

République algérienne démocratique et populaire  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique  
جامعة عين تموشنت بلحاج بوشعيب  
Université –Ain Temouchent- Belhadj Bouchaib  
Faculté des Sciences et de Technologie  
Département Electroniques et Télécommunications



Projet de Fin d'Etudes  
Pour l'obtention du diplôme de Master en : Télécommunications  
Domaine : Science et Technologie  
Filière : Télécommunications  
Spécialité : Réseaux et Télécommunications  
Thème

## **Antenne imprimée miniature satellitaire**

Présenté Par :

- 1) Melle. BENSOUNA Fethenour
- 2) Melle. ZIANE CHERIF Hadjar

Devant le jury composé de :

Dr DEBBAL Mohammed	MCA	UAT.B.B (Ain Temouchent)	Président
Dr FEROUANI Souheyla	MCA	UAT.B.B (Ain Temouchent)	Examinatrice
Dr MOULESSEHOUL Wassila	MCB	UAT.B.B (Ain Temouchent)	Encadrante
Dr RABAH Mohamed Amin	MRA	CDS (Oran)	Co-Encadrant
Dr KANOUN Ahmed Ali	MRB	CDS (Oran)	Invité

*Année Universitaire 2020/2021*

## Remerciement

Cette recherche s'est réalisée grâce au soutien et à l'encouragement de plusieurs personnes qui ont contribué chacune à leur façon à l'atteinte de l'objectif que constitue le dépôt de ce mémoire. Nous tenons à leurs adresser un très grand merci. Avant tout, nos remerciements en premier lieu, à ALLAH qui nous a donné la foi, le courage durant ces longues années d'études et la patience de parvenir à finir ce modeste travail. Nous tenons à remercier particulièrement nos parents ; nos succès demeurés loin le fruit de leurs longues années de sacrifices et de patience.

Nous voudrions exprimer par ce modeste travail notre gratitude, notre reconnaissance, et nos grands remerciements à notre Encadrante, Mme «**MOULESSEHOUL Wassila**», pour nous avoir proposé ce sujet et pour nous avoir fait bénéficier de ses compétences scientifiques et aussi pour sa disponibilité.

Il n'y a pas de superlatif assez grand pour exprimer profondément nos gratitude à notre Co-encadrant Mr «**Rabah Mohamed Amin** » pour l'accompagnement tout au long de ce travail et les conseils fournis. Auxquelles nous adressons nos sincères remerciements de nous guider et épauler avec patience tout au long du temps qu'a pris la réalisation de ce mémoire.

Nous remercions très sincèrement tout particulièrement les membres de jury qui ont accepté d'évaluer et juger notre travail. Nos remerciements s'étendent également à tous, nos enseignants durant les années d'études. Enfin, nous ne voudrions pas oublier de remercier toute personne qui nous a aidés de loin ou de près à réaliser ce travail.

Merci...

## **Dédicace**

**Je dédie ce mémoire à :**

**Mes parents**

**Ma mère Malika, qui a œuvré pour ma réussite, de par son amour, son soutien, tous les sacrifices consentis et ses précieux conseils, pour toute son assistance et sa présence dans ma vie, reçois à travers ce travail aussi modeste soit-il, l'expression de mes sentiments et de mon éternelle gratitude.**

**Mon père Ismail, qui peut être fier et trouver ici le résultat de longues années de sacrifices et de privations pour m'aider à avancer dans la vie. Puisse Dieu faire en sorte que ce travail porte son fruit ; Merci pour les valeurs nobles, l'éducation et le soutien permanent Venu de toi.**

**A celui que j'aime beaucoup et qui m'a soutenue tout au long de ce projet : mon fiancé Abdelnour.**

**Et bien sûr à mes frères Abdeldjalil Abderrahmane, ma sœur Fatima Zohra, à toute ma famille, à tous mes meilleurs amis, à mon binôme Fethenour.**

**Mes professeurs de la UAT qui doivent voir dans ce travail la fierté d'un savoir bien acquis. Et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour que ce projet soit possible, je vous dis**

**Merci.**

**Hadjar**

## **Dédicaces**

**Je dédie ce travail**

**A ALLAH, à qui je dois tout,**

**Je pense spécialement à mon père Ghalem qui est le premier soutien pour moi et tous les sacrifices consentis et ses précieux conseils, à ma mère Nadia pour son amour et ses encouragements.**

**À ma sœur Ahlem et ma belle-sœur Nesrine à mes frères Ahmed,**

**Raouf et Islem,**

**A ma grande famille, qui m'a toujours soutenu, je leurs souhaite**

**bonne santé et longue vie.**

**A ma 2ème Mère Tante Fatima et tonton Abdelkader**

**A tous mes amis Ikram, Asma et Bouchra, pour leur soutien moral de tous les instants, qui ont toujours été là pour moi.**

**. A tous mes professeurs, pour leur apport à ma formation**

**À toutes les personnes qui ont été là pour moi, de près ou de loin.**

**Fethenour.....**

## Résumé

Ce mémoire propose une antenne patch rectangulaire miniature adaptée à la fréquence de 11 GHz pour une application satellite. La bande passante de cette antenne est de 4.37% et sa perte de retour est de -43.01 dB, avec un gain de 5.09 dB. Une mise en réseau de cet élément est faite pour améliorer le gain et la directivité. Pour ce faire, l'outil CST Microwave Studio a été utilisé pour l'étude et la simulation.

**Mot clés :** Antenne patch, le gain, S11, la bande passante.

## Abstract

This brief proposes a miniature rectangular patch antenna adapted to the 11 GHz frequency for a satellite application. The bandwidth of this antenna is 4.37% and its return loss is -43, 01dB, with a gain of 5.09 dB. An array of this element is made to improve the gain and directivity. To do this the CST Microwave studio tool was used for the study and simulation

**KEY WORDS:** patch antenna, miniaturization, the gain, S11, the bandwidth.

# Liste des Acronymes

**2D:** deux dimensions.

**3D:** Trois dimensions.

**CSRRs:** Complementary Split Ring Resonators.

**FM:** frequency modulation.

**Ku:** Kurz-unten.

**MMIC:** Microwave Monolithic Integrated Circuit.

**TM100:** panneau laine de verre.

**UHF:** Ultra High Frequencies.

**VHF:** Very High Frequencies.

**Wi-Fi:** Wireless Fidelity.

**WiMAX:** Worldwide Interoperability for Microwave Access.

# Table des matières

Remerciement.....	I
Dédicace.....	II
Résumé .....	IV
Liste des Acronymes.....	V
Tables des matières.....	VI
Liste des figures.....	X
Liste des tableaux.....	XI
Introduction Générale .....	1

## Chapitre I : Les Antennes imprimées

I.1 .Introduction .....	2
I.2 .Historique de l'antenne imprimée .....	2
I.3. Structure d'une antenne imprimée.....	2
I.4 Caractéristiques des antennes imprimées .....	3
I.4.1 Le Coefficient de réflexion.....	4
I.4.2 L'impédance d'entrée .....	4
I.4.3 La bande passante .....	4
I.4.4 Le Diagramme de rayonnement .....	5
I.4.5 La Directivité .....	6
I.4.6 Le gain .....	6
I.4.7 Le rendement .....	6
I.4.8 L'Ouverture .....	6
I.4.9 La polarisation .....	7
I.4.10 Fréquence de résonance .....	8
I.5 Les techniques d'alimentation .....	8
I.5.1 Alimentation Avec contact .....	8
I.5.1.1 Alimentation par ligne micro-ruban .....	8
I.5.1.2 Alimentation par sonde coaxial .....	8
I.5.2 Alimentation Sans contact .....	9

I.5.2.1 Alimentation par couplage électromagnétique.....	9
I.5.2.2 Alimentation à travers d'une ouverture au plan de masse.....	10
<b>I.6 Comparaison entre les différentes méthodes d'alimentation .....</b>	<b>10</b>
<b>I.7 Techniques d'adaptation des antennes imprimées .....</b>	<b>11</b>
I.7.1 Adaptation par ligne quart d'onde .....	11
I.7.2 Adaptation par stub .....	11
I.7.3 Adaptation avec encoche .....	12
<b>I.8. Différents domaines d'utilisation des antennes .....</b>	<b>12</b>
I.8.1. Les systèmes de communications .....	12
I.8.2. Télévision et radiodiffusion FM .....	13
I.8.3. Les radars .....	13
I.8.4. La télédétection .....	13
I.8.5. La radioastronomie .....	13
I.8.6. La communication par satellite .....	13
<b>I.9 Les avantages et les inconvénients des antennes imprimées .....</b>	<b>14</b>
I.9.1 Les avantages .....	14
I.9.2 Les inconvénients .....	14
<b>I.10 Conclusion .....</b>	<b>14</b>

## **Chapitre II: Les Antennes miniatures: Généralités et Conception**

<b>II.1 Introduction.....</b>	<b>16</b>
<b>II.2 Généralités sur les antennes miniatures .....</b>	<b>15</b>
II.2.1 Définition d'une sphère CHU .....	15
<b>II.2.2 Limites théoriques des antennes miniatures .....</b>	<b>16</b>
II.2.2.1 Le facteur de qualité .....	16
<b>II.2.2. 2 Facteur de miniaturisation .....</b>	<b>16</b>
<b>II.3 Techniques de miniaturisation pour les antennes imprimées .....</b>	<b>17</b>
II.3.1 Modification de la géométrie .....	17
II.3.1.1 Insertion de la fente .....	17
II.3.1.2 Ajout de court-circuit ou de circuits ouverts .....	18
II.3.1.3 Repliement .....	18
II.3.1.4 Méandres .....	19
II.3.1.5 L'antenne fractale .....	19



II.3.2 Utilisation d'éléments localisés .....	20
II.3.3 Emploi de Matériaux .....	20
II.3.3.1 Matériaux diélectriques, magnétiques ou magnéto diélectriques .....	20
II.3.3.2 Méta matériaux .....	21
<b>II.4 Conception d'une antenne miniature .....</b>	<b>21</b>
II.4.1 Le cahier de charge .....	22
II.4.2 Calcul des paramètres de l'antenne .....	22
II.4.3 Simulation de l'antenne .....	24
II.4.3.1 L'ajout des encoches .....	26
<b>II.4.4 La miniaturisation de l'antenne imprimée .....</b>	<b>30</b>
II.4.4.1 L'ajout des fentes .....	30
II.4.4.2 Discussions et interprétation des résultats .....	32
II.4.5 Représentation finale de notre antenne miniaturisée .....	37
<b>II.5 Comparaison de performances entre l'antenne de base et l'antenne miniature .....</b>	<b>38</b>
<b>II.6 Conclusion.....</b>	<b>38</b>

### Chapitre III : Le réseau d'antenne

<b>III.1 Introduction.....</b>	<b>39</b>
<b>III.2 Réseau d'antenne .....</b>	<b>39</b>
<b>III.3 Analyse de réseau d'antenne .....</b>	<b>40</b>
<b>III.4 Structure de réseau d'antenne.....</b>	<b>40</b>
III.4.1 Réseau linéaire .....	40
III.4.1.1 L'espacement entre les éléments du réseau .....	40
III.4.2 Techniques d'alimentation d'un réseau linéaire .....	41
<b>III.5 Simulation et résultat .....</b>	<b>42</b>
III.5.1 Structure d'un réseau d'antenne de deux (1×2), quatre(1×4) et huit(1×8) éléments rayonnées .....	43
III.5.2 Comparaison des différents résultats .....	44
III.5.2.1 Le coefficient de réflexion $S_{11}$ .....	44
III.5.2.2 Diagramme de rayonnement .....	45
III.5.2.3 Le rapport d'onde stationnaire VSWR .....	46
<b>III.6 Discussion des résultats.....</b>	<b>47</b>
<b>III.7 Conclusion.....</b>	<b>47</b>

<b>Conclusion générale.....</b>	<b>49</b>
<b>Référence bibliographique.....</b>	<b>50</b>

# Liste des Figures

## Chapitre I : Les Antennes imprimées

Figure I. 1: Présentation d'une antenne imprimée .....	3
Figure I. 2: Diverses géométries du conducteur métallique .....	3
Figure I. 3: Mesure de la bande passante à partir du tracé du coefficient de réflexion .....	5
Figure I. 4: Représentation du diagramme de rayonnement.....	5
Figure I. 5: L'angle d'ouverture d'une antenne.....	7
Figure I.6: Les différentes sortes de polarisation.....	7
Figure I. 7: Alimentation par ligne Micro-ruban .....	8
Figure I. 8: Alimentation par câble coaxial .....	9
Figure I. 9: Alimentation par proximité. ....	9
Figure I. 10: Alimentation au travers d'une ouverture au plan de masse. ....	10
Figure I. 11: Adaptation par quart à adaptation quart d'onde .....	11
Figure I. 12: Stub en circuit ouvert. ....	11
Figure I. 13: Patch rectangulaire. Figure I. 14: L'équivalence en circuit.....	12
Figure I. 15: Patch adapté par encoches de longueur. ....	12

## Chapitre II : Les Antennes miniatures: Généralités et Conception

Figure II. 1: La sphère de CHU.....	16
Figure II. 2: Représentation des types de fentes .....	17
Figure II. 3: Cartographie du champ E dans la cavité d'une antenne.....	18
Figure II. 4: Antenne repliée (a) bow-tie, (b) repliement vertical .....	18
Figure II. 5: Méandre à ligne micro ruban .....	19
Figure II. 6: Une fente en forme de méandre .....	19
Figure II. 7: Les étapes de la conception d'une fractale selon Von Koch .....	20
Figure II. 8: Géométrie de l'antenne micro ruban chargée par CSRR.....	21
Figure II. 9: Représentation de l'antenne imprimée .....	22
Figure II. 10: L'antenne rectangulaire simulée à 11 GHz (a) face supérieure, .....	25
Figure II. 11: Coefficient de réflexion après l'étude paramétrique .....	25
Figure II. 12: La bande passante après l'étude paramétrique.....	25
Figure II. 13: Antenne rectangulaire avec les encoches.....	26
Figure II. 14: Coefficient de réflexion 11 GHz .....	27
Figure II. 15: L'impédance d'entrée de l'antenne à 11 GHz.....	28
Figure II. 16: Le taux d'onde stationnaire de l'antenne à 11 GHz .....	28
Figure II. 17: La bande passante de l'antenne à 11 GHz .....	29
Figure II. 18: La représentation en 3D du gain.....	29
Figure II. 19: La représentation polar du gain .....	29
Figure II. 20: La représentation en 3D de la directivité .....	30
Figure II. 21: La représentation polar de la directivité .....	30
Figure II. 22: Antenne rectangulaire avec des fentes.....	30
Figure II. 23: Coefficient de réflexion après l'ajout des fentes.....	31

<b>Figure II. 24:</b> Appellation des différentes fentes .....	31
<b>Figure II. 25:</b> Courbes de l'étude paramétrique sur les fentes.....	32
<b>Figure II. 26:</b> Coefficient de réflexion de l'antenne miniaturisé à 11 GHz .....	33
<b>Figure II. 27:</b> La bande passante de l'antenne miniaturisée à 11 GHz .....	33
<b>Figure II. 28:</b> L'impédance d'entrée de l'antenne miniaturisée à 2.4GHz.....	34
<b>Figure II. 29:</b> VSWR de l'antenne miniaturisée à 11 GHz.....	34
<b>Figure II. 30:</b> La représentation en 3D de la directivité .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
<b>Figure II. 31:</b> La représentation polar de la directivité.....	35
<b>Figure II. 32:</b> La représentation en 3D du gain.....	36
<b>Figure II. 33:</b> La représentation polaire du gain .....	36
<b>Figure II. 34:</b> Antenne miniaturisé à 11 GHz .....	37

### Chapitre III:Le réseau d'antenne

<b>Figure III. 1:</b> Réseau d'antennes linéaire . .....	41
<b>Figure III. 2:</b> Les techniques d'alimentation pour le réseau linéaire .....	42
<b>Figure III. 3:</b> Réseau de deux éléments rayonnés (1× 2) .....	43
<b>Figure III. 4:</b> Réseau de quatre éléments rayonnés (1× 4) .....	43
<b>Figure III. 5:</b> Réseau de huit éléments rayonnés (1× 8).....	44
<b>Figure III. 6 :</b> Le coefficient de réflexion de 2, 4 et 8 éléments .....	44
<b>Figure III. 7:</b> Représentation en 3D du gain(a) et la directivité (b)de (1x2) éléments .....	45
<b>Figure III. 8:</b> Représentation en 3D du gain(a) et la directivité(b) de (1x4) éléments .....	46
<b>Figure III. 9:</b> Représentation en 3D du gain(a) et la directivité(b) de (1x8) éléments .....	47
<b>Figure III. 10:</b> VSWR de réseau de 2,4et 8 éléments .....	47

# Liste des tableaux

## Chapitre I : Les Antennes imprimées

Tableau I.1: La différence entre les techniques d'alimentation .....	10
--	----

## Chapitre II : Les antennes miniature : Généralités et Conception

Tableau II. 1: Le cahier de charge .....	22
Tableau II. 2: Paramètres de l'antenne imprimée Rectangulaire .....	23
Tableau II. 3: Les dimensions d'antenne patch rectangulaire .....	24
Tableau II. 4: Etude paramétrique sur l'antenne avec fentes .....	32
Tableau II. 5: Les dimensions de l'antenne miniaturisée à 11 GHz.....	37
Tableau II. 6: Comparaison des résultats .....	38

## Chapitre III : Le réseau d'antenne

Tableau III. 1: Comparaison des résultats .....	48
---	----

# Introduction générale

Les télécommunications se sont basées au cours de ces dernières années. Poussés par l'engouement du public, les systèmes de réception sont devenus portables et les antennes se sont miniaturisées, l'utilisation d'antennes imprimées est devenue usuelle dans les systèmes de radiocommunications.

L'étude présentée dans ce rapport se place dans le cadre d'un mini projet de conception d'une antenne Patch miniature. L'utilisation d'un simulateur CST permet d'appréhender des lois de comportements sans avoir préalablement recours à un formalisme mathématique. Ce travail présente un cas concret de conception d'une antenne imprimée rectangulaire, ou on va concevoir, simuler, réaliser et caractériser une antenne patch.

Ces dernières sont caractérisées par leur faible poids, un encombrement réduit, un faible coût de revient et une configuration planaire compatible avec les circuits intégrés et éventuellement conformable.

L'emploi d'antennes imprimées s'est quasiment généralisé dans tous les systèmes de communication mobile. Ces antennes sont légères, peu encombrantes et peu coûteuses. Elles sont fabriquées selon la technique photo lithographique des circuits imprimés. Selon l'utilisation, on trouve différentes formes d'éléments rayonnants, différents types de substrats ou encore différents types d'alimentation.

Le présent travail se subdivise en 3 chapitres :

Dans un premier chapitre on va faire une étude succincte sur l'antenne imprimée qui est applicable aux différentes situations d'intégration, ainsi la simplicité de sa structure fait que ce type d'antenne est adapté au faible coût de fabrication. Ceci est une propriété clé qui explique l'introduction des antennes imprimées dans les applications de la communication par satellite.

Après quelques rappels sur le fonctionnement théorique des antennes patches, nous avons efforcé à aborder le deuxième aspect celui de la conception logicielle d'une antenne imprimée avec un simulateur électromagnétique, des techniques d'amélioration des performances de cette dernière ont été apporté, nous avons présenté les résultats de simulation pour une fréquence de 11 GHz.

Dans le troisième chapitre nous avons présenté le réseau d'antenne de 2 éléments, 4 et 8 éléments pour augmenter le gain de l'antenne en gardant toujours la fréquence de résonance.

