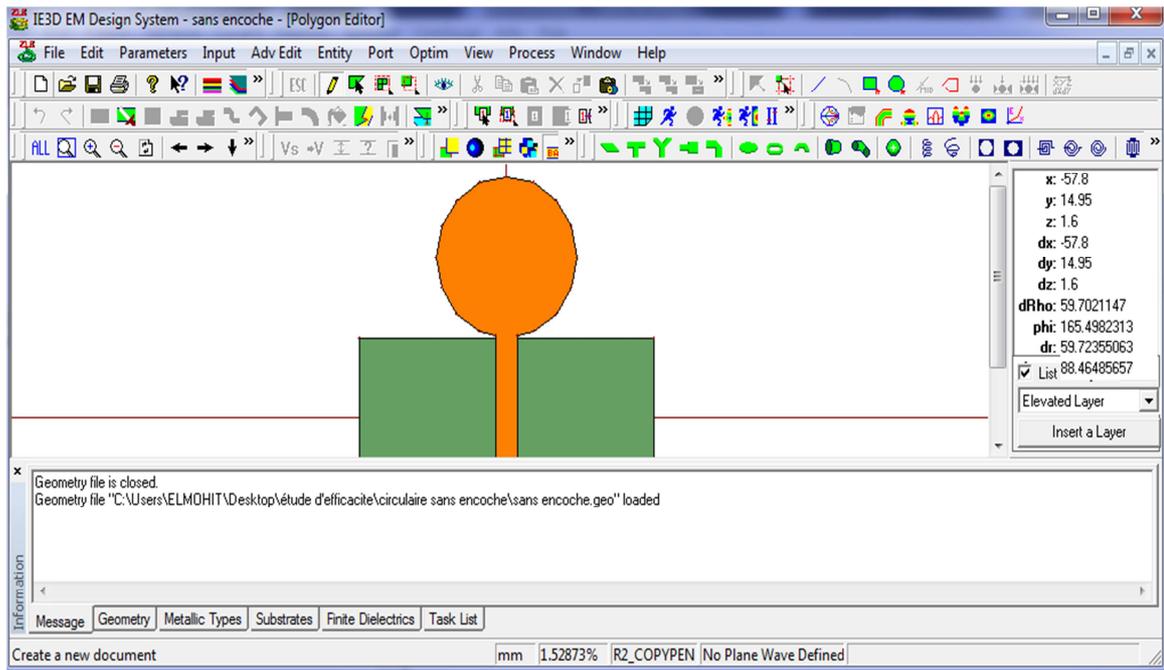
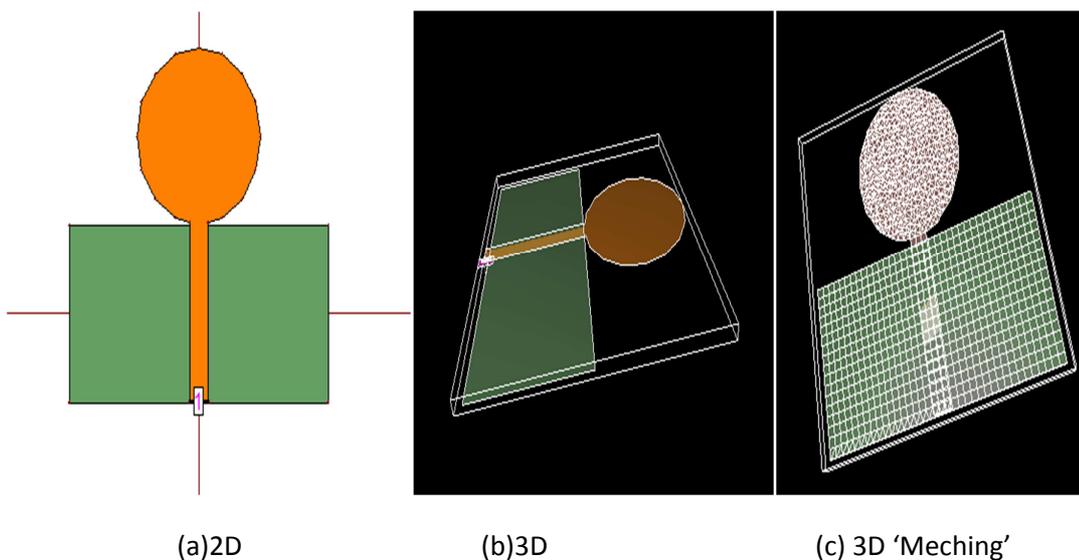


Figure. A.2. Interface montrant les différentes fenêtres d'IE3D.

