



**Mémoire de fin d'étude  
pour l'obtention du diplôme de Master Académique**

Domaine : Sciences et Technologie  
Filière : Télécommunications  
Spécialité : Systèmes de Télécommunications

---

**Etudes des performances des antennes miniature large bande**

---

Présenté par :

-----  
**Madi Abir & Fareh Hanene**  
-----

Sous la direction de :

**Dr Khalfallaoui Abderrazek**

Junin 2017

936

## Remerciement



*Tous d'abord, nous remercions ALLAH tout le puissant de nous avoir donné le courage et la volonté de mener à terme ce travail*

*Ce travail, ne serait pas aussi riche et n'aurait pas pu avoir nos valeureux sans l'aide de l'encadreur Mr **Khalfallaoui Abderrazek**, nous la remercions pour la qualité de son encadrement exceptionnel, et nous lui somme très reconnaissant pour son aide précieuse pendant les moments difficiles.*

*Nous remercions également tous les professeurs pendant notre cursus universitaire, sans oublier le soutien de nos parents et amis*

*Nous formulons toutes notre haute considération envers les respectables membres du jury de soutenance qui auront à se prononcer sur ce modeste travail...*

# *Dédicace*

*Je dédie ce mémoire*

*A ma mère,*

*« Tu m'as donné la vie, la tendresse et le courage pour réussir.  
Tout ce que je peux t'offrir ne pourra exprimer l'amour et la  
reconnaissance que je te porte.  
Et témoignage, je t'offre ce modeste travail pour te remercier pour  
tes sacrifices et pour l'affection dont tu m'as toujours entourée. »*

*A mon père,*

*« L'épaule solide, l'œil attentif compréhensif et la personne la plus  
digne de mon estime et de mon respect.  
Aucune dédicace ne saurait exprimer mes sentiments, que dieu te  
préserve et te procure santé et longue vie. »*

*A mes très chères sœurs sarsoura et noussa,*

*Vous m'avez toujours soutenu durant toutes mes études, je vous  
souhaite une vie pleine de joie de bonheur et de réussite.*

*A toute ma chère famille,*

*A mes professeurs,*

*A mon merveilleux encadreur que dieu le protège*

*A mon très belle amie Aboura*

*A mes chers amis,*

*A tous ceux qui m'aiment,*

*A tous ceux que j'aime,*

*A tous ceux qui m'ont aidé de près ou de lions.*

*Fareh Hanene*

## Dédicace

Je dédie ce mémoire à :

Mes chers parents, que nulle dédicace ne puisse exprimer mes sincères sentiments, pour leur patience illimitée, leur encouragement contenu, leur aide, en témoignage de mon profond amour et respect pour leurs grands sacrifices.

Mes chers frères : Kamilia, Mohamed El Hadi Et Samar, pour leur grand amour et leur soutien qu'ils trouvent ici l'expression de ma haute gratitude.

Mon très chère collègue Hanene, Mes chers amis qui sans leur encouragement ce travail n'aura jamais vu le jour.

Et à ma grande mère, mon grand-père et à toute ma famille ceux que j'aime.

*MADI ABIR*

**Table des matières**

*Remerciement*

*Table des matières*

*Liste des abréviations*

*Liste des figures*

*Liste des tableaux*

**Introduction générale ..... 1**

**Chapitre I : Etat de l'art sur les antennes miniatures**

**I.Introduction ..... 3**

1. Définition d'une antenne miniature ..... 5

2. Facteur de qualité d'une antenne ..... 6

3. Facteur de miniaturisation ..... 5

**II.Techniques de miniaturisation des antennes..... 5**

1. Utilisation de matériaux..... 5

a) Utilisation de matériaux diélectriques..... 6

b) Utilisation de matériaux magnétiques..... 6

2. Modifications géométriques ..... 7

a) Chargement par fente ..... 7

b) Ajout de court-circuit ou de circuits ouverts..... 7

c) Repléments et courbure..... 8

d) Insertion des méandres..... 9

3. Ajouts d'éléments localisés ..... 9

a) Composants électroniques ..... 9

b) Résonateurs couplés..... 10

**III.Antennes miniatures multi bande et large bande..... 10**

1. Les antennes miniatures multi bande..... 11

2. Antenne miniature large bande ..... 12

---

<b>IV. Les applications des antennes miniatures .....</b>	<b>12</b>
1. Antenne miniature dans les milieux biologiques.....	12
a) Antenne méandre conformé sur une gélule.....	13
b) Antenne miniature intégrée dans le tatouage électronique .....	13
2. Antenne miniature pour les vêtements communicants .....	14
3. Antenne miniature a base des polymères souples .....	14
4. Antenne PIFA pour terminaux mobile .....	15
<b>V. Conclusion.....</b>	<b>16</b>

## **Chapitre II : Antennes miniatures Ultra Large Bande**

<b>I. Introduction .....</b>	<b>17</b>
<b>II. La technologie ULB .....</b>	<b>17</b>
1. Définition.....	17
2. Caractéristiques de la technologie ULB.....	18
<b>III. Techniques d'élargissement de la bande passante .....</b>	<b>19</b>
<b>IV. Antennes Ultra Large Bande :.....</b>	<b>20</b>
1. Antennes indépendantes de la fréquence.....	20
2. Antennes omnidirectionnelles.....	21
3. Dipôles/ monopoles électriques ultra large bande.....	21
a) Monopole circulaire/ elliptique.....	22
b) Amélioration des performances de l'antenne circulaire.....	23
c) Augmentation de la bande passante de l'antenne.....	23
d) Antennes ULB à sous bande coupée :.....	24
4. Antennes directives.....	24
<b>V. Caractérisation des antennes Ultra Large Bande .....</b>	<b>25</b>
1. Caractéristiques d'adaptation.....	26
a) Impédance d'entrée d'une antenne.....	26
b) Coefficient de réflexion et ROS.....	26

---

2. Caractéristiques de rayonnement.....	28
a) Diagramme de rayonnement.....	28
b) Directivité.....	29
c) Efficacité.....	30
d) Gain.....	30
e) Polarisation.....	31
<b>VI. Antenne monopole planaire.....</b>	<b>31</b>
a) Ligne à fente.....	32
b) Ligne coplanaire à ruban.....	33
c) Guide d'onde coplanaire.....	33
2. Monopole rectangulaire.....	34
a) Etude de la ligne d'alimentation.....	34
<b>VII. La technologie MIMO .....</b>	<b>37</b>
1. Principe de la technique MIMO.....	37
2. L'utilisation de l'antenne MIMO.....	38
<b>VIII. Conclusion .....</b>	<b>38</b>
 <b>Chapitre III : Simulation et mesure d'une antenne MIMO miniature</b>	
<b>ULB</b>	
<b>I. Introduction .....</b>	<b>39</b>
<b>II. Logiciel HFSS (High Frequency Structure Simulator) .....</b>	<b>39</b>
<b>III. Description de l'antenne de base.....</b>	<b>40</b>
<b>IV. Conception et simulation d'une antenne MIMO à base d'un monopole CPW ...</b>	<b>42</b>
1. Etude de l'antenne de base .....	42
2. Modification sur le plan de masse .....	43
3. Modification sur le rectangle du monopole .....	45
4. Modification sur la ligne.....	46
<b>V. Réalisation et mesure d'antenne MIMO.....</b>	<b>47</b>
1. Réalisation d'antenne .....	47

a) Description du matériel.....	47
2. Mesure expérimentale.....	49
a) Utilisation de la chambre anéchoïque .....	49
b) Mesure du coefficient de réflexion : .....	50
c) Mesure du digramme de rayonnement.....	51
d) Mesure d'efficacité : .....	53
<b>VI. Conclusion .....</b>	<b>56</b>
<i>Conclusion générale .....</i>	<i>57</i>
<i>Références bibliographiques</i>	
<i>Résumé</i>	

## Liste des abréviations

CPS : Coplanare strip-line

CPW: Coplanar wave guide

DCS: Digital Communications System

FCC: Federal Communications Commission

GLONASS: Global Orbiting Navigational Satellite System

GPS: Global Positioning System

GSM: Global System for Mobile (communications)

HFSS: High Frequency Structural Simulator

IEEE: Institute of Electrical and Electronics Engineers

IRSEEM: Embedded Research Institute Electronic System

LTE: Long Term Evolution

MIMIC: Microwave (or Millimeterwave) Monolithic Integrated Circuits

MIMO: Multiple Input Multiple Output

PCS: Personal Communications Service

PIFA: Planar Inverted F Antenna

ROS: Rapport d'Onde Stationnaire

SISO: Single Input, Single Output

UHF: Ultra High Frequency

ULB: Ultra Large Bande

UMTS: Universal Mobile Telecommunications System

UWB: Ultra Wide-Band

Wi-Fi: Wireless Fidelity

WIMAX: Worldwide Interoperability for Microwave Access X

WLAN: Wireless Local Area Network

WPAN: Wireless Personal Area Network

## Liste des figures

### Chapitre I

Figure I-1 : Sphère de Chu d'une antenne

Figure I-2 : Variation du facteur de miniaturisation en fonction de l'épaisseur du substrat sur

Figure I-3 : Illustration du chemin des courants de surface sans fente et avec fente

Figure I-4 : Antenne PIFA avec court-circuit plan ou languette

Figure I-5 : (a) illustration d'une antenne repliée (b) repliement verticale

Figure I-6 : PIFA replie sur plusieurs niveaux

Figure I-7 : Antenne méandre destinée à la réception du GSM

Figure I-8 : Antenne avec des lignes commutables

Figure I-9 : Antenne PIFA avec un élément couplé

Figure I-10 : PIFA pour une application multi bandes

Figure I-11 : S11 du PIFA proposée

Figure I-12 : Antenne E-shaped-radiator pour une application large bande

Figure I-13 : (a) la capsule (b) antenne méandre conformé sur une gélule

Figure I-14 : (a) tatouage électronique (b) les éléments d'un tatouage électronique

Figure I-15 : (a) antenne miniature sur un électro-textile (b) smart tee-shirt

Figure I-16 : Antenne miniature sur une substrat souple

Figure I-17 : Montre intelligente flexible à base d'une antenne souple

Figure I-18 : (a) PIFA pour la 5G (b) diagramme de rayonnement de cette PIFA

### Chapitre II

Figure II-1 : Antenne biconique

Figure II-2 : Exemple de réalisation pratique d'un monopole circulaire (rayon 2.5 cm).

Figure II-3 : Monopole planaire circulaire.

Figure II-4 : Exemple d'amélioration de la bande passante d'antenne planaire et son ROS.

Figure II-5 : Antenne ULB à sous bande coupée et son ROS

Figure II-6 : Système global comportant une antenne émettrice et une antenne réceptrice.

Figure II-7 : Schéma d'une antenne connectée à une ligne de transmission et un générateur

Figure II-8 : Géométrie d'un dipôle et diagramme de rayonnement en 3 dimensions

Figure II-9 : (a) Diagramme de rayonnement d'un dipôle dans le plan H (b) Diagramme de rayonnement d'un dipôle dans le plan E.

## Liste des figures

### Chapitre I

Figure I-1 : Sphère de Chu d'une antenne

Figure I-2 : Variation du facteur de miniaturisation en fonction de l'épaisseur du substrat sur

Figure I-3 : Illustration du chemin des courants de surface sans fente et avec fente

Figure I-4 : Antenne PIFA avec court-circuit plan ou languette

Figure I-5 : (a) illustration d'une antenne repliée (b) repliement verticale

Figure I-6 : PIFA replié sur plusieurs niveaux

Figure I-7 : Antenne méandre destinée à la réception du GSM

Figure I-8 : Antenne avec des lignes commutables

Figure I-9 : Antenne PIFA avec un élément couplé

Figure I-10 : PIFA pour une application multi bandes

Figure I-11 : S11 du PIFA proposée

Figure I-12 : Antenne E-shaped-radiator pour une application large bande

Figure I-13 : (a) la capsule (b) antenne méandre conformé sur une gélule

Figure I-14 : (a) tatouage électronique (b) les éléments d'un tatouage électronique

Figure I-15 : (a) antenne miniature sur un électro-textile (b) smart tee-shirt

Figure I-16 : Antenne miniature sur une substrat souple

Figure I-17 : Montre intelligente flexible à base d'une antenne souple

Figure I-18 : (a) PIFA pour la 5G (b) diagramme de rayonnement de cette PIFA

### Chapitre II

Figure II-1 : Antenne biconique

Figure II-2 : Exemple de réalisation pratique d'un monopole circulaire (rayon 2.5 cm).

Figure II-3 : Monopole planaire circulaire.

Figure II-4 : Exemple d'amélioration de la bande passante d'antenne planaire et son ROS.

Figure II-5 : Antenne ULB à sous bande coupée et son ROS

Figure II-6 : Système global comportant une antenne émettrice et une antenne réceptrice.

Figure II-7 : Schéma d'une antenne connectée à une ligne de transmission et un générateur

Figure II-8 : Géométrie d'un dipôle et diagramme de rayonnement en 3 dimensions

Figure II-9 : (a) Diagramme de rayonnement d'un dipôle dans le plan H (b) Diagramme de rayonnement d'un dipôle dans le plan E.

Figure III-18 : Diagramme de rayonnement de l'antenne MIMO en position horizontale dans le cas co-polarisation

Figure III-19 : Diagramme de rayonnement de l'antenne MIMO en position horizontale dans le cas cross-polarisation

Figure III-20 : Diagramme de rayonnement de l'antenne MIMO en position verticale dans le cas cross-polarisation

Figure III-21 : Diagramme de rayonnement de l'antenne MIMO en position verticale dans le cas co-polarisation

Figure III-22 : Capuchon Wheeler utilisée dans IRSEEM

Figure III-23 : L'efficacité de l'antenne MIMO

## **Liste des tableaux**

### **Chapitre II**

Tableau II-1 : Les avantages et les inconvénients des différentes méthodes permettant d'élargir la bande passante d'un monopole

### **Chapitre III**

Tableau III-1 : Les dimensions de l'antenne de base

Tableau III-2 : Caractéristiques de l'antenne de base (a) utilisation monopole (b) utilisation MIMO

Tableau III-3 : Modification sur le plan de masse

Tableau III-4 : Modification sur le rectangle du monopole

Tableau III-5 : Modification sur la ligne

## **Introduction générale**

Dans un système de communication, l'antenne est un composant à part entière qui nécessite une étude particulière. Tout en cherchant à optimiser les performances radioélectriques d'une antenne, il est nécessaire de l'adapter aux applications les plus récentes et de répondre aux exigences d'intégration dans l'architecture des terminaux. La technologie émergente de communication radio ULB (UWB) qui exploite le principe de liaisons radio en impulsions de très courte durée, sans porteuse, offre des avantages intéressants par rapport aux techniques actuelles de transmission d'information et pourrait révolutionner le domaine des télécommunications d'ici quelques années. Le déploiement de ces technologies, notamment dans les applications de grande diffusion, impose l'utilisation d'antennes performantes très large bande, miniatures et bas coût. Les antennes planaires, telles que les antennes alimentées par des lignes à fente, lignes coplanaires à ruban ou bien alimentées par des guides d'onde coplanaires ont les dispositifs attrayants du profil bas, de la petite taille, et de la conformité. Pour cette raison, des techniques de conception compacte et à large bande pour les antennes planaires ont beaucoup attiré l'attention des chercheurs d'antenne.

L'objectif de notre projet de fin d'étude est de faire une étude des antennes miniatures tout en essayant d'améliorer leurs performances afin de les adapter aux applications des communications UWB. De ce fait, notre travail est réparti en trois chapitres

Le premier chapitre présente un état de l'art des antennes miniatures. Ce chapitre s'ouvre sur une définition de la notion d'antenne miniature, des limites théoriques de la miniaturisation d'antennes (facteur de qualité et facteur de miniaturisation). Ainsi que des différentes techniques de miniaturisation couramment utilisées. Le chapitre se termine par quelques applications de ces antennes miniatures dans les différents domaines de la technologie ULB.

Le deuxième chapitre présente une généralité sur les antennes ultra large bande. Ce chapitre relate une étude simple de la technologie UWB incluant ses caractéristiques et ces avantages. En passant par les techniques d'élargissement de la bande passante. Une étude détaillée sur les antennes ultra large bande et ces caractéristiques d'adaptation et de rayonnement. Ensuite une présentation des antennes monopoles planaires tel que le monopole rectangulaire alimenté par un guide d'onde coplanaire (CPW). Enfin, un aperçu de la technologie MIMO que nous avons utilisé dans notre application.

Le troisième chapitre est consacré à la simulation, la réalisation et la caractérisation de notre antenne miniature ULB. La première partie de ce chapitre sera réservée à la présentation du logiciel de simulation, il s'agit HFSS ANSYS. Ensuite une deuxième partie qui contient la conception et la simulation de l'antenne MIMO, en passant par des modifications sur la structure de base. Dans la troisième partie de ce chapitre on passera à présenter la méthode de la réalisation de cette antenne qui nous avons réalisée dans notre laboratoire des circuits imprimés (département d'électronique et télécommunication) de notre université. Une dernière partie détaille les différentes mesures expérimentales effectuées de l'antenne MIMO telles que la mesure d'adaptation, de rayonnement et d'efficacité.

# Chapitre I

**Etat de l'art sur les antennes miniatures**

## I. Introduction

De nos jours, les antennes peuvent être retrouvées dans des objets usuels de toutes sortes. Maintes applications qui s'étendent des télécommunications (terminaux mobiles) aux vêtements communicants en passant par la médecine (implant auditif par exemple). Dans un contexte de généralisation des systèmes de communication sans fil, le besoin de miniaturiser les antennes va en augmentant afin de permettre leur intégration sur de petits objets aux fréquences UHF. A ces fréquences, l'antenne est le composant le plus volumineux et sa miniaturisation constitue un des défis actuels les plus importants des concepteurs d'objets communicants. La multiplication des standards de communication renforce également ces besoins d'intégration et de miniaturisation puisqu'aujourd'hui près d'une dizaine d'antennes peuvent être amenées à cohabiter sur un même terminal mobile. Nous allons définir en premier lieu ce qu'est une antenne miniature et présenterons ses limites théoriques de la miniaturisation des antennes, et en second lieu nous détaillerons les techniques de miniaturisation qui existent dans la littérature. Dernièrement nous citerons quelques applications de ces antennes dans les différents domaines.

### 1. Définition d'une antenne miniature

Avant de définir une antenne miniature, il est nécessaire de définir la sphère de Chu [I-1], il s'agit de la sphère contenant l'intégralité de l'antenne. Elle est définie par son rayon  $a$  (Figure I-1) qui correspond à la plus grande dimension de l'antenne. Cette grandeur est exprimée à l'aide de la longueur d'onde associée à la fréquence de fonctionnement de l'antenne. Dans le cadre des antennes ULB, nous prenons cette fréquence égale à la fréquence basse de fonctionnement.

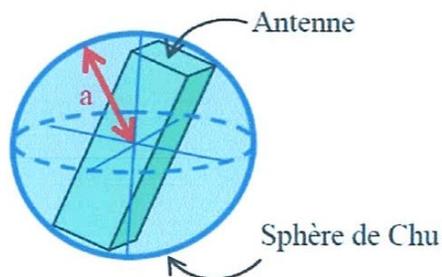


Figure I-1 : sphère de Chu d'une antenne

Le critère communément utilisé pour caractériser les antennes miniatures est le produit du rayon  $a$  par le nombre d'onde  $k = 2\pi/\lambda$ . Sur ce critère, il est possible d'appliquer deux conditions. La première est donnée par Wheeler [I-2], qui considère qu'une antenne est miniature si le diamètre

de la sphère de Chu ne dépasse pas  $1/k$ . Cette dimension est appelée *radianlength*. Ceci revient à dire qu'une antenne est miniature si elle satisfait la condition suivante

$$k * a < 0.5 \quad (I-1)$$

La deuxième condition est donnée par Hansen [I-3]. Il considère que l'encombrement minimum que peut prendre une antenne se situe à la distance limite entre le rayonnement en champ proche et en champ lointain. La distance correspondant à cette limite champ proche/champ lointain est appelée *radiansphere*. Selon Hansen, une antenne est miniature si elle est incluse dans la *radiansphere*, c'est-à-dire si le rayon  $a$  de la sphère est égal à la *radianlength*. Autrement dit :

$$k * a < 1 \quad (I-2)$$

Ces deux critères se basent uniquement sur les dimensions de l'antenne. L'objectif de la miniaturisation est de réduire les dimensions d'une antenne tout en conservant ses performances en bande passante et en rayonnement. L'étude du facteur de qualité de l'antenne permet d'évaluer l'impact de la miniaturisation sur ces paramètres.