# Chapitre I : Les Antennes imprimées

---

## **I.1 .Introduction**

Au fil des années, de nombreux types d'antennes ont été développés pour différents buts à cause de l'évolution rapide de la technologie, plusieurs critères ont été ajoutés à ceux qui existent pour intégrer les antennes à des circuits imprimés pour les utiliser dans des appareils à grand usage comme les téléphones, les routeurs, les capteurs. Parmi ces types on mentionne les antennes imprimées nommées aussi antenne patch. Ce chapitre est consacré aux principes fondamentaux de ce type d'antenne, en premier temps on a donné une définition des antennes imprimées suivie par un bref historique et les types d'antenne avec leurs domaines. Dans un second temps, les caractéristiques ont été détaillées avec leurs formules. Puis on passe à l'explication de la manière dont elles rayonnent et comment les antennes patch sont alimentées et adaptées. Et pour finir nous allons citer quelques avantages et inconvénients des antennes imprimées.

## **I.2 .Historique de l'antenne imprimée**

Le concept des antennes imprimées fut initialement proposé en 1953 par Deschamps aux États-Unis d'Amérique et en France par Guttan et Baissimot en 1955, mais ce n'est qu'aux années soixante-dix que les premières applications de ce type d'antennes ont vu le jour.

Actuellement, les antennes imprimées deviennent de plus en plus importantes en raison de la grande variété des formes géométriques qu'elles peuvent prendre et qui les rendent applicables aux différentes situations d'intégration [1].

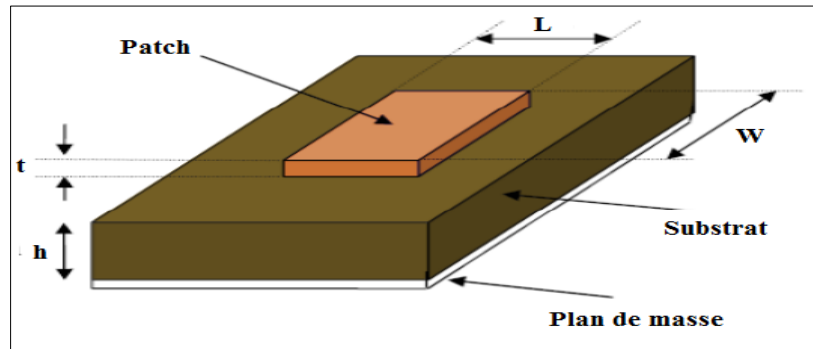
## **I.3. Structure d'une antenne imprimée**

L'antenne est un dispositif métallique nécessaire dans tous les systèmes de communications sans fil. Elle transforme le signal électrique en une onde électromagnétique et vice versa (a un rôle réciproque).

Elle permet de transmettre un signal modulé (porteur d'une information) d'un émetteur vers le récepteur via un canal de transmission (guide d'ondes, l'espace libre, ...) [2].

Sous sa forme la plus fondamentale, une antenne micro-ruban ou imprimée se compose d'une pièce métallique rayonnante sur un côté (patch), du substrat diélectrique et un plan de masse de l'autre côté comme représenté sur la (Figure I.1). Le patch rayonnant et les lignes d'alimentation sont habituellement photo gravées sur le substrat diélectrique, Le patch est généralement fabriqué à base d'un matériau conducteur tel que le cuivre ou l'or et il peut prendre n'importe quelle forme possible [3].



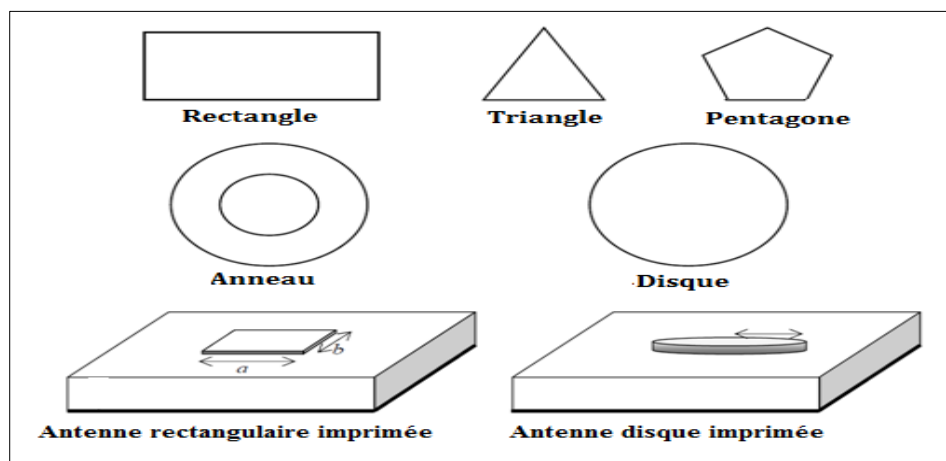


**Figure I. 1:** Présentation d'une antenne imprimée.

L : Longueur du patch.      t : épaisseur du patch.

W : Largeur du patch.      h : épaisseur du substrat.

Ces éléments rayonnants présentent différentes formes : carrée, rectangulaire, triangulaire, circulaire, elliptique ou d'autres formes plus complexes.



**Figure I. 2:** Diverses géométries du conducteur métallique.

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

#### I.4 Caractéristiques des antennes imprimées

Pour une estimation des performances des antennes fonctionnant dans n'importe quelle fréquence, plusieurs critères sont pris en considération, parmi ces caractéristiques il existe :

### I.4.1 Le Coefficient de réflexion

Le coefficient de réflexion S11 met en évidence l'absorption de l'énergie par l'antenne. C'est sur ce paramètre que l'on se base lors de l'optimisation «S11» c'est le rapport entre la puissance réfléchie à l'entrée de l'antenne et la puissance émise par l'antenne elle-même, il est défini par l'équation suivante :

$$S_{11} = \frac{Z_e - Z_c}{Z_e + Z_c} \quad (\text{I. 1})$$

Avec :

- ( $Z_e$ ) est l'impédance d'entrée de l'antenne.

- ( $Z_c$ ) est l'impédance caractéristique (Généralement égale à 50  $\Omega$ ) [4].

### I.4.2 L'impédance d'entrée

L'impédance d'entrée de l'antenne est l'impédance vue de la part de la ligne d'alimentation au niveau de l'antenne.

$$Z_e = Z_c \frac{(1 + S_{11})}{(1 - S_{11})} \quad (\text{I. 2})$$

Avec :

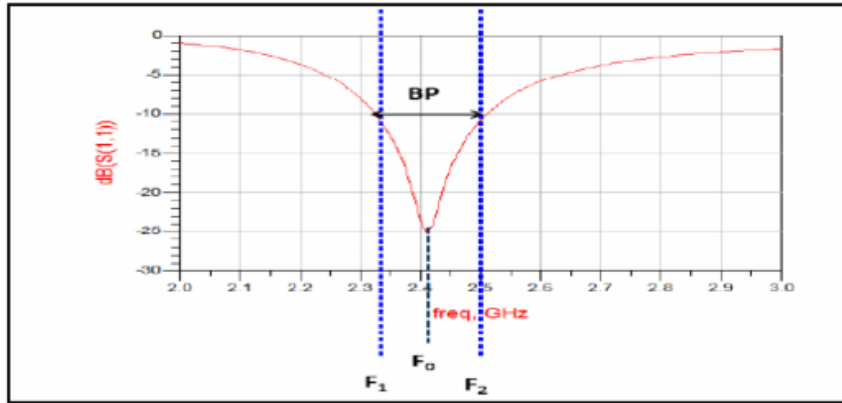
$Z_c$  : l'impédance caractéristique de la ligne d'alimentation.

S11 : Le coefficient de réflexion.

Comme S11 est fonction de la fréquence, alors  $Z_e$  varie aussi avec la fréquence [4].

### I.4.3 La bande passante

La bande passante d'une antenne est définie comme étant la gamme des fréquences utile. Elle est déterminée en général à un taux d'onde stationnaire égal à 2 (ce qui équivaut à presque -10 dB de la courbe du coefficient de réflexion). Au cours de nos travaux, nous utiliserons la bande passante dont S11 est inférieur de -10 dB. On peut juger l'efficacité de l'antenne par cette trace du coefficient de réflexion, où on peut indiquer la plage de fréquence utilisé [5] [6].



**Figure I. 3:** Mesure de la bande passante à partir du tracé du coefficient de réflexion.

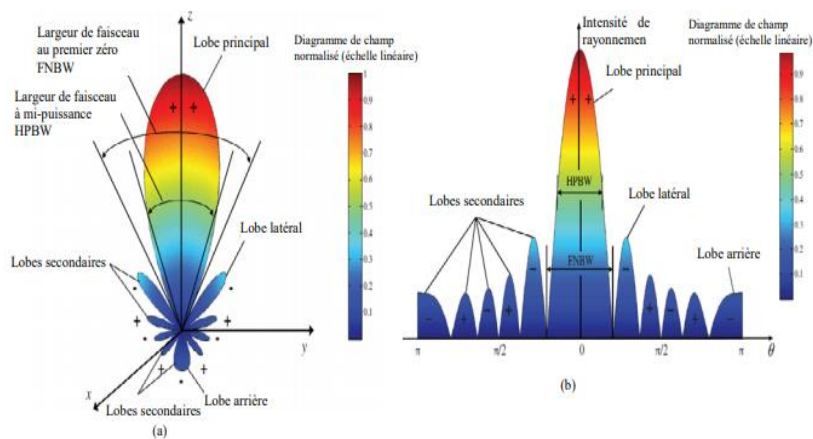
Le rapport de la bande passante en % est donné par l'expression :

$$Bp(\%) = \frac{F_{max} - F_{min}}{F_c} * 100 \tag{I. 3}$$

Avec  $f_{c}$  est la fréquence centrale ou de résonance.

### I.4.4 Le Diagramme de rayonnement

Le diagramme de rayonnement est la représentation graphique des champs EM existant dans le champ lointain ça veut dire il présente les variations de la puissance rayonné qui se propage dans différente direction de l'espace.



**Figure I. 4:** Représentation du diagramme de rayonnement.

La fonction caractéristique de rayonnement  $(\theta, \phi)$  de l'antenne permet d'avoir une vision globale du rayonnement. Elle est définie comme étant le rapport de la puissance transmise dans une direction donnée  $(\theta, \phi)$  à la puissance  $P_{max}$  de la direction où le rayonnement est maximal [7]:

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

### I.4.5 La Directivité

La directivité  $D(\theta, \varphi)$  d'une antenne dans une direction  $P(\theta, \varphi)$  est le rapport entre la puissance rayonnée dans une direction donnée  $P(\theta, \varphi)$  et la puissance que rayonnerait une antenne isotrope [7].

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

Avec  $Pr$  : puissance rayonné par l'antenne.

### I.4.6 Le gain

Le gain représente le rapport entre la puissance rayonné dans une direction et la puissance rayonnée par une antenne isotrope sans perte. Il est exprimé en dB et présenté par l'équation suivante [7] :

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

Avec :

-  $P(\theta, \varphi)$ : Puissance rayonné dans une direction.

-  $Pa$  : Puissance rayonnée à l'antenne.

### I.4.7 Le rendement

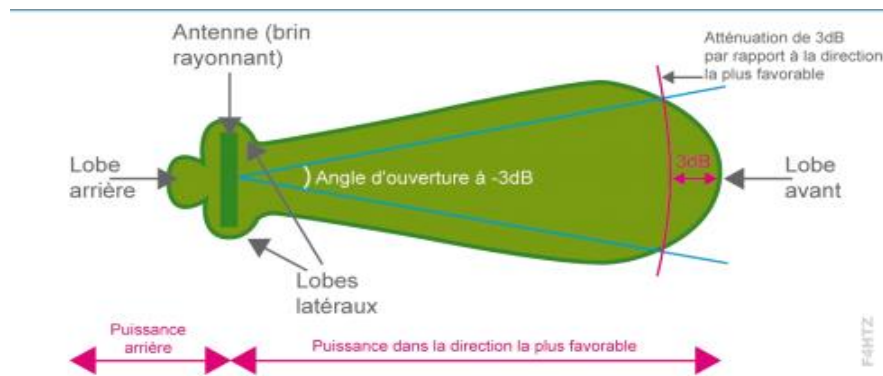
Le rendement ou l'efficacité  $\eta$  d'une antenne définit la capacité de transformer la puissance transmise à l'antenne  $Pa$  en puissance rayonnée  $P$  [7] :

$$\eta = \frac{P}{Pa} = \frac{\text{gain}}{\text{directivité}} \quad (\text{I. 7})$$

Avec :  $P$ : Puissance totale rayonné.

### I.4.8 L'Ouverture

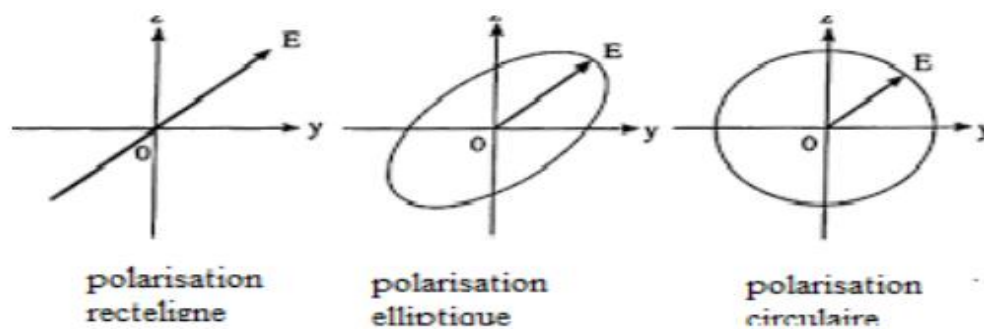
L'ouverture rayonnante d'une antenne est la surface géométrique rayonnante de cette antenne. C'est aussi la surface qui capte l'énergie des ondes électromagnétiques transmises. L'angle d'ouverture d'une antenne est l'angle de direction pour lequel la puissance rayonnée est la moitié de la puissance rayonnée (-3dB) dans la direction la plus favorable [8].



**Figure I. 5:** L'angle d'ouverture d'une antenne.

### I.4.9 La polarisation

L'orientation du champ électrique ( $E$ ) généré par une antenne est appelée polarisation, elle est généralement linéaire horizontale ou verticale. Le plan de polarisation est défini selon l'orientation du champ électrique. Lorsque la configuration de l'antenne place le champ électrique verticalement, on dit que la polarisation est verticale. À l'inverse, lorsque la configuration de l'antenne place le champ électrique horizontalement, on dit que la polarisation est horizontale. Dans certaines conditions, la polarisation peut être aussi "circulaire droite ou circulaire gauche" et il y a plusieurs sortes de polarisation comme le montre la Figure (I. 6) :



**Figure I.7:** Les différentes sortes de polarisation.

- Une onde plane est dite à polarisation rectiligne si le champ électrique est constamment dirigé dans la même direction.
- L'onde est dite à polarisation circulaire si l'extrémité du vecteur  $E$  décrit un cercle, ce cas de figure peut se présenter en considérant deux doublets orthogonaux alimentés en quadrature.
- L'onde est dite à polarisation elliptique si l'extrémité du vecteur  $E$  décrit une ellipse. [8].

### I.4.10 Fréquence de résonance

La fréquence de travail d'un patch est intrinsèquement liée à ses dimensions (la longueur  $L$  du patch pour une antenne rectangulaire) et aux conditions de propagation le long du ruban.

## I.5 Les techniques d'alimentation

Une antenne patch peut être excitée par plusieurs techniques qui sont catégorisées en deux types avec et sans contact. Dans le premier type, l'antenne est alimentée directement à l'aide d'une connexion comme la ligne micro ruban et le câble coaxial. Dans le deuxième type (sans contact), l'alimentation est assurée par un couplage par fente ou par proximité. Ces deux dernières techniques permettent de transférer la puissance RF entre la ligne micro ruban et le patch rayonnant [9].

### I.5.1 Alimentation Avec contact

Dans cette catégorie la ligne de transmission est directement liée à la surface rayonnante de l'antenne.

#### I.5.1.1 Alimentation par ligne micro-ruban

Une ligne micro-ruban (généralement de  $50\Omega$ ) est connectée directement au bord du patch rayonnant. La longueur de la bande conductrice est plus petite par rapport au patch. Ce genre d'alimentation a l'avantage que l'alimentation peut être gravée sur le même substrat pour fournir une structure plane. C'est la technique la moins coûteuse et la plus simple à réaliser, mais elle provoque un rayonnement parasite qui peut être important [10].

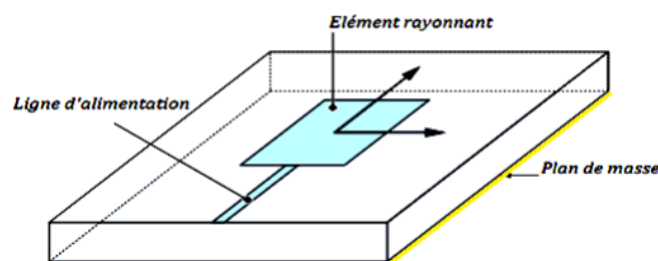
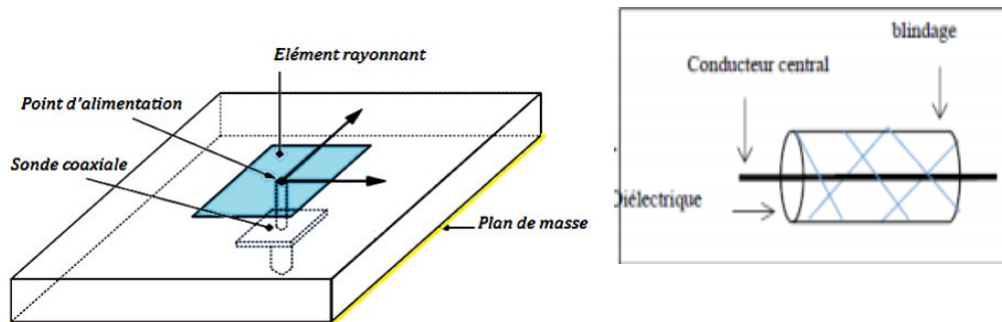


Figure I. 8: Alimentation par ligne Micro-ruban.

#### I.5.1.2 Alimentation par sonde coaxial

L'alimentation par câble coaxial est très utilisée dans les antennes micro-ondes à cause de sa simplicité de mettre en œuvre et sa facilité d'adaptation d'impédance. Le câble coaxial se compose de deux conducteurs (externe et interne). Il traverse le plan de masse et le substrat, le conducteur externe est relié au plan de masse tandis que le conducteur intérieur est relié au

patch rayonnant (Figure I. 9). Parmi ses avantages, elle peut être appliquée à n'importe quel emplacement du patch mais ce type d'alimentation présente une bande passante étroite et une grande difficulté de le modéliser, surtout pour des substrats épais [11].



**Figure I. 10:** Alimentation par câble coaxial.

## I.5.2 Alimentation Sans contact

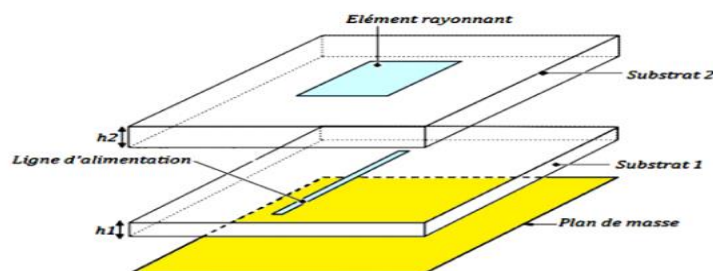
Dans cette catégorie la ligne de transmission n'est pas liée à la surface rayonnante de l'antenne, on trouve :

### I.5.2.1 Alimentation par couplage électromagnétique

Dans cette structure, la ligne d'alimentation micro ruban se trouve entre deux couches diélectriques :

- Une couche supérieure qui comporte le patch en haut (substrat d'antenne).
- Une couche inférieure dont le plan de masse est gravé en bas (substrat d'alimentation).