A.2 Résultats de simulation

Une fois la simulation terminée, de nombreuses sorties de résultats sont autorisées. Nous avons simulé une structure d'un patch circulaire avec IE3D (figure A.3). Les différents graphes que nous pouvons visualiser telle que coefficient de réflexion sous différentes formes sont représentés dans figures A.4.

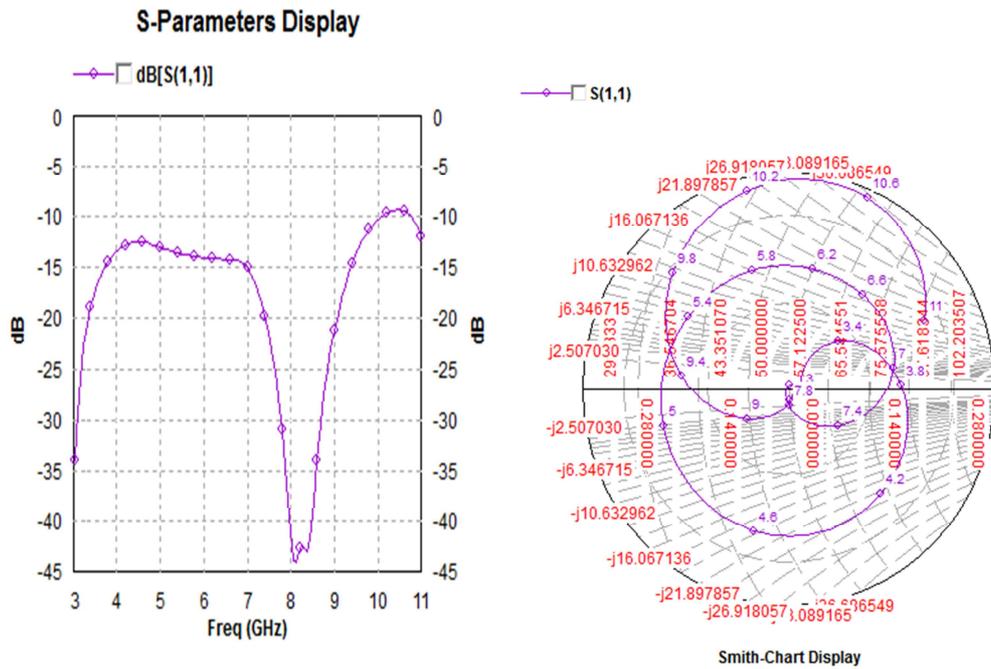


(a)2D

(b)3D

(c) 3D 'Mechnig'

Figure A.3. Différents angles de vue d'une antenne (2D et 3D).



(a) Représentation cartésienne

(b) Abaque de smith

Figure A.4 . Exemple du tracé du coefficient de réflexion S_{11} en dB

Egalement, on peut visualiser la distribution de courant des structures après simulation (figure A.5) ainsi que le diagramme de rayonnement en 2D(figure A.6) et en 3D (figure A.7).

