

وزارة البحث العلمي والتعليم العالي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



جامعة عبد الحميد بن باديس مستغانم

Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem

كلية العلوم والتكنولوجيا

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Génie Électrique



## MEMOIRE

Pour obtenir le diplôme de MASTER ACADEMIQUE

### MASTER EN TELECOMMUNICATIONS

Spécialité :

Systemes des télécommunications

Présenté par

**TRAORE Balla Moussa**

**TRAORE Rabia**

# INFLUENCE DES PARAMETRES GEOMETRIQUES SUR LES PERFORMANCES DE L'ANTENNE PATCH RECTANGULAIRE

Soutenu le 25/06/2023

devant le jury composé de :

Présidente :	Mme ABBAD Amel	Professeur	Université de Mostaganem
Examineur :	M. BENAOUALI Mohamed	MAA	Université de Mostaganem
Rapporteur :	Mme BENCHELLAL Amel	MCB	Université de Mostaganem

Année Universitaire 2022/2023

## *Remerciements*

Nous remercions ALLAH soubhanahou wa taala de nous avoir donné le courage et la volonté de terminer ce travail dans des meilleures conditions.

Nous ne pouvons, réellement trouver des expressions éloquentes que mérite notre encadrante **Mme BENCHELLAL**, afin de la remercier pour sa sympathie, son encouragement, son aide et sa disponibilité totale durant ce travail.

Nous remercions également **Mme ABBAD Amel** et Mr **BENAOUALI Mohamed** qui nous ont fait l'honneur de juger et d'examiner notre modeste travail.

Nos remerciements à tous les enseignants et responsables du département de génie électrique.

Un grand remerciement à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la concrétisation de ce modeste travail.

## *Dédicace*

*Je dédie ce travail :*

*A mes formidables parents **TRAORE Moussa** et  
**GUINDO Hawa** qu'aucun mot ne saurait exprimer ma  
gratitude pour leur soutien indéfectible.*

*A mon frère **TRAORE Mamadou dit Gaston**.*

*A mes sœurs **Mariam** et **Bintou TRAORE***

*A mes tantes et mes oncles.*

*A mes neveux et mes nièces.*

*A Toute ma famille*

*A mes amis*

BALLA MOUSSA

## ***Dédicace***

*Je dédie ce travail :*

*A la mémoire de ma chère mère **SIBY Lalla Aissé***

*Je ne saurais exprimer mon grand chagrin en ton absence*

*J'aurais aimé que tu sois à mes côtés ce jour.*

*A mon père **TRAORE Baba***

*Aucune dédicace ne saurait exprimer ma reconnaissance pour  
tous les sacrifices que tu as fait pour mon éducation.*

*J'implore Allah le tout puissant de t'accorder une longue vie  
en bonne santé.*

*A ma sœur **TRAORE Aïssiatou***

*A mon neveu **NIONO Baba Demba***

*A ma seconde mère **ABBAD Amel***

*A mon cousin **TRAORE Harouna***

*A toute la famille Siby*

*A mes amies*

**RABIA**

## ملخص

يتناول هذا العمل في المقام الأول تأثير الاعدادات الهندسية لهوائي "باتش" مستطيل الشكل على خصائصه و أدائه باستخدام برنامج أدس.

الاعدادات الخاصة بهذا الهوائي قد تم تعبئتها للعمل على التردد 10 جيجا هرتز.

في هذا المنظور بدأت المحاكاة بهوائي محسن في نطاق التردد المطلوب ثم تم التطرق لتغيير السماحية النسبية للعازل و كذا تغيير ارتفاعه. و بالأخير تغيير نمط التزويد الى التزويد بالجوار.

في ضوء هذه النتائج تم تصميم شبكة الهوائي لاحقا، لتشكيل شبكة 2 هوائي، ثم 4 هوائي ثم بالأخير 8 هوائي، تمّت المحاكاة لدعم قدرته على تحسين أداء الهوائي الأول

## *Abstract*

This work deals first with the influence of the geometrical parameters of the rectangular patch antenna on its performance, using ADS software. The parameters chosen were set for an antenna operating in the 10 GHz band.

With this in mind, the simulation began with a rectangular patch antenna, optimized at the 10 GHz resonant frequency. We tested the variation in the relative permittivity of the substrate and its height on antenna performance. Our study also included proximity feeding.

In the light of these results, an antenna array structure was subsequently designed, forming a multiple of the elementary antenna. The structure of 2, 4 and then 8 elements was simulated to support its ability to improve the performance of the elementary patch antenna.

Key words : Patch antenna, ADS, antenna array, Proximity feeding, 10GHz

## ***Résumé***

Ce travail traite en premier lieu l'influence des paramètres géométriques de l'antenne patch rectangulaire sur ses performances en utilisant le logiciel ADS. Les paramètres choisis ont été fixé pour une antenne opérant dans la bande des 10 GHz.

Dans cette optique, la simulation a commencé par une antenne patch rectangulaire, optimisée à la fréquence de résonance 10 GHz. On a testé la variation de la permittivité relative du substrat, sa hauteur sur les performances de l'antenne. Notre étude a porté aussi sur une alimentation par proximité.

A la lumière de ces résultats, une structure de réseau d'antenne est par la suite conçue, formant un multiple de l'antenne élémentaire, la structure de 2, 4 puis 8 éléments ont été simulé pour appuyer son aptitude à améliorer les performances de l'antenne patch élémentaire.

**Mots clés** :Antenne patch, ADS, réseau d'antenne, Alimentation par proximité, 10GH

# *Table des matières*

Remerciements .....	i
Dédicace.....	ii
<i>ملخص</i> .....	v
Abstract .....	v
Résumé .....	vi
Table des matières .....	vii
Listes des figures .....	x
Listes des tableaux.....	xii
Introduction générale .....	1
Chapitre I. Généralités sur les antennes imprimées .....	2
I.1. Introduction .....	2
I.2. Description des antennes imprimées.....	2
I.2.1. L'élément rayonnant .....	3
I.2.2. Le substrat .....	3
I.2.2.1. Les types de substrats.....	4
I.2.2.2. Les critères de choix du substrat.....	5
I.2.3. Le plan de masse.....	5
I.3. Les techniques d'alimentation de l'élément rayonnant.....	5
I.3.1. Alimentation avec contact .....	6
I.3.1.1. Alimentation par câble coaxial (sonde).....	6
I.3.1.2. Alimentation par la ligne micro-ruban .....	7
I.3.2. Alimentation sans contact (par proximité) .....	7
I.3.2.1. Alimentation couplée par ouverture.....	7
I.3.2.2. Alimentation par couplage de proximité .....	8
I.3.3. Comparaison entre les différentes techniques d'alimentation .....	9
I.4. Les techniques d'adaptation des antennes imprimées .....	10
I.4.1. Adaptation par ligne quart d'onde .....	10
I.4.2. Adaptation avec encoche .....	10
I.5. Les caractéristiques des antennes .....	11