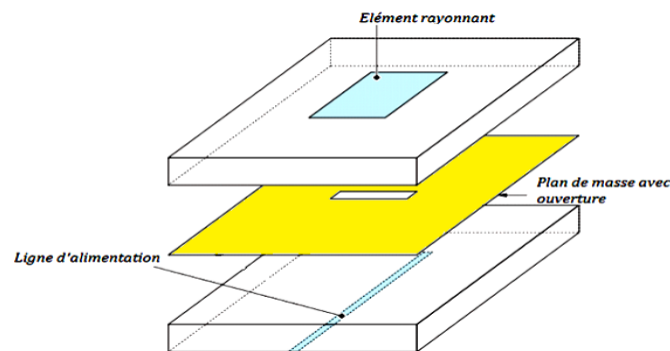
Le transfert d'énergie est effectué par couplage entre la ligne d'alimentation et le patch, Le couplage électromagnétique se fait indépendamment est sans contact de la ligne d'alimentation avec le patch ce qui permet de minimiser le rayonnement parasites et d'améliorer la bande passante mais elle est difficile à réaliser [9].



**Figure I.11:** Alimentation par proximité.

### I.5.2.2 Alimentation à travers d'une ouverture au plan de masse

C'est la plus difficile à mettre en œuvre en plus elle présente une bande passante étroite. Elle se compose de deux substrats de permittivités diélectriques, séparés par un plan de masse sur lequel l'ouverture est faite. Une ligne de transmission est disposée sur le substrat inférieur (permittivité élevée) alors que le patch est disposé sur le substrat supérieur (permittivité faible). Cette technique permet d'alimenter le patch par couplage à travers la fente du plan de masse qui est centré sous ce patch [11].



**Figure I. 12:** Alimentation au travers d'une ouverture au plan de masse.

## I.6 Comparaison entre les différentes méthodes d'alimentation

Ce tableau représente la différence entre les méthodes d'alimentation, une comparaison a été faite entre leur influence sur les performances des caractéristiques des antennes patch [12].

**Tableau I.1:** La différence entre les techniques d'alimentations

Caractéristiques	Alimentation par ligne micro-ruban	Alimentation par câble coaxial	Alimentation couplée par ouverture	Alimentation couplée par proximité
Rayonnement parasite	Plus	plus	moins	Minimum
Fiabilité	Meilleur	Pauvre à cause de soudure	Bon	Bon
Facilité de fabrication	Facile	Soudure et forage requis	Alignement requis	Alignement requis
Adaptation d'impédance	Facile	Facile	Facile	Facile



Bande passante	2-5 %	2-5 %	2-5 %	13%
----------------	-------	-------	-------	-----

## I.7 Techniques d'adaptation des antennes imprimées

Chaque système qui transforme l'énergie sur une ligne de transmission a besoin d'adaptation, la ligne transforme l'impédance de charge en une autre valeur d'impédance au droit de la source. Ce que voit la source dépend donc de l'impédance de charge de la longueur électrique de la ligne et de son impédance caractéristique [13].

### I.7.1 Adaptation par ligne quart d'onde

Dans la construction de circuits hyperfréquences, on recherche souvent l'adaptation, c'est à dire à se ramener à une impédance différente (qui est souvent l'impédance caractéristique) de celle obtenue en fin de circuit [13].

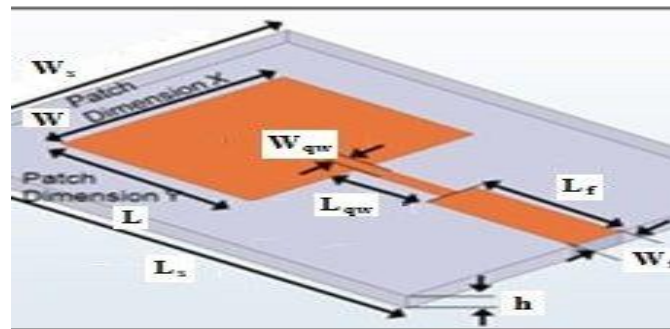


Figure I. 13: Adaptation par quart à adaptation quart d'onde.

### I.7.2 Adaptation par stub

Une autre façon de procéder pour arriver à l'adaptation d'une charge quelconque consiste à utiliser un stub. Grâce à un stub en un circuit ouvert (open stub) ou en court-circuit (short stub). La solution retenue est généralement celle présentant le plus faible encombrement.

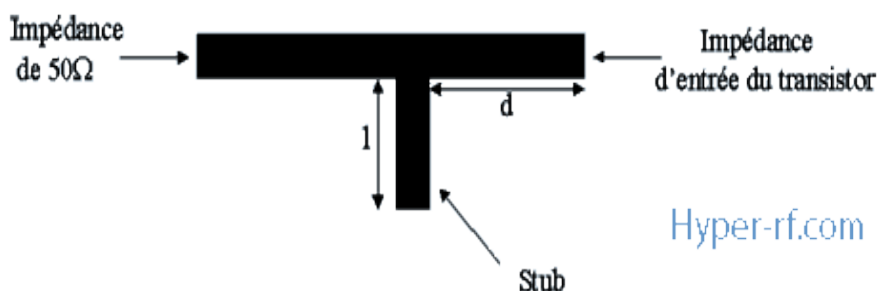


Figure I. 14: Stub en circuit ouvert.

### I.7.3 Adaptation avec encoche

Pour adapter l'antenne, on utilise des encoches agissant comme des stubs. C'est des fentes au niveau de patch c'est-à-dire on va changer la géométrie du patch par modifier Les dimensions des encoches jusqu'à ce que l'antenne soit adaptée [13].

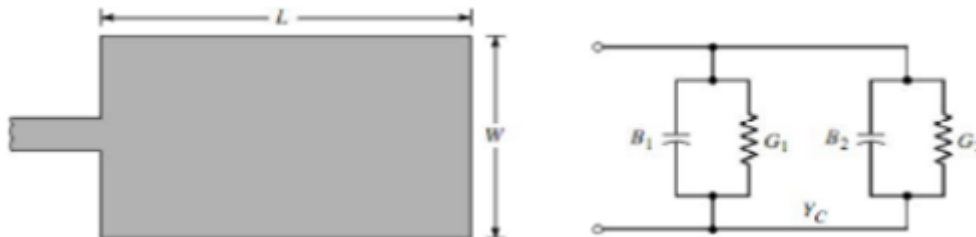


Figure I. 15: Patch rectangulaire. Figure I. 16: L'équivalence en circuit.

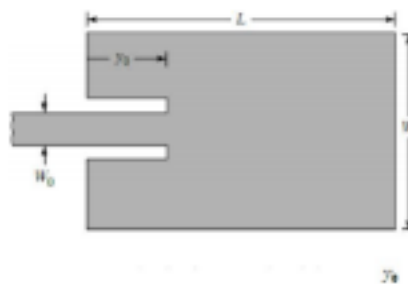


Figure I. 17: Patch adapté par encoches de longueur.

## I.8. Différents domaines d'utilisation des antennes

### I.8.1. Les systèmes de communications

Les communications représentent un domaine très vaste dans lequel les systèmes utilisent des antennes de formes variées. Au début des télécommunications, il paraissait extraordinaire de transmettre la voix. On est ensuite passé à la transmission de données. Ensuite, grâce au développement, des technologies sans fil ont permis la transmission d'internet. Pour cela les types d'antennes ont beaucoup évolué dans chaque domaine d'applications. par exemple celui des antennes de terminaux mobiles qui sont passées en très peu de temps d'antennes filaires rectilignes aux antennes patch, en satisfaisant des contraintes comme une diminution de taille et à une esthétique imposée par le marché grand public [14].

### **I.8.2. Télévision et radiodiffusion FM**

Les bandes de fréquences utilisées pour la télévision et la radiodiffusion FM occupent une grande partie du spectre VHF et UHF. Il existe de nombreuses antennes utilisées aussi bien pour la transmission que la réception. Cependant, le respect de certaines caractéristiques et notamment l'adaptation de l'antenne à l'amplificateur est obligatoire pour la conception des antennes utilisées en transmission [14].

### **I.8.3. Les radars**

Le radar est une technique de détection et de mesure de position d'objets réfléchissant les ondes électromagnétiques. Les caractéristiques d'antennes radar sont étroitement liées aux capacités de couvertures, c'est-à-dire la capacité à discerner deux cibles proches [14].

### **I.8.4. La télédétection**

La télédétection est par définition le domaine qui consiste à détecter la distance. Les applications dans ce domaine sont actuellement très nombreuses. Les différents types d'antennes dont on a parlé sont choisis en fonction de leurs caractéristiques selon les applications visées [14].

### **I.8.5. La radioastronomie**

La radioastronomie est le domaine d'observation des corps célestes dans les bandes de fréquences micro-onde et millimétriques. Les antennes sont souvent composées de deux réflecteurs. Le récepteur se trouve juste derrière le réflecteur primaire qui est percé de façon à laisser passer le rayonnement qui vient se focaliser. Ces antennes peuvent être associées en réseau [14].

### **I.8.6. La communication par satellite**

Le satellite est naturellement la partie essentielle d'un système de télécommunications par satellite. Au début des années 60 époque à laquelle diverses possibilités de télécommunications spatiales étaient expérimentées [15,16], le satellite n'était qu'un objet purement passif, une grande sphère réfléchissante se déplaçant dans le ciel dont la seule fonction était de réfléchir l'énergie reçue, mais les résultats médiocres obtenus ont entraîné l'abandon d'un tel système. Le satellite maintenant est de type actif : il se comporte comme un véritable relais hertzien dans le ciel. Il reçoit les émissions de la terre (lien montante) et les retransmis vers la terre (lien descendante) après translation de fréquence et amplification [17,18].

## **I.9 Les avantages et les inconvénients des antennes imprimées**

De nos jours les antennes imprimées sont de plus en plus utilisées dans divers domaines grâce à leurs intégrités dans plusieurs appareils, un avantage qui se distingue des autres cités par la suite [19] [20] [21]:

### **I.9.1 Les avantages**

- Faible poids et volume réduit, encombrement réduit, donc possibilité d'être intégrées dans des systèmes mobiles.
- Faible coût de fabrication.
- Polarisation linéaire et circulaire pour les télécommunications.
- Profil plat et compatible avec les circuits hybrides et MMIC (Microwave Monolithic Integrated Circuit).
- Réseaux d'alimentation et d'adaptation fabriqués simultanément avec l'antenne.

### **I.9.2 Les inconvénients**

- Bande passante étroite souvent associée avec les problèmes de tolérance géométriques physiques.
- faible gain et la plupart de ces antennes rayonnent uniquement dans un demi-plan.
- Supportent uniquement des faibles puissances.
- Rayonnement parasite du réseau d'alimentation.
- Circuit d'alimentation parfois très complexe, difficile à réaliser[13].

## **I.10 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons parlé d'une façon générale sur les antennes imprimées. Maintenant, on sait bien que les éléments préformant de l'antenne sont surtout la bande passante et le rayonnement. Nous avons vu qu'il existe plusieurs types et plusieurs formes de cette dernière avec des différentes techniques d'alimentation et adaptations.

# Chapitre II: Les Antennes miniatures:

---

## Généralités et Conception

---

## II.1 Introduction

Après avoir détaillé tout ce qui est théorique sur le concept des antennes imprimées, nous allons passer à la définition des antennes miniatures et les différentes techniques de miniaturisation pour concevoir une antenne imprimée miniature adaptée à la fréquence de 11 GHz, ensuite on va définir le cahier de charge de l'antenne patch rectangulaire à 11 GHz avec une brève définition sur le domaine de fonctionnement de cette fréquence.

Par la suite et avant de commencer la conception on calculera les valeurs des paramètres de l'antenne pour les introduire au logiciel, une fois l'exécution est faite nous allons discuter les résultats après les modifications nécessaires pour l'adaptation de notre antenne. De ce point nous passerons à la miniaturisation de cette antenne avec la technique de l'insertion des fentes, et par conséquent de ce fait on a dépensé nos efforts à adapter cette dernière pour avoir une antenne imprimée miniature à 11 GHz.

En fin nous allons évaluer les performances de l'antenne réalisée en mettant en valeur le coefficient de réflexion, le gain, la directivité, la bande passante,...

## II.2 Généralités sur les antennes miniatures

Une antenne miniature ou électriquement petite est l'antenne dont la taille est beaucoup plus petite que la longueur d'onde à sa fréquence de travail. WHEELER indique qu'une antenne pouvait être considérée comme électriquement petite si ses dimensions maximales étaient inférieures à « K » qui représente le nombre d'onde.

$$K = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (\text{II. 1})$$

Avec « $\lambda$ » : la longueur d'onde de l'antenne à sa fréquence d'utilisation.

On a  $k \times a < 1$  (II. 2), « a » : c'est le rayon de la sphère minimale qui entoure complètement l'antenne. Cette sphère est appelée sphère de WHEELER ou de CHU. [22]

### II.2.1 Définition d'une sphère CHU

C'est une sphère qui contient l'intégralité de l'antenne, elle est définie par le rayon de la sphère minimale qui entoure complètement l'antenne « a ». Elle correspond à la distance de transition entre le champ proche où l'énergie électromagnétique est stockée dans l'antenne et le champ lointain où celle-ci est propagée. Cette réduction de taille des antennes par rapport à la longueur d'onde électrique limite les performances radioélectriques des antennes [23].

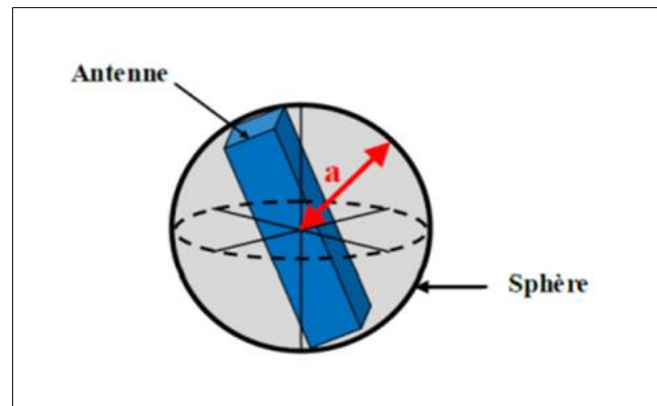


Figure II. 1: La sphère de CHU.

## II.2.2 Limites théoriques des antennes miniatures

### II.2.2.1 Le facteur de qualité

Le facteur de qualité c'est le critère qui limite la miniaturisation d'une antenne en gardant ses performances et ces caractéristiques électromagnétiques (bande passante et gain). Ce facteur fait actuellement le sujet de plusieurs recherches pour aboutir à des dimensions minimales de l'antenne avec des bonnes performances électriques. En théorie le facteur de qualité est défini comme étant le rapport entre l'énergie maximale stockée dans l'antenne et la puissance totale rayonnée [24] :

$$Q = \frac{2W_e}{p_{rad}} \text{ si } W_e > W_m \quad (\text{II. 3})$$

$$Q = \frac{2W_m}{p_{rad}} \text{ si } W_e < W_m \quad (\text{II. 4})$$

Avec:

$W_e$ : Energie électrique moyenne stockée.

$W_m$ : Energie magnétique moyenne stockée.

$p_{rad}$ : Puissance rayonnée.  $W$  : La pulsation.

### II.2.2. 2 Facteur de miniaturisation

L'évaluation du facteur de miniaturisation est défini en théorie comme étant le rapport de la grandeur caractéristique de l'antenne miniaturisée par rapport à celle de l'antenne en espace libre pour une fréquence bien défini [25].

Ce facteur est calculé pour évaluer la réduction d'une antenne comme le montre l'équation suivante :

$$F_M = \frac{L_{miniat}}{L_{esplib}} \quad (\text{II. 5})$$

Nous exprimons cette valeur en %. Mais en pratique il consiste à réaliser une antenne miniaturisé tel que ses performances électromagnétiques se rapprochent le plus de l'antenne imprimée normale en faisant une comparaison des dimensions de ces deux antennes.

## II.3 Techniques de miniaturisation pour les antennes imprimées

De nombreuses techniques, largement détaillées dans des ouvrages de référence et de nombreux documents internationaux, ont été utilisées pour réduire la taille des antennes pour une fréquence donnée. Plusieurs catégories des méthodes de miniaturisation intéressent à l'élément rayonnant. Il s'agit d'une part, de changer localement la structure rayonnante en utilisant des éléments localisés ou des courts-circuits et d'autre part de modifier ponctuellement sa géométrie [26].

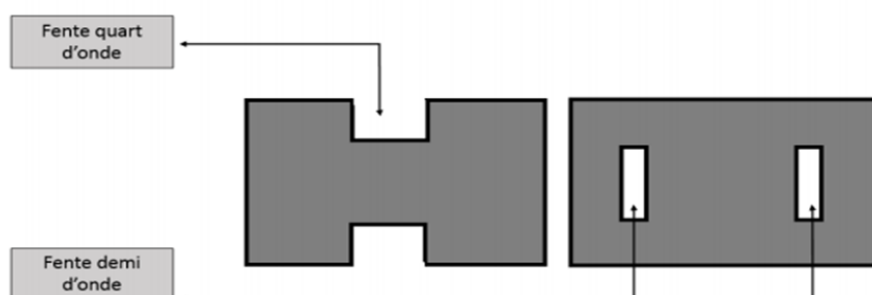
### II.3.1 Modification de la géométrie

La première famille de techniques s'intéresse à la modification structurelle de l'antenne en utilisant des fentes, le repliement, des formes fractales ou arbitraires.

#### II.3.1.1 Insertion de la fente

Cette technique de miniaturisation consiste à la modification structurelle de l'antenne en utilisant des fentes. Lorsqu'elles sont bien placées, elles permettent 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, donc il devra prendre un chemin plus long cela veut dire que la longueur électrique est augmentée ainsi que la capacité et l'inductance de l'antenne. Grâce à cette technique il est possible de réduire la taille d'une antenne de 30% à 50%.

Il existe deux types de fentes : des fentes quart d'onde et fente demi-onde comme le montre la (Figure II. 2) [27] :



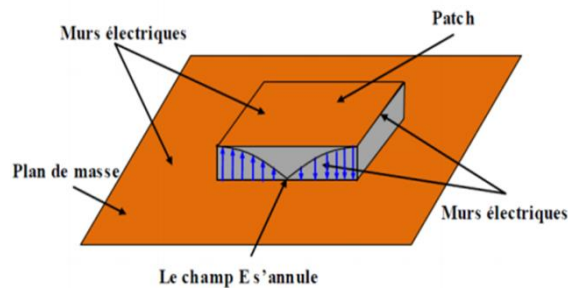
**Figure II. 3:** Représentation des types de fentes.



### II.3.1.2 Ajout de court-circuit ou de circuits ouverts

Cette méthode consiste à introduire un ou plusieurs courts-circuits entre le patch et le plan de masse. En observant la distribution du champ électrique du premier mode résonnant ou mode fondamental TM<sub>100</sub> dans la cavité virtuellement délimitée par des murs électriques et magnétiques (Figure II.3), on constate que le champ électrique s'annule au milieu du patch.