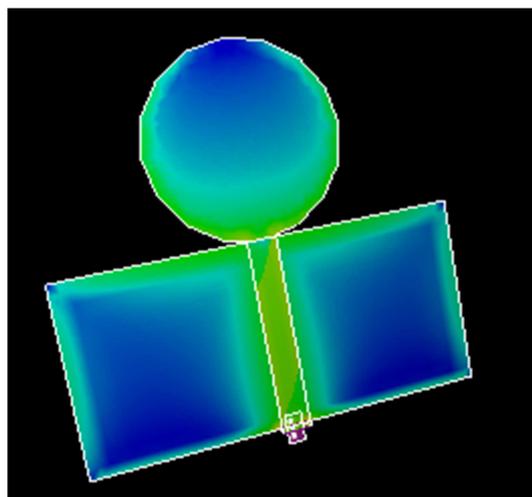
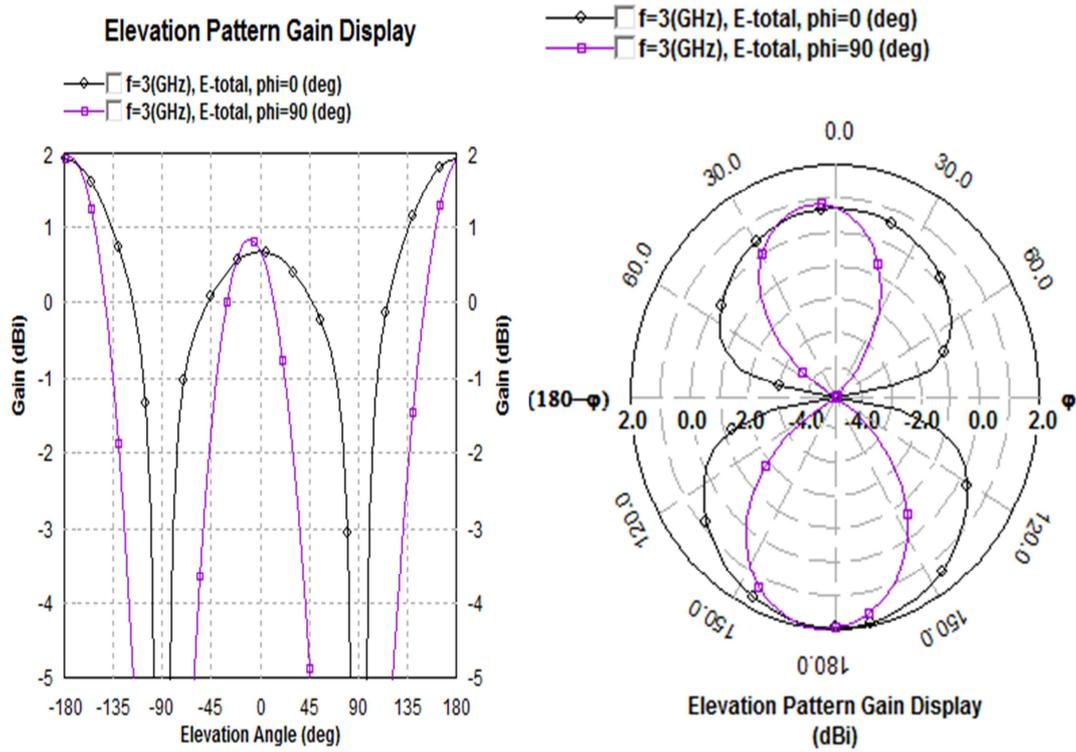


Figure A.5. Distribution de courant



(a) Forme cartésienne

(b) Forme polaire

Figure A.6. Diagramme de rayonnement 2D

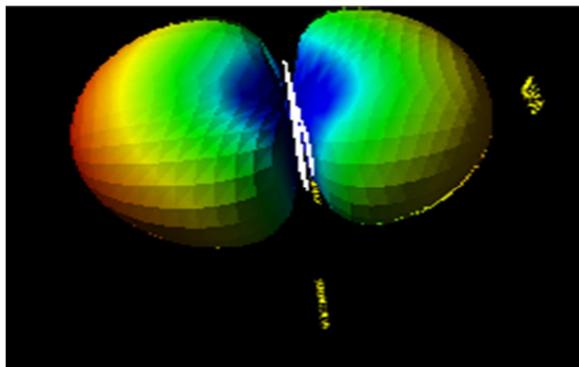


Figure A.7. Diagramme de rayonnement 3D

Bibliographie

- [1] Cédric Requin : 'Antennes quasi-auto-complémentaire pour terminaux mobiles multi-standards', thèse de doctorat, université de Nice-Sophia Antipolis, 2013.
- [2] Alexandre Boyer : 'Support de cours 5eme Année Telecom', institut national des sciences appliquée de Toulouse, 2011.
- [3] Maurice Bellanger : 'Les antennes théorie, conception et application', Dunos, 2009.
- [4] J.G Proakis : 'Digital communication by John G Proakis', 4^{em} edition McGrawHill, 2000. .
- [5] G.J.Foschini et M.J Gans : 'One limit of wireless communication in fading environment when using multiple antenna', Wireless personal communication, Vol 6, p311-335, 1998.
- [6] G.J.Foschini : 'Layered Space time architecture for wireless communication in fading environment when using multi element antenna', Bell Labs technical journal, Vol 1, n°2, p41-59, 1996.
- [7] Pascal Djiknavorian : ' MIMO pour les nuls', université LAVAL, 2007.
- [8] Emre Telatar : ' Capacity of multi-antenna gaussian channels', European transactions on télécommunications, Vol. 10, No. 6, p. 585–595,1999.
- [9] Maha Benzid : 'Emplois de techniques de traitement de signal MIMO pour des applications dédiées réseaux de capteurs sans fil ', thèse de doctorat, Université Grenoble Alpes, 2012.
- [10] Lingjia Liu, Runhua Chen, Stefan Geirhofer, K.S, Z.S et Y.Z : 'Downlink MIMO in LTE-advanced: SU-MIMO vs. MU-MIMO ', IEEE Communications Magazine, Volume 50, N° 2, février 2012.