I.5.1.	Le coefficient de réflexion $S_{11}$ (Adaptation).....	11
I.5.2.	La bande passante .....	12
I.5.3.	La polarisation .....	13
I.5.3.1.	Polarisation linéaire.....	13
I.5.3.2.	Polarisation circulaire.....	13
I.5.3.3.	Polarisation elliptique.....	13
I.5.4.	Le diagramme de rayonnement.....	14
I.5.5.	La directivité, le gain et le rendement d'une antenne .....	15
I.5.5.1.	La directivité.....	16
I.5.5.2.	Le gain.....	16
I.5.5.3.	Le rendement .....	16
I.6.	Les avantages et limites des antennes imprimées.....	17
I.6.1.	Les avantages des antennes patch.....	17
I.6.2.	Les limites des antennes patch.....	17
I.7.	Les domaines d'applications des antennes imprimées.....	18
I.8.	Conclusion.....	18
Chapitre II. Conception d'une antenne patch rectangulaire pour les applications 10GHz ..		19
II.1.	Introduction .....	19
II.2.	Description du logiciel ADS .....	19
II.3.	Cahier des charges .....	20
II.3.1.	Calcul des paramètres géométriques de l'antenne .....	21
II.3.1.1.	La structure de l'antenne patch.....	23
II.3.2.	Simulation et optimisation.....	24
II.3.2.1.	Adaptation par encoche .....	26
II.3.2.2.	Adaptation par ligne quart d'onde.....	28
II.3.2.3.	Comparaison des résultats .....	32
II.3.3.	Influence de la permittivité du substrat sur les performances de l'antenne .....	33
II.3.4.	Influence de l'épaisseur du substrat sur les performances de l'antenne .....	37
II.3.5.	Effet du changement du type d'alimentation sur les performances de l'antenne : Alimentation par proximité.....	39
II.4.	Conclusion.....	41
Chapitre III. Le réseau d'antenne imprimé.....		43
III.1.	Introduction .....	43
III.2.	Technique d'alimentation d'un réseau d'antenne imprimée .....	43

III.2.1. Alimentation en série .....	43
III.2.2. Alimentation en parallèle .....	44
III.2.2.1. Diviseur de Wilkinson.....	44
III.2.2.2. La transformée en quart d'onde .....	45
III.3. Domaines d'applications des réseaux d'antennes.....	46
III.4. Simulation et discussions des résultats .....	46
III.4.1. Réseau d'antennes à 2 éléments.....	46
III.4.2. Réseau d'antennes à 4 éléments.....	49
III.4.3. Réseau d'antennes à 8 éléments.....	51
III.5. Conclusion.....	53
Conclusion générale .....	54
Références bibliographiques .....	56

## *Listes des figures*

Figure I- 1 : Le schéma d'une antenne imprimée rectangulaire .....	2
Figure I- 2 : Les différentes formes géométriques d'une antenne patch.....	3
Figure I- 3 : Une antenne patch alimentée par sonde coaxial .....	6
Figure I- 4 : Une antenne patch alimentée par micro-ruban .....	7
Figure I- 5 : Une antenne patch alimentée par fente .....	8
Figure I- 6 : Une antenne patch alimentée par proximité .....	9
Figure I- 7 : Adaptation par ligne quart d'onde .....	10
Figure I- 8 : Adaptation par encoche .....	11
Figure I- 9 : Bande passante et coefficient de réflexion .....	12
Figure I- 10 : Les différents types de polarisation .....	14
Figure I- 11 : Les différents types de représentations d'un diagramme de rayonnement .....	15
Figure I- 12 : Diagramme de rayonnement.....	15
Figure I- 13 : Schéma de la conversion de l'énergie dans une antenne .....	16
Figure II- 1 : Logo du logiciel ADS .....	20
Figure II- 2 : Structure d'une antenne imprimée avec ses dimensions .....	21
Figure II- 4 : Calcul des dimensions du patch sur emtalk .....	24
Figure II- 5 : Schématique de simulation de l'antenne patch sans adaptation.....	24
Figure II- 6 : Layout de l'antenne patch sans adaptation .....	25
Figure II- 7 : S11 (dB) sans Adaptation.....	25
Figure II- 8 : Antenne patch rectangulaire avec adaptation par encoche .....	26
Figure II- 9 : Schématique de l'antenne adaptée par encoche .....	27
Figure II- 10 : Layout de l'adaptation par encoche .....	27
Figure II- 11 : S11(dB) de l'antenne adaptée par encoche .....	28
Figure II- 12 : Adaptation par ligne quart d'onde.....	28
Figure II- 13 : Schématique de l'adaptation par ligne quart d'onde .....	30
Figure II- 14 : Layout de l'adaptation par ligne quart d'onde .....	30
Figure II- 15 : Coefficient de réflexion S11(dB) de l'antenne adaptée par ligne quart d'onde	31
Figure II- 16 : Schématique de l'adaptation par ligne quart d'onde centré à la fréquence de résonance.....	31
Figure II- 17 : S11(dB) de l'adaptation par ligne quart d'onde centré à la fréquence de résonance.....	32
Figure II- 18 : (a) performance de l'antenne sans adaptation.....	32

(b) performance de l'antenne adaptée par encoche .....	32
(c) performance de l'antenne adaptée par ligne quart d'onde.....	32
Figure II- 19 : Coefficient de réflexion pour $\epsilon_r = 2$ .....	34
Figure II- 20 : Coefficient de réflexion pour $\epsilon_r = 3$ .....	34
Figure II- 21 : Coefficient de réflexion pour $\epsilon_r = 4.6$ .....	35
Figure II- 22 : (a) performance de l'antenne avec $\epsilon_r = 2$ .....	35
(b) performance de l'antenne avec $\epsilon_r = 3$ .....	35
(c) performance de l'antenne avec $\epsilon_r = 4.6$ .....	35
Figure II- 23 : Coefficient de réflexion pour $h = 0.2 \text{ mm}$ .....	37
Figure II- 24 : Coefficient de réflexion pour $h = 1.5 \text{ mm}$ .....	38
Figure II- 25 : Coefficient de réflexion pour $h = 2 \text{ mm}$ .....	38
Figure II- 26 : Layout d'une antenne alimentée par proximité en 2D et 3D .....	39
Figure II- 27 : S11 (dB) de l'antenne alimentée par proximité à 10 GHz.....	41
Figure III- 1 : Alimentation en série .....	44
Figure III- 2 : Alimentation en parallèle.....	44
Figure III- 3 : Un réseau d'antenne diviseur avec Wilkinson .....	45
Figure III- 4 : Transformée en quart d'onde.....	45
Figure III- 5 : Un réseau d'antenne avec la transformée en quart d'onde.....	46
Figure III- 6 : Schématique d'un réseau d'antenne à 2 éléments .....	47
Figure III- 7 : Layout pour un réseau d'antenne à 2 éléments .....	47
Figure III- 8 : S11(dB) pour un réseau d'antenne à 2 éléments.....	48
Figure III- 9 : (a) Diagramme de rayonnement en 2D d'un réseau d'antenne à 2 éléments	
(b) Paramètre d'un réseau d'antenne à 2 éléments.....	48
Figure III- 10 : Schématique d'un réseau d'antenne à 4 éléments .....	49
Figure III- 11 : Layout pour une antenne à 4 éléments .....	49
Figure III- 12 : Coefficient de réflexion pour un réseau d'antenne à 4 éléments .....	50
Figure III- 13 : (a) Diagramme de rayonnement en 2D d'un réseau d'antenne à 4 éléments	
(b) Paramètre d'un réseau d'antenne à 4 éléments.....	50
Figure III- 14 : Schématique d'un réseau d'antenne à 8 éléments (voir annexe).....	51
Figure III- 15 : Layout pour une antenne à 8 éléments .....	51
Figure III- 16 : Coefficient de réflexion pour un réseau d'antenne à 4 éléments .....	52
Figure III- 17 : (a) Diagramme de rayonnement en 2D d'un réseau d'antenne à 8 éléments	
(b) Paramètre d'un réseau d'antenne à 8 éléments.....	52