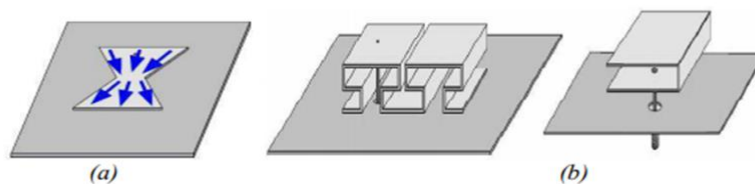
Cela signifie qu'en positionnant un mur électrique parfait dans ce plan vertical, la distribution des champs n'est nullement affectée. Par conséquent, la longueur de la structure peut être réduite de moitié [28].



**Figure II. 4:**Cartographie du champ E dans la cavité d'une antenne Micro-ruban (mode TM<sub>100</sub>).

### II.3.1.3 Repliement

Cette technique consiste à modifier la forme de l'élément rayonnant ou à le plier sur lui-même [29, 30]. Cette opération conduit naturellement à un élément qui occupe physiquement moins d'espace qu'une structure non repliée.

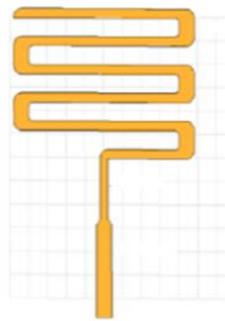


**Figure II. 5:** Antenne repliée (a) bow-tie, (b) repliement vertical.

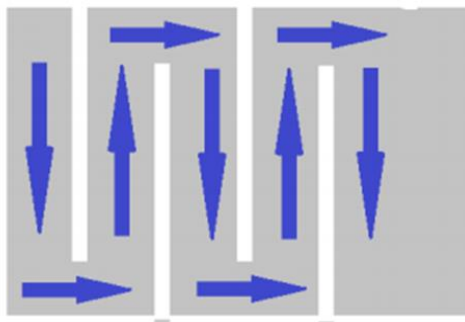
La principale contrepartie de ce type d'opération réside dans l'augmentation des pertes ohmiques et donc une diminution de l'efficacité et du gain. Le cas présenté dans la Figure II. 6(a) a également pour vocation d'élargir la bande passante. Dans le second cas de repliement dans la Figure II. 7(b), le désagrément de cette technique réside dans l'augmentation non négligeable de la hauteur de l'antenne [31].

### II.3.1.4 Méandres

L'Antenne méandre permet de diminuer la longueur physique d'une antenne sans diminuer sa longueur électrique. Les méandres sont utilisés dans les technologies filaire et imprimée, et les méandres à fentes en technologie imprimée. Les méandres à lignes micro ruban (Figure II.8) sont constitués d'un élément rayonnant replié en forme de méandre. Les méandres à fentes, sont obtenus en créant une fente en forme de méandre (Figure II.6) dans un plan métallique. Même la possibilité de donner à la ligne micro ruban ou au fil métallique une forme, cette forme peut être créneau, carré, triangulaire, fractal ou sinusoïdal. En fonction des caractéristiques de cette forme. Ce type de géométrie a un impact sur les performances de l'antenne, comme l'augmentation des pertes métalliques et la diminution de l'efficacité de rayonnement [32].



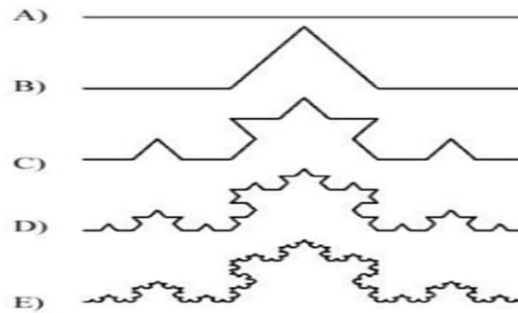
**Figure II. 9:** Méandre à ligne Micro-ruban.



**Figure II. 10:** Une fente en forme de méandre.

### II.3.1.5 L'antenne fractale

L'antenne fractale c'est une antenne ou le patch a une forme mathématiques fragmentées cela signifie une géométrie sous forme courbes mathématiques optimisées pour remplir au mieux une surface carrée, triangulaire ou quelconque, à partir d'une cellule élémentaire de même forme [33] , on donne comme exemple d'antenne fractale imprimée obtenue à partir de la géométrie de Von Koch [34].



**Figure II. 11:** Les étapes de la conception d'une fractale selon Von Koch.

Un des grands intérêts de ces formes est l'utilisation de leur facteur d'échelle pour augmenter la bande passante de l'antenne.

### II.3.2 Utilisation d'éléments localisés

Ces éléments localisés peuvent prendre différentes composantes discretes, trois types peuvent être utilisés, les charges résistives, capacitives ou encore inductives. L'inconvénient de cette technique est l'introduction de pertes ohmiques, d'où une baisse de l'efficacité due à la concentration des courants dans la résistance qui, bien que faible, demeure plus résistive qu'un court-circuit [35, 36].

### II.3.3 Emploi de Matériaux

#### II.3.3.1 Matériaux diélectriques, magnétiques ou magnéto diélectriques

Les matériaux dits diélectriques sont des matériaux avec de fortes permittivités  $\epsilon_r$ . Si on augmente la permittivité d'un matériau, nous allons permettre la réduction de la taille physique d'une antenne comme le montre l'équation suivante [37]:

$$\lambda_r = \frac{\lambda_0}{(\sqrt{\epsilon_r \mu_r})} \quad (\text{II. 6})$$

Ou:

$\lambda_0$  : La longueur d'onde dans l'espace libre

$\lambda_r$ : Longueur d'onde dans un milieu

$\epsilon_r$  : Est la permittivité relative du matériau.

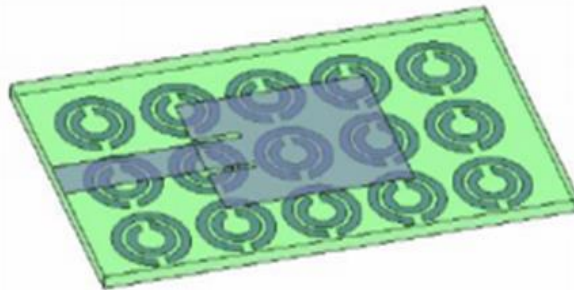
$\mu_r$  : Est la perméabilité relative du matériau

L'utilisation de matériaux à forte permittivité entraîne une augmentation des pertes, ce qui provoque une forte réduction de l'efficacité de l'antenne. Des recherches ont montré aussi

qu'il est possible de miniaturiser les antennes par l'utilisation de matériaux magnétiques. Cette technique repose sur le même principe des matériaux diélectriques qui consistent à réduire la longueur électrique et donc l'encombrement de la structure antennaire selon l'équation précédente (II.6). Les deux techniques citées précédemment (matériaux diélectrique et magnétique) peuvent être combinées pour miniaturiser une antenne avec l'utilisation des matériaux magnétoélectrique. Des chercheurs tels que Sara-bandi et Hal ont développé un matériau constitué d'un empilement de couches diélectriques et magnéto-diélectriques pour diminuer la taille d'une antenne imprimée (La perméabilité et la permittivité relative de ce matériau sont de l'ordre de  $\mu_r = \epsilon_r = 16$  et les tangentes de pertes diélectriques et magnétiques valent respectivement 0.002 et 0.02) [38].

### II.3.3.2 Méta matériaux

Le préfixe méta signifie « après ». Le terme méta matériaux fait référence à des matériaux qui ont des propriétés qu'il est impossible de trouver dans la nature. Plusieurs études ont été menées pour utiliser ces nouveaux matériaux dans des structures antennaires afin de les miniaturiser. Hao, et al. ont étudié l'influence d'un méta matériau sur la fréquence de résonance d'une antenne patch (Figure II.8). En effet, le plan de masse uniforme est remplacé par un plan de masse périodiquement gravé de motifs métalliques CSRRs (Complementary Split Ring Resonators), Cette antenne a été fabriquée pour deux valeurs différentes de la permittivité du substrat diélectrique  $\epsilon_r = 3$  et  $\epsilon_r = 4.7$  [39].



**Figure II. 12:** Géométrie de l'antenne micro ruban chargée par CSRR.

## II.4 Conception d'une antenne miniature

La bande de fréquence Ku est une bande largement utilisée dans le domaine de télécommunication par satellite, elle s'étend de 10.70 à 12.75 GHz.

C'est pour cette raison qu'on a fixé notre choix à la conception logicielle d'une antenne miniature à la fréquence de 11 GHz, pour qu'elle soit facilement intégrée dans les systèmes satellitaires.

### II.4.1 Le cahier de charge

Le tableau suivant résume tous les éléments nécessaires utilisés pour la conception de notre antenne à 11 GHz, avec leurs propriétés :

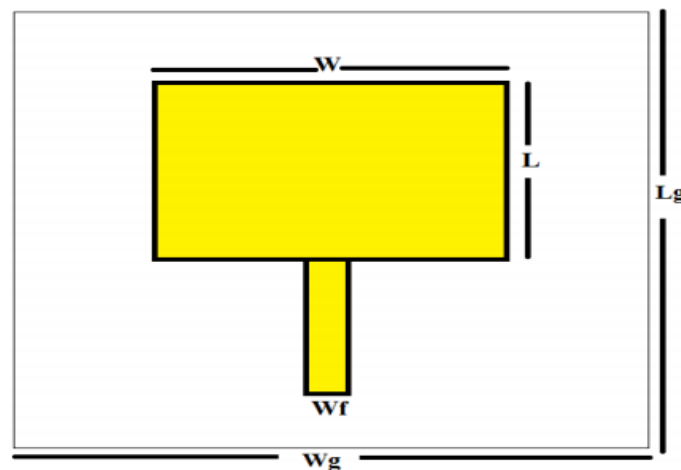
**Tableau II. 1:** Le cahier de charge.

Les composants d'antenne	Le type de matériaux	Hauteur (mm)	Permittivité diélectrique
Plans de masse	Copper (annealed)	0.035	-----
Le patch	Copper (annealed)	0.035	-----
La ligne d'alimentation	Copper (annealed)	0.035	-----
Le substrat	FR-4 (lossy)	1.6	4.3

Ce projet consiste à réaliser une antenne patch microstrip à une fréquence bien déterminée.

### II.4.2 Calcul des paramètres de l'antenne :

La structure de l'antenne imprimée est représentée sur la figure suivante :



**Figure II. 13:** Représentation de l'antenne imprimée.

Le tableau suivant représente les équations utilisées pour le calcul de notre antenne rectangulaire à une fréquence de 11 GHz [40]:

**Tableau II. 2:** Paramètres de l'antenne imprimée Rectangulaire.

Paramètre d'antenne	Equations
Longueur réelle du patch (L)	$L = L_{eff} - 2\Delta L$
Longueur effective ( $L_{eff}$ )	$L_{eff} = \frac{c}{2f\sqrt{\epsilon_{r_{eff}}}}$
L'extension de la Longueur ( $\Delta L$ )	$\Delta L = 0.412h \frac{(\epsilon_{r_{eff}} + 0.3)(\frac{w}{h} + 0.264)}{(\epsilon_{r_{eff}} - 2.58)(\frac{w}{h} - 0.8)}$
Constante diélectrique ( $\epsilon_{r_{eff}}$ )	$\epsilon_{r_{eff}} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} [1 + 12 \frac{h}{w}]^{-1/2}$
Largeur du patch (W)	$W = \frac{c}{2fr\sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}}}$
Longueur du substrat ( $L_g$ )	$L_g = L + 6h$
Largeur du substrat ( $W_g$ )	$W_g = W + 6h$
Guide Wavelength	$\lambda_g = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_{r_{eff}}}}$
Longueur quart d'onde ( $L_q$ )	$L_q = \frac{\lambda_g}{4}$
Largeur quart d'onde ( $W_q$ )	$W_q = \frac{7.48h}{e^{87\sqrt{\epsilon_r + 1.41}}} - 1.25t$
Longueur micro strip ( $L_f$ )	$L_f = \frac{\lambda_g}{2}$
Largeur micro strip ( $W_f$ )	$\frac{W_f}{h} = \frac{8e^A}{-2 + e^{2A}} ;$ $A = \frac{zc\sqrt{\epsilon_r + 1}}{120} + \frac{1}{2} \left( \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1} \right) \left( \ln \frac{\pi}{2} + \frac{1}{\epsilon_r} \times \ln \frac{4}{\pi} \right)$

• C : la vitesse de la lumière  $c = 3 * 10^8 m/s$

• Fr : fréquence de résonance

•  $\epsilon_r$  : permittivité du substrat

• h : l'épaisseur du substrat

L'impédance caractéristique  $Z_c$  :

$$Z_c = \frac{119.9}{\sqrt{2(\epsilon_r + 1)}} \left[ \ln \left( 4 \frac{h}{w_f} + \sqrt{16 \left( \left( \frac{h}{w_f} \right)^2 + 2 - \frac{1}{2} \left( \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1} \right) \left( \ln \frac{\pi}{2} + \frac{1}{\epsilon_r} \ln \frac{4}{\pi} \right) \right)} \right) \right] \quad (\text{II. 7})$$

Après avoir calculé les paramètres de l'antenne, les résultats sont classés dans le tableau suivant

s d'antenne patch rectangulaire

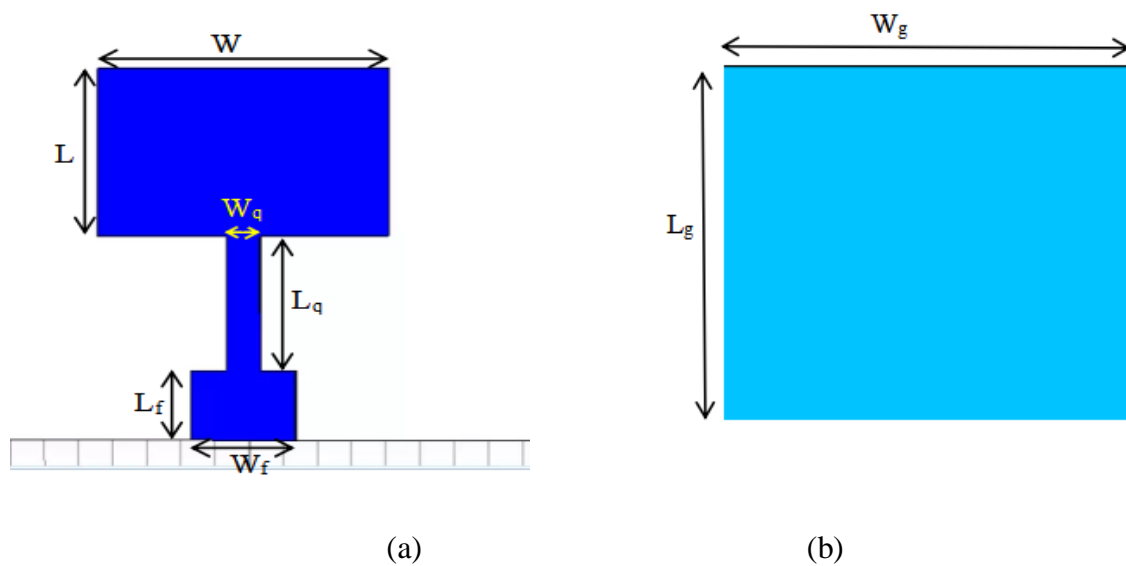
**Tableau II. 3:** Les dimensions d'antenne patch rectangulaire.

Noms	Appellations	Valeurs (mm)
Longueur du substrat	$L_g$	15.422
Largeur du substrat	$W_g$	17.976
Longueur du patch	$L$	5.48
Largeur du patch	$W$	8.5
Longueur du micro strip	$L_f$	2.266
Largeur du micro strip	$W_f$	3.07
Longueur du quart d'onde	$L_q$	4.366
Largeur du quart d'onde	$W_q$	1

### II.4.3 Simulation de l'antenne

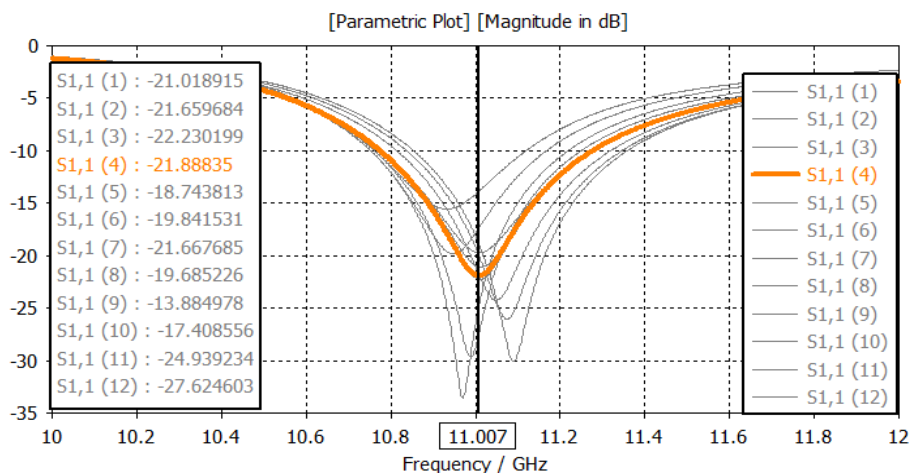
La simulation de notre antenne est faite par logiciel CST Microwave studio en introduisant les dimensions et les paramètres des composantes de cette antenne (plan de masse, substrat, patch, ligne d'alimentation).

La figure suivante représente l'illustration réelle de l'antenne simulée qui est adaptée par une ligne quart d'onde :

**Figure II. 14:** L'antenne rectangulaire simulée à 11 GHz (a) face supérieure,(b) face inférieure.

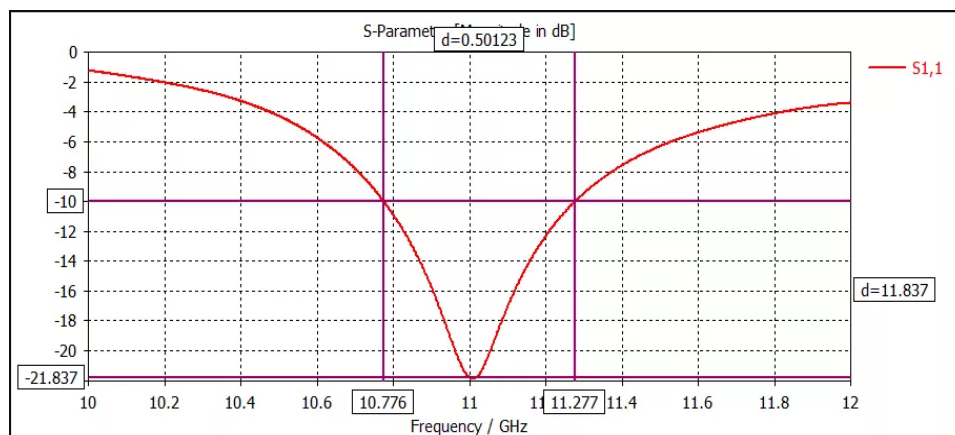


On a fait une étude paramétrique pour adapter l'antenne sur les dimensions de micro strip ( $L_f$ ,  $W_f$ ) et on a obtenu ces résultats  $W_f=3.09$ ,  $L_f=2.2$ , avec un coefficient de réflexion qui égale à  $-21.88$  dB à la fréquence de 11 GHz. Comme le montre la courbe suivante :



**Figure II. 15:** Coefficient de réflexion après l'étude paramétrique.

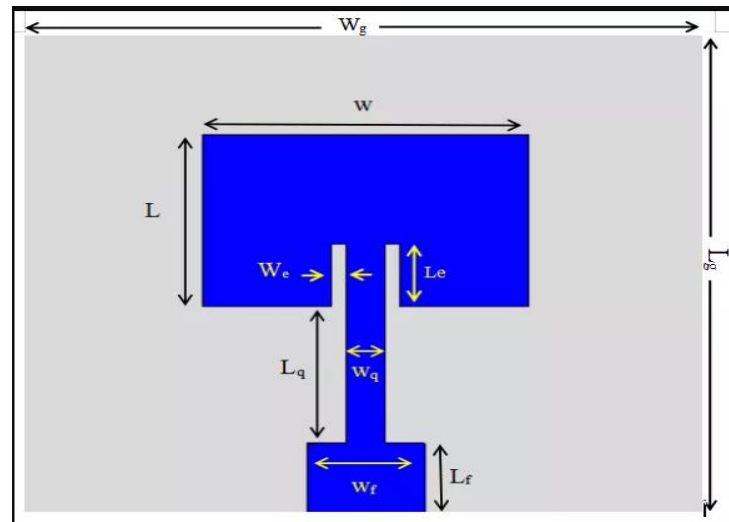
Avec une bande passante de  $BP = 4.55\%$



**Figure II. 16:** La bande passante après l'étude paramétrique.

Mais cela n'empêche pas qu'on peut aller plus loin dans nos recherches afin d'améliorer le résultat qu'on a car cette antenne va être miniaturisée par la suite.