- [11] Matthieu Lamelot : 'Orange fait son Show Hello et présente sa nouvelle LiveBox ', tomshardware.fr, le 16 mars 2016.
- [12] Laurence Babour : 'Etude et conception d'antenne ultra large bande miniaturisé en impulsional ', thèse de doctorat, institut polytechnique de Grenoble, 2009.
- [13] Nicolas Fortino, ' conception et caractérisation d'antennes imprimées pour les systèmes ULB impulsional ', thèse de doctorat, université Nice-sophia Antipolis, 2006.
- [14] FCC 1st Report and Order on Ultra-Wideband Transmission systems, Février 2002.
- [15] Junding Zhao, Hao Zhang : 'Ultra wide band printed antenna block satellite and WLAN signals', Microwave & rf, technology editor, 2017.
- [16] Cyril Luxey, Robert Staraj, Georges Kossiavas et A.P : 'Antennes imprimées-Bases et principes E3310', Technique de l'ingénieur, Mai 2007.
- [17] Ziani Kerarti Djalal : 'Etude et conception d'antenne ultra large bande ', thèse de magister, université de Tlemcen ,2011.
- [18] Constantine. A. Balanis : 'Antenna theory analysis and design', 4^{em} edition, 2005.
- [19] A.Akaltech, R. Fallahi and M. G. Roozbahani : 'Design of a band notched microstrip circular slot antenna for UWB communication', Progress In electromagnetics research c, Vol. 12, 113-123, 2010.
- [20] M.M. Sharma, Ashok Kumar, Sanjeev Yadav et Y. Ranga : 'An ultra-wideband printed monopole antenna with dual band notch characteristics using DGS and SSR ' , 2nd international conference on communication computing & security, Procedia technology, vol 6, p 778 – 783, 2012.
- [21] Ramu Pillalamarri, G. Sasi Bhushana Rao and S. Srinivasa Kumar : ' Novel Printed Rectangular Patch Monopole Antennas with Slit Ground Plane for UWB Applications', the nehu journal, vol VIII, n° 1, January 2010.
- [22] Vaishali. S. Varpe, R. P. Labade : 'A Compact Printed Wide-Slot UWB Antenna With Band-Notched Characteristics', International conference on computing communication control and automation , India ,2016.

- [23] Nicolas Fortino, Jean-Yves Dauvignac, Georges Kossiavas, and Robert Staraj : ' Design optimization of UWB printed antenna for omnidirectional pulse radiation ', IEEE transactions on antennas and propagation, vol 56, n °7, Jui 2008.
- [24] C.-C. Lin, H.-R. Chuang et Y.-C. Kan : 'A 3–12GHz UWB planar triangular monopole antenna with ridged ground-plane', Progress in electromagnetics Research, PIER 83, 307–321, 2008.
- [25] O. Kim, N.I Jo, H.A. Jang, et C.Y. Kim : 'Design of the ultra-wideband antenna with a quadruple-band rejection characteristics using a combination of the complementary split ring resonators', Progress In Electromagnetics Research, vol 112, Corée du sud, 93-107, 2011.
- [26] J. William et R. Nakkeeran : 'A compact cpw-fed uwb slot antenna with cross tuning stub', Progress in electromagnetics research c, Vol. 13, p 159-170, 2010.
- [27] A. R. H. Alhawari, A. Ismail, M. A. Mahdi et R. S. A. R. Abdullah : ' Antipodal vivaldi antenna performance booster exploiting snug-in-negative index metamaterial', Progress in electromagnetics research c, vol 27, 265-279, 2012.
- [28] Avez Syed, Rabah W. Aldhaheeri : ' A cupcake shaped CPW-Fed printed antenna for UWB applications', Mediterranean microwave symposium (MMS) 16th, United Arab Emirates, 2016.
- [29] S.C.Deshmukh, R.P.Labade : 'Printed hexagonal slot antenna for uwb applications', International conference on computing communication control and automation, 2016.
- [30] A. Bhowal, N. Verma, and R. K. Singh : 'Design and Evaluation of a New Compact CPW Fed Slot Textile Antenna for UWB Applications' , IEEE ICCSP conference, 2015.
- [31] R. A. Santos, A. C. Sodré Jr. et S. E. Barbin : 'A low-profile printed antenna for UWB applications', International conference on electromagnetics in advanced applications (ICEAA), Australia ,2016 .
- [32] M. Bitchikh : 'Les antennes Ultra Large Bande dans le domaine des communications mobiles ', thèse de doctorat en électronique, école nationale polytechnique d'Alger, 2014.