## *Listes des tableaux*

Tableau I- 1 : Les substrats soft .....	4
Tableau I- 2 : Les substrats hard .....	5
Tableau I- 3 : Comparaison entre les différentes techniques d'alimentation .....	9
Tableau II- 1 : Les équations de calcul des dimensions de l'antenne patch rectangulaire .....	22
Tableau II- 2 : Dimensions de l'antenne patch rectangulaire .....	23
Tableau II- 3 : Dimension de la ligne d'encoche .....	26
Tableau II- 4 : Résultats des dimensions de la ligne d'encoche .....	26
Tableau II- 5 : Les dimensions de la ligne quart d'onde .....	29
Tableau II- 6 : Dimensions de la ligne quart d'onde .....	29
Tableau II- 7 : Comparaison des résultats .....	33
Tableau II- 8 : Influence de la permittivité sur les performances de l'antenne .....	36
Tableau II- 9 : Les fréquences obtenues avant optimisation.....	36
Tableau II- 10 : Influence de la hauteur du substrat sur les performance de l'antenne .....	38
Tableau II- 11 : Les fréquences obtenues avant optimisation.....	39
Tableau II- 12 : Variation de la profondeur de la ligne .....	40
Tableau II- 13 : Variation de la longueur du patch .....	40
Tableau II- 14 : Comparaison entre deux types d'alimentations .....	41
Tableau-III 1 : Résultats des différents structures de l'antenne .....	53

# **Introduction générale**

## Introduction générale

Le rôle d'une antenne est de convertir l'énergie électrique d'un signal en énergie électromagnétique transportée par une onde électromagnétique (ou inversement).

Apparu dans les années 1950, mais le véritable développement ne s'est fait que dans les années 1970. Les antennes patch étaient utilisées spécialement pour les applications militaires. Ces dernières années avec le développement rapide de la technologie et le changement de communication filaire en communication non filaire les antennes imprimées ont connu un grand succès en raison de leur faible coût, de leur taille compacte et de leur capacité de concentrer le signal dans une direction précise. Ce type d'antenne est utilisé dans les applications de communications sans fil, tels que la téléphonie mobile, les systèmes multimédias sans fil (WIFI, Bluetooth), et les communications spatiales. L'antenne patch est un composant clé pour une variété de communication sans fil.

Le travail présent dans ce manuscrit a pour objectif l'étude de l'influence de la géométrie de l'antenne patch sur ses performances à l'aide de logiciel de simulation ADS, plus loin cette structure est utilisée pour former un réseau d'antennes, largement déployés pour des applications à 10GHz.

Pour atteindre cet objectif notre travail est organisé en trois chapitres :

- Le premier chapitre est consacré à une présentation générale des antennes imprimées, ainsi que ses caractéristiques, les différentes techniques d'alimentations, les avantages et les limites des antennes patchs et les domaines d'applications.
- Dans le deuxième chapitre nous nous fixons comme but d'implémenter sous le logiciel ADS une antenne imprimée de forme rectangulaire optimisée à la fréquence 10 GHz pour ensuite étudier l'influence de la permittivité, de la variation de la hauteur du substrat et du changement de la technique d'alimentation sur ses performances.
- Le dernier consiste à former un réseau d'antennes dans l'objectif d'améliorer les performances liées à l'antenne élémentaire : le gain et la directivité puis comparés les résultats obtenus.

# **Chapitre I. Généralités sur les antennes imprimées**

## I.1. Introduction

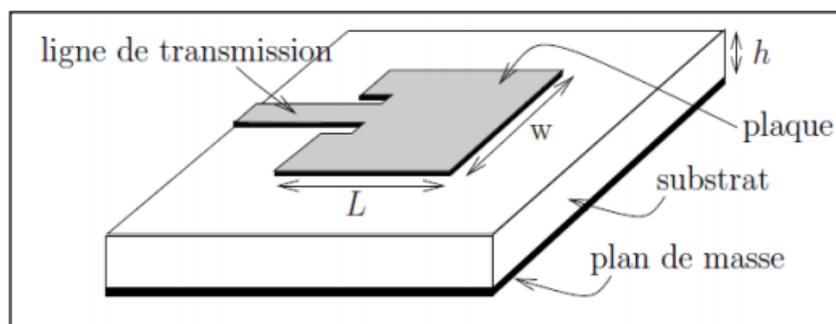
Le domaine des télécommunications est en perpétuelle évolution. La communication sans fil devient de plus en plus utilisée sur la liaison de nombreux systèmes et appareils informatiques. Cette course à l'innovation concernant les systèmes de communication nécessite des dispositifs bien adaptés aux technologies existantes. Assurant l'interface entre les systèmes communicants, les antennes sont les éléments indispensables dans la transmission des informations dans les communications sans fil car elles assurent les opérations d'émissions ou de réceptions des ondes électromagnétiques dans l'atmosphère terrestre ou dans l'espace. [1]

Il existe plusieurs sortes d'antennes, cependant, leur intégration dans les dispositifs électroniques et informatiques occupe une place importante. C'est à partir de cela que l'antenne patch tire son avantage. Elle est caractérisée par sa petite taille, son coût faible, sa simplicité de fabrication et sa possibilité de se mettre en réseaux. [2]

Dans ce chapitre nous allons donner une présentation générale des antennes imprimées ainsi que leurs caractéristiques, les différentes techniques d'alimentation, en terminant par leurs avantages et limites.

## I.2. Description des antennes imprimées

Dans sa conception géométrique usuelle, une antenne imprimée est constituée d'une plaque métallique de forme quelconque appelé l'élément rayonnant déposé sur un substrat diélectrique caractérisé par sa permittivité relative  $\epsilon_r$  et un plan de masse qui couvre la partie inférieure du substrat comme montré dans la **figure I-1** [3].