### II.4.3.1 L'ajout des encoches

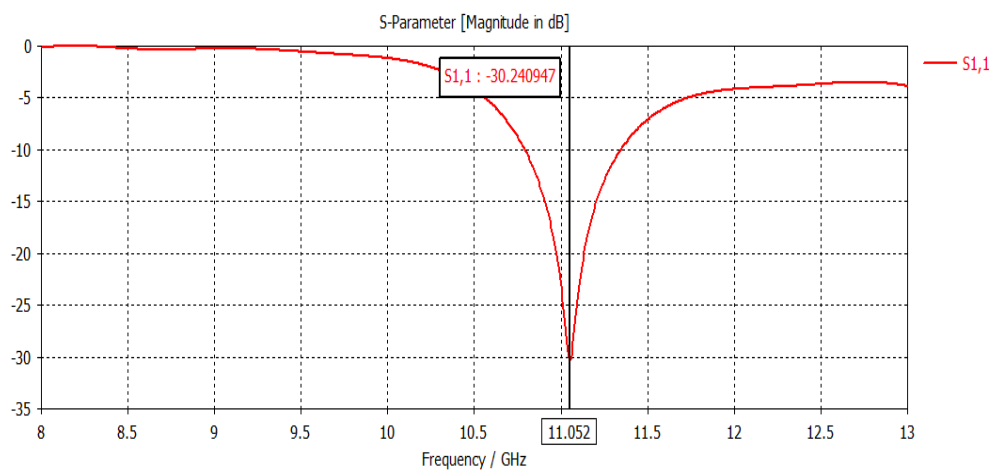


**Figure II.17:**Antenne rectangulaire avec les encoches.

Nous avons trouvé dans la littérature que l'ajout des encoches aide à avoir une meilleure adaptation sur les antennes alimentés par quart d'onde on a fait une étude paramétrique sur les dimensions de les encoches et on a obtenir les résultats suivants.

- **Le coefficient de réflexion**

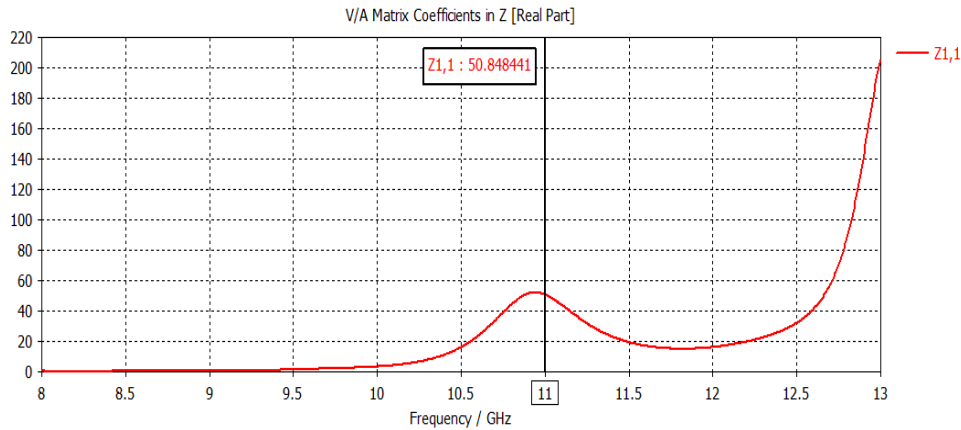
À partir de la modification des dimensions des encoches, nous avons réussi à avoir un S11 qui égale à -30.24 dB a une fréquence ( $f=11\text{GHz}$ ) :



**Figure II. 14:**Coefficient de réflexion 11 GHz.

- **L'impédance d'entrée**

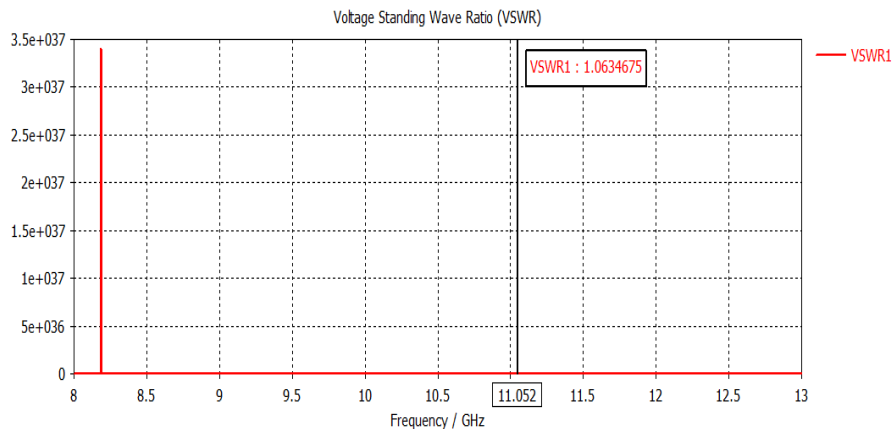
Le résultat de l'impédance d'entrée vaut 50 Ohm, est proche à celle de l'impédance caractéristique 50ohm, ce qui engendre une bonne fourniture de l'énergie vers la ligne d'alimentation utilisée.



**Figure II. 15:**L'impédance d'entrée de l'antenne à 11 GHz.

- **Rapport d'onde stationnaire (VSWR)**

Le rapport d'onde stationnaire de notre antenne est en dessous de 2 ce qui indique une bonne adaptation d'impédance entre l'antenne et la ligne d'alimentation, VSWR=1.06



**Figure II.16:**Le taux d'onde stationnaire de l'antenne à 11 GHz.

### • La bande passante

La bande passante est calculée à partir de l'équation (I-3), on remarque que notre antenne rayonne dans la plage de fréquences [10.79GHz-11.34GHz].

Bp=5%

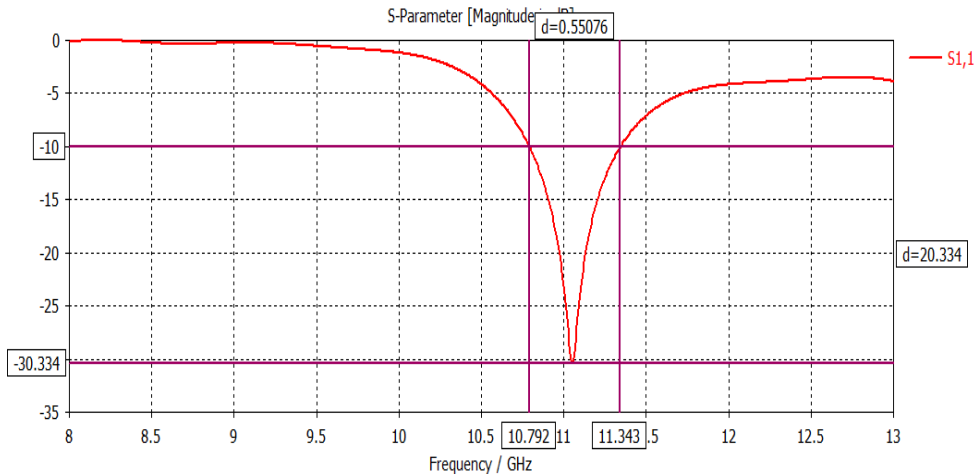


Figure II.17: La bande passante de l'antenne à 11 GHz.

### • Diagramme de rayonnement en Gain et Directivité

Le CST nous a permis de visualiser le diagramme de rayonnement de cette antenne en terme de Gain et de directivité sur un plan polaire qui nous donne une idée sur l'angle d'ouverture de cette antenne. On remarque aussi que le rayonnement en 3D de cette antenne (lobe principale) est dirigé vers la direction Z ce qui montre que l'antenne est presque omnidirectionnelle.

- ✓ La valeur du gain est: 4.99 dB.
- ✓ La directivité de cette antenne est: 6.94 dB.
- ✓ L'angle d'ouverture est: 71.3 °.

Les figures suivantes montrent la représentation polaire et 3D du gain et la directivité :

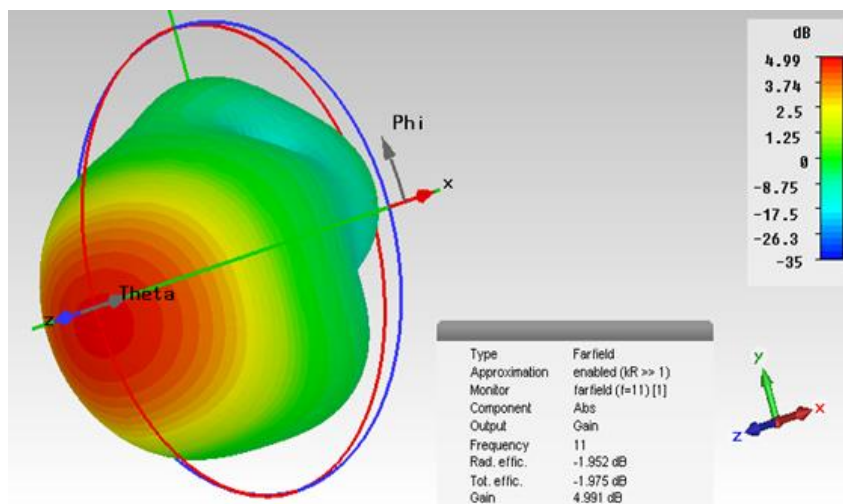


Figure II.18: La représentation en 3D du gain.

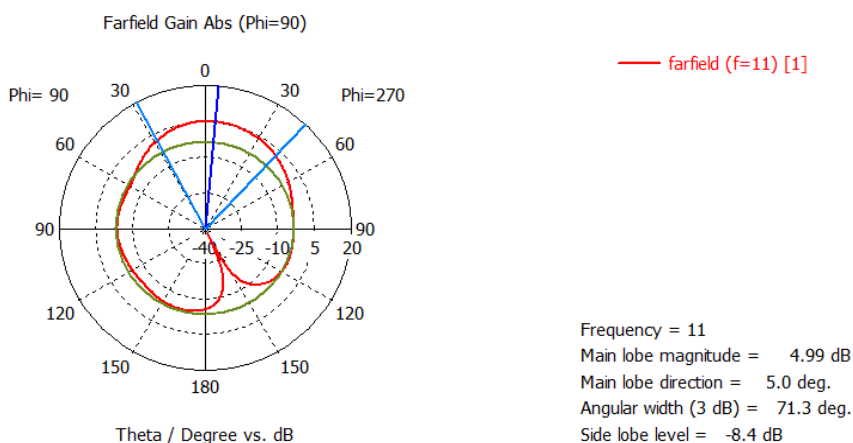


Figure II.19: La représentation polar du gain.

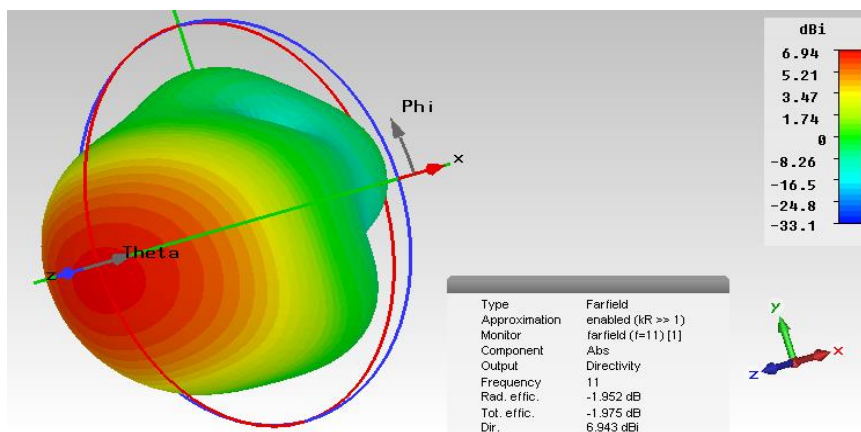
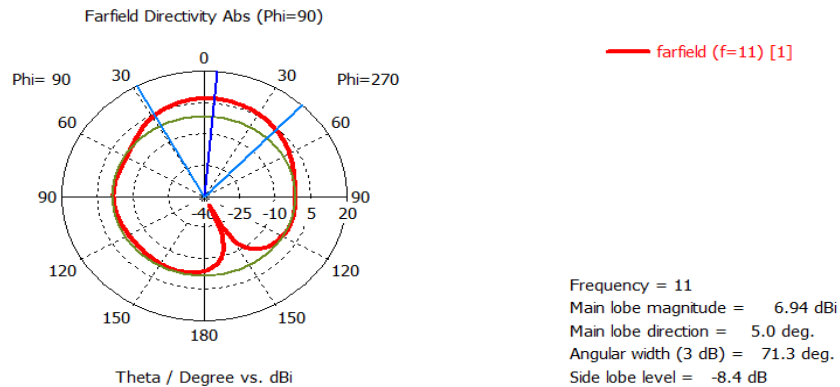


Figure II.20: La représentation en 3D de la directivité.



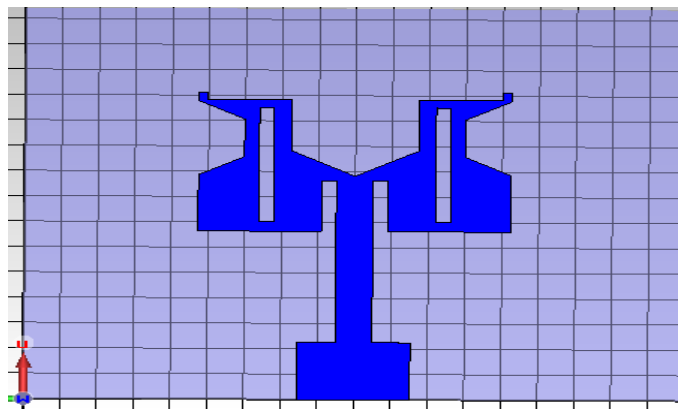
**Figure II. 21:**La représentation polar de la directivité.

#### II.4.4 Antenne imprimée miniature

Après les recherches menées et après avoir acquis des connaissances dans le domaine de la miniaturisation des antennes imprimées, nous avons choisi la technique de la modification de la géométrie de l'antenne, en ajoutant des fentes au niveau de l'antenne.

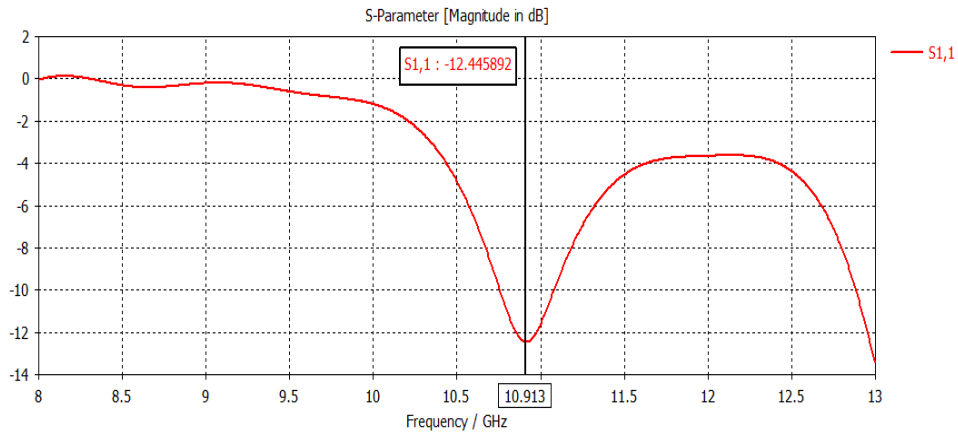
##### II.4.4.1 L'ajout des fentes

Au début nous avons pris l'antenne précédente et qui est l'antenne de base de cette étude, et nous avons ajouté des fentes sur le patch (Figure II.22), sans toucher les mesures de paramètres de l'antenne.



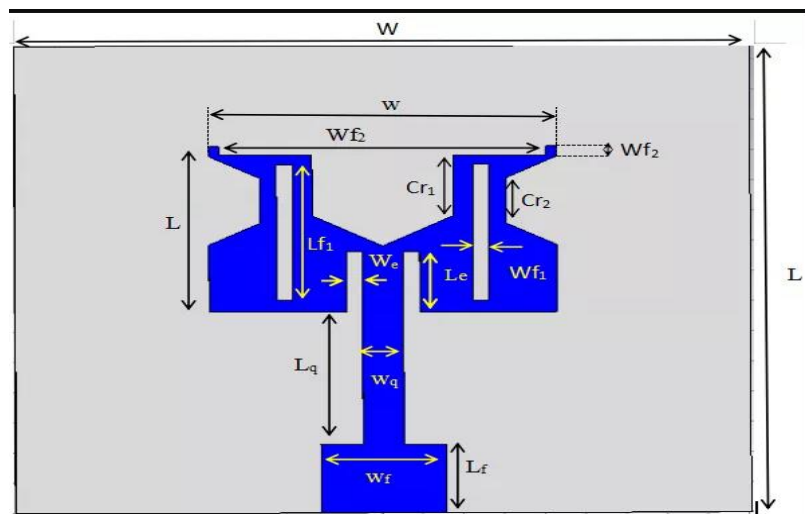
**Figure II. 22:**Antenne rectangulaire avec des fentes.

Plusieurs études ont prouvé que cette technique peut réduire de 30% à 50% la taille réelle de l'antenne, donc on a essayé d'appliquer directement ce qui est mentionné dans la littérature. Les résultats de cette étape démontrent un dysfonctionnement global de l'antenne,  $S_{11} = -12.44\text{dB}$  à une fréquence de 10.91 GHz.