## 2. Facteur de qualité d'une antenne

Wheeler remarque que la miniaturisation d'une antenne entraîne une limitation sur la bande passante et souligne également que l'efficacité d'une antenne est liée au volume qu'elle occupe, le volume étant inversement proportionnel au facteur de qualité  $Q$  [I-2]. La miniaturisation d'une antenne s'étudie à l'aide du facteur de qualité de l'antenne. L'expression du facteur de qualité d'une antenne généralement admise est donnée en équation (I-3). Cette expression est utilisée par Chu et Wheeler. Elle reste très généralement utilisée.

$$Q = \frac{2\omega_0 \max(W_E, W_M)}{P_A} \quad (I-3)$$

Où  $W_E$  et  $W_M$  sont les quantités moyennes d'énergie non rayonnée respectivement électrique et magnétique,  $\omega_0$  est la pulsation à la fréquence  $f_0$  et  $P_A$  la puissance reçue ou rayonnée par l'antenne. [I-4]

### 3. Facteur de miniaturisation

En pratique, pour évaluer la réduction d'une antenne le facteur de miniaturisation est calculé. Il existe deux manières d'évaluer ce facteur de miniaturisation :

- Réaliser l'antenne compacte telle que ses performances électromagnétiques se rapprochent le plus de l'antenne de référence, et faire le rapport des dimensions de l'antenne miniature sur celles de l'antenne de référence.
- Réaliser l'antenne compacte avec les mêmes dimensions maximales et comparer le rapport des fréquences, soit à un niveau d'adaptation donné, soit à un niveau de gain dans l'axe donné. [I-4]

## II. Techniques de miniaturisation des antennes

### 1. Utilisation de matériaux

En électromagnétisme les matériaux sont caractérisés électriquement à l'aide de deux paramètres : la permittivité relative  $\epsilon_r$  et la perméabilité relative  $\mu_r$ . Ces paramètres permettent de caractériser le comportement d'un champ électromagnétique dans la matière. La vitesse de propagation d'une onde

électromagnétique dans un matériau est proportionnelle à  $\frac{1}{\sqrt{\epsilon_r \mu_r}}$ . En utilisant des matériaux qui

présentent une forte permittivité relative et/ou perméabilité relative, il est donc possible de diminuer la vitesse de propagation de l'onde. Cette diminution de la vitesse de phase implique que l'onde se propage à une vitesse inférieure à celle de la lumière. En effectuant cette diminution, nous créons un phénomène dit d'onde lente. La diminution de la vitesse de phase entraîne une diminution de la longueur effective parcourue par l'onde. En effet la longueur d'onde dans un milieu  $\lambda_r$  peut être exprimée en fonction de la longueur d'onde dans le vide  $\lambda_0$  à l'aide de l'équation suivante :

$$\lambda_r = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_r \mu_r}} \quad (\text{I-4})$$

a) Utilisation de matériaux diélectriques

Les matériaux dits diélectriques sont des matériaux avec de fortes permittivités  $\epsilon_r$ . En augmentant la permittivité d'un matériau, nous allons permettre la réduction des dimensions de l'antenne conçue sur ce matériau, en créant une onde lente ( $v_\phi$  inversement proportionnel à  $\sqrt{\epsilon_r}$ )

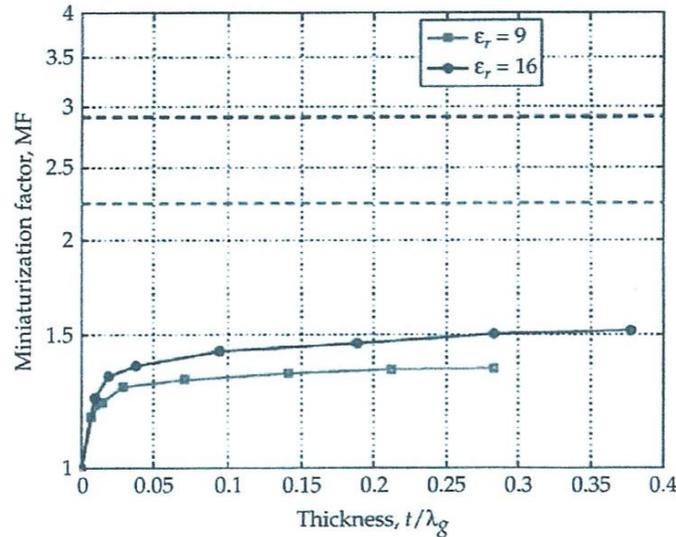


Figure I-2 : Variation du facteur de miniaturisation en fonction de l'épaisseur du substrat sur la longueur d'onde (Thickness,  $t/\lambda_g$ )

La valeur de la permittivité seule ne suffit pas à réduire sensiblement les dimensions de l'antenne. Comme le montre la Figure I-2, le choix de l'épaisseur du substrat a également son importance. Cette figure montre que le facteur de miniaturisation est stable pour un rapport épaisseur de substrat sur longueur d'onde supérieur à 0.1. En dessous de cette valeur, il diminue rapidement. L'utilisation de matériaux à forte permittivité entraîne en général une forte augmentation des pertes, ce qui présente l'inconvénient de réduire fortement l'efficacité de l'antenne. Les céramiques polymères sont des matériaux qui offrent un bon compromis permittivité/pertes/coût. [I-4]

b) Utilisation de matériaux magnétiques

Les matériaux dits « magnétiques » sont des matériaux à forte perméabilité  $\mu_r$ . Ils ont l'avantage d'améliorer la bande passante et l'adaptation. Ils sont essentiellement constitués de ferrite. Pour minimiser les pertes des ferrites magnétiques, il est nécessaire d'appliquer quelques règles pour optimiser la miniaturisation. Il faut maintenir une certaine distance entre le revêtement de ferrite et l'antenne imprimée. Il est important aussi de savoir que ce revêtement modifie le coefficient de réflexion du plan de masse ce qui améliore le rayonnement de l'antenne même pour des fréquences où la distance entre le plan de masse et l'antenne est inférieure à  $\lambda/20$ . Néanmoins, l'utilisation de

matériau magnétique à forte perméabilité n'est souvent pas réaliste, soit parce que ces matériaux présentent des pertes trop importantes, soit parce qu'ils sont trop onéreux. [I-4]

## 2. Modifications géométriques

### a) Chargement par fente

Sur des éléments rayonnants tels que des antennes plaquées ou patches, l'utilisation de fentes sur un élément rayonnant permet, lorsqu'elles sont bien placées, d'augmenter la distance parcourue par le courant surfacique. En effet, un courant qui circule d'un bout à l'autre de la partie métallique de l'antenne sera bloqué par les fentes. Pour les contourner, il devra emprunter un chemin plus long que celui sans les fentes (Figure I-3). La longueur parcourue par le courant est plus grande. La longueur d'onde de l'antenne est artificiellement allongée. Sa fréquence de fonctionnement est donc plus basse. Grâce à cette technique il est possible de réduire la taille d'une antenne jusqu'à 30% [I-5] Toutefois, le facteur de qualité augmente avec le nombre de fentes, ce qui a pour conséquence de dégrader la bande passante. En fonction de leur forme et de leur emplacement les fentes peuvent éventuellement introduire des effets capacitifs et inductifs. Si ces effets sont correctement contrôlés, ils peuvent donc augmenter la bande passante de l'antenne.

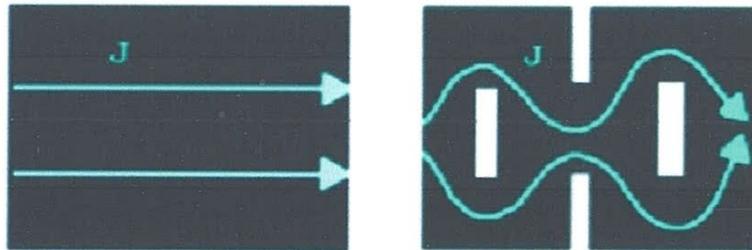


Figure I-3 : Illustration du chemin des courants de surface sans fente et avec fente

### b) Ajout de court-circuit ou de circuits ouverts

L'utilisation de courts-circuits lorsqu'ils sont bien placés, permet en fonction de la répartition du champ électrique dans l'antenne de venir radicalement diminuer les dimensions d'une antenne. En effet, dans une structure, s'il existe un axe où le champ électrique s'annule, il est possible d'y ajouter un mur électrique et de réduire ainsi de moitié l'encombrement d'une antenne. L'antenne la plus connue utilisant des courts-circuits est l'antenne PIFA (Planar Inverted-F Antenna). Cette antenne est court-circuitée en son centre avec un bout de métal vertical connecté au plan de masse. L'antenne passe ainsi d'une longueur électrique de  $\lambda/2$  à  $\lambda/4$ . [I-4]

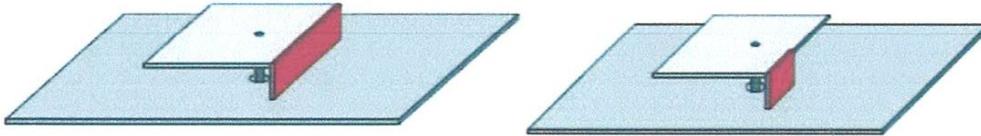
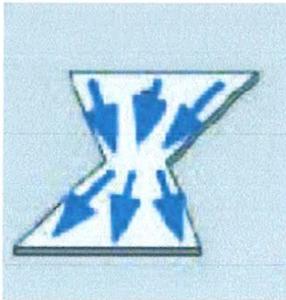


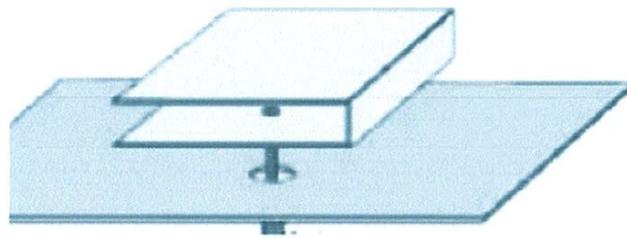
Figure I-4 : Antenne PIFA avec court-circuit plan ou languette

c) Repliements et courbure

Cette technique, a aussi sa place pour la miniaturisation des antennes. Par cette technique, on modifie la forme de l'élément rayonnant ou bien on le replie sur lui-même (FigureI-5). Cette opération conduit naturellement à un élément qui occupe physiquement moins d'espace qu'une structure non repliée. Cette technique est particulièrement utilisée sur les dipôles.



(a)



(b)

Figure I-5 : (a) illustration d'une antenne repliee (b) repliement verticale

Généralement, on trouve cette technique sur des modèles d'antennes de type (PIFA) en la repliant sur plusieurs niveaux.

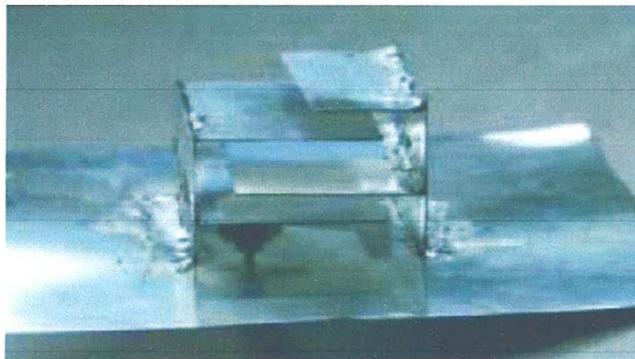


Figure I-6 : PIFA replie sur plusieurs niveaux

Cette technique permet de réduire la longueur électrique de la PIFA initialement de  $\lambda_g/4$  d'un facteur  $1/N$ , avec  $N$  le nombre de plaques métalliques montées verticalement (Figure I-6) au détriment cependant de la hauteur. [I-6]

#### d) Insertion des méandres

Tout comme l'antenne hélice pour les antennes filaires, l'antenne méandre permet de diminuer la longueur physique d'une antenne sans diminuer sa longueur électrique. L'avantage par rapport à l'antenne hélice est que l'antenne méandre est plane et donc moins encombrante et plus facilement intégrable dans un terminal mobile. La Figure I-7 montre une antenne méandre dédiée à la réception GSM d'un téléphone mobile. Elle est imprimée sur du substrat FR4 d'épaisseur 0.8 mm et tel que  $\epsilon_s=4.9$ . [I-7]

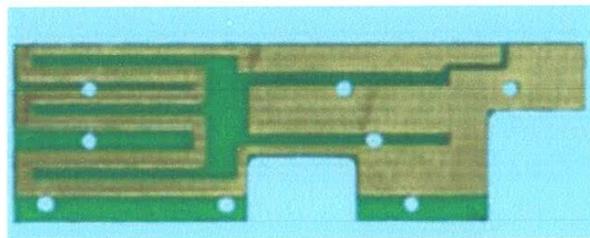


Figure I-7 : Antenne méandre destinée à la réception du GSM

### 3. Ajouts d'éléments localisés

#### a) Composants électroniques

Pour diminuer les longueurs de l'antenne et améliorer l'adaptation, il est possible de charger l'antenne par des éléments discrets tels que des résistances, des capacités ou des inductances. Néanmoins l'ajout de ces composants introduit des pertes supplémentaires qui se traduisent par une diminution de l'efficacité de l'antenne. L'utilisation de composants discrets dans une antenne peut poser des problèmes de tenue en puissance dans les antennes à fort gain. [I-4]

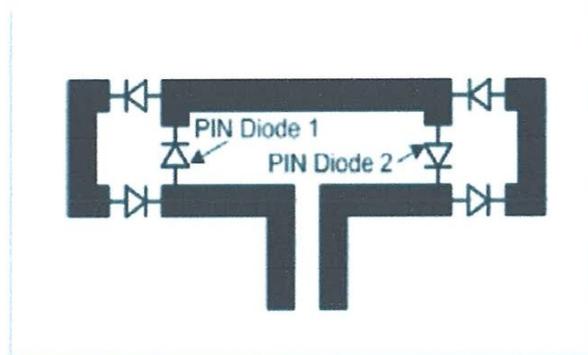


Figure I-8 : Antenne avec des lignes commutables

b) Résonateurs couplés

Afin d'élargir la bande passante ou pour rendre multi-bande une antenne, il est possible de venir approcher un résonateur de l'élément rayonnant. Par un couplage électromagnétique cet élément va conduire le courant et participer au rayonnement de l'antenne.

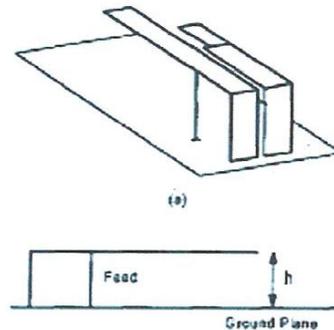


Figure I-9 : Antenne PIFA avec un élément couplé

La Figure I-9 présente l'exemple d'une antenne PIFA à laquelle un résonateur court-circuité est placé proche de l'élément rayonnant. La proximité de ces éléments entraîne un couplage qui permet d'ajouter une résonance aux coefficients de réflexion. Cette nouvelle résonance vient élargir la bande passante de l'antenne tout en limitant la place occupée par l'antenne. [I-4]

### III. Antennes miniatures multi bande et large bande

La croissance récente et le développement rapide de la communication mobile et des dispositifs fonctionnant à plusieurs bandes de fréquences ont conduit à l'exigence d'antennes prenant en charge l'exploitation multi bande ou à large bande

#### 1. Les antennes miniatures multi bande

Dans les téléphones portables et plusieurs autres appareils de communication sans fil, l'antenne est un élément important qui décide de la qualité et de la performance de l'appareil sur diverses normes de communication. D'après [I-8] une antenne plane interne inversée (PIFA) compacte avec un plan de masse ayant deux fentes à extrémités ouvertes qui est très mince par rapport à la structure PIFA classique. Le plan de masse est un élément de radiateur avec la plaque supérieure de la structure PIFA, la hauteur de PIFA peut-être réduite dans une grande mesure, ce qui a pour effet de réduire l'épaisseur des téléphones mobiles. Dans [I-8], l'antenne proposée à un volume de  $25 \times 15 \times 3,8 \text{ mm}^3$ . L'antenne est conçue pour fonctionner au GPS, GLONASS, DCS (1800 MHz), PCS (1900 MHz), UMTS (2100 MHz), Bluetooth (2400 MHz), 4G LTE (2300 MHz et 2600 MHz), WLAN (5,2 GHz) normes. Les

résultats de la simulation montrent que les paramètres de performance de l'antenne satisfont aux exigences des dispositifs de communication sans fil avancés.

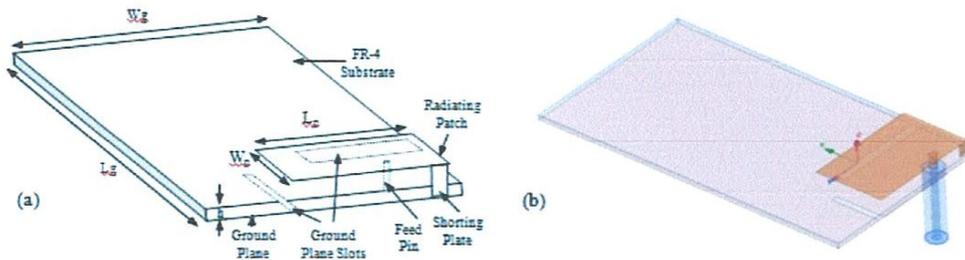


Figure I-10 : PIFA pour une application multi bandes

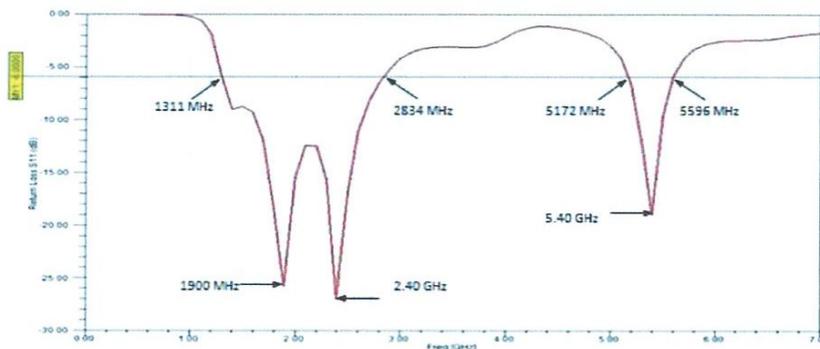


Figure I-11 : S11 du PIFA proposée

## 2. Antenne miniature large bande

Les antennes jouent un rôle critique dans des systèmes de communication d'UWB puisqu'elles influencent la complexité des conceptions du récepteur et l'émetteur (générateur d'impulsion). Leur conception est bien plus provocante pour les dispositifs portables d'UWB. L'attribution récente du spectre de fréquence de 3,1 à 10,6 GHz par la Commission fédérale de communications (FCC) pour des applications à ultra large bande (UWB) a présenté une myriade d'occasions et de défis passionnants pour des concepteurs d'antenne. [I-9] la figure I-12 montre que L'élément rayonnant est imprimé sur du substrat FR4 possédant une permittivité diélectrique égale à 4.4 et il est alimenté par une ligne micro ruban présentant une impédance de 50 Ω. Les dimensions de l'élément rayonnant sont  $L_1=W_1=10$  mm et celles de la carte PCB sont égales à 75 mm x 40 mm. Cette antenne couvre la bande [2.4 GHz – 6.8 GHz] et donc tous les standards se trouvant dans cette gamme de fréquence (Bandes WiFi, WiMax, etc) avec un rapport d'ondes stationnaires inférieur à 2. L'élément rayonnant

possède finalement des dimensions de l'ordre de  $\lambda_0/13 \times \lambda_0/13$  à 2.4 GHz et le système antennaire possède 96% de bande passante. [I-7]

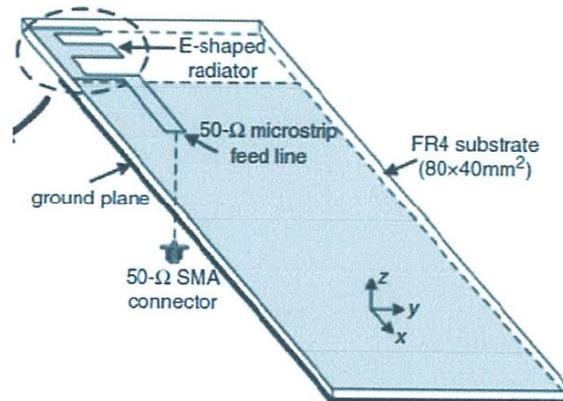


Figure I-12 : Antenne E-shaped-radiator pour une application large bande

#### IV. Les applications des antennes miniatures

La technologie sans fil moderne et la miniaturisation des antennes et des composants électroniques jouent un rôle très important. Les systèmes de transmission sans fil sont de plus en plus employés dans les applications biomédicales, les vêtements intelligents et les terminaux mobiles.