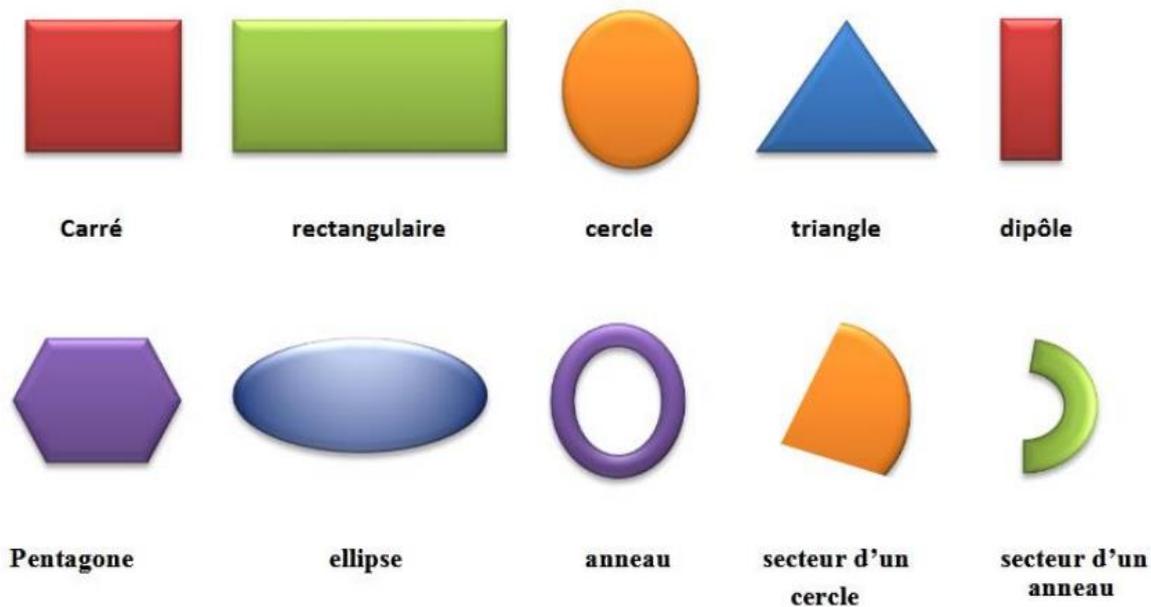
**Figure I- 1** : Le schéma d'une antenne imprimée rectangulaire

Les paramètres physiques et géométriques liés à cette structure sont :

- Les dimensions de l'élément rayonnant ( $L, W$ ) ;
- L'épaisseur  $h$  du diélectrique (elle doit être inférieure par rapport à la longueur d'onde à transmettre) ;
- La tangente des pertes ( $\tan \delta$ ) dans ce même substrat, avec dominance des pertes par effet joule ;
- La permittivité relative du substrat ( $\epsilon_r$ ) ; [4]

### I.2.1. L'élément rayonnant

L'élément rayonnant ou le patch est généralement fabriqué à base des matériaux conducteurs tel que le cuivre, l'argent ou l'or. La forme de ce dernier peut être variée, et son choix dépendra du type d'application désirée et des paramètres qu'on cherche à optimiser (bande passante, la puissance rayonnée, le gain...) [5].



**Figure I- 2** : Les différentes formes géométriques d'une antenne patch

Parmi toutes ces formes citées dans la **figure I-2** la forme rectangulaire est la plus simple à appréhender pour la compréhension du mécanisme de rayonnement des antennes imprimées.

### I.2.2. Le substrat

Situé entre l'élément rayonnant et le plan de masse joue sur le comportement et les performances électromagnétique de l'antenne. Composé d'un matériau isolant, le substrat

diélectrique est utilisé pour augmenter la puissance rayonnée par l'antenne, et réduire les pertes par l'effet joule et amélioré la bande passante de l'antenne.

Pour avoir une bonne bande passante il est conseillé d'utiliser des substrats de grande épaisseur et de basse permittivité mais ceci augmente les surfaces d'ondes. Pour minimiser ces surfaces d'ondes et les radiations non désirées pour les circuits micro-ondes mieux vaut utiliser des minces substrats et de permittivités élevées. [2]

Les matériaux utilisés sont :

- Les matériaux céramiques ;
- Les matériaux semi-conducteurs ;
- Les matériaux ferromagnétiques ;
- Les matériaux synthétiques...

### I.2.2.1. Les types de substrats

Il existe deux types de substrats qui sont le substrat soft et le substrat hard :

- Les substrats softs sont les plus flexibles, moins chers et peuvent être facilement confectionner mais ils possèdent de grands coefficients d'expansions thermales. [5]

Ce tableau présente quelques exemples des substrats softs :

**Tableau I- 1 : Les substrats soft**

<b>Substrat</b>	<b>Constante diélectrique relative (<math>\epsilon_r</math>)</b>	<b>Constante diélectrique effective(<math>\epsilon_{eff}</math>)</b>	<b>Pertes diélectrique <math>\tan \delta</math></b>
<b>RT-Duroid-5880</b>	2.2	2.1144	0.0009
<b>RT-Duroid-5870</b>	2.33	2.2352	0.0011
<b>Neltec NX 9240</b>	2.4	2.3002	0.0010
<b>Arlon Diclاد 522</b>	2.5	2.3931	0.0010
<b>Benzocyclobu-Ten</b>	2.6	2.4859	0.0010

Les substrats hard par contre sont les plus fiable et possèdent de petits coefficient d'expansions thermales mais sont plus chers et moins flexibles. [5]

Ce tableau présente aussi quelques exemples des substrats hard :

**Tableau I- 2 : Les substrats hard**

<b>Substrat</b>	<b>La constante diélectrique relative (<math>\epsilon_r</math>)</b>
<b>Quartz</b>	3.78
<b>Saphir</b>	11.7
<b>GaAs</b>	12.3

### **I.2.2.2. Les critères de choix du substrat**

Les caractéristiques du substrat influencent sur le comportement de l'antenne. On choisit en général un diélectrique de faible hauteur vis-à-vis de la longueur d'onde  $\lambda$  utilisée, la permittivité doit être faible ( $\epsilon_r \leq 3$ ) de façon à permettre à l'antenne de rayonner en évitant le confinement des champs dans la cavité comprise entre le patch et le plan de masse. [4]

Le substrat est caractérisé par la permittivité  $\epsilon_r$ , sa hauteur  $h$  et son facteur de perte  $\delta$ , il doit répondre à certains exigences :

- La conservation de sa forme originale ;
- Possibilité d'excitation par onde de surface ;
- La stabilité en température (pour la soudure) et aux conditions atmosphériques ;
- De faibles pertes diélectrique ( $\tan(\delta) \leq 3 \cdot 10^{-3}$ ) pour une meilleure efficacité ;
- Une résistance aux produits chimiques (pour la phase de photolithographie) ;
- Une faible rugosité ;
- Une facilité d'usinage ; [6]

### **I.2.3. Le plan de masse**

Le plan de masse est une surface conductrice (cuivre) recouvrant la partie inférieure du substrat. Elle permet de faire rayonner la partie supérieure [7].

## **I.3. Les techniques d'alimentation de l'élément rayonnant**

L'alimentation de l'antenne dépend de la manière dont elle est intégrée dans le dispositif [8].

Les antennes patch peuvent être alimentées par plusieurs techniques qui peuvent être classifiées en deux catégories qui sont : alimentation avec contact et alimentation sans contact [9].

### I.3.1. Alimentation avec contact

Dans les méthodes d'excitation avec contact, la plaque rayonnante est directement alimentée en utilisant un élément de connexion tel que le câble coaxial ou la ligne micro-ruban.

#### I.3.1.1. Alimentation par câble coaxial (sonde)

L'alimentation coaxial ou l'alimentation par sonde est une technique très connue utilisée pour alimenter les antennes imprimées. Le conducteur interne du connecteur coaxial traverse le diélectrique et est soudé au patch alors que le conducteur externe est relié au plan de masse. Cette alimentation est généralement utilisée pour les patches de formes circulaires et annulaire.