**Figure II. 23:** Coefficient de réflexion après l'ajout des fentes.

Une étude paramétrique a été faite sur les fentes, cette dernière a pour but d'adapter l'antenne à la fréquence de 11 GHz, avec un coefficient de réflexion qui dépasse -10 dB :

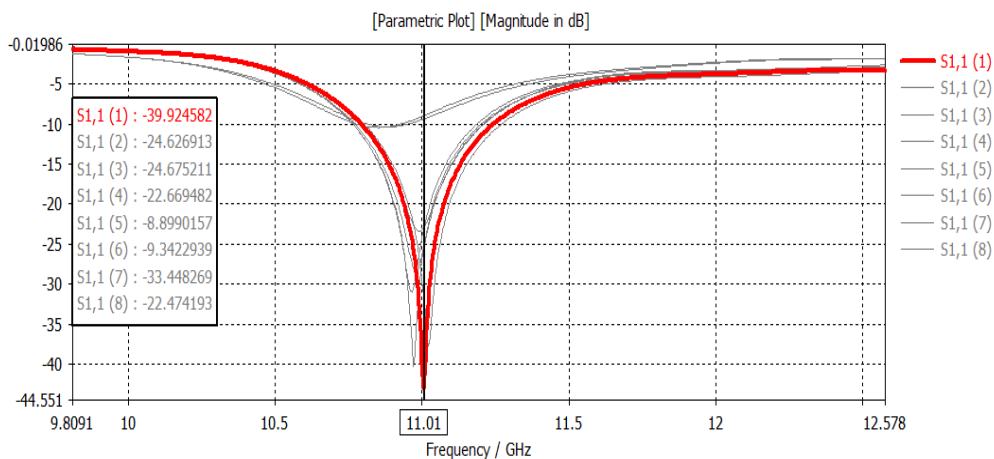


**Figure II. 24:** Appellation des différentes fentes.

**Tableau II. 4:** Etude paramétrique sur l'antenne avec fentes.

	Lf1 (mm)	Wf1 (mm)	S11 (dB)	Fréquence (GHz)
1	2.5	0.4	-39.92	11.01
2	2.6	0.4	-40.10	10.97
3	2.7	0.4	-28.59	10.97
4	2.8	0.4	-23.38	10.99
5	2.9	0.4	-10.44	10.85
6	2.4	0.4	-10.36	10.88
7	2.5	0.3	-37.74	11.02
8	2.5	0.6	-31.01	10.96

La courbe ci-dessous montre l'impact de l'ensemble des expériences qui ont été faite pour aboutir au résultat montré en rouge sur cette figure :

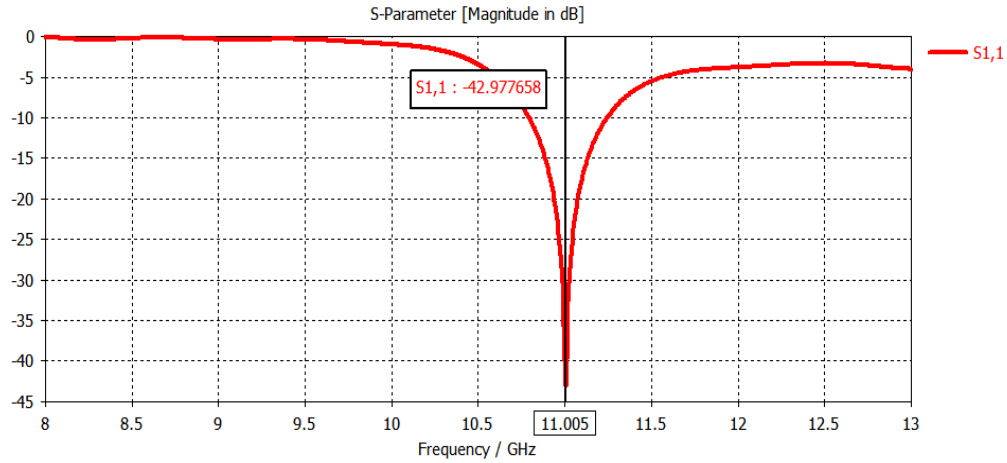
**Figure II. 25:** Courbes de l'étude paramétrique sur les fentes.

#### II.4.4.2 Discussions et interprétation des résultats

- Le Coefficient de réflexion



Nous avons réussi à avoir un coefficient de réflexion  $S_{11} = -42.9\text{dB}$  à la fréquence 11 GHz exactement comme on a souhaité.

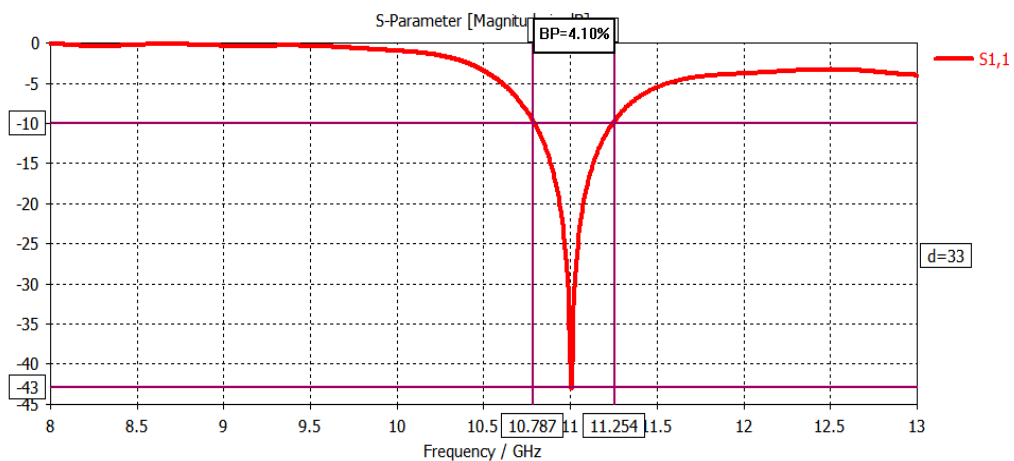


**Figure II. 26:** Coefficient de réflexion de l'antenne miniaturisé à 11 GHz.

#### • La bande passante

Notre antenne rayonne dans la plage de fréquence [10.79 GHz-11.24 GHz].

La valeur de la bande passante est de l'ordre de 4.10%

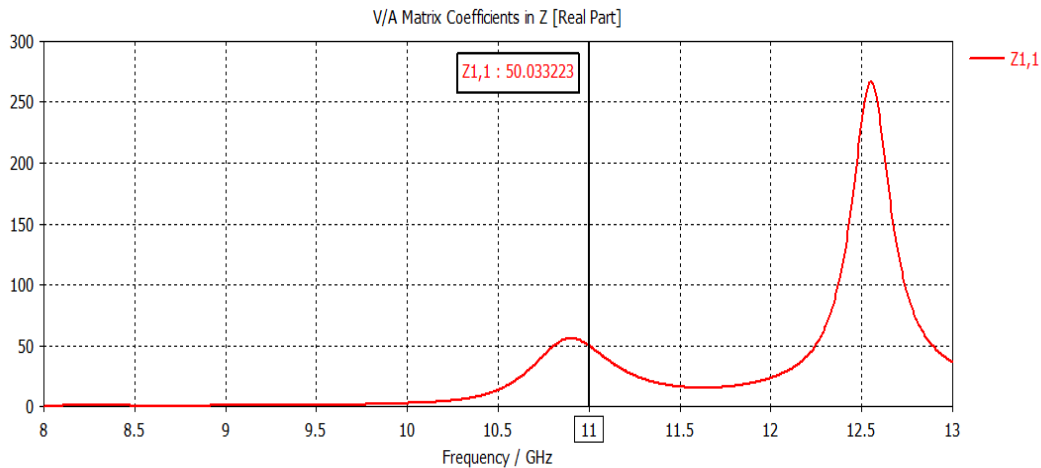


**Figure II.27:** La bande passante de l'antenne miniaturisée à 11 GHz.

### • L'impédance d'entrée

Le résultat de l'impédance d'entrée est proche à celle de l'impédance caractéristique 50 ohm, ce qui engendre une bonne fourniture de l'énergie vers la ligne d'alimentation utilisée

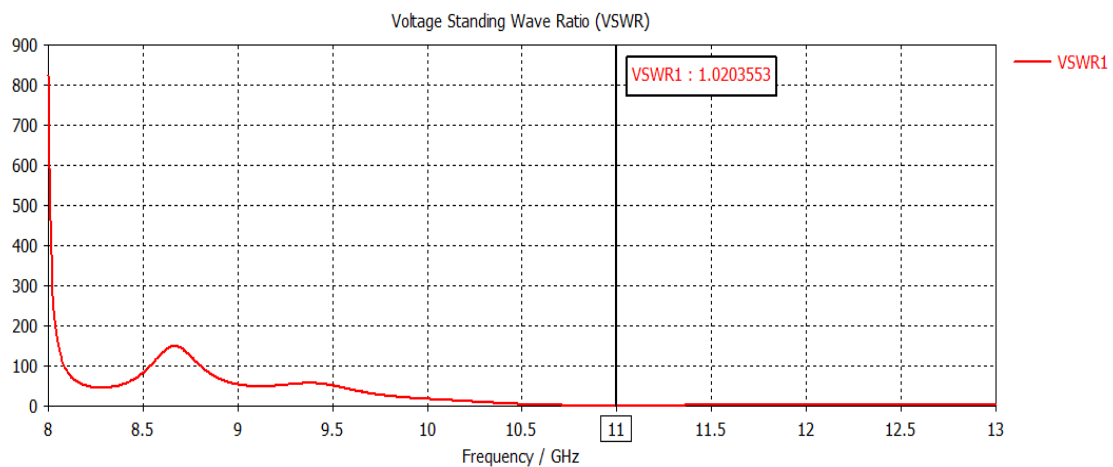
$Z_{11}=50$  ohm.



**Figure II.28:** L'impédance d'entrée de l'antenne miniaturisée à 11 GHz.

### • Taux d'onde stationnaire VSWR

Le rapport d'onde stationnaire nous donne l'appréciation de l'adaptation, le TOS est en dessous de 2 ce qui indique une bonne adaptation d'impédance entre l'antenne et la ligne de d'alimentation, VSWR=1.02.

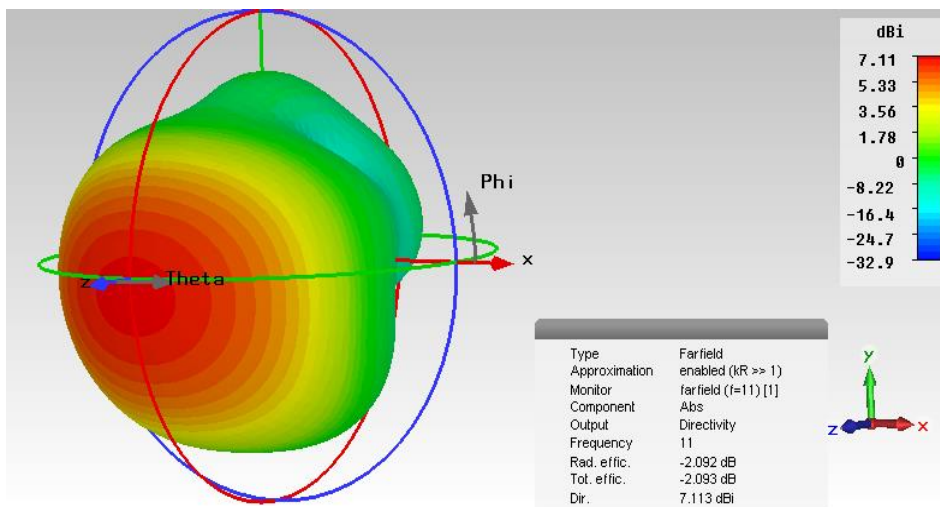


**Figure II.29:** VSWR de l'antenne miniaturisée à 11 GHz.

### • Diagramme de rayonnement en Gain et Directivité

Le diagramme de rayonnement 3D de cette antenne reflète la valeur du Gain et la directivité, et sur le plan polar on peut voir l'angle d'ouverture de cette antenne :

- ✓ La valeur du gain : 5.02dB
- ✓ La directivité de cette antenne : 7.11dBi



- ✓ L'angle d'ouverture : 70.8deg

Les figures suivantes montrent la représentation polaire et 3D du la directivité et du gain :

**Figure II. 30:** La représentation en 3D de la directivité

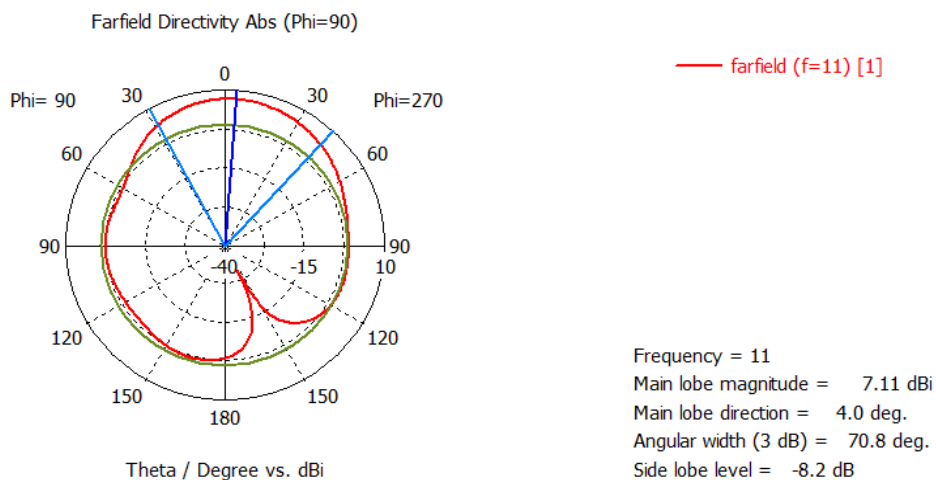


Figure II.31: La représentation en polaire de la directivité.

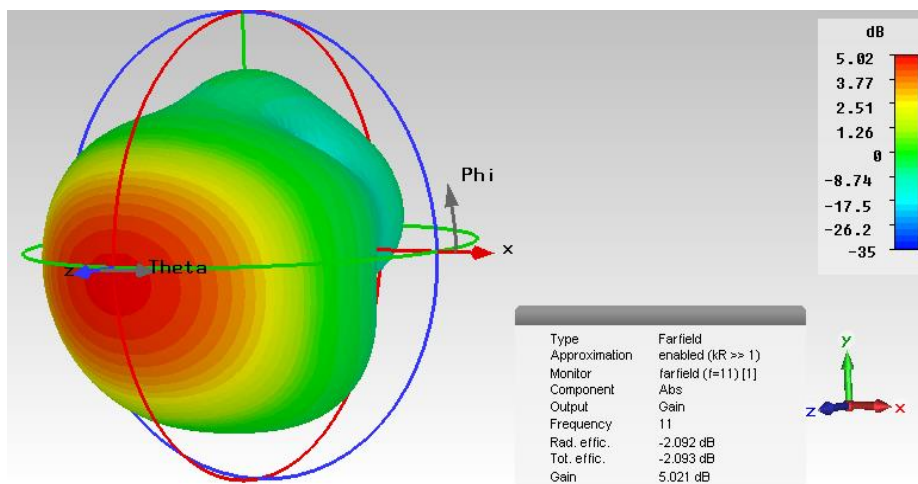


Figure II. 32:La représentation en 3D du gain.

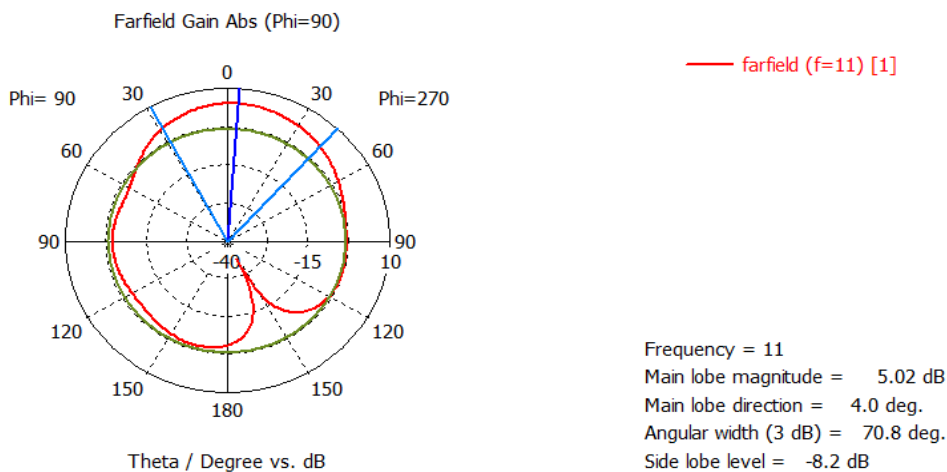


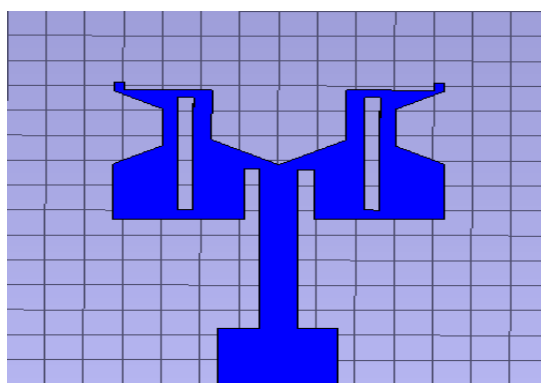
Figure II. 33:La représentation polaire du gain.

### II.4.5 Représentation finale de notre antenne miniaturisée

Nous avons réussi à réduire la taille de notre patch pour obtenir les résultats présentés dans le tableau (II. 3), avec un taux de miniaturisation égal à 44%.

**Tableau II. 5:** Les dimensions de l'antenne miniaturisée à 11 GHz.

Noms	Valeurs (mm)	Noms	Valeurs (mm)
Longueur du patch L	5.48	La largeur de quart d'onde $W_q$	1
Largeur du patch W	8.5	La longueur de micro strip Lf	2.2
Longueur de substrat Lg	15.422	La largeur de micro strip Wf	3.09
Largeur de substrat Wg	17.97	La longueur de la 1 <sup>ère</sup> fonte Lf1	2.5
La longueur de l'encoche Le	2	La largeur de la 1 <sup>ère</sup> fonte Wf1	0.4
La largeur de l'encoche We	0.4	Cr1	2
La longueur de quart d'onde Lq	4.3667	Cr2	1.48
La longueur de la 2eme fonte Lf2	8	La largeur de la 2eme fonte Wf2	1.2



**Figure II. 34:** Antenne miniaturisée à 11 GHz.

## II.5 Comparaison de performances entre l'antenne de base et l'antenne miniature

Le tableau suivant présente les valeurs du : gain, directivité et bande passante de l'antenne patch rectangulaire avec ces dimensions normales, et celle de sa version miniature :

**Tableau II. 6:** Comparaison des résultats.

	Gain (dB)	Directivité (dBi)	S11 (dB)	Fréquence (GHz)	Bande passante (GHz)
Antenne patch simple	4.99	6.94	-30.24	11.05	5%
Antenne patch miniature	5.02	7.11	-43.02	11	4.10%

Nous remarquons une amélioration des performances électromagnétiques (gain, directivité) de l'antenne miniature par rapport à l'antenne de base avec une réduction de la bande passante ce qui est normale par rapport au fait de la miniaturisation, les deux antennes sont adaptées à la fréquence 11 GHz et le coefficient de réflexion de l'antenne miniaturisé est plus petit que l'antenne simple. Généralement on peut dire que nous avons réussi à miniaturiser l'ensemble des dimensions des composantes de l'antenne pour avoir une antenne imprimée miniature à la fréquence de 11GHz.

## II.6 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons réalisé une antenne imprimée rectangulaire à 11 GHz miniature. Nous avons commencé par la conception d'une antenne patch rectangulaire simple performante, après plusieurs tentatives d'adaptation on a réussi à atteindre notre première phase de cette réalisation. En ce qui concerne la deuxième phase on a réduit la taille de l'antenne avec la technique de l'insertion des fentes, ces derniers nous ont permis de conserver les performances de notre antenne (gain, bande passante, directivité) après plusieurs tests sur la longueur et la largeur de ces fentes-là. A la fin de ce chapitre nous avons comparés les performances de l'antenne imprimée normale et sa version miniature ou on a constaté une diminution minimale de la bande passante qui n'affecte pas beaucoup le fonctionnement normal de notre antenne, donc nous avons réussi à concevoir une antenne patch rectangulaire miniature avec des bonnes performances à la fréquence de 11GHz.