##### 1. Antenne miniature dans les milieux biologiques

Avec le développement rapide des technologies sans fil modernes et la miniaturisation des antennes et des systèmes électriques, l'emploi des antennes à l'intérieur et à l'extérieur du corps humain pour le suivi thérapeutique est devenu possible, parmi ces antennes on trouve les antennes méandre conformé sur une gélule, intégré dans le tatouage électronique.

##### a) Antenne méandre conformé sur une gélule

**La capsule :** La capsule (Image source Given) se présente sous forme d'une gélule de dimensions égales à 11 mm x 30 mm Elle comprend 8 modules :

- 1 2 3 : Système de caméra et d'optique.
- 4 : Éclairage miniaturisé (White LED).
- 5 : Puce électronique capable de capturer des images couleurs.
- 6 : Deux batteries disposant d'une autonomie de 8 heures environ.
- 7 : Système d'intégration d'un émetteur vidéo de petite taille.
- 8 : Antenne (la fréquence utilisée est de 410 MHz). [I-10]

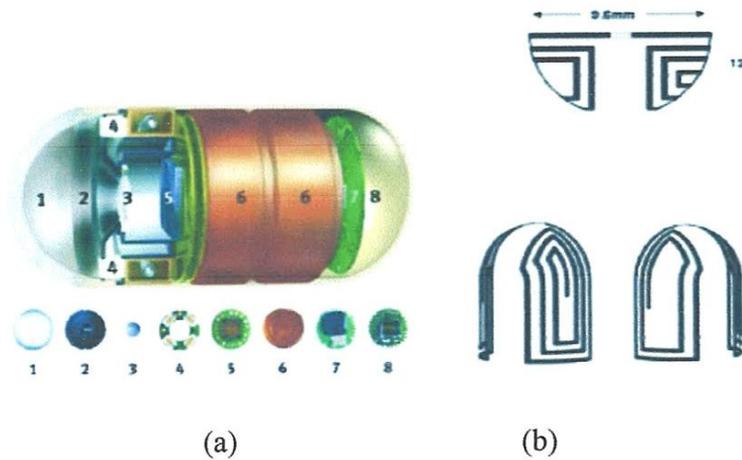


Figure I-13 : (a) la capsule (b) antenne méandre conformé sur une gélule

b) Antenne miniature intégrée dans le tatouage électronique

Le tatouage est fait à partir d'une « encre » électronique à la place de l'encre habituellement utilisée. Pose à la surface de la peau, Le tatouage surveille les paramètres de sante tels que le rythme cardiaque, la fréquence respiratoire ou encore la tension artérielle. Fonctionnant sans fil, il envoie ces données à votre médecin traitant via une application sur smartphone. Très discret et pas du tout encombrant, le tatouage fait son travail de docteur sans gêner le patient qui peut ainsi continuer à vivre normalement au lieu d'être relie par de grosses machines. [I-11]

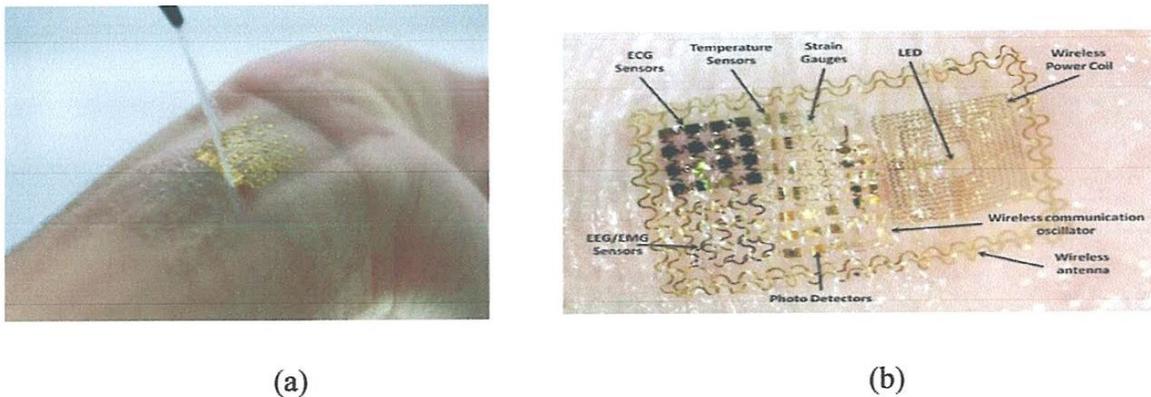


Figure I-14 : (a) tatouage électronique (b) les éléments d'un tatouage électronique

2. Antenne miniature pour les vêtements communicants

Ces antennes sont planes, flexibles et mesurent quelques centimètres. Elles se cachent dans les électro textiles d'un tee-shirt. Les applications sont multiples : transmettre, via les antennes et un téléphone, les données physiologiques d'un sportif (température, rythme cardiaque, localisation GPS), relier un patient à son médecin, ou relayer les images filmées par un pompier. [I-12]

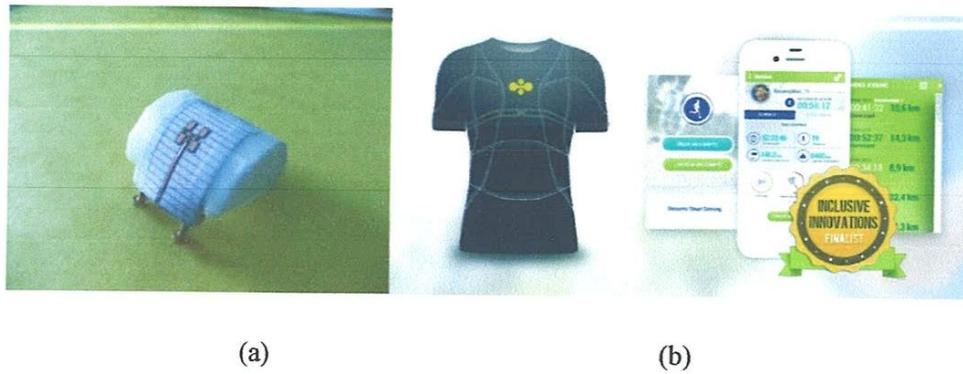


Figure I-15 : (a) antenne miniature sur un électro-textile (b) smart tee-shirt

### 3. Antenne miniature a base des polymères souples

L'antenne se présente comme une étiquette plastique transparente. A l'intérieur, du gallium est injecté dans des micro canaux de la taille d'un cheveu. Ce métal est maintenu liquide à température ambiante par mélange avec de l'indium. En s'oxydant après injection, il se constitue une sorte de peau qui l'emprisonne et le protège des fuites. Selon les chercheurs, cette antenne peut être pliée, étirée, torsadée, etc., tout en maintenant sa capacité à fonctionner. Les applications potentielles vont de la téléphonie mobile au militaire. Le gallium et l'indium sont pourtant des métaux plus chers que le cuivre, le métal le plus courant aujourd'hui dans les antennes. Mais selon les chercheurs, la quantité utilisée est si infime que l'antenne d'un terminal portable sans fil ne coûterait que quelques cents. Un prototype est réalisé dans un substrat polymère. Les tests dans la bande de fréquences de 1 910 à 1 990 MHz donnent une efficacité de rayonnement radioélectrique de 90 %, similaire à celle d'une antenne en cuivre. [I-13]

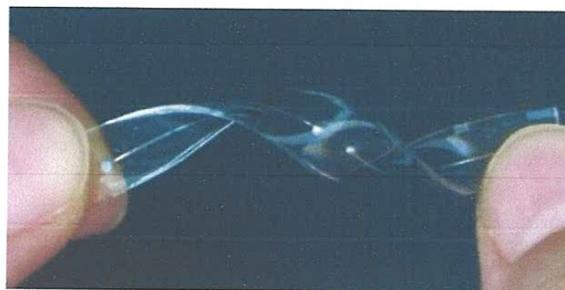


Figure I-16 : antenne miniature sur une substrat souple

Comme une application de ces antennes Apple expérimente des montres en verre incurvé. Une telle montre fonctionnerait sur la base de l'iOS d'Apple et se démarque de la concurrence par son design en verre qui peut être courbé autour du poignet.



Figure I-17 : montre intelligente flexible à base d'une antenne souple

#### 4. Antenne PIFA pour terminaux mobile

Dans [I-14], une nouvelle antenne miniature Planar Inverted F Antenna (PIFA) pour la technologie sans fil 5G a été proposée. la taille globale de l'antenne proposée compris le plan de masse est de 18mm × 10mm × 3.5mm ce qui est adapté pour être utilisé dans un appareil mobile ainsi que dans de petits électronique portable. l'antenne couvre la bande de fréquence proposée 5G et couvre une large gamme de fréquence de 9.77 GHz-11.58 GHz. la tache rayonnante supérieur de l'antenne a de bords tronqués, ce qui en fait un nouveau design (Figure I-18). le [I-14] discute de divers paramètres de performance tel que le gain et le diagramme de rayonnement. les résultats mesurés sont en bon accord avec les résultats simulé. [I-14]

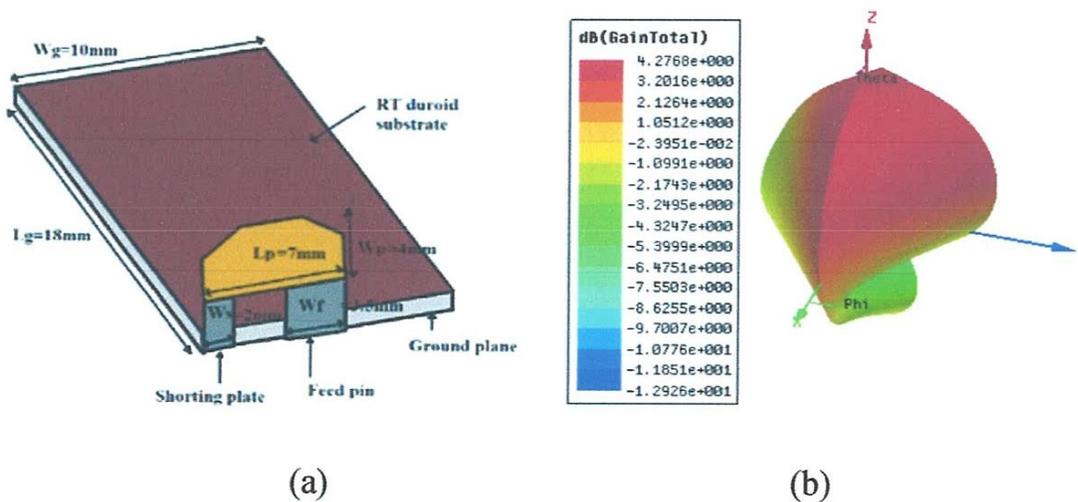


Figure I-18 : (a) PIFA pour la 5G (b) diagramme de rayonnement de cette PIFA

## **V. Conclusion**

Ce premier chapitre présente un état de l'art sur les antennes miniature, les techniques de miniaturisations et leurs applications. Dans la première partie, les différentes techniques de miniaturisation d'antennes ont été passées en revue. Ces techniques consistent essentiellement à une modification de la géométrie de l'antenne (méandres, etc.), à une introduction de charges capacitives ou inductives localisées à des emplacements spécifiques pour modifier la distribution du courant le long de l'antenne et obtenir la réduction de taille souhaitée ou à l'intégration de court-circuit. L'emploi de matériaux particuliers permet également de miniaturiser des antennes. Parmi les matériaux utilisés on peut citer : les diélectriques, les matériaux magnétiques, les matériaux magnéto-diélectriques. Une seconde partie qui présente différents applications des antennes miniatures dans le domaine médical, pour les vêtements communicants et pour les terminant mobiles.

# Chapitre II

*Antennes miniatures ultra large bande*

## I. Introduction

La technologie Ultra Large Bande (ULB) ou Ultra Wide Band (UWB) est une technologie de transmission sans fil utilisant les ondes radio. Elle est née au début des années soixante et doit une grande partie de son développement à de nombreux travaux financés par le gouvernement américain sous le couvert de la confidentialité et destinés aux applications radar. Depuis 1994, cette technologie est largement étudiée dans les milieux industriels et universitaires et fait l'objet de nombreuses publications relatives notamment à son utilisation dans les WPANs (Wireless Personal Area Network) à haut débit. La FCC (Federal Communications Commission) - l'autorité américaine de régulation des télécoms - a d'ailleurs autorisé son exploitation commerciale depuis le 14 février 2002 bien que la définition exacte ne soit toujours pas arrêtée. A ce jour, seuls les Etats-Unis ont légiféré et autorisé le déploiement de l'UWB. [II-1]. Dans ce contexte, ce chapitre vise à décrire les différents aspects couverts par la technologie UWB : quelles sont ses caractéristiques, ses points faibles et ses atouts, Mais surtout, quels sont les enjeux induits pour élargir la bande passante, c'est quoi une antenne monopole alimenté par une ligne coplanaire CPW ? et finalement on va parler sur le principe de la technique MIMO et ses utilisations.

## II. La technologie ULB

### 1. Définition

La définition de l'Ultra large bande donnée par la FCC en février 2002 est la suivante. Un signal est dit ultra large bande si :

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

$$Bp_{relative} = 2 \cdot \frac{f_h - f_l}{f_h + f_l} > 0.2 \quad (II-1)$$

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

[II-2]

## 2. Caractéristiques de la technologie ULB

La technologie ULB a plusieurs caractéristiques qui la distinguent des systèmes à bande étroite conventionnels :

Une large bande passante instantanée, typiquement de l'ordre de 500 MHz à plusieurs GHz, ce qui rend l'ULB plus adaptée à l'augmentation de débit que les systèmes existants présentant des contraintes sur leur largeur de bande. En effet, la capacité d'un canal de transmission peut être calculée selon le théorème de Shannon par :

$$C = B \cdot \log_2 \left( 1 + \frac{S}{B+N_0} \right) \quad (\text{II-2})$$

Où C: représente la capacité maximale du canal (bit/s), B : la largeur de bande du canal (Hz), S : la puissance du signal (W) et  $N_0$ : la densité spectrale de puissance du bruit. Il est clair d'après équation (II-2) que la capacité maximale du canal de transmission croît linéairement avec la largeur de bande. Par ailleurs, cette capacité du canal (C) est une indication sur le débit maximal théorique. Pour un canal donné, comme on sait d'après la théorie de l'information, il est possible de transmettre des données à un taux d'erreur binaire inférieur à un certain seuil fixé, à condition que le débit de transmission de données reste inférieur à la capacité maximale du canal de transmission. La grande largeur de bande offre à l'ULB une résolution temporelle supérieure à celle des systèmes conventionnels, pour des applications radar et de localisation précise. Cette résolution est typiquement de l'ordre de la nanoseconde (ULB en mode impulsionnel). Une courte durée d'impulsions permet une grande robustesse face aux évanouissements rapides dus aux trajets multiples dans un environnement dense. Cette courte durée permet l'exploitation d'un nombre supérieur de trajets.

Une faible densité spectrale de puissance qui permet la coexistence de l'ULB et des services existants. En effet, la large bande de fréquences des signaux ULB recouvre des fréquences déjà allouées à d'autres systèmes radio. Les autorités de régulation ont alors imposé cette propriété aux signaux ULB afin de permettre la coexistence de l'ULB avec les services existants sans les perturber. Comme conséquence à cette faible densité spectrale de puissance, les signaux ULB sont plus difficiles à détecter et les communications ULB sont mieux sécurisées. D'autre part, cette propriété limite la portée des communications ULB à quelques dizaines de mètres. Les applications visées par l'ULB sont donc des applications à courte portée et à haut débit.

Une simple implémentation étant donné que l'ULB permet la transmission directe d'impulsions en bande de base sans porteuse. [II-3]

Parmi les inconvénients liés à l'utilisation de cette nouvelle technique de communication tient au fait que les fréquences utilisées sont déjà employées par d'autres systèmes, ce qui rend possible l'existence d'interférences. [II-2]

### III. Techniques d'élargissement de la bande passante

Différentes techniques ont été envisagées pour élargir la bande passante et stabiliser le diagramme de rayonnement. On peut citer pour augmenter la bande passante du monopole, l'utilisation d'un court-circuit, le décalage de l'alimentation, l'utilisation des encoches, et la technique de l'évasement symétrique [II-4]. Toutes ces méthodes se basent sur le même effet physique, à savoir le fait d'ajouter des modes supplémentaires à la structure. Des méthodes existent aussi pour stabiliser le diagramme de rayonnement du monopole carré, par exemple :

- Ajouter un second élément rayonnant, identique au précédent, perpendiculaire l'élément rayonnant principal
- Une méthode consiste à utiliser trois monopoles rectangulaires pliés, espacés de 120°le tableau ci-dessous récapitule les avantages et les inconvénients des différentes méthodes permettant d'élargir la bande passante d'un monopole (exemple : rectangulaire).

	Avantages	Inconvénients
Court-circuit	Diminution de 50% de la taille Fort courant sur le court-circuit	Diminution de l'efficacité a bande passante identique Instabilité du diagramme de rayonnement
Décalage de l'alimentation	129% de bande passante contre 68% pour le monopole initial	Instabilité du diagramme de rayonnement
Encoches	169% de bande passante contre 68% pour le monopole initial	Instabilité du diagramme de rayonnement
Evasement symétrique	169% de bande passante contre 68% pour le monopole initial	Instabilité du diagramme de rayonnement

Monopole croisé	Stabilité du diagramme de rayonnement	Difficulté de fabrication  111% de bande passante 169% pour monopole a évasement symétrique
Monopole a 3 plaques	Stabilité du diagramme de rayonnement  122% de bande passante contre 68% pour le monopole initial	Difficulté de fabrication

Tableau II-1 : Les avantages et les inconvénients des différentes méthodes permettant d'élargir la bande passante d'un monopole

#### IV. Antennes Ultra Large Bande :

Les antennes ULB ont été classées selon certaines propriétés : particularités géométriques ou spécificité du diagramme de rayonnement (antenne omnidirectionnel ou directive). Toutes ces antennes possèdent naturellement une bande passante assez élevée. Il existe plusieurs façons de réaliser une antenne ayant une bande passante très large. Parmi ces antennes on va parler sur les antennes indépendantes de la fréquence, les antennes omnidirectionnelles et les antennes monopoles large bande. Ces antennes se caractérisent par un passage progressif de l'impédance caractéristique de la ligne (ou du guide) à l'impédance d'onde de l'espace libre. [II-2]

##### 1. Antennes indépendantes de la fréquence

Les antennes indépendantes de la fréquence sont connues depuis longtemps et ont été définies par Rumsey en 1957. Ce sont des antennes qui sont entièrement définies par leurs dimensions angulaires. Les performances de l'antenne (diagramme de rayonnement, impédance d'entrée) sont indépendantes de la fréquence. Pour ce type d'antenne, si l'on multiplie toutes les dimensions de l'antenne par un facteur X, les performances de l'antenne restent inchangées, seule la fréquence de travail augmente du même facteur X.