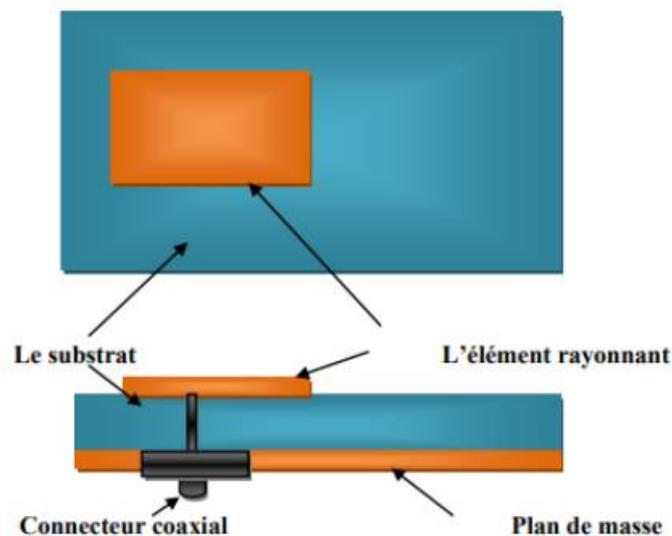
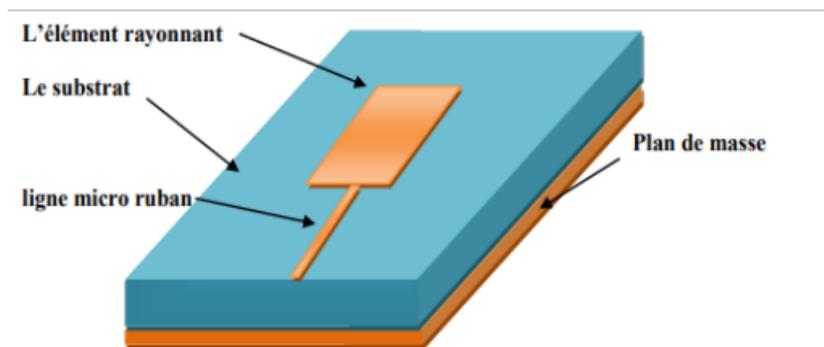


Figure I- 3 : Une antenne patch alimentée par sonde coaxial

L'avantage principal de ce type d'alimentation est qu'elle peut être placée à n'importe quel endroit désiré de la plaque afin d'assurer l'adaptation d'impédance. Cette technique d'alimentation est facile à fabriquer et a un rayonnement parasite faible. Cependant, son principal inconvénient est qu'elle fournit une bande passante étroite et elle est difficile à modéliser car un trou doit être foré dans le substrat et le connecteur sort en dehors du plan de masse [10] [1].

### I.3.1.2. Alimentation par la ligne micro-ruban

Dans ce type d'alimentation la ligne micro ruban est directement connectée à la plaque rayonnante



**Figure I- 4 :** Une antenne patch alimentée par micro-ruban

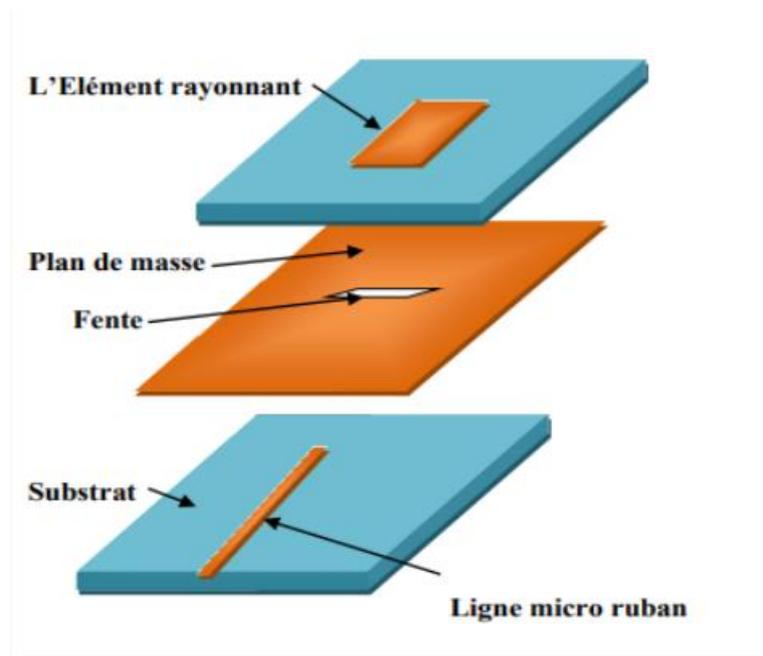
L'avantage d'une telle technique est la facilité de fabrication, le prix abordable et simple à s'adapter à la résonance. Cependant son inconvénient est principal est le rayonnement parasite assez fort, ce qui les rend utilisable uniquement dans les applications qui n'exigent pas performances élevées. Pour l'adaptation on doit agir sur la dimension et la position de la ligne d'alimentation [10] [11].

### I.3.2. Alimentation sans contact (par proximité)

Dans les techniques sans contact, le couplage de champ électromagnétique garantit le transfert de la puissance entre la ligne micro-ruban et le patch rayonnant. Les techniques d'alimentations citées ci-dessus souffrent de plusieurs inconvénients que ces alimentations sans contact résolvent ces problèmes [10].

#### I.3.2.1. Alimentation couplée par ouverture

Dans ce type d'alimentation, l'élément rayonnant et la ligne micro-ruban sont séparées par le plan de masse comme représente dans la figure. Le couplage entre le patch et la ligne d'alimentation est assurée par une fente ou une ouverture dans le plan de masse.



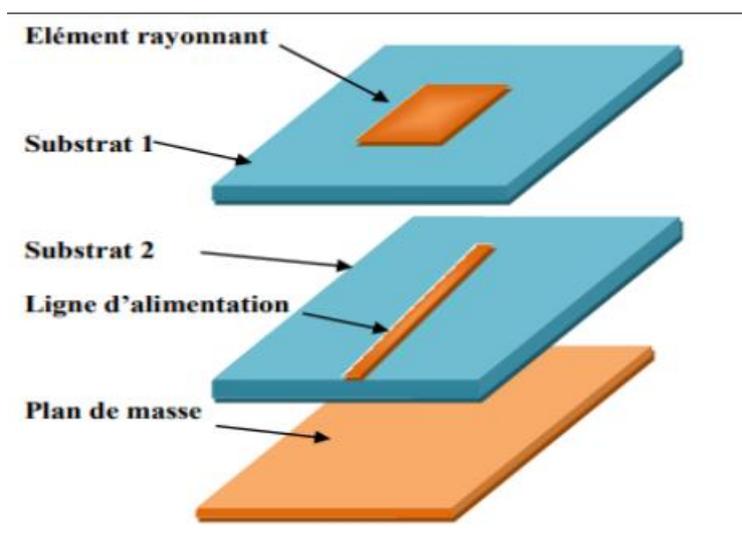
**Figure I- 5** : Une antenne patch alimentée par fente

L'ouverture du couplage est généralement centrée sous le patch. La quantité de couplage à partir de la ligne d'alimentation au patch peut être déterminée à partir de la forme, la taille, et la position de l'ouverture. Dans ce type d'alimentation, le rayonnement parasite est minimisé car la ligne d'alimentation et le patch sont séparés par le plan de masse. D'une façon générale, un matériau ayant une constante diélectrique élevée est utilisée pour le substrat inférieur, tandis qu'un matériau épais et qui a une constante diélectrique faible est utilisée pour le substrat supérieur afin de pouvoir optimiser le rayonnement du patch.