# Chapitre III : Le réseau d'antenne

---

### III.1 Introduction

Dans sa structure de base, un réseau d'antennes est l'association d'un ensemble d'éléments rayonnants disposés selon une géométrie particulière, dans une même bande de fréquence. Généralement les antennes élémentaires sont alimentées avec la même pondération en amplitude et en phase avec une distance inter-éléments constante, L'objectif principal d'un réseau d'antenne est de produire un faisceau très directif. On peut ainsi multiplier par un facteur  $N$  le nombre d'éléments rayonnants afin d'augmenter le gain, et donc la portée du signal et les débits d'information. Cette augmentation de puissance produite grâce au réseau d'antenne occupe une place très importante dans beaucoup des domaines d'applications.

### III.2 Réseau d'antenne

Dans le domaine des télécommunications, les utilisateurs ont tendance à favoriser l'utilisation de dispositifs légers, de faible coût et peu encombrants. Les antennes imprimées permettent de répondre à ces contraintes. La structure de ces antennes conformables et souples permet de les intégrer facilement dans divers systèmes de télécommunications. Malheureusement ces derniers souffrent de quelques limitations: la puissance rayonnée, la fréquence d'utilisation, le gain, ainsi que la bande passante. L'association en réseau de plusieurs antennes imprimées permet de compenser les limitations des caractéristiques d'une antenne seule et d'améliorer leurs performances en gain et rayonnement... [41].

Actuellement un réseau imprimé est largement utilisé puisqu'il permet de répondre à de nombreuses contraintes commandées par les systèmes. Il est caractérisé par le diagramme de rayonnement, la fonction caractéristique, l'angle d'ouverture, la dynamique d'une antenne, le gain et la directivité. Les domaines d'utilisation privilégiés de ces antennes sont trouvés dans de nombreux systèmes de communication tels que la téléphonie mobile, les systèmes multimédia sans fil (WIFI, Bluetooth, WIMAX...etc.) Et les communications spatiales. Elles trouvent également des applications dans certains systèmes radar ou de télédétection et sont utilisées dans des bandes de fréquences allant de 1GHz jusqu'aux bandes millimétriques. Ces applications sont soumises à des critères sélectifs et à des limitations de poids, de volume et d'épaisseur [42].



### III.3 Analyse de réseau d'antenne

On définit un réseau d'antennes par l'association de plusieurs éléments rayonnants répartis spatialement. Chacune de ces antennes va rayonner le signal radiofréquence porteur de l'information au prorata de ses propriétés intrinsèques (gain, diagramme de rayonnement, etc.) et des conditions d'excitation (puissance électrique transmise, phase relative)[43].

### III.4 Structure de réseau d'antenne

Le réseau d'antennes peut avoir différentes géométries: réseaux linéaires, réseaux planaires et réseaux circulaires. Le champ total rayonné par le réseau est déterminé par l'addition des vecteurs champs rayonnés par les différents éléments [44].

#### III.4.1 Réseau linéaire

Un réseau linéaire uniforme est la géométrie la plus fréquemment utilisée dans la conception des antennes réseaux. La Figure III. 1 ,représente un réseau formé de N antennes alignées et séparées par une distance d (distances entre deux éléments). Les éléments sont excités uniformément [44].

##### III.4.1.1 L'espacement entre les éléments du réseau

L'espacement entre les éléments du réseau agit directement sur le diagramme de rayonnement et le gain. Notant que lorsqu'on augmente le nombre d'élément rayonnant, on augmente le gain de 3 dB mais cela sans prendre en considération aucune perte, pour un angle de balayage donné  $\theta_0$  à une fréquence f, l'espacement maximal des éléments est donné par [45]:

$$\frac{d}{\lambda} = \frac{1}{1 + \sin \theta} \quad (\text{III. 1})$$

Avec :  $\theta$  Maximum d'angle de couverture (surface antenne).

L'espacement théorique des éléments pour les réseaux d'antennes dans laquelle le gain obtenu est maximum est donné par:  $0.4\lambda \leq d \leq 0.9\lambda$  [46]

Si les éléments sont trop proches les uns des autres, un phénomène de couplage réduit la valeur du gain et lorsque elles sont trop éloignées, des lobes secondaires apparaissent et réduisent par conséquent la directivité [46].

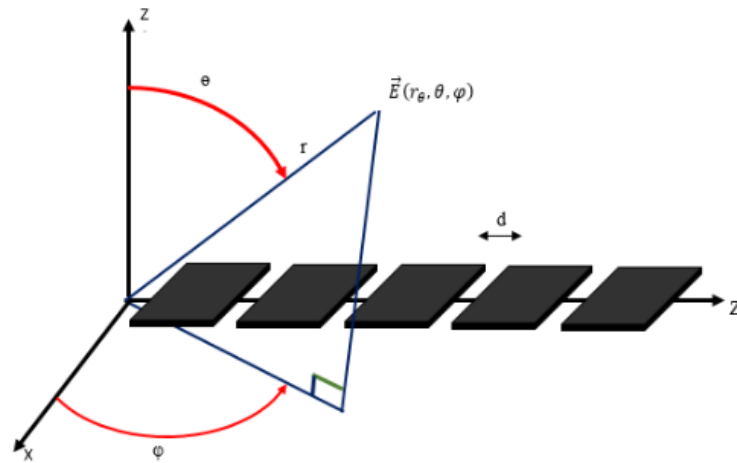


Figure III. 2: Réseau d'antenne linéaire [6-7].

Pour connaître le rayonnement de  $N$  éléments en un point donné de l'espace, nous utilisons le théorème de superposition qui consiste en l'addition vectorielle des champs lointains émis par chaque source [47].

$$E_t(\theta, \varphi) = \sum_{n=0}^{N-1} \mathbf{E}_t(\theta, \varphi) = \sum_{n=0}^{N-1} a_n \frac{e^{-ikr_n}}{r_n} e^{-i\varphi n} f_n(\theta, \varphi) \quad (\text{III. 2})$$

Avec :

$f_n(\theta, \varphi)$  : Fonction caractéristique du  $n^{\text{ième}}$  élément du réseau.

$a_n$ : Amplitude électrique de la source  $n$ .

$\theta_n$ : Phase de la  $n^{\text{ième}}$  source.

$r_n$ : Distance du point d'observation au  $n^{\text{ième}}$  élément.

$K$ : Vecteur d'onde.

### III.4.2 Techniques d'alimentation d'un réseau linéaire

Il existe deux façons d'alimenter un réseau, soit en série (**Figure III.2.a**), soit en parallèle (**Figure III.2.b**) [48][49]. Pour une alimentation en série, les éléments rayonnants sont reliés en chaîne les uns aux autres par des tronçons de ligne micro-ruban. Pour l'alimentation en parallèle,  $2^n$  éléments rayonnants sont alimentés en parallèle par  $n$  étages de  $2^{m-1}$  diviseurs de puissance à chaque étage [50].

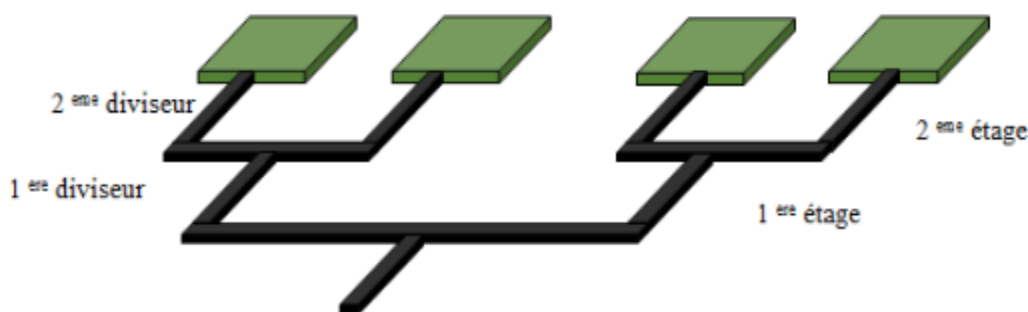
Les éléments rayonnants sont alimentés par une ligne de  $50\Omega$  utilisant la technique d'alimentation d'entreprise selon la règle de division de Wilkinson [51] afin d'obtenir une correspondance avec le patch à  $100\Omega$ .

L'alimentation en série et l'alimentation en parallèle sont différentes dans de nombreux aspects, d'abord l'alimentation parallèle fournit une largeur de bande passante plus grande, généralement 10% de la fréquence de fonctionnement, tandis que l'alimentation en série fournit une bande passante du 1% à 3% [52][53].

Le principal inconvénient de l'alimentation parallèle c'est qu'elle souffre de plusieurs pertes ohmiques vu que les structures utilisées pour l'alimentation en parallèle occupent plus d'espace. Les pertes par rayonnement sont également d'une plus grande quantité en raison de la discontinuité de la configuration nécessaire en parallèle.



(a) Alimentation en série  $N=2^n$ .



b) Alimentation en parallèle avec 3 niveaux de diviseurs.

**Figure III. 3:** Les techniques d'alimentation pour le réseau linéaire.

### III.5 Simulation et résultat

Dans cette section, nous allons exposer quelques résultats issus de la littérature sur l'utilisation du réseaux d'antenne pour des différents nombres des élément rayonnée 2, 4 et 8.

### III.5.1 Structure d'un réseau d'antenne de deux ( $1 \times 2$ ), quatre ( $1 \times 4$ ) et huit ( $1 \times 8$ ) éléments rayonnées

Figure III.3, Figure III.4 et La figure III.5 montre la simulation proposée des réseaux à 2 éléments ( $1 \times 2$ ), 4 éléments ( $1 \times 4$ ) et 8 éléments ( $1 \times 8$ ). Ces trois éléments ont les mêmes spécifications de matériau de substrat et les mêmes paramètres d'antenne que l'antenne à un seul élément unique. L'espacement uniforme est maintenu entre les éléments du réseau.

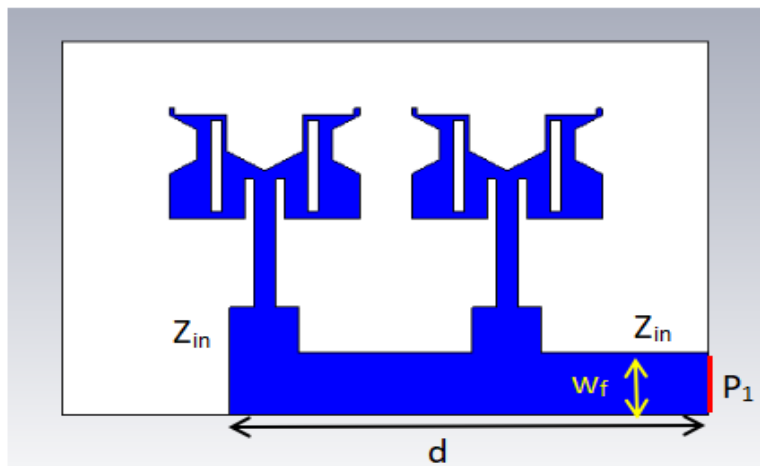


Figure III. 4: Réseau de deux éléments rayonnés.

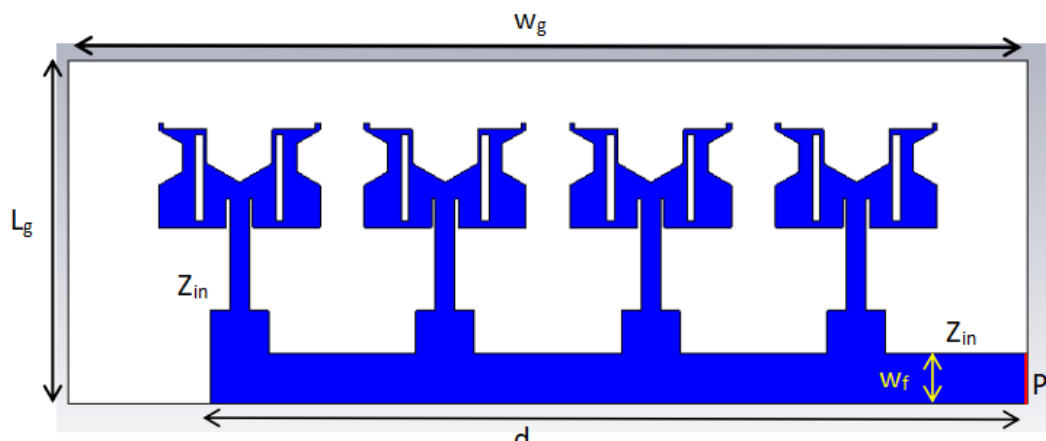
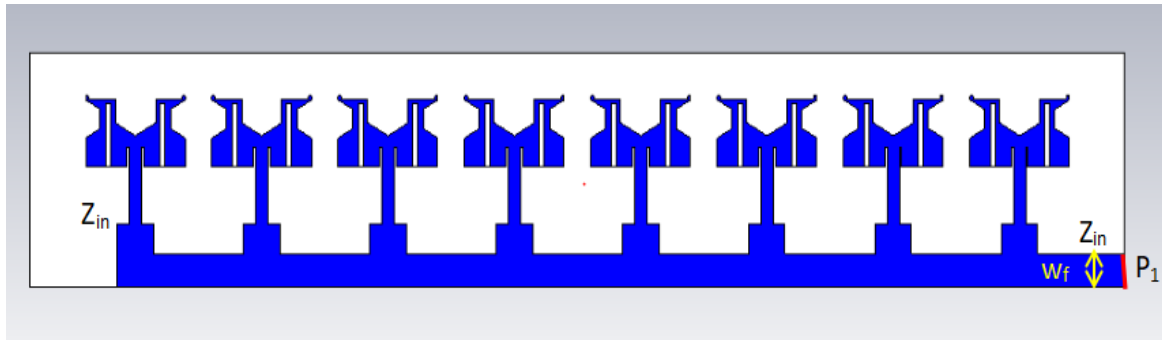


Figure III. 5: Réseau de quatre éléments rayonnés.

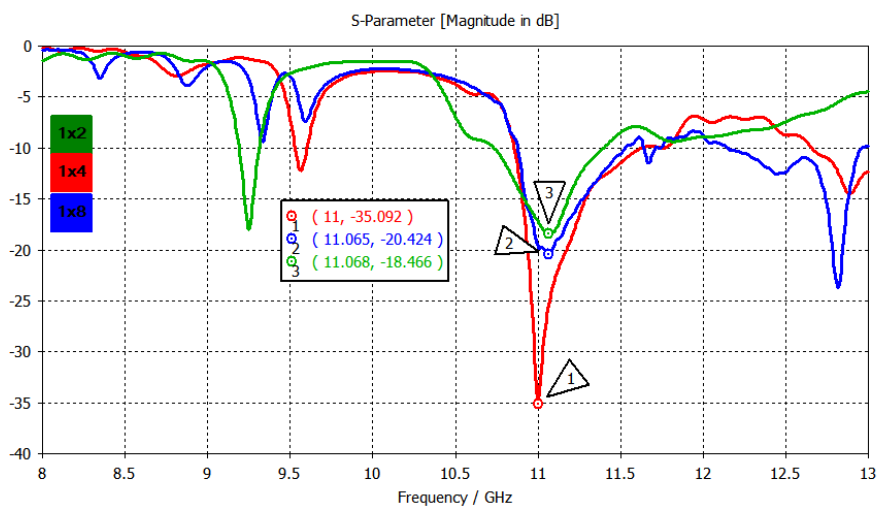


**Figure III. 6:** Réseau de huit éléments rayonnés.

Une alimentation en série a été utilisée pour alimenter les éléments du réseau avec une impédance d'entrée  $Z_{in} = 50 \Omega$  (la largeur de la ligne d'alimentation a été calculée d'après l'équation (II-8) de chapitre II et un espace inter élément égale à  $0.4\lambda$ ).

### III.5.2 Comparaison des différents résultats

#### III.5.2.1 Le coefficient de réflexion $S_{11}$



**Figure III. 7:** Le coefficient de réflexion de 2, 4 et 8 éléments.

#### III.5.2.2 Diagramme de rayonnement

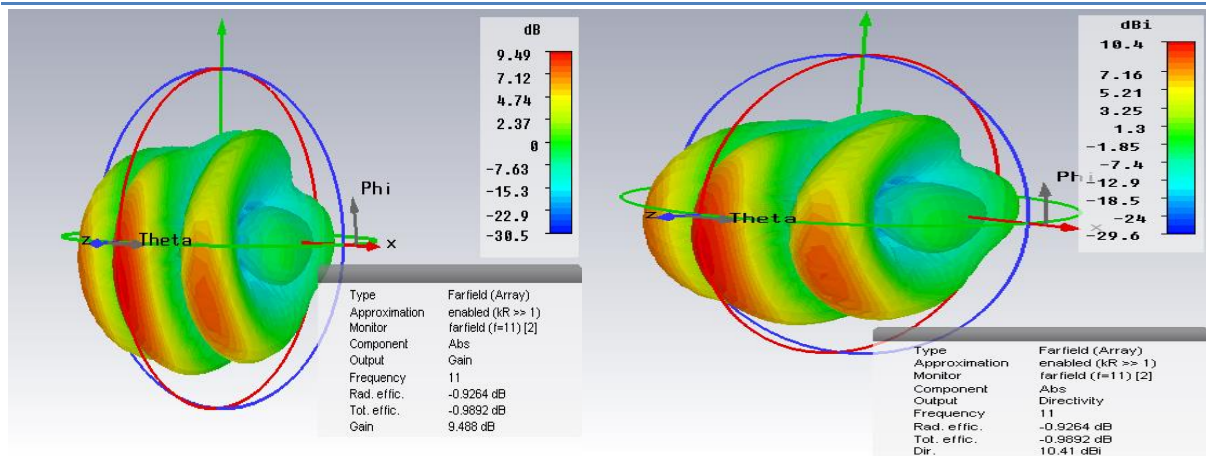


Figure III. 7: Représentation en 3D du gain(a) et la directivité (b)de (1x2) éléments.