L'expression générale de leur forme géométrique peut se mettre sous la forme suivante

$$r = e^{a(\varphi+\varphi_0)} F(\theta) \quad (\text{II-3})$$

Où  $r, \theta, \varphi$  sont les coordonnées sphériques, les deux  $a$  et  $\varphi_0$  sont constantes et  $F$  une fonction ne dépendant que de  $\theta$ . Théoriquement, ces antennes présentent une bande passante infinie, cependant, en pratique leur bande passante est finie à cause des dimensions finies de l'antenne

2. Antennes omnidirectionnelles

On peut obtenir des antennes ayant naturellement à la fois une très large bande passante et un diagramme de rayonnement omnidirectionnel. Ces antennes sont une évolution directe des monopoles et des dipôles de base (doublet de Hertz). On sait que plus un dipôle est épais, plus sa bande passante est grande. A partir de cette simple constatation, de nombreuses antennes large bande ont été conçues. Parmi les antennes on peut citer les antennes biconiques large bande. Les antennes biconiques ont été imaginées en 1943 par Schelkunoff. Le concept de l'antenne biconique est basé sur le fait qu'un dipôle construit à l'aide d'un fil épais offre une bande passante plus grande que s'il est construit avec un fil fin. Ce concept peut être étendu pour obtenir une bande passante encore plus importante en utilisant des conducteurs évasés. On forme ainsi la structure biconique montrée sur la (Figure II-1). L'antenne biconique peut être analysée comme si la ligne de transmission biconique de l'antenne était évasée jusqu'à l'infini. L'antenne biconique infinie agit comme un guide pour une onde sphérique.

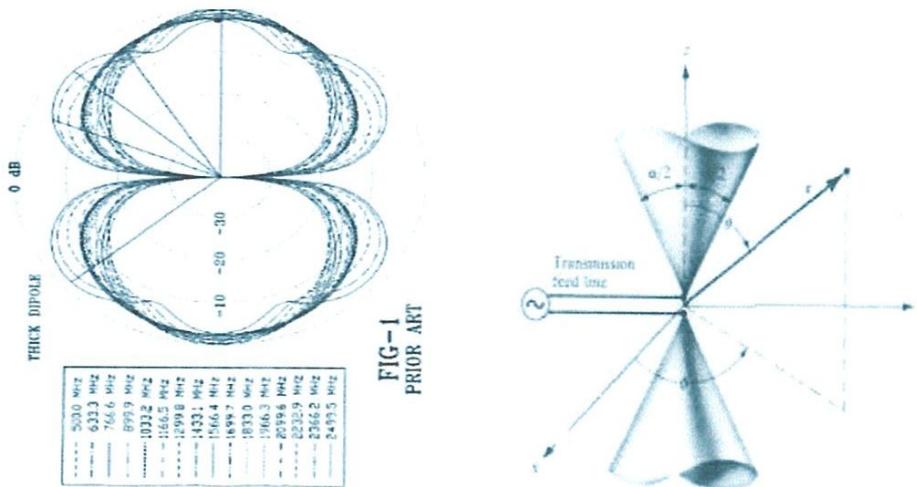


Figure II-1 : Antenne biconique et son diagramme de rayonnement.

3. Dipôles/ monopoles électriques ultra large bande

Une autre catégorie d'antenne large bande est constituée par les monopoles plans ou dipôles. De nombreuses études ont été menées sur ce type d'antenne et différentes formes ont été conçues : carrée, circulaire ou elliptique. Toutes ces antennes présentent de nombreuses caractéristiques communes : une bande passante importante, une polarisation linéaire et un

diagramme de rayonnement omnidirectionnel dans le plan azimutal. L'utilisation d'un plan de masse perpendiculaire à l'élément rayonnant présente un inconvénient majeur pour l'utilisation d'une telle antenne. En effet, la zone de l'alimentation du monopole est relativement fine, ce qui entraîne une certaine fragilité de l'antenne. En outre, pour une application commerciale, il est préférable de rendre plane un monopole plan, c'est-à-dire d'utiliser un plan parallèle à la structure. Dans ce paragraphe, on va examiner d'un point de vue fréquentiel et d'un point de vue temporel plusieurs types d'antennes couramment utilisées.

a) Monopole circulaire/ elliptique

C'est la première antenne large bande du type monopoles plans qui a été conçue et réalisée en 1992 par Honda. (Figure II-2)

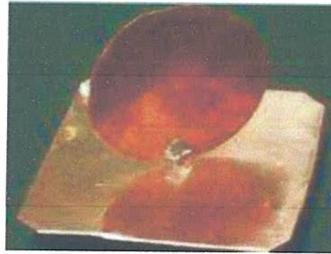


Figure II-2 : Exemple de réalisation pratique d'un monopole circulaire (rayon 2.5 cm).

Le monopole circulaire plan est de forme circulaire avec un plan de masse de dimensions supérieures à une longueur d'onde maximale pour éviter les réflexions qui proviennent du plan de masse. L'élément peut être de forme elliptique, cependant un fort rapport d'ellipticité dégrade la bande passante de l'antenne. L'antenne plane de forme elliptique a été la première antenne large bande commercialisée. Il est possible de calculer numériquement avec une bonne approximation la fréquence basse d'adaptation pour un ROS fixé à 2 en fonction des paramètres géométriques de l'antenne : ce calcul se fait de la même façon que pour un monopole cylindrique.

$$f_{low} = \frac{30 \times 0.24}{l+r} \quad (\text{II-4})$$

Où  $f_{low}$  est la fréquence basse exprimée en GHz,  $l$  la hauteur du monopole en cm et  $r$  son rayon équivalent en cm. Le rayon équivalent d'un monopole elliptique peut être déterminé à partir de la formule suivante :

$$\frac{2}{\pi r l} = \pi a b \quad (\text{II.5})$$

Où  $a$  désigné le petit axe de l'ellipse et  $b$  le grand axe. Habituellement, cette antenne a une bande passante de plus de 160 %. Pour un monopole circulaire de rayon 2.5 cm, la bande passante va de 1,17-12 GHz pour un ROS  $< 2$ .

Depuis quelques années, cette antenne est réalisée avec un plan de masse parallèle à l'élément rayonnant comme le montre la (Figure II-3).

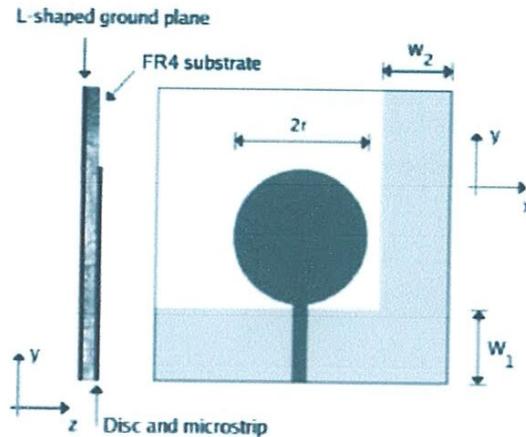


Figure II-3 : Monopole planaire circulaire.

b) Amélioration des performances de l'antenne circulaire

A partir de la forme planaire circulaire, d'autres formes d'antennes ont émergé. Elles ont été conçues dans le but de réduire la taille de l'antenne ou d'améliorer l'une de ses performances (augmentation de la bande passante ou stabilisation du diagramme de rayonnement, rejet d'une fréquence en particulier.)

c) Augmentation de la bande passante de l'antenne

Dans certaines applications, il est intéressant d'avoir une antenne ayant une bande passante le plus large possible, par exemple pour l'utilisation de plusieurs standards sur une même antenne. C'est dans cette optique qu'a été conçue l'antenne suivante. Elle se base sur un monopole elliptique avec un fort rapport d'ellipticité et un plan de masse de forme trapézoïdale, permettant d'obtenir une très large bande passante : ROS  $< 2$  0.44-10.5 GHz.

Une réalisation de cette antenne est présentée sur la figure II-4, ainsi que son ROS.

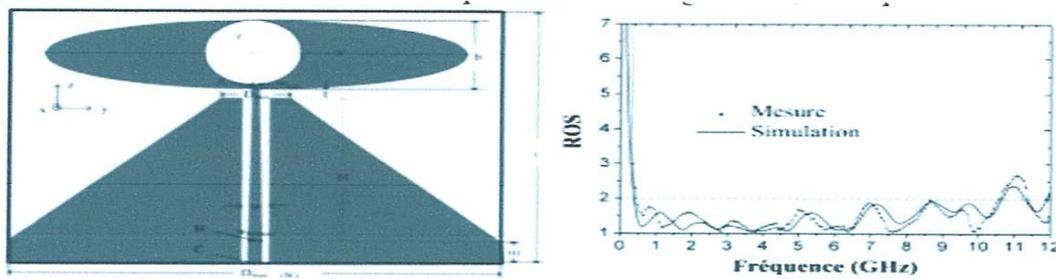


Figure II-4 : Exemple d'amélioration de la bande passante d'antenne planaire et son ROS.

d) Antennes ULB à sous bande coupée :

Pour éviter certaines interférences avec les systèmes à bande étroite déjà existants, l'antenne ULB doit pouvoir rejeter certaines fréquences (bande 5-6 GHz pour le Wifi, ou 2.4 GHz pour le Bluetooth). Pour ce faire, l'antenne doit pouvoir jouer le rôle de filtre coupe bande. En ajoutant des fentes ou des éléments parasites, sur ou proches de l'élément rayonnant, l'antenne peut être désadaptée sur une certaine sous bande. La position et la dimension de la fente sont immédiatement reliées par la bande de fréquence rejetée.

Une antenne ultra large bande à sous bande coupée travaillant dans la bande 3.1-10.6 GHz, et rejetant la bande de fréquence 5-6 GHz est présentée sur la figure II-5.

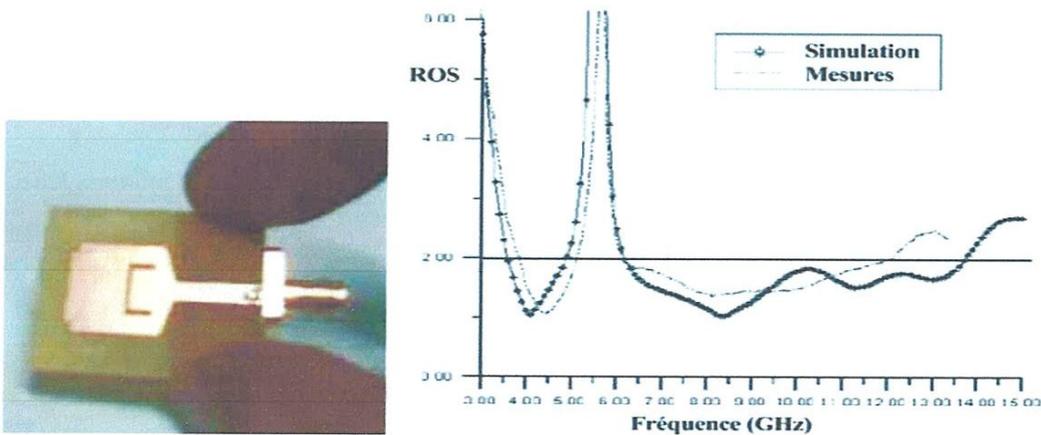


Figure II-5 : Antenne ULB à sous bande coupée et son ROS

4. Antennes directives

Les antennes ULB directives peuvent être décrites comme des systèmes de transition entre un guide d'onde et l'espace libre. On part d'une ligne de transmission dont l'un des paramètres est une impédance caractéristique constante quel que soit la fréquence, puis les lignes de

transmission s'évasent pour amener graduellement la structure à l'impédance du vide. L'onde peut maintenant rayonner. L'antenne ULB directive est souvent utilisée dans des applications particulières ; par exemple dans le cas d'une station de base en communication avec des stations fixes. D'autres systèmes requièrent que l'antenne rayonne plutôt dans un demi-espace. On peut citer comme exemple l'antenne de point d'accès accrochée au mur ou encore une antenne en façade d'appareils électroniques. Certaines antennes ULB directives sont aussi couramment utilisées dans le cadre de mesure d'antennes en chambre anéchoïde. Contrairement aux antennes étudiées précédemment, il est très difficile de miniaturiser ce type d'antenne.

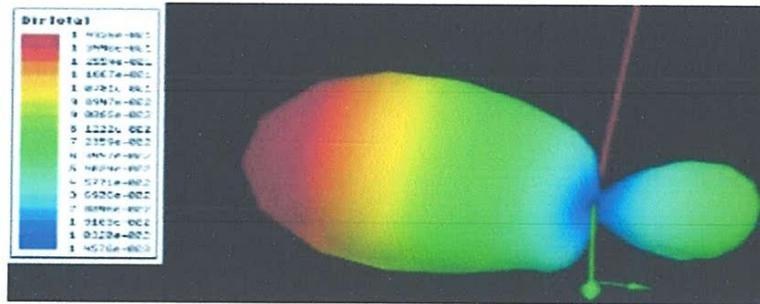


Figure II-6 : diagramme de rayonnement d'une antenne directive

### V. Caractérisation des antennes Ultra Large Bande

L'antenne est une partie indispensable de n'importe quel dispositif sans fil. Selon le Standard IEEE (Définitions des termes pour les antennes), une antenne est définie comme "un système permettant de rayonner ou de recevoir des ondes radio ". En d'autres termes, à l'émission, une antenne est un dispositif qui prend les signaux électromagnétiques d'une ligne de transmission, les diffuse dans l'espace libre, comme le montre la Figure II-7 et en mode de réception, l'antenne recueille l'onde électromagnétique incidente et la convertit en une tension. [II-2]

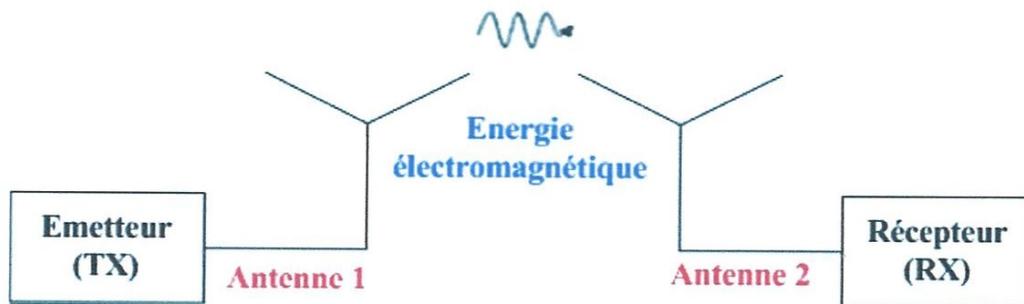


Figure II-7 : Système global comportant une antenne émettrice et une antenne réceptrice.

Pour décrire les performances d'une antenne, plusieurs paramètres essentiels que l'on va définir dans ce chapitre sont utilisés : son impédance d'entrée, sa polarisation, son diagramme de rayonnement, son gain et son efficacité.

1. Caractéristiques d'adaptation

a) Impédance d'entrée d'une antenne

On note  $Z_c$  l'impédance caractéristique de la ligne ( $50\Omega$ , en règle générale), Par rapport au générateur, l'antenne se comporte comme un dipôle électrique. L'impédance d'une antenne est l'impédance vue par les extrémités de l'antenne seule (non reliée à une charge). Cette impédance est définie comme le rapport entre la tension et le courant aux terminaux de l'antenne ou comme le rapport entre les composantes appropriées des champs électriques et magnétiques. On note  $Z_{ant}$  cette impédance dépendant de la fréquence.

$$Z_{ant} = R_{ant}(f) + jX_{ant}(f) \tag{II-6}$$

La partie réelle comporte une partie due au rayonnement ( $R_{ant}$ ) et une partie due aux pertes ohmiques et diélectriques des matériaux.

b) Coefficient de réflexion et ROS

On considère un système comportant l'antenne, un générateur, une ligne de transmission d'impédance caractéristique  $Z_c$ .

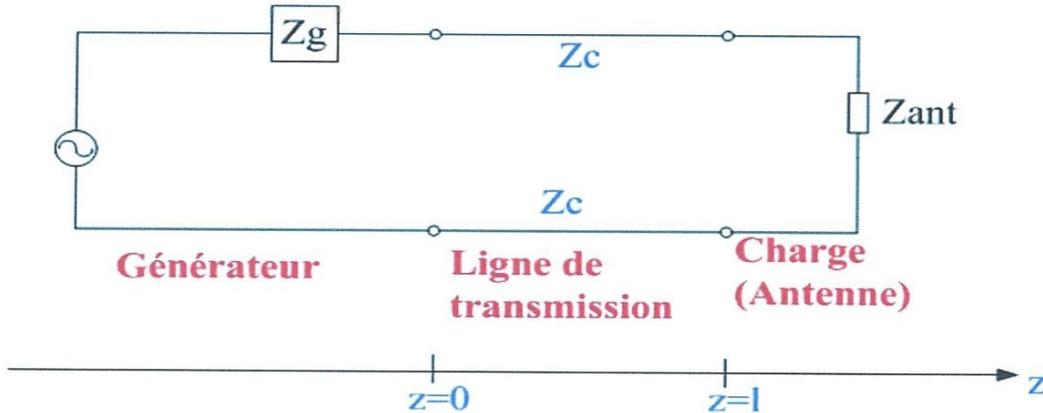


Figure II-8 : Schéma d'une antenne connectée à une ligne de transmission et un générateur

On peut écrire les équations traditionnelles reliant tensions et courants, en  $z$  :

$$I(z) = I_0^+ \cdot e^{-jKz} + I_0^- \cdot e^{+jKz} \quad (\text{II-7})$$

$$V(z) = V_0^+ \cdot e^{-jKz} + V_0^- \cdot e^{+jKz} \quad (\text{II-8})$$

Avec  $k$ , le nombre d'onde  $K = \frac{\omega}{c}$

On définit l'impédance caractéristique  $Z_C$  par :

$$Z_C = \frac{V_0^+}{I_0^+} = -\frac{V_0^-}{I_0^-} \quad (\text{II-9})$$

Les équations tensions-courants se réécrivent alors en fonction de l'impédance caractéristique :

$$I(z) = I_0^+ \cdot e^{-jKz} + I_0^- \cdot e^{+jKz} \quad (\text{II-10})$$

$$V(z) = Z_C (I_0^+ \cdot e^{-jKz} - I_0^- \cdot e^{+jKz}) \quad (\text{II-11})$$

A partir de ces deux équations, on peut définir le coefficient de réflexion  $\Gamma$  par :

$$\Gamma(z) = \frac{V_0^-}{V_0^+} e^{j2Kz} = \frac{Z_{ant} - Z_C}{Z_{ant} + Z_C} e^{j2K(z-1)} \quad (\text{II-12})$$

L'équation précédente permet de déterminer le paramètre de réflexion  $S_{11}$  ou  $\Gamma$  en  $z=1$

$$S_{11} = \Gamma = \frac{Z_{ant} - Z_C}{Z_{ant} + Z_C} \quad (\text{II-13})$$

De la même façon, on peut aussi déterminer le Rapport d'Onde Stationnaire (ROS) par le rapport entre la tension maximale à la tension minimale :

$$\text{ROS} = \frac{V_{\max}}{V_{\min}} = \frac{1 + |S_{11}|}{1 - |S_{11}|} \quad (\text{II-14})$$

Et inversement :

$$|S_{11}| = |\Gamma| = \frac{\text{ROS} - 1}{\text{ROS} + 1} \quad (\text{II-15})$$

**NB** : Le ROS est une mesure de la désadaptation entre la ligne de transmission et la charge, Plus le ROS est élevé, moins bonne est l'adaptation. Le minimum du ROS correspond à une adaptation parfaite, il est alors égal à 1. Le transfert de puissance maximale ne peut être atteint que si l'impédance de l'antenne est adaptée à celle du générateur

## 2. Caractéristiques de rayonnement

### a) Diagramme de rayonnement

Le diagramme de rayonnement est la représentation des propriétés de rayonnement de l'antenne en fonction de coordonnées spatiales. Dans la plupart des cas, ces diagrammes sont déterminés en champ lointain où la distribution spatiale de la puissance rayonnée ne dépend pas de la distance. Habituellement, le diagramme représente le champ normalisé (la puissance) par rapport à son maximum. Il est d'usage de limiter la représentation des diagrammes de rayonnement aux deux plans perpendiculaires :  $x-z$  ( $\theta : 0-2\pi - \varphi=0^\circ$ ) ou plan d'élévation et  $x-y$  ( $\varphi : 0-2\pi \theta=90^\circ$ ) ou plan azimutal. De façon plus précise, le plan élévation contient le vecteur du champ magnétique et la direction de rayonnement maximum, et le plan azimutal contient la direction du champ électrique et la direction de rayonnement maximum

La figure II-9 représente un doublet élémentaire avec son diagramme de rayonnement à 3 dimensions. Le gain est exprimé en dBi, ce qui signifie que le gain est rapporté à celui d'une antenne isotrope.