L'inconvénient majeur de cette technique est qu'elle est difficile à fabriquer en raison des multiples couches, qui augmentent aussi l'épaisseur de l'antenne. Cette méthode fournit aussi une bande passante étroite. Pour aboutir à l'adaptation d'impédance, on doit contrôler la taille de la fente ou la taille de la ligne d'alimentation ou les deux en même temps. [10] [11]

### **I.3.2.2. Alimentation par couplage de proximité**

Connue également sous le nom de couplage électromagnétique. Deux substrats sont employés de façon que la ligne d'alimentation soit insérée entre les deux et que le patch soit sur le substrat supérieur comme sur la **figure I-6**



**Figure I- 6 :** Une antenne patch alimentée par proximité

L'avantage principal de cette technique est qu'elle élimine le rayonnement de parasite due à l'alimentation et fournit une bande passante très large (au-delà de 13%) en raison de l'augmentation globale de l'épaisseur de l'antenne. Avec cette méthode, nous pouvons aussi optimiser les performances de l'antenne en choisissant entre les milieux diélectriques différents. Parmi ces inconvénients c'est la complexité de conception à cause des deux couches diélectriques nécessitant un alignement approprié. L'adaptation peut être réalisée en contrôlant la longueur de la ligne d'alimentation.

### I.3.3. Comparaison entre les différentes techniques d'alimentation

**Tableau I- 3 :** Comparaison entre les différentes techniques d'alimentation

Caractéristiques	Alimentation par câble coaxial(sonde)	Alimentation par ligne micro ruban	Alimentation par ouverture de fente	Alimentation couplée par proximité
<b>Rayonnement Parasite de l'alimentation</b>	Plus	Plus	Moins	minimum
<b>Fiabilité</b>	Meilleure	Moins au cause de la soudure	Bon	Bon
<b>Facilité de fabrication</b>	Facile	Soudure et ouverture	Alignement requis	Alignement requis
<b>Adaptation d'impédance</b>	Facile	Facile	Facile	Facile
<b>Bande passante</b>	2-5%	2- 5%	2- 5%	13 %

## I.4. Les techniques d'adaptation des antennes imprimées

L'adaptation d'impédance est une opération très importante dans l'alimentation d'une antenne quel que soit la technique utilisée, car c'est elle qui garantit que la plupart de la puissance est transférée de l'alimentation vers le patch [12].

Plusieurs méthodes sont utilisées pour adapter la ligne d'alimentation à l'entrée d'une antenne patch, chacune d'elle a son impact sur la performance de l'antenne. Les techniques d'adaptation dépendent aussi de la technique d'alimentation choisie:

### I.4.1. Adaptation par ligne quart d'onde

Une ligne quart d'onde peut servir de transformateur d'impédance, pour l'adaptation entre la ligne d'alimentation et une antenne. Elle consiste à mettre une ligne  $\lambda/4$  entre la ligne d'alimentation et l'antenne patch.

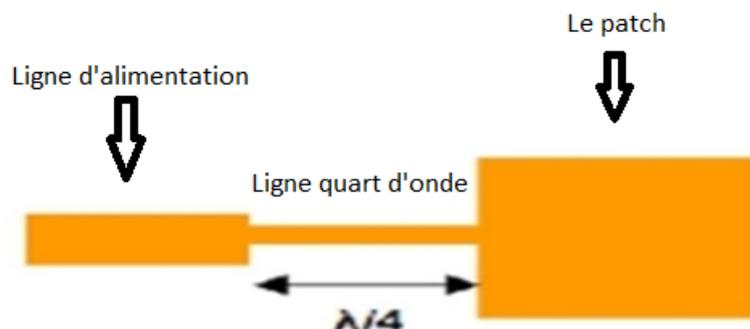


Figure I- 7 : Adaptation par ligne quart d'onde

### I.4.2. Adaptation avec encoche

L'adaptation par encoche consiste à faire une encoche dans le patch en insérant la ligne d'alimentation d'une impédance caractéristique de 50 ohms à une profondeur ou l'impédance d'antenne est égale à 50ohms [13].

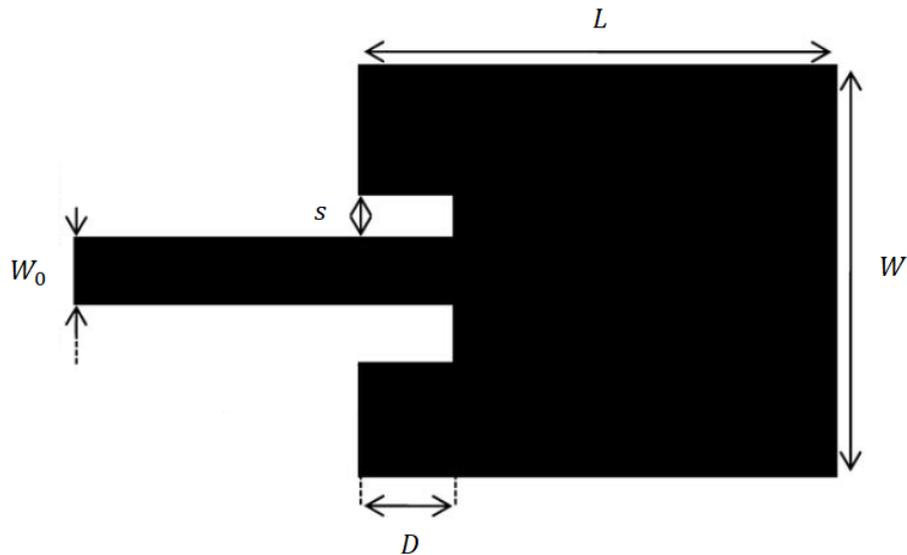


Figure I- 8 : Adaptation par encoche

## I.5. Les caractéristiques des antennes

Un grand nombre de paramètres permettent de classer les antennes. La performance d'une antenne peut être évaluée à partir de ces paramètres qui sont présentés ci-dessous :

### I.5.1. Le coefficient de réflexion $S_{11}$ (Adaptation)

Lorsqu'une onde change de milieu de propagation ou rencontre une nouvelle interface, une partie de cette onde incidente est réfléchiée et l'autre partie est transmise au nouveau milieu. Le coefficient de réflexion  $\Gamma$  et le coefficient de transmission  $T$  correspondent à ces deux milieux respectivement. Le coefficient de réflexion d'une antenne se définit comme étant le rapport des amplitudes des ondes incidentes sur les ondes réfléchiées.

Pour une antenne d'impédance  $Z_A$ , reliée à la source par une ligne d'impédance caractéristique  $Z_0$  (souvent égale à  $50 \Omega$ ) le coefficient de réflexion peut être défini comme suit :

$$\Gamma = S_{11} = \frac{Z_A - Z_0}{Z_A + Z_0} \quad (\text{I.1})$$

$Z_0$  = L'impédance caractéristique de la ligne de propagation ;

$Z_A$  = L'impédance d'entrée de l'antenne ;

Plus généralement il est exprimé en décibel (dB) et est noté

$$S_{11}(\text{dB}) = 20 \log(S_{11}) \quad (\text{I.2})$$

Pour maximiser la puissance de transmission entre les différents éléments d'un circuit, il faut que le coefficient de réflexion soit le plus faible possible. Il permet de connaître la qualité de l'adaptation. Une bonne adaptation est obtenue lorsqu'il est inférieur à -10 dB.

$$S_{11}(\text{dB}) < -10\text{dB} \quad (\text{I.3})$$

Parfois l'adaptation est souvent caractérisée par le rapport d'onde stationnaire (ROS) ou Voltage Standing Wave (VSWR) [14] [2].