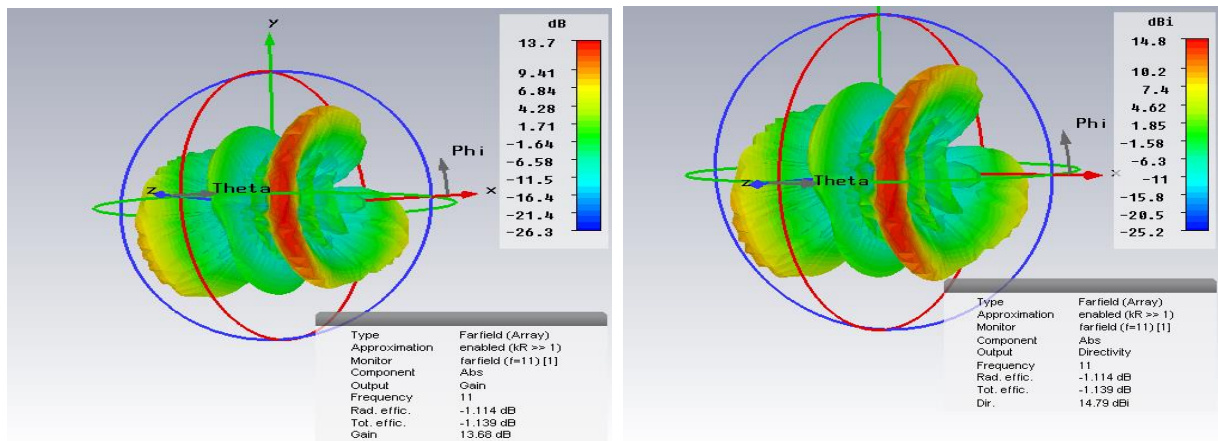
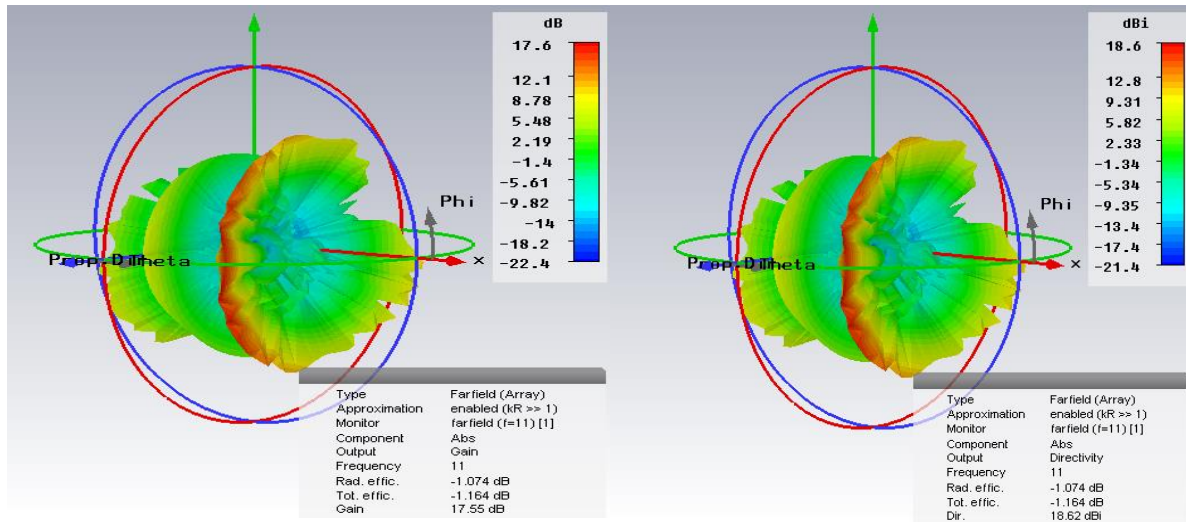


Figure III. 8: Représentation en 3D du gain (a) et la directivité (b) de (1x4) éléments.



(a)

(b)

Figure III.9: Représentation en 3D du gain(a)et la directivité(b)de (1x8) éléments.

### III.5.2.3 Le rapport d'onde stationnaire VSWR

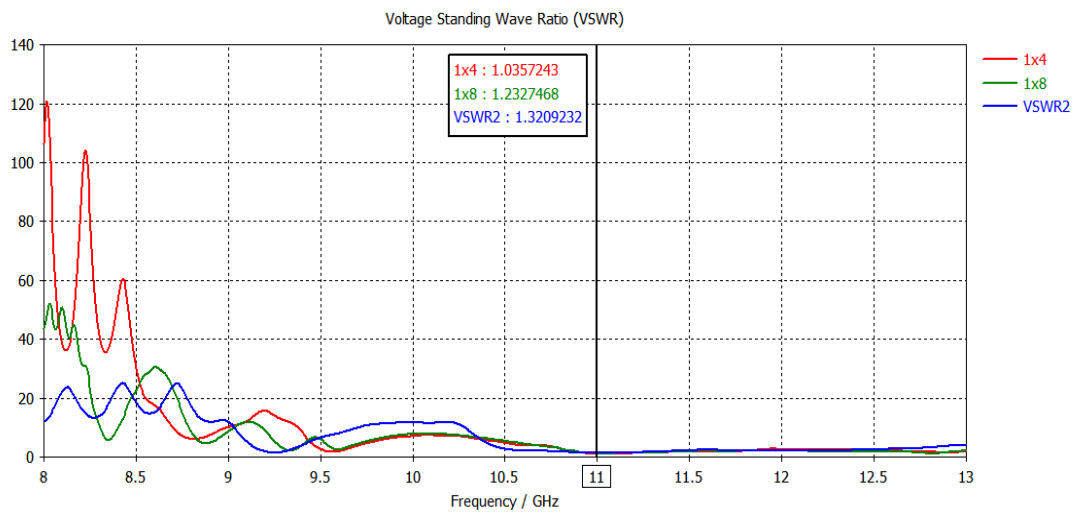


Figure III.10: VSWR de réseau de 2,4 et 8 éléments.

### III.6 Discussion des résultats

Comme le montre la (Figure III. 7), le coefficient de réflexion simulé de réseau à deux éléments est de -18.47dB, le réseau à quatre éléments est de -35.11dB et le réseau à huit éléments est de -19.63dB. La directivité et le gain de l'antenne sont étroitement liés l'un à l'autre, la directivité mesure les capacités directionnelles du rayonnement et le gain représente l'efficacité de l'antenne. Le gain de deux, quatre et huit éléments sont 9.49dB, 13.7dB, et 17,6dB. La directivité obtenue pour les éléments proposés est 10.4dB, 14.8dB et 18.6dB respectivement.

La valeur du VSWR est inférieure à 2 à une fréquence de fonctionnement de 11 GHz. Le VSWR de 1×2 éléments, 1×4 éléments et 1×8 éléments, est de 1,27, 1,03 et 1,23 respectivement, le tableau suivant montre la comparaison entre les différentes valeurs:

**Tableau III. 1:** Comparaison des résultats

Paramètre	Réseau 1×1	Réseau 1×2	Réseau 1×4	Réseau 1×8
S11 (dB)	-42.93	-18.47	-35.11	-19.63
VSWR	1.01	1.27	1.03	1.23
Directivité (dBi)	7.11	10.4	14.8	18.6
Gain (dB)	5.02	9.49	13.7	17.6
La Bande passante (GHz)	4.10%	5.8%	8.6%	6.1%

### III.7 Conclusion

Dans ce chapitre on a défini en générale le réseau d'antenne et ses caractéristiques pour avoir des bons résultats, ensuite on a parlé sur l'analyse et la structure de réseau d'antenne qu'on a travaillé avec (réseau linéaire), on a simulé une structure d'un réseau d'antenne de



deux, quatre et huit éléments pour améliorer les performances d'antenne (gain, directivité et la bande passante).

A la fin nous avons réussie à augmenter le gain, directivité et la bande passante de l'antenne en mettant en réseau cette dernière, et nous remarquons que plus le nombre d'éléments augmente plus nous obtenons de meilleurs résultats.

# Conclusion général

---

Les antennes miniatures sont le sujet de plusieurs études depuis maintenant de nombreuses années, en effet l'antenne est un élément indispensable de tout système de communication et sa miniaturisation est un défi pour la réduction de la taille global des objets communicant sans fils. Les techniques de miniaturisation ont reçus une attention considérable ces dernières années principalement en raison de leur capacité à rétrécir les dimensions physique de l'antenne sans que cela n'intervienne sur les performances de l'antenne.

L'objectif principal de ce travail était de simuler, et concevoir une antenne patch rectangulaire miniature. Dans un premier temps, nous avons donné des généralités sur les antennes imprimées en parlant de leurs caractéristiques, leurs techniques d'alimentations ainsi que les techniques d'adaptation, après nous avons détaillé les techniques de miniaturisations et on a réalisé une antenne patch rectangulaire de base, elle était adapté et alimenté par la ligne quart d'onde et miniaturisé avec l'ajoutant des fentes.

Notre antenne patch rectangulaire proposé possède une bonne qualité d'intégration en termes de dimension, de gain et de directivité.

Nous avons ensuite donné des généralités sur le réseau d'antenne et présenté par la suite les résultats de nos différentes simulations effectuées afin d'améliorer leurs performances en gain et rayonnement...

À la fin nous sommes arrivés à réaliser un réseau d'antenne patch rectangulaire à la fréquence de 11GHz, ensuite nous avons terminé avec une comparaison de performances entre l'antenne miniature et le réseau d'antenne dans laquelle on a remarqué que le fait de l'association de plusieurs éléments rayonnants va augmenter la valeur du gain, la bande passante et la directivité.

## Références bibliographiques:

---

- [1] : BAALOUJ Oualid, sujet : Etude de l'effet des matériaux du substrat sur les caractéristiques d'une antenne patch micro ruban, l'Université Larbi Tebessi-Tébessa / Faculté des Sciences Exactes et des Sciences de la Nature et de la Vie, Département : Science de la matière
- [2]: CHAIMA Amel, « Etude et conception d'une antenne reconfigurable pour les applications WLAN », Master en télécommunication, université Mohamed Boudiaf - M'SILA, 2017/2018.
- [3] :L. Djouane " Analyse rigoureuse d'une plaque microbande rectangulaire sur plan de masse avec ouverture rectangulaire par la méthode des moments et les dyades hybrides de Green "thèse de Magister, Institut d'électronique, Université de Batna, 2005.
- [4]:C. Hamid « Conception D'un Nouveau System D'antenne Réseau Conforme En Onde millimétrique» Maitrise En Ingénierie, Université De Québec A Chicoutimi. Mai 2012.
- [5]:M, Gujral, J.L.W, Li,T, Yuan, and CW.Qiu, "Bandwidth improvement of microstrip antenna array using dummy ebg pattern on feed line" national university Of singapoor, progressin electromagnetic research, Vol.127, pp.79-92, 2012.
- [6]: Md, Maruf Ahmed, Kishore Bhowmik, Md. Shahidulla, Md.Shihabul Islam, Md, Abdu Rahman "Rectangular microstrip patch antenna at 2Ghz on different Dielectric constant for pervasive wireless communication", International journal of electrical and computer engineering (IJECE) Vol.2, N°3, pp.417-424, June 2012.
- [7]:A. Boyer « Antennes, Support De Cours Enonce De Travaux Diriges» Institut National Des Sciences Appliqués De Toulouse.
- [8] : Support de cours Aline saidane<http://www.infcom.rnu.tn/content/pdf/cours/alinesaidane/chapitre1-generalies-sur-les-antennes-2dni.pdf>.
- [9] : ZEMAM Youssouf et FOUKIA Aimad Eddine, « Étude et Conception d'Antennes Reconfigurables par Association d'éléments actifs » MEMOIRE pour obtenir le diplôme de MASTER de l'université AboubakrBelkaïd– TLEMCEM – Juin 2017.
- [10] : AblaBehloul, « Contribution à l'étude des antennes microstrip supraconducteur de forme triangulaire » mémoire de magister en électronique de l'université Mentouri CONSTANTINE Avril 2010.

## Références bibliographiques:

---

[11] : CHAIMA Amel, « Étude et conception d'une antenne reconfigurable pour les applications WLAN actifs », MEMOIRE de MASTER, l'université MOHAMED BOUDIAF - M'SILA- 2010.

[12] : Mr IRANKUNDA Germain Mr UFITEYEZU Emmanuel, Sujet : Etude et Conception d'une antenne patch Rectangulaire pour les Réseaux Personnels Sans fils \_WPAN à 60 GHz. Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene.

[13] : Fouad Benamrane, « Conception d'une antenne patch microstrip », Université Sidi Mohamed Ben Abdellah (Fès) MAROC - Master télécoms hyperfréquence 2011.

[14] : Odile Picon et Coll : << Les Antennes Théorie, conception et application >>, Paris, 2009

[15] : A. Jamalipour, "Low earth orbital satellites for personal communication networks", Artech House, Boston. London, 1998.

[16] : L.J. Libois, "La genèse des télécommunications et les grandes mutations techniques", in Réalités industrielles (Annales des Mines), avril 1993.

[17] : M. Kermani, "Modélisation des vibrations dans la communication optique par les satellites lasers", Thèse de magister, Université de Constantine, 2001.

[18] : H. Hemmati, "Near-Earth Laser Communications", CRC Press Taylor & Francis Group, 2008.

[19] : ZEMAM Youssouf et FOUKIA Aimad Eddine, « Étude et Conception d'Antennes Reconfigurables par Association d'éléments actifs » MEMOIRE pour obtenir le diplôme de MASTER de l'université AboubakrBelkaïd– TLEMCEN – Juin 2017.

[20] : AbLaBehloul, « Contribution à l'étude des antennes microstrip supraconducteur de forme triangulaire » mémoire de magister en électronique de l'université Mentouri CONSTANTINE

Avril 2010.

[21]: I. J. Bahl and P. Bhartia, "Microstrip antennas, "Dedham, Ma: Artech House 1980.

## Références bibliographiques:

---

[22] : Doctorat de l'université Toulouse Délivré par : Institut National Polytechnique de Toulouse (INP Toulouse) spécialité : Electromagnétisme et Systèmes Haute Fréquence Présentée et soutenue par : M. JEREMY VALLEAU le jeudi 1 décembre 2016.

[23] : François Grange: "Matériaux composites pour antenne miniature intégrée", Thèse De Doctorat. Université de RENNES 1, le 23 novembre 2010.

[24]: A. Balanis: "Antennatheoryanalysis and design", Constantine. Arizona State, University Tempe, AZ.2005.

[25]: Doctorat de l'université de Toulouse présenté par MILUSINE Pigeon, intitulé : Étude et réalisation d'antennes ultra-compactes à base de métamatériaux Application à la réalisation d'une antenne GNSS miniature. nov. 2011.

[26] : A. Diallo « Systems Multi-Antennes Pour Diversités Et Mimo » Thèse De Doctorat De L'université De Nice-Sophia Antipolis.NOV 2007

[27] : Doctorat de l'université de Grenoble présenté par SARAH SUFYAR intitulé « contristions à l'étude d'antenne miniature reconfigurable en fréquence par association d'élément actifs » se tenu le 14 décembre 2011

[28] : François Grange: 'Matériaux composites pour antenne miniature intégrée', Thèse De Doctorat. Université de RENNES 1, le 23 novembre 2010

[29] : J. George, M. Deepukumar, C. Aanandan, P. Mohanan, and K. Nair, 'New compact microstripantenna', ElectronicsLetters, vol. 32, no. 6, pp. 508–509, Mar 1996.

[30] : J. George, C. Aanandan, P. Mohanan, and K. Nair,'Analysis of a new compact microstrip antenna', Antennas and Propagation, IEEE Transactions on, vol. 46, no. 11, pp. 1712–1717, Nov 1998.

[31] : K. Luk, R. Chair, and K. Lee, 'Small rectangular patch antenna', Electronics Letters, vol. 34,no. 25, pp. 2366–2367, Dec 1998.

[32] : Doctorat de l'université de Grenoble présenté par SARAH SUFYAR intitulé « contristions à l'étude d'antenne miniature reconfigurable en fréquence par association d'élément actifs » se tenu le 14 décembre 2011

[33] : Doctorat de l'université de RENNES 1 Mention : Electronique Ecole doctorale MATISSE présentée par Sabre DAKHLI préparée à l'unité de recherche UMR CNRS 6164

## Références bibliographiques:

---

Institut d'Electronique et de Télécommunications de Rennes Groupe Antennes et Hyperfréquences UFR Structures et Propriétés de la Matière et au Laboratoire Innov.Com, SUP.COM

[34] : John J. O'Connor et Edmund F. Robertson, « Niels Fabian Helge von Koch », dans MacTutor History of Mathematics archive, university de St Andrews [https://fr.wikipedia.org/wiki/Helge\\_von\\_Koch](https://fr.wikipedia.org/wiki/Helge_von_Koch) 31.

[35] : Y. Wang, W. Koh, J. Tan, P. Teo, P. Yeo, and C. Lee, “A compact and broadband microstrip patch antenna”, in Radio and Wireless Conference, RAWCON. IEEE, pp. 219–222, 2001

[36] : K.-L.Wong and K.-P. Yang, “Modified planar inverted f antenna”, Electronics Letters, vol. 34, no. 1, pp. 7–8, Jan 1998.

[37] : Amal Harrabi. Conception et réalisation d’une antenne plate pour la réception satellite. Sciences de l’ingénieur [physics]. UNIVERSITE DE NANTES/UNIVERSITE DE TUNIS EL MANAR, 2015.

[38]:blog Publié le 26 mai 2013 par f8asb <http://blog.f8asb.com/2013/05/26/experimentation-antenne-fractale/>

[39] :P. Ikonen, S. Maslovski, S.Tretyakov, “On Artificial Magneto-dielectric Substrates with Microstrip Antennas : The Role of Frequency Dispersion,” IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, pp. 390 – 393, 2006.

[40] :: S. Ohmori, H. Wakana and S. Kawase, “Mobile satellite communications”, Artech House, Boston. London, 1998.

[41]:Lee K.F., Luk K.M., Tong K.F., Shum S.M., Huynh T., and Lee R.Q. «Experimental and simulation studies of the coaxially fed u-slot rectangular patch antenna. Microwaves, Antennas and Propagation», IEE Proceedings, 144(5) :354–358, Oct 1997

[42]:Radhwane KEBBAB, «Conception d’antennes ultra large bande en technologie imprimée», Thèse de magister, Université de Abou BakrBelkaid-Tlemcen, 2010.

[43]:Amal HARRABI,«conception et réalisation d’une antenne plate pour la réception satellite», thèse de Doctorat, Université deManar, Tunis, sous le label de l’université Nantes Angers le Mans, 2015.

## Références bibliographiques:

---

- [44] :NajibFADLALLAH,«Contribution à l'optimisation de la synthèse du lobe de rayonnement pour une antenne intelligente. Application à la conception de réseaux à déphasage»,thèse de Doctorat, Université de limoges, 2005.
- [45] : HAMID C HORFI,"Conception D'un Nouveau Système D'antenne Réseau Conforme En Onde Millimétrique",Mai2012,Université Du Québec En Abitibi-Témiscamingue
- [46] ;Ozdemir, M. K, Arslan, H, Arvas, E, 'Mutual coupling effect in Multi-antennaWireless communication Systems' Dec 2003, IEEE GlobeCom.
- [47] : Leila CHOUTI, «Contribution à l'étude d'antennes imprimées rectangulaires double bande et multi bandes tenant compte de l'effet de couplage», Mémoire de magister, Université Mentouri-Constantine, 2009
- [48] :Dahele J. S & Lee K.F, "On the resonant frequencies of the triangular patch" Dahele J. S & Lee K.F, "On the resonant frequencies of the triangular patch antennas", IEEE-trans. Antenna and propagation, AP-35, pp.100-101, 1987.
- [49] :S. M. MoulaiKhathir, «Contribution à l'analyse des structures rayonnantes de formes particulières», mémoire de magister, université Abou-bakrBelkaid-Tlemcen, Mars 2006.
- [50] :Andrée FOUQUE. «Contribution à la conception d'un récepteur mobile faible cout et faible consommation dans la bande Ku pour le standard DVB-S», Thèse de Doctorat, Université de Bordeaux 1, 2012.
- [51] :C. A. Balanis, Antenna theory, John Wiley, 3rd Edition, 2005
- [52] :Mohammed MESSAOUDENE,«Modélisation par Modèle équivalent amélioré des antennes Périodiques et log-périodiques à base d'éléments rayonnants à encoche: Applications aux télécommunications Sans Fil», Thèse de doctorat soutenue à 'Université de Tlemcen, Avril 2016
- [53] :J. Huang, "Practical Design of Microstrip Arrays and Reflectarrays", IEEE International Antennas and Propagation Symposium and USNC/CNC/URSI North American Radio Science Meeting, 2003.