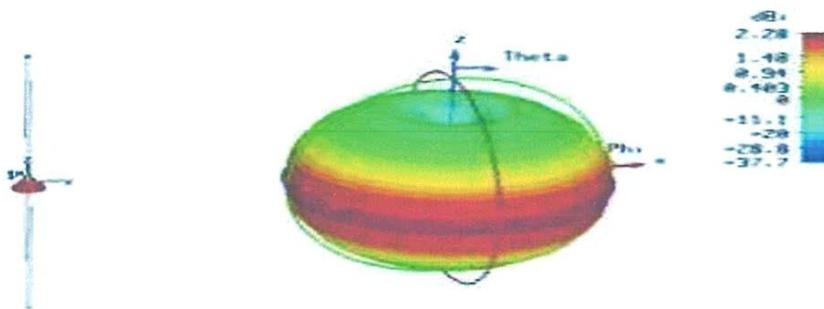


Figure II-9 : Géométrie d'un dipôle et diagramme de rayonnement en 3 dimensions

La figure II-10 illustre les diagrammes de rayonnement dans le plan H et dans le plan E

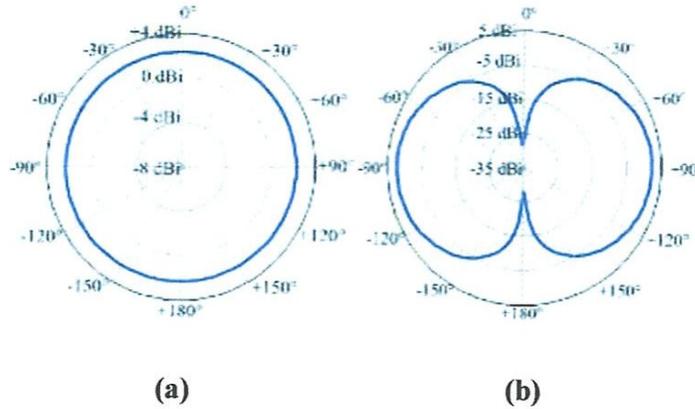


Figure II-10 : (a) Diagramme de rayonnement d'un dipôle dans le plan H ( $\theta=\pi/2$ ) (b) Diagramme de rayonnement d'un dipôle dans le plan E ( $\varphi=0$ ).

b) Directivité

La directivité d'une antenne est définie comme " le rapport entre l'intensité de rayonnement dans une direction donnée et l'intensité de rayonnement obtenue en faisant une moyenne sur toutes les directions".

La puissance totale rayonnée est égale au flux du vecteur de Poynting à travers une surface fermée entourant l'antenne.

$$P_{rad} = \iint_{sphère} \overline{P} ds = \frac{1}{2} \iint_{sphère} \text{Re}(\overline{E} \times \overline{H}^*) \cdot d\overline{s} \quad (\text{II-16})$$

L'intensité de rayonnement est définie par les Standard IEEE de Termes pour les Antennes comme "la puissance d'une antenne rayonnée par unité angle solide  $d\zeta$ ". L'intensité de rayonnement est simplement la densité moyenne de rayonnement,  $S_{rad}$ , multipliée par le carré de la distance,  $r$ . Ceci est aussi une approximation valable en champ lointain.

L'intensité de rayonnement  $U$  est donnée par  $U = r^2 S_{rad}$  où  $U$  représente l'intensité de rayonnement (W/unité d'angle solide) et  $S_{rad}$  est la densité de rayonnement (W/m<sup>2</sup>)

La puissance totale rayonnée,  $P_{rad}$ , peut être alors trouvée en intégrant l'intensité de rayonnement sur l'angle solide de  $4\pi$  stéradians et est donnée par :

$$P_{rad} = \oiint_{\Omega} U d\Omega = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} U \sin \theta d\theta d\varphi \quad (\text{II-17})$$

$$P_{rad}^{isotrope} = \oiint_{\Omega} U_0 d\Omega = 4\pi U_0 \quad (\text{II-18})$$

On peut en déduire l'expression de la directivité d'une antenne :

$$D = \frac{P_{rad}}{\frac{P_{rad}^{isotrope}}{4\pi}} = \frac{U}{U_0} = \frac{4\pi U}{P_{rad}} \quad (\text{II-19})$$

Plus simplement, la directivité d'antenne est une mesure du rapport de l'intensité du rayonnement dans une direction donnée à l'intensité du rayonnement que produirait une source isotrope.

c) Efficacité

L'efficacité d'une antenne prend en compte les pertes ohmiques et diélectriques de l'antenne dues aux matériaux utilisés et les pertes liées à la désadaptation. L'efficacité de désadaptation et l'efficacité de rayonnement sont les deux termes qui permettent de définir l'efficacité totale de l'antenne.

L'efficacité  $e_r$  de désadaptation est directement reliée au paramètre  $S_{11}$  et est définie par :

$$e_r = (1 - |S_{11}|^2) \quad (\text{II-20})$$

L'efficacité de rayonnement tient compte des pertes par conduction et des pertes diélectriques des matériaux et est déterminée expérimentalement par des mesures effectuées en chambre anéchoïde. L'efficacité de rayonnement est déterminée par le rapport de la puissance rayonnée,  $P_{rad}$  sur la puissance d'entrée aux terminaux de l'antenne  $P_{in}$ .

L'efficacité de rayonnement est alors déterminée par l'expression suivante :

$$e_{rad} = \frac{P_{rad}}{P_{in}} \quad (\text{II-21})$$

L'efficacité totale  $\eta$  de l'antenne est simplement le produit des deux précédents termes (efficacité de rayonnement et efficacité de désadaptation) :

$$\eta = e_r \cdot e_{rad} = \frac{P_{rad}}{P_{in}} (1 - |S_{11}|^2) \quad (\text{II-22})$$

d) Gain

Le concept de gain d'antenne est relié à la directivité et à l'efficacité de rayonnement de l'antenne. Le gain absolu d'une antenne est défini comme " le rapport de l'intensité, dans une direction donnée, à l'intensité de rayonnement qui serait obtenue si la puissance acceptée par l'antenne était rayonnée de façon isotrope ".

Le gain d'antenne est défini par :

$$G = e_{\text{rad}} \cdot D = 4\pi \frac{U(\theta, \varphi)}{P_{\text{in}}} = G_{\text{réalisé}} \quad (\text{II-23})$$

Ce gain est parfois dénommé gain réalisé par opposition au gain intrinsèque ne prenant en compte que les pertes de l'antenne (sans les pertes d'adaptation).

$$G_{\text{réalisé}} = G_{\text{intrinsèque}} \cdot (1 - |S_{11}|^2) \quad (\text{II-24})$$

e) Polarisation

La polarisation d'une antenne caractérise la polarisation de l'onde électromagnétique rayonnée par l'antenne en champ lointain. L'onde en champ lointain a localement les caractéristiques d'une onde plane. Les vecteurs E et H sont perpendiculaires et appartiennent à un plan perpendiculaire à la direction de propagation ( $\vec{u}_\theta, \vec{u}_\varphi$ ).

On a :

$$\vec{E} = E_\theta \vec{u}_\theta + E_\varphi \vec{u}_\varphi \quad (\text{II-25})$$

Il existe trois types de polarisation d'antenne : linéaire, circulaire et elliptique, la polarisation linéaire et la polarisation circulaire étant des cas spéciaux de polarisation elliptique.

- Polarisation linéaire :  $E_\theta$  et  $E_\varphi$  sont en phase.
- Polarisation circulaire :  $E_\theta$  et  $E_\varphi$  sont égaux en module et vibrent en quadrature.
- Polarisation elliptique : Les composantes  $E_\theta$  et  $E_\varphi$  vibrent en quadrature mais leurs modules sont quelconques

## VI. Antenne monopole planaire

Les antennes ULB planaires imprimées sur les diélectriques sont plus pratiques à mettre en œuvre que les antennes monopole planaires. Elles possèdent les mêmes paramètres géométriques ainsi les différentes formes géométriques peuvent être trouvées dans les deux configurations. Grace à leur encombrement, les antennes monopoles planaires peuvent être facilement intégrées dans des circuits RF ainsi que des dispositifs ULB. La figure II-11 montre des dessins typiques. [II-3]

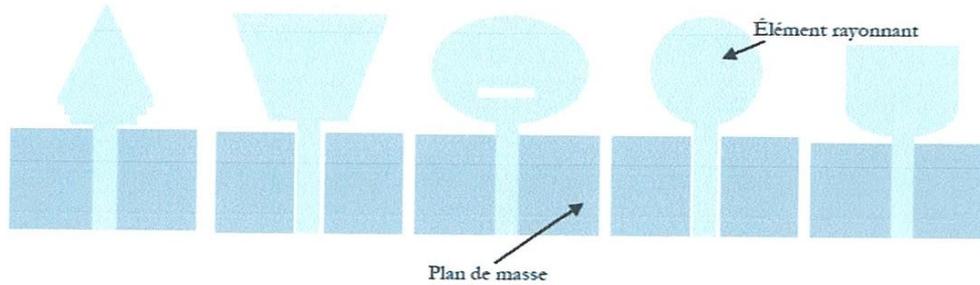


Figure II-11 : Quelques géométries d'antenne planaire

Fondamentalement, les éléments rayonnants planaires sont gravés sur un substrat diélectrique, le plan de masse peut être coplanaire (CPW) avec éléments rayonnants ou dans le cadre du substrat diélectrique. Le terme coplanaire est utilisé pour toute ligne de transmission où tous les conducteurs sont situés dans le même plan ; généralement, sur la face supérieure du substrat diélectrique. Ces lignes de transmission incluent les lignes à fente, les lignes coplanaires à ruban (CPS) et les guides d'ondes coplanaires (CPW) [II-5], le plan de masse peut être modifié pour améliorer la bande passante.

a) Ligne à fente

La ligne à fente (Fig.II-12), est constituée d'un substrat qui supporte une métallisation sur la face supérieure avec une rainure au milieu. Elle est très utilisée dans les circuits exigeant de hautes impédances, les stubs séries, les courts circuits et les combinaisons hybrides avec les circuits à microruban dans les structures MMIC.

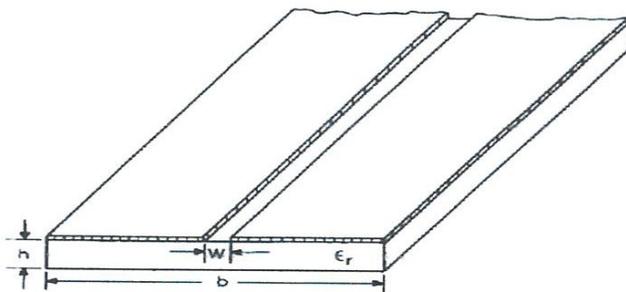


Figure II-12 : Géométrie de la ligne à fente

b) Ligne coplanaire à ruban

L'évolution technologique des circuits intégrés micro-onde a permis la réalisation de nombreuses structures qui occupent très peu de place, par exemple la ligne coplanaire à ruban. Cette structure présente l'avantage important d'être utilisée à des fréquences allant de quelques

GHz à plusieurs dizaines de GHz [2,3]. La forme générale de la ligne coplanaire à ruban, illustrée par la figure (II-13), est constituée d'une paire de rubans conducteurs, de largeur  $W$  séparés par une fente étroite de largeur  $S$ , sur un substrat diélectrique d'épaisseur  $h$ .

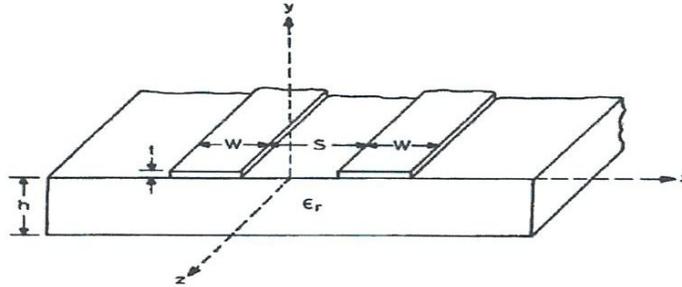


Figure II-13 : Forme générale d'une ligne coplanaire à ruban CPS.

c) Guide d'onde coplanaire

Le guide d'ondes coplanaire est une ligne de transmission efficace largement utilisée qui présente l'avantage de placer 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 parallèles entre eux, déposé sur la même face d'un substrat diélectrique

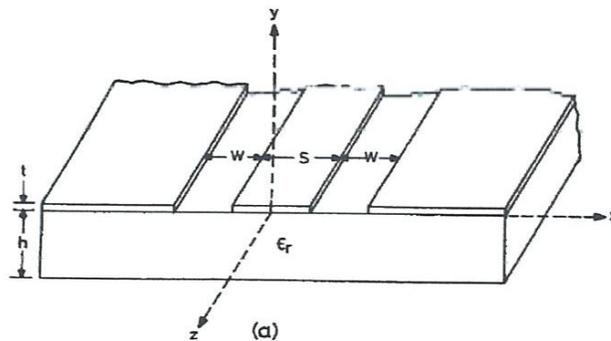


Figure II-14 : Forme générale d'une ligne coplanaire CPW.

Dans notre travail on s'intéresse à l'alimentation par guide d'ondes coplanaire.

## 2. Monopole rectangulaire

Les antennes alimentées par CPW sont préférées en raison de sa petite taille, son faible profil et son intégration facile Avec MMIC. L'antenne dans la (Figure II-15) présente le type que nous avons choisi à étudier. Cette antenne est alimentée par un guide d'onde coplanaire où le plan de masse et la ligne d'alimentation sont intégrés dans la même face que l'élément rayonnant.

De nombreux travaux ont été réalisés afin d'utiliser le monopole rectangulaire sous sa forme planaire pour des applications ultra large bande. [II-4]

La structure de base de l'antenne est montrée dans la figure ci-dessous.

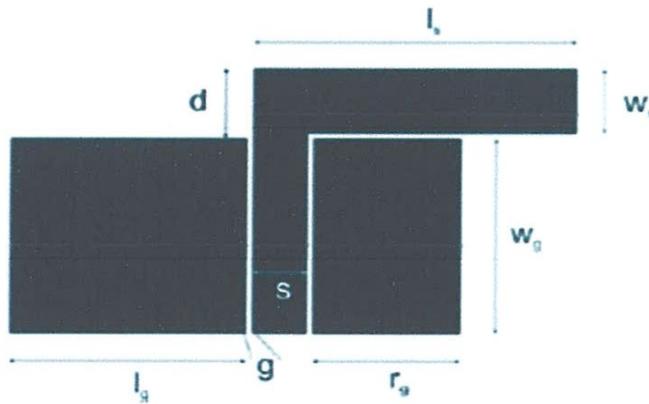


Figure II-15 : Antenne monopole CPW

a) Etude de la ligne d'alimentation

Avant de passer à la structure optimisée de l'antenne, il est indispensable d'étudier et d'adapter la ligne d'alimentation. Pour cela, on fait varier les différents paramètres qui constituent le guide d'ondes coplanaire.

Les différents paramètres de la ligne coplanaire CPW sont :

- La largeur du guide d'ondes coplanaire.
- La longueur du guide.
- La largeur du ruban central et la fente entre le conducteur centrale et le plan de masse.

Le schéma dans la (Figure II-16) présente les différents paramètres de la ligne CPW.

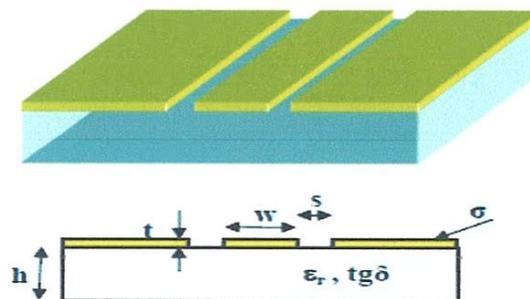


Figure II-16 : la ligne CPW

Ces équations analytiques permettent de déterminer l'impédance caractéristique  $Z_c$  et la permittivité effective  $\varepsilon_{eff}$  en fonction du substrat et de la largeur de la ligne. [II-6]

$$Z_c = \frac{Z_{vide}}{4\sqrt{\varepsilon_{eff}}} \cdot \frac{k'(k_1)}{k(k_1)} \quad (\text{II-26})$$

$$\varepsilon_{eff} = 1 + \frac{\varepsilon_r - 1}{2} \cdot \frac{K(k_2) \cdot K'(k_1)}{K'(k_2) \cdot K(k_1)} \quad (\text{II-27})$$

Tel que :

$Z_{vide}$  : impédance du vide

$$k_1 = \frac{w}{d} \quad k_2 = \frac{\sinh\left(\frac{\pi w}{4h}\right)}{\sinh\left(\frac{\pi d}{4h}\right)} \quad \text{et } d = w + 2s$$

$$\frac{K(k)}{K'(k)} = \frac{\pi}{\ln\left(2 \cdot \frac{1+\sqrt{K'}}{1-\sqrt{K'}}\right)} \quad \text{Pour } 0 \leq k \leq \frac{1}{\sqrt{2}}$$

$$\frac{K(k)}{K'(k)} = \frac{\ln\left(2 \cdot \frac{1+\sqrt{k}}{1-\sqrt{k}}\right)}{\pi} \quad \text{Pour } \frac{1}{\sqrt{2}} \leq k \leq 1$$

Avec :  $k' = \sqrt{1 - k^2}$

#### ■ Largeur du guide d'ondes coplanaire

Le guide d'ondes coplanaire est tout d'abord dimensionné pour avoir une impédance caractéristique de 50  $\Omega$ . Ainsi le ruban central  $W$  et la largeur  $S$  des fentes entre le ruban central et les plans de masse sont fixés en fonction du substrat choisi et de son épaisseur. Cependant, afin de donner à l'antenne la géométrie désirée, la largeur des plans de masse de la ligne doit être diminuée, et ce sans perturber son fonctionnement. Pour cela deux études sont menées : l'une sur le coefficient de réflexion de la ligne en fonction de la largeur de ses plans de masse coplanaire et l'autre sur la répartition des courants sur celle-ci.

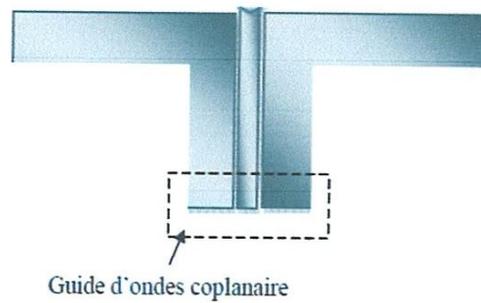


Figure II-17 : Antenne alimentée par guide d'ondes coplanaire

#### ▪ Longueur du guide d'ondes coplanaire

L'effet de la longueur de la ligne d'alimentation sur l'adaptation de l'antenne en termes de stabilité de l'impédance d'entrée a été étudié. Le but étant d'obtenir une structure la moins encombrante possible. L'étude a donc été menée dans le sens d'une diminution de la longueur de la ligne d'alimentation. Elle met également en lumière le fait que le guide d'ondes coplanaire contribue aux performances de l'antenne, et ne se comporte donc pas comme une simple ligne d'alimentation.

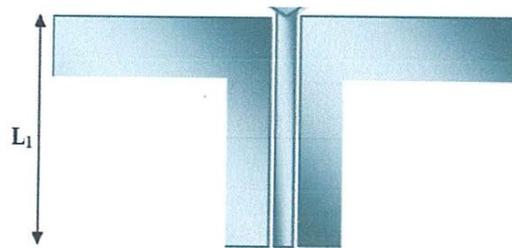


Figure II-18 : Longueur de guide d'onde coplanaire

#### ▪ Largeur du conducteur central

L'effet de la largeur  $W$  du conducteur central du guide d'ondes coplanaire sur l'impédance d'entrée de l'antenne a également été étudié. Afin de conserver une adaptation de cette ligne de transmission à  $50 \Omega$ , la largeur  $S$  de ses fentes a également été redimensionnée, ce qui montre une influence non négligeable de ce paramètre sur les performances d'adaptation de l'antenne.

[II-5]

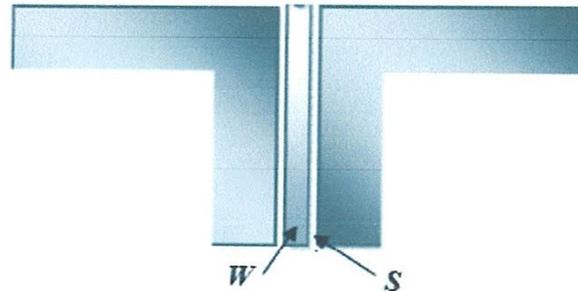


Figure II.19 : Largeur du conducteur central

## VII. La technologie MIMO

Une solution permettant d'accroître le débit et la robustesse des systèmes, et d'augmentant le nombre d'antennes à l'émission et à la réception. Les systèmes utilisant plusieurs antennes à l'émission et plusieurs antennes à la réception sont appelés systèmes Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) ou multi-antennaires.