### I.5.2. La bande passante

Ce paramètre correspond à la gamme de fréquence où le transfert d'énergie est maximal. La bande passante peut être définie en fonction du coefficient de réflexion, à condition que le diagramme de rayonnement ne change pas dans cette bande. Généralement elle est prise où le coefficient de réflexion est égale à -10 dB, c'est-à-dire la ou 90 % de la puissance fournie par l'antenne est transformée et le reste est réfléchi. [14]

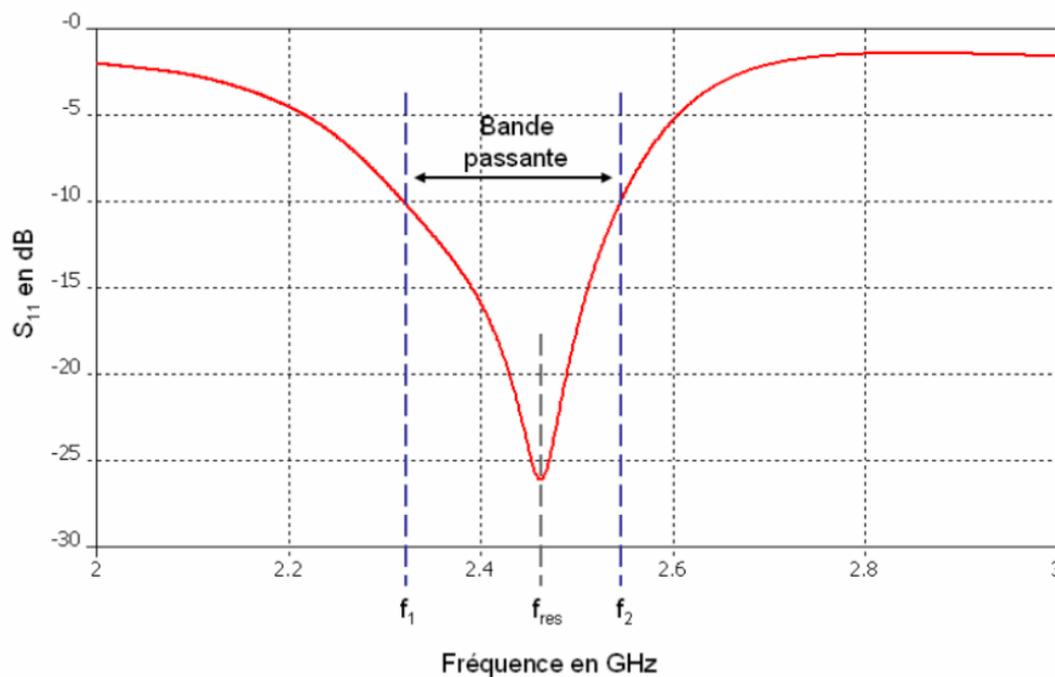


Figure I- 9 : Bande passante et coefficient de réflexion

$$|BP| = f_2 - f_1 \quad (\text{I.5})$$

Ce paramètre est aussi évalué en pourcentage du rapport de la bande passante relative sur la fréquence centrale  $f_0$

$$BP = \frac{|BP|}{f_0} * 100 \quad (1.6)$$

### **I.5.3. La polarisation**

Une antenne rayonne une onde qui, présente localement les propriétés d'une onde plane en champ lointain. Par convention la polarisation d'une antenne est déterminée par la trajectoire que décrit le champ E de l'onde qu'elle reçoit ou émet de façon privilégié. Ce paramètre permet de réutiliser la même fréquence en utilisant la diversité en polarisation. Il existe trois types de polarisation du champ électromagnétique : Polarisation linéaire polarisation circulaire et polarisation elliptique. [11] [15].

#### **I.5.3.1. Polarisation linéaire**

La polarisation est linéaire si le vecteur champ électrique de l'onde rayonnée par l'antenne est toujours dans la même direction en fonction du temps.

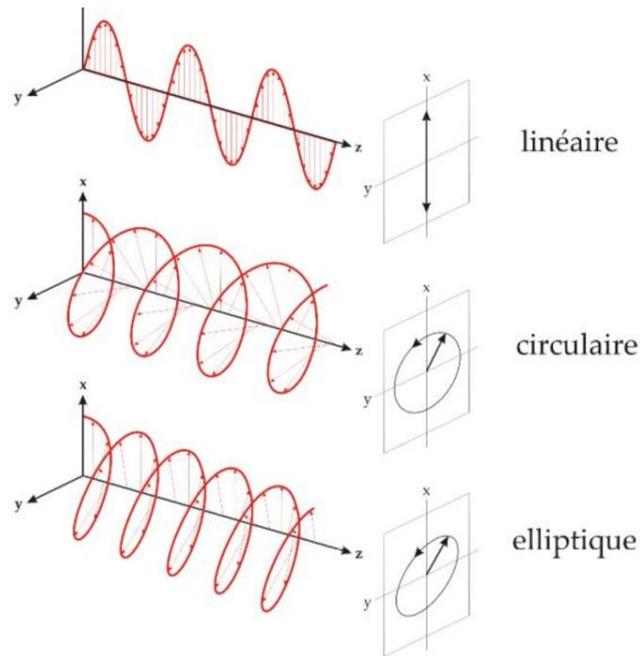
Cette polarisation est dite horizontale si la direction du champ électrique est horizontale par rapport au sol et elle est verticale si E est perpendiculaire au sol [16].

#### **I.5.3.2. Polarisation circulaire**

Dans la polarisation circulaire, le champ électrique fait une rotation horaire ou antihoraire de 360° à chaque émission de l'onde radioélectrique. Dans ce cas le déphasage entre le champ électrique et le champ magnétique est de 90° et les deux composantes ont la même amplitude.

#### **I.5.3.3. Polarisation elliptique**

C'est comme la polarisation circulaire mais le déphasage entre les deux champs n'est pas 90° et n'ont pas la même amplitude.



**Figure I- 10** : Les différents types de polarisation

#### **I.5.4. Le diagramme de rayonnement**

Les antennes sont rarement omnidirectionnelles c'est à dire rayonnent de manière égale dans toutes les directions, émettent et reçoivent dans les directions privilégiées. Le diagramme de rayonnement d'une antenne représente la variation de la puissance rayonnée par l'antenne dans les différentes directions de l'espace. Il indique les directions de l'espace dans lesquelles la puissance rayonnée est maximale [15].

La représentation de ce diagramme peut se faire en 2D (repère polaire ou cartésienne) ou en 3D.