- [33] Yue Dong, Yingsong Li, Kai Yu et Yanyan Wang : 'High isolation design of a two-element planar UWB-MIMO monopole antenna ', International applied computational electromagnetics society symposium, Italy, 1-2,2017.
- [34] Yuanyuan Kong, Yingsong Li and Wenhua Yu : 'Design of a compact dual-element MIMO-UWB antenna by using slot and stub', IEEE 4th Asia-Pacific conference on antennas and propagation, 101-102, 2015.
- [35] W. N. N. W. Marzudi, Z. Z. Abidin, S. H. Dahlan, Ma Yue, Raed A. Abd-Alhameed, et M. B. Child : 'A compact orthogonal wideband printed MIMO antenna for WIFI/WLAN/LTE applications', Microwave and optical technology letters , vol 57 n° 7,1733-1738, July 2015.
- [36] Muhammad Bilal, Rashid Saleem, Muhammad F. Shafique et Hassan A. Khan : 'MIMO application UWB antenna doublet incorporating a sinusoidal decoupling structure', Microwave and optical technology letters ,vol 56 N° 7, 1547-1553, July 2014.
- [37] Yuanyuan Kong, Yingsong Li et Kai Yu : 'A Minimized MIMO-UWB Antenna with High Isolation and Triple Band-Notched Functions', Frequenz,2016.
- [38] Yao Liu, ChunWei Sun : ' A Compact printed MIMO antenna for UWB application with WLAN band-rejected ', International symposium on antennas Propagation and EM Theory (ISAPE), 95-97,2016.
- [39] See T.S.P, Swee A.M.L, Chen Z.N : ' Correlation analysis of UWB MIMO antenna system configurations ', Proceedings of IEEE International conference ultra-wideband, 105-108 , Sep 2008.
- [40] Wong K.L, Su S.W, Kuo Y.L : 'A printed ultra-wideband diversity monopole antenna', microwave and optical technologies Let, vol 38 N°4, 257-259, 2003.
- [41] Hong S, Lee J, Choi J : ' Design of UWB diversity antenna for PDA applications', Proceedings of 11th international conference advanced communication technology, 583-585, Feb 2008.

- [42] Chen Y, Lu W.J, Cheng C.H, Cao W, Li Y : ' Printed diversity antenna with cross shape stub for ultra-wideband applications', Proceedings of 11th IEEE international conference communication systems, 813-816, Nov 2008.
- [43] Ali Imran Najam, Yvan Duroc et Smail Tedjini : ' Multiple-input multiple-output antennas for ultra-wideband communications' , Mohammad Abdul Matin,2012.
- [44] Rajagopalan A, Gupta G., Konanur A.S, Hughes B, Lazzi G : 'Increasing channel capacity of an ultra-wideband MIMO system using vector antennas ', IEEE Trans antennas and propagation, vol 55 n°10, 2880-2887, 2007.
- [45] Wong K.L, Su S.W, Kuo Y.L : 'A printed ultra-wideband diversity monopole antenna',microwave and optical technologies Let, vol 38 N°4, 257-259, 2003.
- [46] Wael Abd Ellatif, Darwish Abd El Aziz et Rania Mahmoud : 'A 4-elements performance analysis of compact UWB antenna for MIMO-OFDM systems', IEEE international conference on wireless for space and extreme environments, 135-139, 2016.
- [47] Waqas Ahmad, Miodrag Tasic et Djuradj Budimir : 'Compact UWB MIMO antennas with dual bandnotch high isolation and high diversity ' , Proceedings of the Asia-Pacific Microwave Conference ,1-4, 2016.
- [48] IE3d, Manuel IE3d version 14, *Zeland software*.