### 1. Principe de la technique MIMO

Dans les systèmes de communications traditionnels, il n'existe qu'une antenne à l'émission et une antenne à la réception (SISO). Or les futurs services de communications mobiles sans fils demandent plus de transmissions de données (augmentation de la capacité de transmission). Ainsi pour augmenter la capacité des systèmes SISO et satisfaire ces demandes, les bandes passantes de ces systèmes et les puissances à transmettre ont été largement augmentées. Mais les récents développements ont montré que l'utilisation de plusieurs antennes à l'émission et à la réception permettait d'augmenter le débit de transmission des données et cela sans augmenter ni la bande passante de l'antenne réceptrice du système SISO ni la puissance du signal à l'émission. Cette technique de transmission s'appelle MIMO (Fig.II-20).

Un Système MIMO tire profit de l'environnement multi-trajets en utilisant les différents canaux de propagation créés par réflexion et/ou par diffraction des ondes pour augmenter la capacité de transmission. D'où l'intérêt aussi d'obtenir des signaux indépendants sur les antennes. [II-7]



Figure II-20 : Principe du MIMO

## 2. L'utilisation de l'antenne MIMO

En utilise les systèmes MIMO :

- À savoir l'emploi simultané de plusieurs antennes d'émission et de réception.
- Améliore la vitesse et la qualité de transmission.
- Cette technique tire parti de la propagation par trajets multiples dans des canaux radio, laquelle se manifeste par des interférences perturbatrices dans des standards de radio classiques. Dans les systèmes MIMO, chaque trajet supplémentaire entre l'émetteur et le récepteur améliore le rapport signal/bruit. Ce sont notamment des applications mobiles qui bénéficient considérablement de la réception par trajets multiples car le niveau de réception minimum requis peut être réduit. [11-8]

## VIII. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté la technologie ULB, avec les différentes techniques qui permet d'élargir la bande passante de l'antenne, ensuite nous avons parlé sur les divers types d'antenne ULB et ces caractéristiques d'adaptation et de rayonnement. Parmi les antennes ULB on trouve le monopole rectangulaire alimenté par un guide d'onde coplanaire CPW d'ailleurs c'est le modèle que nous avons choisi pour notre travail dans de troisième chapitre. Ce type d'antenne sera utilisé en application MIMO c'est dans ce but nous avons cité leurs principes et ces utilisations dans la dernière partie de ce chapitre.

# Chapitre III

*Simulation et mesure d'une antenne*

**MIMO miniature ULB**

## **I. Introduction**

Après l'étude des technologies et des antennes utilisées en ultra large bande qui ont fait l'objet du premier et du deuxième chapitre de ce mémoire, on s'est consacré dans ce troisième chapitre à la conception et à l'étude des structures d'antennes adaptées aux systèmes de communication ULB. Le premier travail proposé est basé sur une antenne planaire sous forme d'un monopole. En premier lieu différentes modifications seront menées sur la ligne d'alimentation, l'élément rayonnant et les plans de masse en vue d'adapter la structure pour une utilisation MIMO en ULB. Une fois le modèle choisi, on passera à l'étude expérimentale de ce modèle tel que réalisation et mesure (adaptation, diagramme de rayonnement, efficacité). Avant de passer à l'étude de notre antenne, il est indispensable de présenter le logiciel de simulation utilisé.

## **II. Logiciel ANSYS HFSS (High Frequency Structure Simulator)**

ANSYS HFSS est un logiciel de simulation électromagnétique qui étudie des structures complexes en trois dimensions en simulant ces structures et en proposant des visualisations claires des résultats en 2D et en 3D. HFSS est utilisé essentiellement pour les expérimentations et les études de systèmes fonctionnant en hautes fréquences, il est exploité notamment pour calculer les paramètres S, les fréquences de résonances ainsi que les champs électromagnétiques. En utilisant les équations de Maxwell, le HFSS divise les structures géométriques complexes en des formes géométriques plus simples, précisément des tétraèdres sur lesquels le calcul mathématique sera plus faisable, d'où on commence à parler de la convergence qui est la persistance des résultats obtenus. Le logiciel présenté ici utilise la méthode des éléments finis. Et qu'on a des avantages, des inconvénients se présentent pour ce logiciel, et qui résident dans les points suivants :

- Complexité de travail et de création des structures ayant des larges détails de conception.
- La nécessité d'avoir maîtrisé l'utilisation du logiciel, avant d'aborder le projet, parce qu'on est obligé de se servir des opérations booléennes parfois, pour dessiner des surfaces ou formes n'ayant pas une forme géométrique bien définie. En plus on doit faire attention aux frontières (Bouderies), il ne faut pas avoir des conflits entre une surface de radiation par exemple et une surface conductrice.
- La simulation pourra prendre une durée de plusieurs heures jusqu'aux plusieurs jours parfois, surtout si le projet à simuler est d'un volume relativement grand, et présente beaucoup de détails. [III-1]

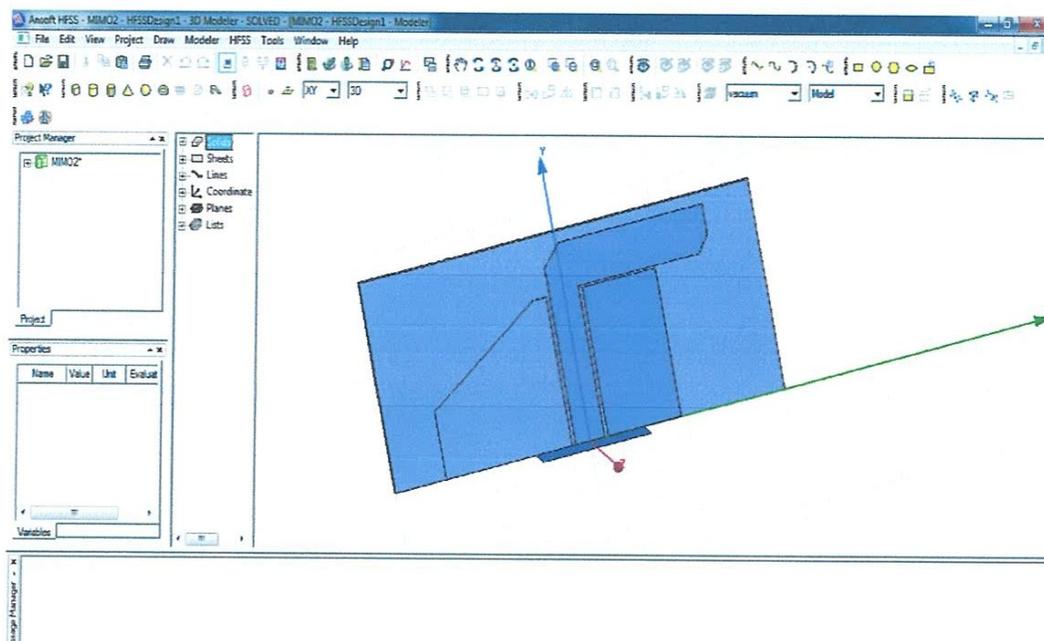


Figure III-1 : simulateur HFSS

### III. Description de l'antenne de base

L'élément de base de l'antenne est une bande conductrice de forme d'un rectangle de dimensions  $l_s$  et  $w_s$  déposé sur un substrat diélectrique de constante diélectrique  $\epsilon_r=4.4$  et d'épaisseur  $h=1.6\text{mm}$  et une ligne d'alimentation sur la même face qui est une guide d'ondes coplanaire. [III-2]

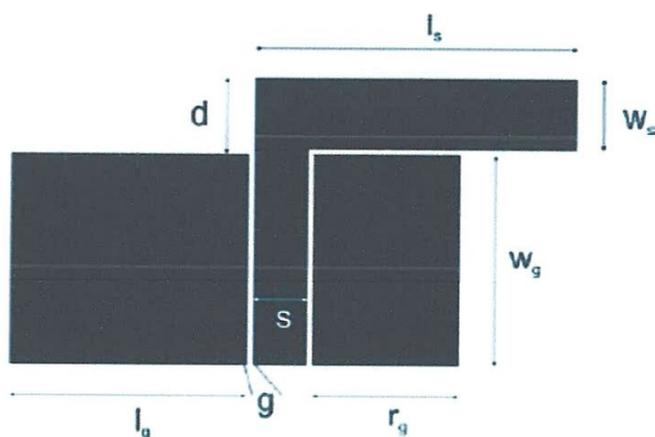


Figure III-2 : les dimensions d'antenne de base

Tel que toutes les dimensions de cette antenne sont présentées dans ce tableau

Paramètres	Valeurs (mm)
$I_g$	12.95
G	0.35
$r_g$	7.55
$W_g$	12.79
S	3
$W_s$	4
Is	16.59
D	4.4

Tableau III-1 : les dimensions de l'antenne de base

A partir de cette antenne de base qui travaille dans la bande [2-10] GHz qui est utilisé dans les différents applications tel que l'imagerie par micro-ondes, hyperthermia, imagerie radar, WBAN [III-2], on propose de réaliser une antenne MIMO ULB, une teste sera réalisé à la fréquence 3.6 GHz pour une application WiMax [III-3]. Une étude paramétrique est proposée afin de voir l'influence des paramètres géométriques et le type d'alimentation sur les caractéristiques des antennes (le coefficient de réflexion, la fréquence de résonance, efficacité et diagramme de rayonnement). L'objectif essentiel serait de garantir un coefficient de réflexion < -10db entre 3 et 10 GHz avec une meilleure adaptation possible.

Le substrat choisi est L'époxy –FR4 de permittivité relative  $\epsilon_r=4.4$  et d'épaisseur  $h=1.6$  mm

IV. Conception et simulation d'une antenne MIMO à base d'un monopole CPW

1. Etude de l'antenne de base :

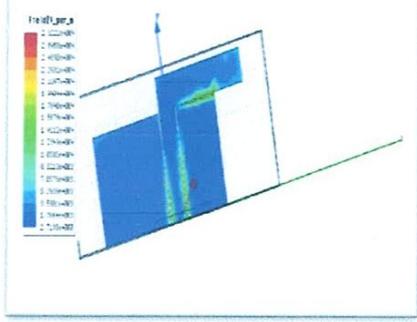
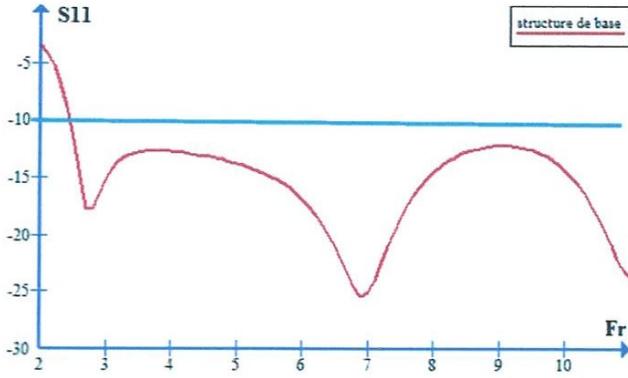
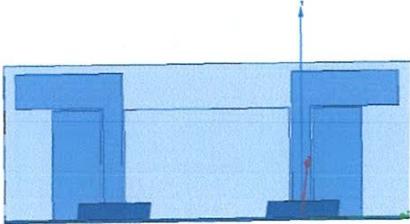
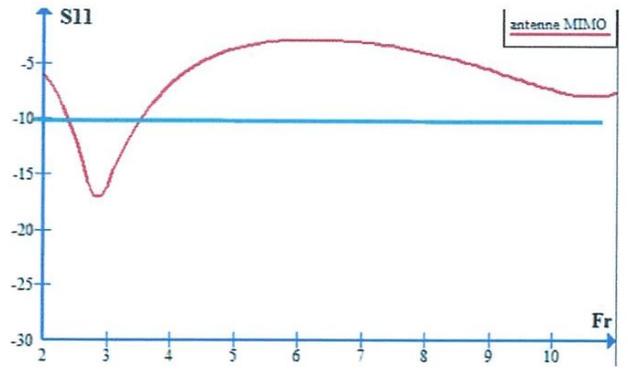
	Structures	S <sub>11</sub>
Structure de base	 <p>(a)</p>	 <p>Figure III-3</p>
Antenne MIMO	 <p>(b)</p>	 <p>Figure III-4</p>

Tableau III-2 : caractéristiques de l'antenne de base (a) utilisation monopole (b) utilisation MIMO

Les figures du tableau III-2 montre que :

La structure de l'antenne de base est bien adaptée à partir de la fréquence 2.5GHz est montre un caractère large bande. Le passage à une antenne MIMO montre que le S11 de cette structure ne donne pas des résultats correspondants aux critères de la technologie ULB. A partir de cette simulation nous proposons des modifications sur la structure de base (la ligne d'alimentation, l'élément rayonnant et les plans de masse) en vus d'adapter la structure pour une utilisation d'antenne MIMO ULB.

2.      Modification sur le plan de masse :

Dans cette étude, nous avons éliminé les parties qui contient une faible distribution du courant peu à peu dans le plan de masse latéral pour voir son influence sur le coefficient de réflexion S11

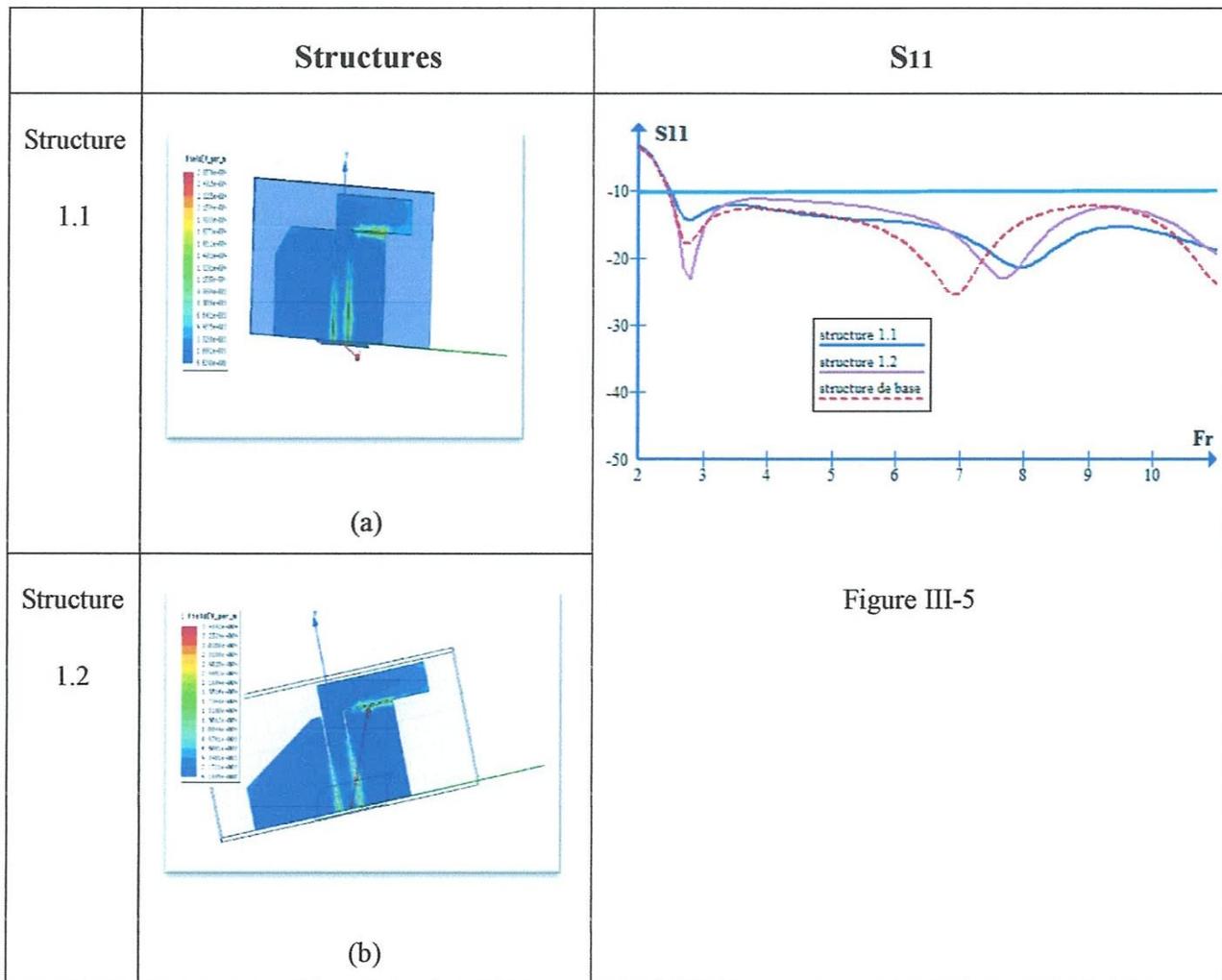


Figure III-5

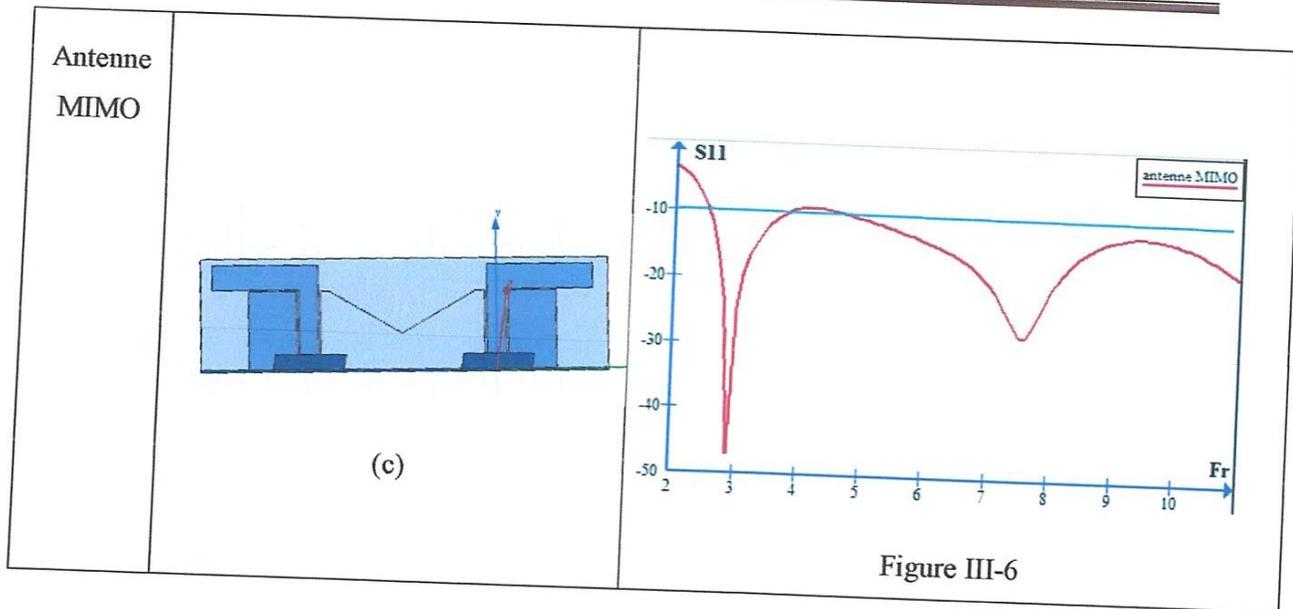


Tableau III-3 : modification sur le plan de masse

D'après les résultats de tableau III-3 :

L'étude montre que l'élimination des parties du faible distribution du courant dans le plan de masse n'a pas de conséquence au niveau de l'adaptation et garde toujours le caractère ULB de la structure monopole (figure III-5). L'élimination des parties du faible distribution du courant dans le plan de masse améliore à la fois la bande passante et l'adaptation. Nous avons opté pour la structure 1 2 pour une utilisation MIMO. On remarque sur la (Figure III-6) que l'adaptation est améliorée par rapport à l'antenne MIMO de base (figure III-4) mais ces résultats de S11 obtenus ne répondent pas aux conditions de ULB ( $S_{11} > -10\text{dB}$  entre 3.7GHz-4.7GHz).

3. Modification sur le rectangle du monopole :

Dans ce cas on va modifier la forme du monopole tel que on a coupé les parties qui contiennent la faible distribution du courant

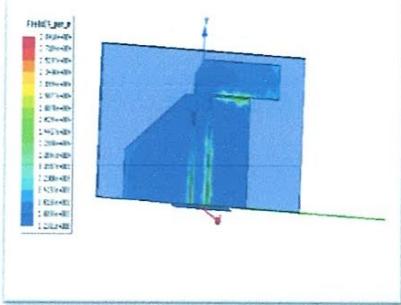
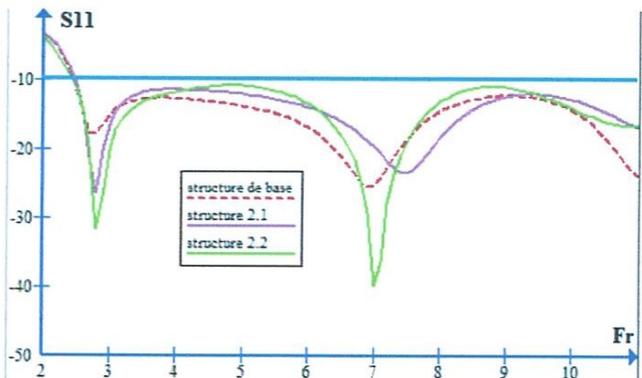
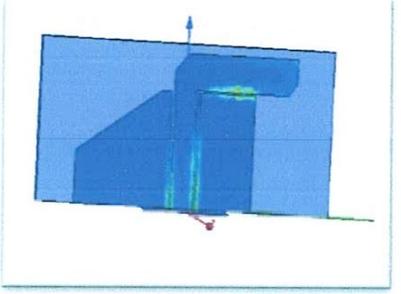
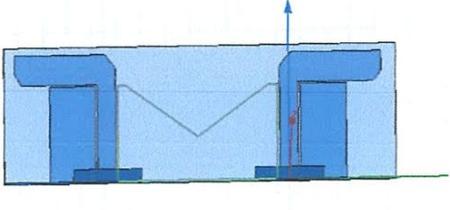
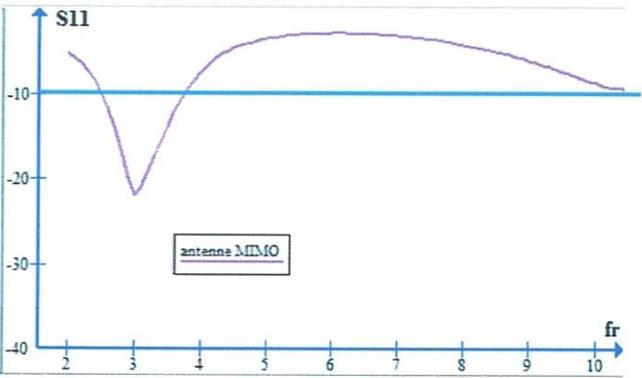
	Structures	S11
Structure 2.1	 <p>(a)</p>	
Structure 2.2	 <p>(b)</p>	<p>Figure III-7</p>
Antenne MIMO	 <p>(c)</p>	

Tableau III-4 : modification sur le rectangle du monopole

Les figures de tableau III-4 montre que :

La structure 2.1 présente des résultats moins adaptés que la structure 2.2 tel que cette dernière nous donne une meilleure adaptation pour la 1<sup>er</sup> fréquence (-32dB a 2.9GHz) et la 2eme fréquence (-42dB a 7GHz). Par contre pour l'utilisation de l'antenne MIMO de structure 2.2 on remarque une désadaptation à partir de 3.7 GHz ce qui fait perdre le caractère ULB recherché ( $S_{11} > -10\text{dB}$  entre (3GHz-10GHz))

4.      Modification sur la ligne :

Dans cette étude on a modifié la forme de la ligne à une forme d'escalier dans le but d'obtenir les résultats requis pour l'antenne MIMO

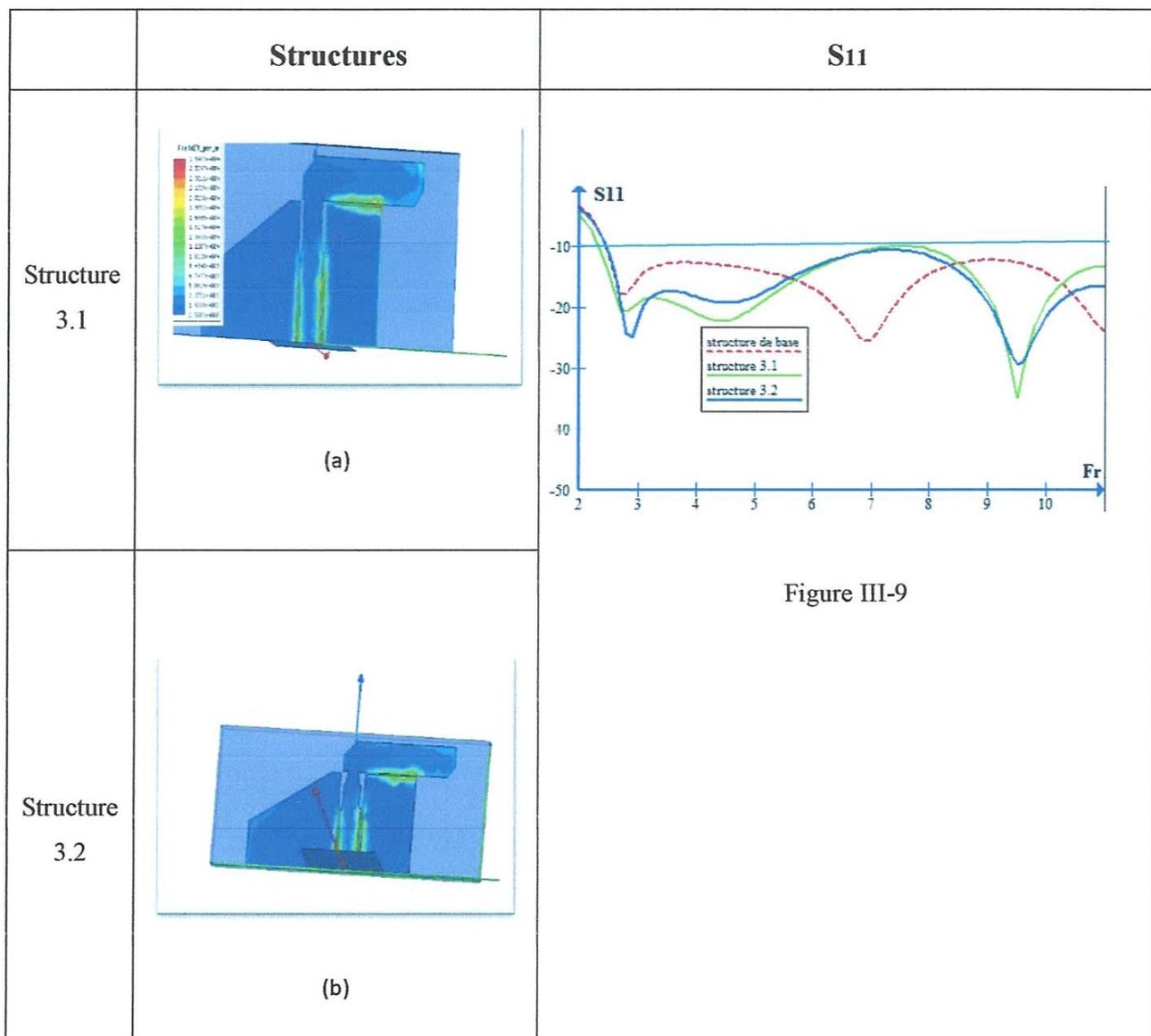


Figure III-9

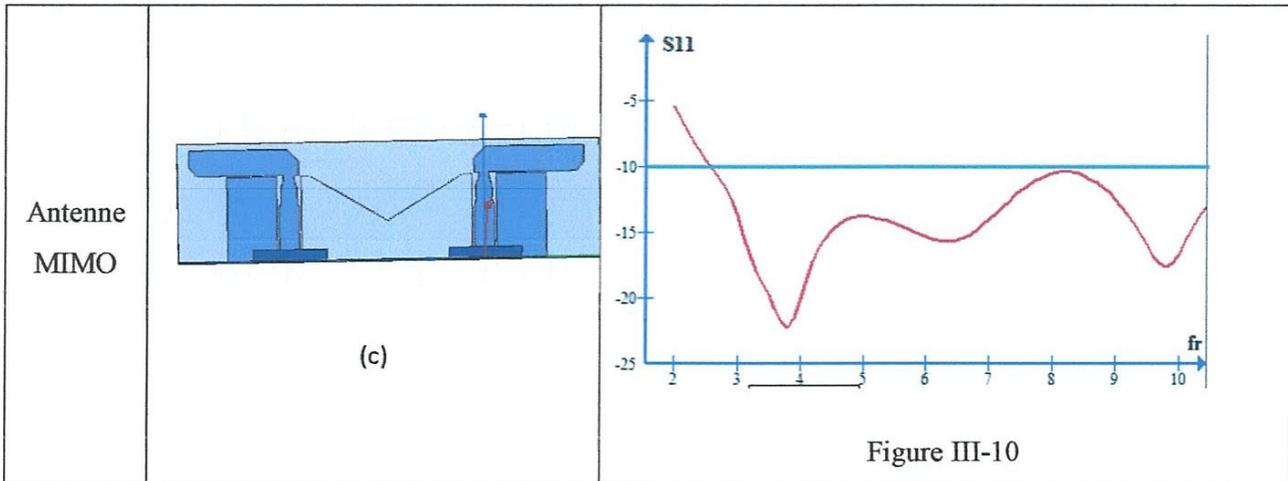


Tableau III-5 : modification sur la ligne

D'après les résultats de tableau III-5 :

Les résultats de la structure 3.1 et 3.2 montre que la modification de la forme de la ligne donne un élargissement de bande (3GHz-6GHz) et aussi entre (8GHz-10GHz). A propos de l'antenne MIMO, on est arrivé à des résultats satisfaisants ( $S_{11} < -10\text{dB}$  entre 3-10GHz, bonne adaptation et caractère ULB). Afin de valider ces résultats de simulation nous avons choisi la structure 3.1 pour la testé en expérimentale.

## V. Réalisation et mesure d'antenne MIMO

### 1. Réalisation d'antenne

La réalisation de la structure est faite dans notre laboratoire des circuits imprimés du département d'électronique et télécommunication (Université 08 mai 1945). Pour cela en va-vous présenter l'outil de réalisation, c'est une machine ProtoMat S103 alimenté avec un logiciel qui s'appelle Circuit Pro.

#### a) Description du matériel

Le graveur de circuits imprimés LPKF ProtoMat S103 pour le prototypage de circuits imprimés et la production de petites quantités, est configuré spécifiquement pour les exigences des applications RF et micro-ondes. Le limiteur de profondeur pneumatique sans contact permet en outre le traitement des substrats tendres et flexibles dotés de surfaces fragiles. Le ProtoMat S103 permet également de dégrapper soigneusement les circuits imprimés flexibles aux formes irrégulières hors des circuits plus grands.

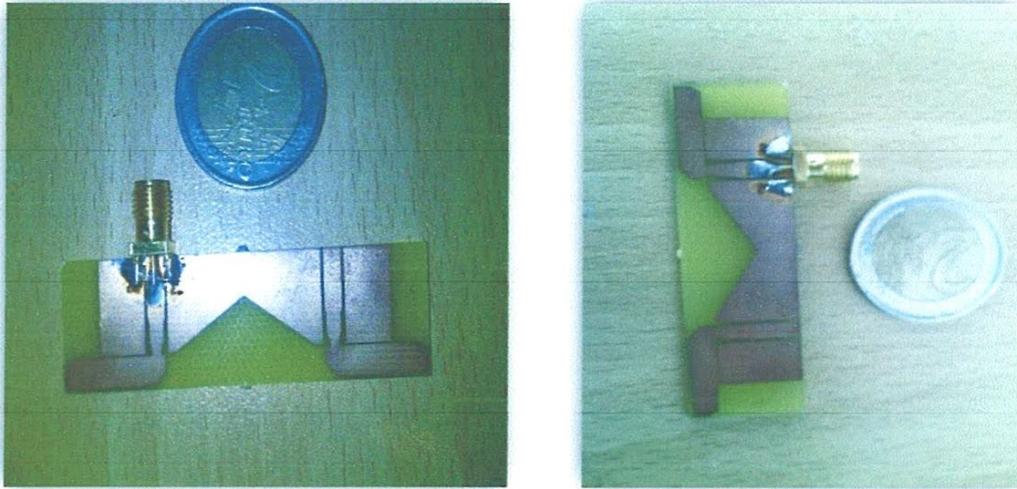


Figure III-13 : l'antenne MIMO réalisée

## 2. Mesure expérimentale

### a) Utilisation de la chambre anéchoïque

Quand l'antenne est conforme aux résultats attendus, il faut donc entamer une phase expérimentale afin de valider les résultats de la simulation. Il est très rare qu'on parvienne avec des résultats mesurés qui concordent parfaitement avec la simulation, en raison de certains facteurs tels que le placement des connecteurs ou la qualité des soudures. [III-5]

La plupart des mesures d'antennes s'effectuent dans une chambre anéchoïque (figure III-14). Il s'agit d'un espace fermé entièrement tapissé d'absorbants sous lesquels est disposé un feuillard métallique d'aluminium pour se rapprocher des caractéristiques d'une cage de Faraday et ainsi, se prémunir des agressions électromagnétiques extérieures. Afin de limiter les réflexions parasites dues à la source sur les parois de la chambre, l'utilisation de mousses absorbantes en polyuréthane chargées de particules de carbone est souvent retenue pour absorber les ondes incidentes aux parois. Ces mousses, caractérisées par leur réflectivité, peuvent prendre des formes variées, cependant la forme pyramidale est très souvent utilisée. En effet, l'idée consiste, grâce à cette forme particulière, à passer de façon graduelle, d'une impédance d'onde au sommet de la pyramide égale à  $377 \Omega$  à celle d'un milieu dissipatif à la base de la pyramide. Notons que les performances des absorbants seront d'autant meilleures que la fréquence est élevée. La hauteur des pyramides est proportionnelle à la longueur d'onde de travail et, par conséquent, inversement proportionnelle à la fréquence. [III-6]



Figure III-11 : la machine Protomat S103

Tous les graveurs de circuits imprimés LPKF sont équipés de puissants logiciels systèmes permettant la conversion des données de topologie dans les circuits imprimés : ils récupèrent les données des logiciels de conception, les éditent pour la production, les décomposent en étapes de procès, et guident les utilisateurs, étape par étape, dans le processus de fabrication. Le LPKF Circuit Pro est capable d'importer tous les formats d'échange de données, offre un grand éventail d'options d'édition et permet de contrôler les graveurs de circuits imprimés. En outre, le logiciel a la possibilité de produire des stencils pour des vernis épargnes et des calques d'assemblage. Le LPKF Circuit Pro Lite est une version simplifiée du LPKF Circuit Pro pour les graveurs de circuits imprimés LPKF d'entrée de gamme. [III-4]



Figure III-12 : logiciel LPKF Circuit Pro



Figure III-14 : la chambre anéchoïque de l'IRSEEM

Les mesures sont réalisées à l'institut IRSEEM (Institut de Recherche en Systèmes Électroniques Embarqués) en France par notre encadreur Mr. Khalfallaoui durant son stage de courte durée.

b) Mesure du coefficient de réflexion :

La mesure est réalisée par un analyseur de réseau vectoriel Agilent Technologies E5071C de 2 à 8.5 GHz fréquence limite de l'analyseur. Nous avons tracé le coefficient de réflexion S11 de notre antenne MIMO (figure III-14) à partir des données que nous avons obtenus après la mesure sous forme de fichier SP1.



Figure III-15 : Analyseur de réseau vectoriel Agilent Technologies E5071C

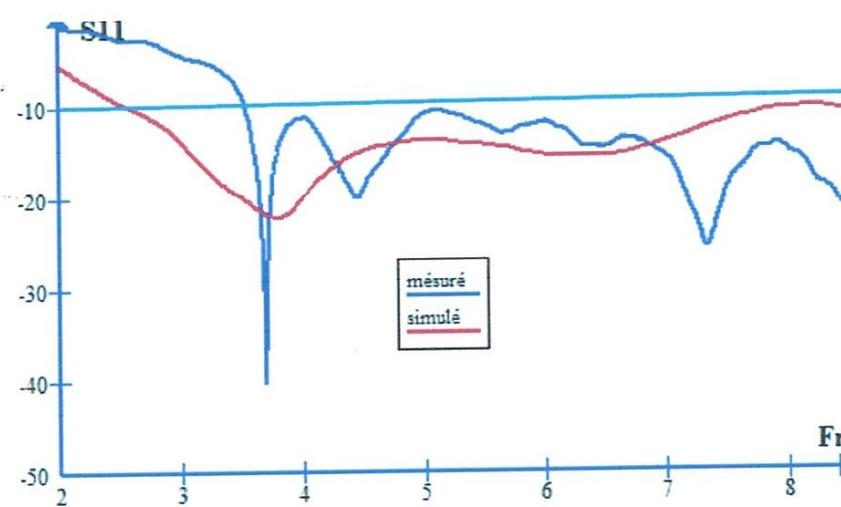


Figure III-16 : comparaison entre le S11 simulé et mesuré

La figure (III-16) montre que les résultats de mesure et simulation sont assez concordante en termes de :

- Caractère ULB
  - $\Delta f$  (simulé) = 5.5GHz à partir de 2.5GHz
  - $\Delta f$  (mesuré) = 5 GHz à partir de 3.5GHz
- Première fréquence de résonance autour de 3.6GHz.

c) Mesure du diagramme de rayonnement<sup>a</sup>

Nous avons fait cette mesure :

- Pour une fréquence 3.66Ghz puisqu'elle présente une meilleure adaptation
- Hauteur d'antenne MIMO = 1.43m
- La distance entre MIMO et l'antenne = 2.95m
- Puissance = +10dB

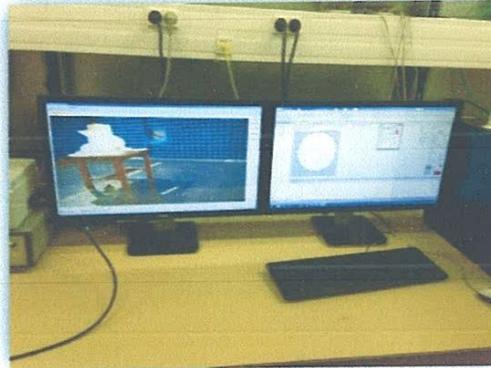
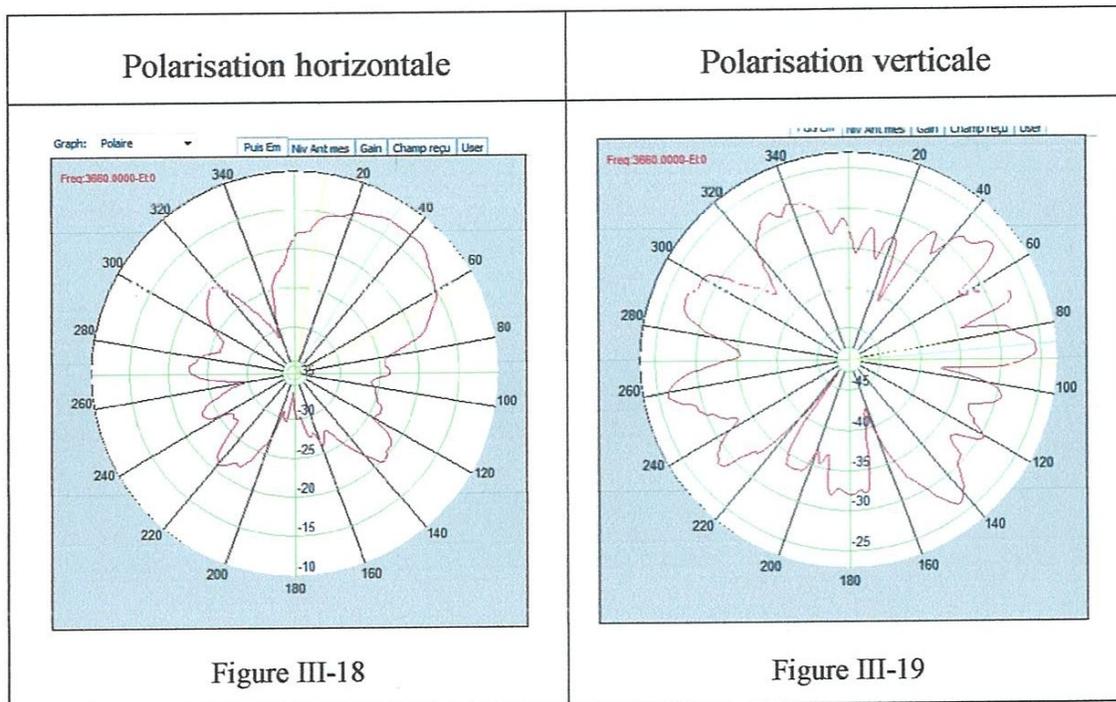


Figure III-17 : méthode de la mesure de diagramme de rayonnement a L'IRSEEM.

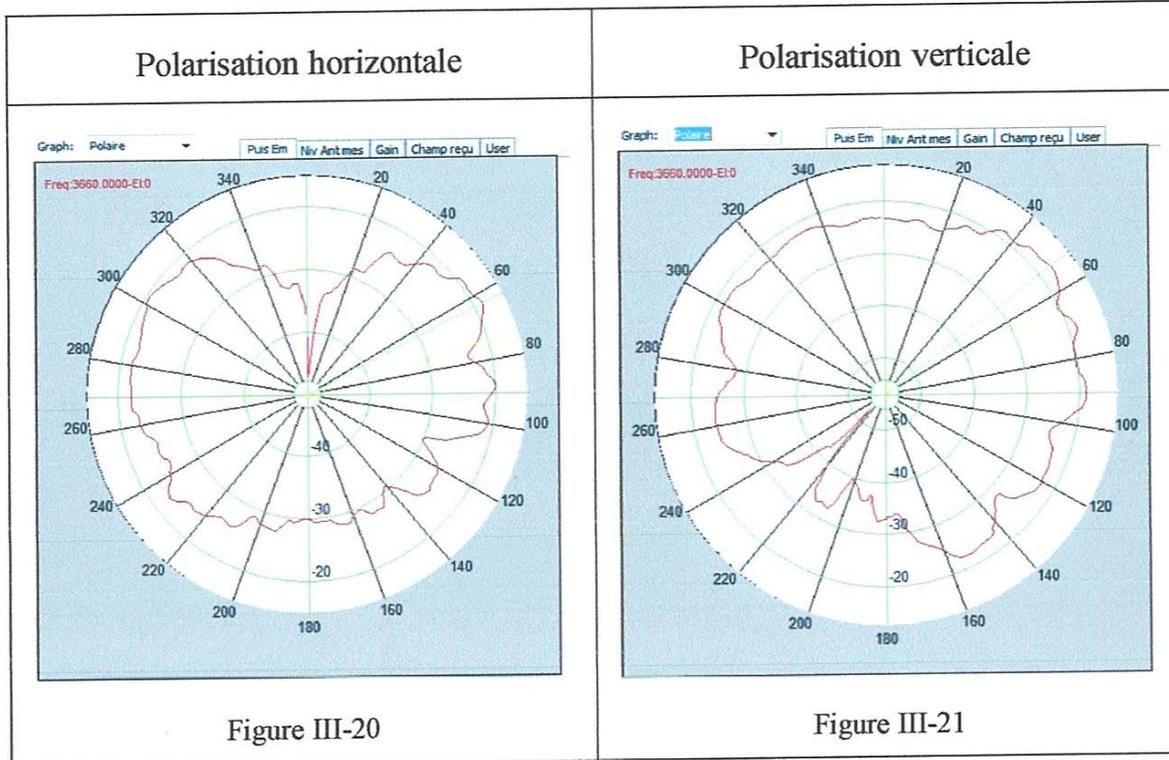
Nous avons effectué les mesures dans deux positions (verticale, horizontale)

- Antenne MIMO en position horizontale :



Dans le cas Co-polarisation (figureIII-18) on peut dire que cette antenne est directive avec une concentration d'énergie dans une partie du plan horizontal (lobe principale entre 20° et 60°) et des lobes secondaires qui sont généralement des lobes parasites. Par contre dans le cas cross-polarisation (figureIII-19) l'antenne est équi-directive ou omnidirectionnelle qui rayonne presque une même énergie dans toutes les directions.

- Antenne MIMO en position verticale :



D'après (figure III-20 et figure III-21) l'antenne est omnidirectionnelle dans le cas d'une polarisation horizontale et presque dans le cas d'une polarisation verticale. Avec un gain  $\sim 20$  dB dans les toutes directions

d) Mesure d'efficacité :

La détermination de l'efficacité constitue l'une des étapes fondamentales pour quantifier les performances d'une antenne. Ce paramètre indique la quantité de puissance qui sera réellement rayonnée par l'antenne par rapport à la puissance fournie à cette même antenne. Les principales méthodes pour déterminer l'efficacité d'une antenne sont au nombre de trois. On distingue :

- La méthode de directivité/gain
- La méthode radiométrique
- La méthode de Wheeler cap

Dans notre étude on utilise la méthode de Wheeler cap, Le principe de cette méthode est de placer autour de l'antenne à mesurer une sphère conductrice. Le rayon de la sphère doit être choisis pour se trouver à la transition entre la zone où l'antenne stocke de l'énergie autour d'elle (champs proche) et la zone où les champs sont rayonnés par l'antenne (champs lointain). Cette

transition se situe à une distance de  $\lambda/2\pi$ . Si toute la puissance rayonnée par l'antenne est réfléchiée par la cage sans possibilité de s'échapper, c'est équivalent dans notre modèle à une résistance de rayonnement  $R_{rad}$  égale à 0. Il est donc possible en réalisant une mesure sans la cap (mesure en espace libre) et avec la cap (mesure Wheeler cap), et à partir de ces mesures, de calculer les résistances de pertes et de rayonnement et d'en déduire l'efficacité. On considère que la résistance de perte reste constante avec et sans le cap.



Figure III-22 : Capuchon Wheeler utilisée dans IRSEEM

Avec le cap, la résistance de rayonnement est égale à zéro, et le coefficient de réflexion est  $S_{11WC}$ . Alors :

$$S_{11WC} = \frac{R_{LOSS} - R_s}{R_{LOSS} + R_s} \quad (III-1)$$

Sans la Cap. La résistance au rayonnement est celle de l'antenne rayonnant dans l'espace libre, et le coefficient de réflexion de l'antenne est  $S_{11FS}$ . Alors :

$$S_{11FS} = \frac{(R_{RAD} + R_{LOSS}) - R_s}{(R_{RAD} + R_{LOSS}) + R_s} \quad (III-2)$$

Les deux équations sont transposées pour devenir

$$\frac{R_{LOSS}}{R_s} = \frac{1 + S_{11WC}}{1 - S_{11WC}} \quad (III-3)$$

$$\frac{(R_{RAD} + R_{LOSS})}{R_S} = \frac{1 + S_{11FS}}{1 - S_{11FS}} \quad (III-4)$$

Et l'efficacité de rayonnement est alors :

$$\eta_{ray} = \frac{R_{RAD}}{R_{RAD} + R_{LOSS}} = \frac{\left(\frac{1 + S_{11FS}}{1 - S_{11FS}}\right) - \left(\frac{1 + S_{11WC}}{1 - S_{11WC}}\right)}{\left(\frac{1 + S_{11FS}}{1 - S_{11FS}}\right)} \quad (III-5)$$

Si  $S_{11FS} > S_{11WC}$  
$$\eta_{ray} = 1 - \frac{(1 - S_{11FS})(1 + S_{11WC})}{(1 + S_{11FS})(1 - S_{11WC})} \quad (III-6)$$

Sinon 
$$\eta_{ray} = 1 - \frac{(1 + S_{11FS})(1 - S_{11WC})}{(1 - S_{11FS})(1 + S_{11WC})} \quad (III-7)$$

En fonction du type de résonateur considéré (série ou parallèle), le  $S_{11FS}$  pourra être supérieur ou inférieur au  $S_{11WC}$ . Il faudra utiliser la bonne équation pour éviter d'avoir une efficacité  $>1$ . NB : La première résistance est la résistance de rayonnement  $R_{rad}$ , elle modélise toute l'énergie qui est dissipée et transformée en rayonnement électromagnétique. La deuxième résistance  $R_{loss}$  va représenter l'énergie dissipée par l'antenne en échauffement thermique. [III-7]. Nous avons effectué des mesures du coefficient de réflexion de notre antenne MIMO à l'air libre ensuite en place l'antenne dans le cap de Wheeler. A l'aide d'un programme (Matlab) nous avons tracer l'efficacité de cette antenne.

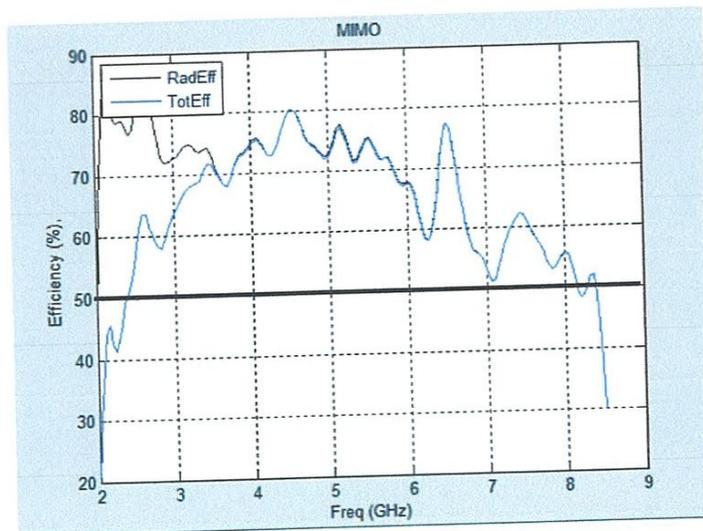


Figure III-23 : l'efficacité de l'antenne MIMO

Cette mesure (Figure III-23) montre que l'antenne MIMO rayonne une puissance de 71% à une  $f_r=3,6\text{GHz}$ , 80% pour  $f_r=4,5\text{GHz}$  et 75% à  $6,6\text{GHz}$ . Globalement notre antenne présente une efficacité moyenne de 50% dans la bande 3GHz jusqu'à 8,5GHz, ces résultats confirment la mesure de l'adaptation et le caractère ULB dans cette gamme de fréquence.

## **VI. Conclusion**

Dans ce chapitre, notre travail se focalise sur la conception, la réalisation et la caractérisation des structures d'antennes MIMO adaptée aux systèmes de communication ULB. Comme première étape des simulations avec différentes modifications sur la structure de base l'antenne monopole afin de déterminer la meilleure structure en utilisation MIMO qui répond aux critères visés à savoir : la miniaturisation et largeur de la bande ULB. Une fois notre modèle est optimisé nous avons passé à l'étape de réalisation de notre antenne MIMO avec la machine à gravure mécanique LPKF de notre laboratoire des circuits imprimés. Enfin nous avons entamé la dernière étape qui est la caractérisation de notre antenne. Les mesures de coefficient de réflexion qui montre que l'antenne est bien adaptée sur une large bande. Ces résultats est confirmé aussi par la mesure de l'efficacité ou nous avons trouvés que l'antenne est plus efficace dans cette même bande. Finalement les mesures du diagramme de rayonnement présentent un diagramme quasi-omnidirectionnelle a la fréquence de travail 3.6GHz ce qui nous permet de dire que cette antenne est prête à l'utilisation pour les systèmes WIMAX.

## **Conclusion générale**

La technologie Ultra Large Bande (ULB) est une solution d'avenir dans les communications sans fils à hauts débits et à courtes portées. L'élaboration de notre modeste travail nous a permis d'étudier de nouvelles antennes miniatures qui répondent aux exigences de cette technologie, ce sont les antennes monopoles alimentées par un guide d'onde coplanaire (CPW).

Dans le premier chapitre nous avons présenté les antennes miniatures, où on a cité les différentes techniques de miniaturisation et les différentes applications adaptées au système Ultra Large Bande.

Dans le deuxième chapitre une généralité sur la technologie ULB, divers techniques d'élargissement de la bande passante. Un état de l'art sur les antennes ultra large bande et ces principales caractéristiques, parmi ces antennes une étude détaillée sur le monopole rectangulaire CPW et dernièrement une présentation de la technologie MIMO, son principe de fonctionnement et ces utilisations.

Pour le dernier chapitre, il a été consacré à la conception, la réalisation et caractérisation. L'étude d'une structure d'antenne monopole alimentée par CPW pour une utilisation MIMO adaptée sur une très large bande passante. Différentes simulations ont été menées sur l'alimentation, l'élément rayonnant et les plans de masse en vue d'adapter la structure à la bande de fréquence souhaitée. Une deuxième partie sur la réalisation et les mesures expérimentales de tel que l'adaptation, le rayonnement et l'efficacité.

L'antenne réalisée dans ce projet de type MIMO ULB présente des performances encourageantes et répond bien aux critères cibles à savoir.

- La miniaturisation : la taille de l'antenne ne dépasse pas 5cm.
- Le caractère ULB : une bande passante =5GHz.

Nous concluons aussi que notre antenne peut être utilisée pour une application WIMAX vu les résultats à la fréquence 3.6 GHz.

Ces travaux développés au sein de notre département d'électronique et de télécommunication Université 8 mai 1945 Guelma (laboratoire des circuits imprimés) et à l'institut de recherche en système électronique embarqués (IRSEEM) en France.

Ces travaux développés au sein de notre département d'électronique et télécommunication Université 8 mai 1945 (laboratoire des circuits imprimés) et l'institut de recherche en système électronique embarqués (IRSEEM) en France.

## Références bibliographiques

### Chapitre I

- [I-1] : CHU, Lan Jen. Physical Limitations of Omni-Directional Antennas. Journal of applied physics, 1948
- [I-2]: Wheeler, Harold A. Fundamental limitations of small antennas. Proceedings of the IRE, 1947
- [I-3]: Hansen, Robert C. Fundamental limitations in antennas. Proceedings of the IEEE, 1981
- [I-4]: Jérémy Valteau. « Miniaturisation d'antennes très large bande pour applications spatiales ». Thèse de l'obtention du doctorat, 2016. INP Toulouse
- [I-5] : Ghosh, Bratin, HAQUE, SK Moinul, et MITRA, Debasis. Miniaturization of slot antennas using slit and strip loading. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2011
- [I-6] : Berkat Abedelatif. « Conception et réalisation d'antennes miniatures isotrope dans les bandes C et ISM ». Thèse de l'obtention du doctorat, 2014. Université Abou Bakr Belkaid Tlemcen
- [I-7] : Laure Huitema. « Conception d'antennes miniatures à base de matériaux innovants pour systèmes de communications mobiles ». Thèse de l'obtention du doctorat, 2011. UNIVERSITE DE LIMOGES
- [I-8]: Navccn Kumar, Garima Saini. A Multiband PIFA with Slotted Ground Plane for Personal Communication Handheld Devices. Department, National Institute of Technical Teachers' Training & Research (NITTTR), Chandigarh, India. 2013
- [I-9] : Melle Braikia Nacera, Melle MOHAMMEDI BOUZINA Souad « Les antennes planaire pour les communications UWB », Mémoire de fin d'études pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en télécommunications, Institut des télécommunications d'Oran Abdelhamid Boussouf, Promotion : IGE 25
- [I-10] : Fatiha El Hatmi. « Conception d'antennes de communication `à travers le corps humain pour le suivi thérapeutique ». Thèse de l'obtention du doctorat. UNIVERSITÉ PARIS-EST.2013
- [I-11]: <http://dailygeekshow.com/tatouage-electronique-cyborg/>
- [I-12]: <http://www.espace-sciences.org/sciences-ouest/336/dossier/des-antennes-a-fleur-de-peau>
- [I-13]: <https://www.industrie-techno.com/une-antenne-radio-liquide.9007>

[I-14]: Neha Loharia, Shashi B. Rana, Naveen Kumar. A Novel Miniature Edge Fed Planar Inverted-F Antenna (PIFA) for Future 5G Wireless Devices. Guru Nanak Dev University, Punjab, India Thapar University, Punjab, India.2016

## **Chapitre II**

[II-1] : Melle Braikia Nacera, Melle MOHAMMEDI BOUZINA Souaad « Les antennes planaire pour les communications UWB », Mémoire de fin d'études pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en télécommunications, Institut des télécommunications d'Oran Abdelhafid Boussouf, Promotion : IGE 25

[II-2] : Laurence Babour, « ETUDE ET CONCEPTION D'ANTENNES ULTRA LARGE BANDE MINIATURISEES EN IMPULSIONNEL », Instiutt National Polytechnique de Grenoble - INPG, 2009.

[II-3] : Ziani Kerarti Djalal, « ETUDE ET CONCEPTION D'ANTENNE ULTRA LARGE BANDE », mémoire pour l'obtention du diplôme de magister en télécommunication 2011, université ABOU BAKR BELKAID -TLEMEN

[II-4] : Kebbab Radhwane, « Conception D'antennes Ultra Large Bande En Technologie Imprimee », These de magister de telecommunication 2010, Université Abou bakr Belkaid-Tlemcen

[II-5] : Mehnana Fateh, « Contribution à l'étude d'un guide d'onde coplanaire CPW par l'approche full-wave », Pour l'Obtention du Diplôme de MAGISTER,2010, UNIVERSITE FERHAT ABBAS DE SETIF UFAS (ALGERIE)

[II-6] : <https://cdn.fsbx.com/v/t59.2708>

[II-7] : Aliou Diallo « SYTEMES MULTI-ANTENNES POUR DIVERSITE ET MIMO », Thèse pour obtenir le titre de Docteur en Sciences spécialité Electronique de l'UNIVERSITE de Nice-Sophia Antipolis 2007

[II-8] : <https://cdn.rohdeschwarz.com/pws/dl-downloads/dl-common-library/dl-news-from-rs/203/NEWS-203-french-FSQ-MIMO.pdf>

## **Chapitre III**

[III-1] : Soltane Samia. « etude et caracterisation d'antennes imprimees pour système ultra-large bande ». Université Mohamed Khider – Biskra.2015

[III-2]: S. Sreenath, P. Ashkarali, Paulbert Thomas, R. Dinesh, and C. K Anandan. CPW-FED compact bent monopole antenna for UWB applications. department of electronics, center for research in electromagnetics and antennas, Cochin University of Science and Technology.2012

[III-3]: [http://www.wiborne.com/datasheet/WiMAX-MPBS\\_brochure](http://www.wiborne.com/datasheet/WiMAX-MPBS_brochure)

## ***Résumé***

L'objectif de ce mémoire est de présenter d'une façon non exhaustive la technologie ULB et Les performances des antennes miniatures utilisées par cette technologie, fonctionnant sur plusieurs Gigahertz tout en répondant aux contraintes spécifiques des applications grand public. Dans ce cadre une simulation d'une antenne MIMO à base d'une structure monopole alimenter par un guide d'onde est faite à l'aide du logiciel ANSYS HFSS afin d'optimiser une structure qui répond aux critères de miniaturisation et de ULB. Une réalisation de cette structure optimisée est effectuée par une machine a gravure mécanique LPKF reçus récemment dans notre département. Différentes mesures accomplies sur cette antenne MIMO à savoir : le coefficient de réflexion, la bande passante, diagramme de rayonnement et l'efficacité au niveau de l'IRSEEM. L'antenne MIMO réalisée présente bien un caractère large bande et peut être envisageable pour une application WIMAX.

Les mots clés : WIMAX, MIMO, ULB.

### **ABSTRACT:**

The aim of this thesis is to present in a non-exhaustive way the ULB technology and the performances of the miniature antennas used by this technology, operating on several Gigahertz while responding to the specific constraints of the consumer applications.

In this framework, a simulation of a MIMO antenna based on a monopoly structure is performed using an ANSYS HFSS software to optimize a structure that meets the criteria of miniaturization and ULB. One realization of this optimized structure is carried out by an LPKF mechanical etching machine recently received in our department. Different measurements carried out on this MIMO antenna, namely: the reflection coefficient, the bandwidth, the radiation pattern and the efficiency at the level of the IRSEEM. The MIMO antenna realized has a wideband character and can be envisaged for a WIMAX application.

KEY WORDS: WIMAX, MIMO, ULB.