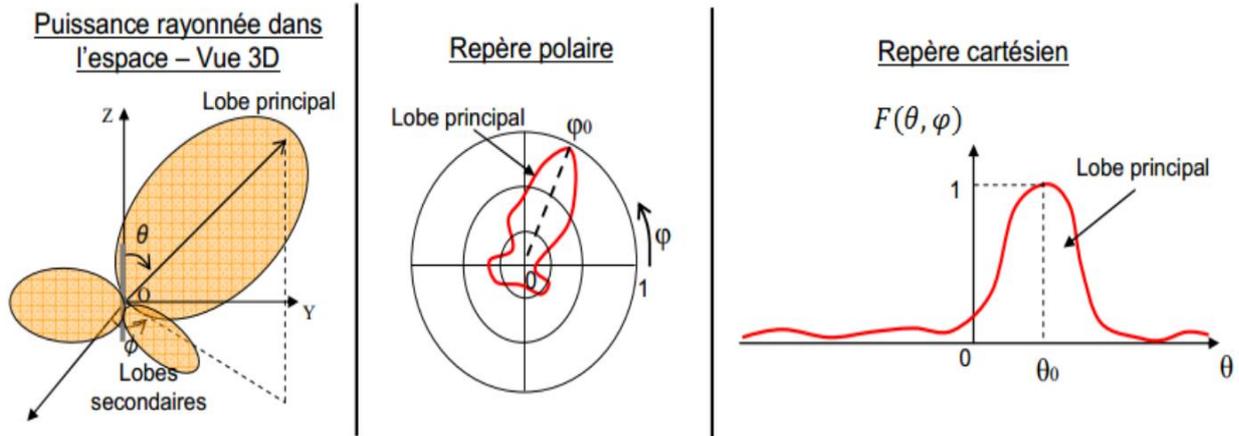


Figure I- 11 : Les différents types de représentations d'un diagramme de rayonnement

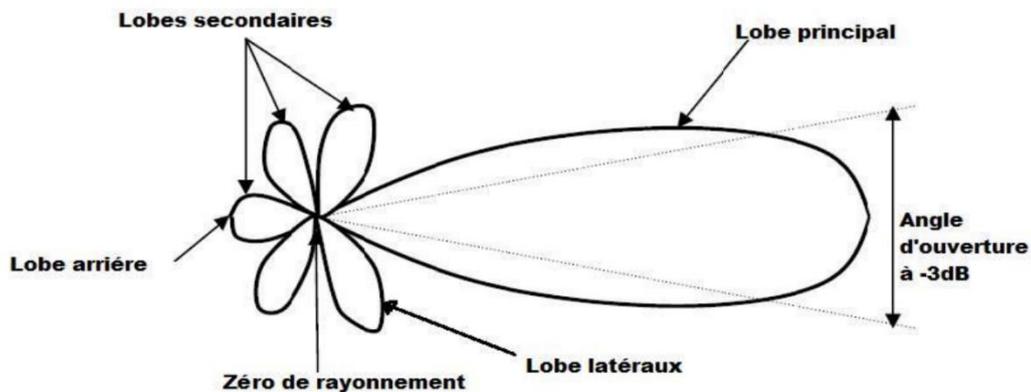


Figure I- 12 : Diagramme de rayonnement

Généralement il est caractérisé par un lobe principal autour duquel se trouve concentrée une grande partie de la puissance rayonnée, des lobes secondaires autour desquelles se répartissent la fraction de la puissance restante. On cherche à les minimiser car l'énergie rayonnée dans ces directions sont perdues. Lobe arrière indique l'énergie transmise ou reçue de la direction opposée à l'axe principal et l'angle d'ouverture est l'angle entre les deux directions autour du lobe principal ou la puissance rayonnée est égale à la moitié de la puissance rayonnée dans la direction de rayonnement maximal.

### I.5.5. La directivité, le gain et le rendement d'une antenne

Ces trois grandeurs permettent de caractériser la façon dont une antenne convertie sa puissance électrique indente en puissance électromagnétique rayonnée dans une direction particulière.

Le gain et la directivité permettent de comparer les performances d'une antenne par rapport à l'antenne de référence qui l'antenne isotrope. [2]

### I.5.5.1. La directivité

La directivité d'une antenne caractérise la manière dont cette antenne concentre son rayonnement dans certaines dimensions de l'espace. La directivité est le rapport entre l'intensité de rayonnement dans une direction de l'antenne sur l'intensité de puissance que rayonnerait la source isotrope.

Elle est donnée par la relation suivante :

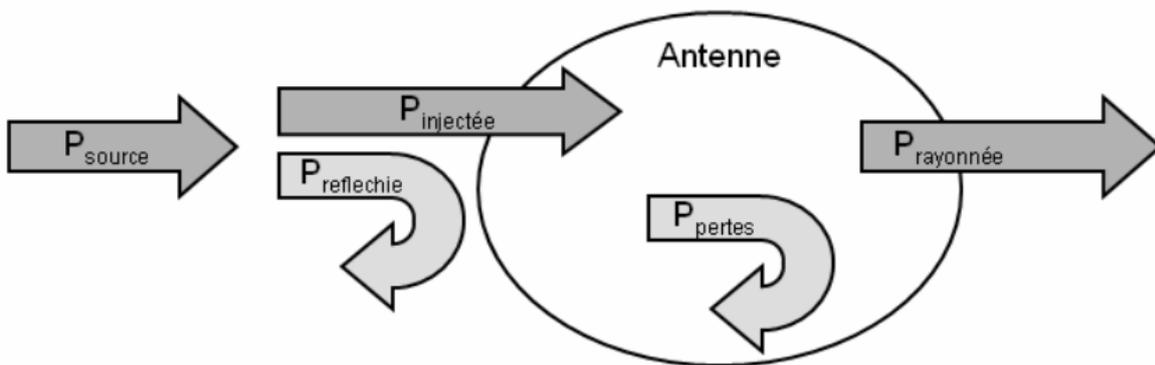
$$D(\theta, \varphi) = 4\pi \frac{P(\theta, \varphi)}{P_r} \quad (\text{I.7})$$

### I.5.5.2. Le gain

Le gain est le rapport entre la puissance rayonnée dans une direction donnée sur la puissance que rayonnerait une antenne isotrope sans perte c'est-à-dire la puissance injectée dans l'antenne.

$$D(\theta, \varphi) = 4\pi \frac{P(\theta, \varphi)}{P_{inj}} \quad (\text{I.8})$$

### I.5.5.3. Le rendement



**Figure I- 13** : Schéma de la conversion de l'énergie dans une antenne

Soit  $P_{source}$  la puissance d'alimentation d'une antenne. Cette puissance est transformée en une puissance rayonnée  $P_{rayonnée}$ . Dans le sens d'émission, la puissance rayonnée est inférieure à la puissance de source. L'antenne est un transformateur imparfait, il y a des pertes lors de cette transformation d'énergie comme montre dans la figure ci-dessus.

On a donc des relations suivantes :

$$P_{\text{injectée}} = P_{\text{ray}} + P_{\text{pertes}} \quad (\text{I. 9})$$

$$P_{\text{source}} = P_{\text{injectée}} + P_{\text{réfléchi}} = P_{\text{ray}} + P_{\text{pertes}} + P_{\text{réfléchi}} \quad (\text{I. 10})$$

L'efficacité de rayonnement l'antenne  $\eta$  est le rapport entre la puissance rayonnée et la puissance injectée

$$\eta = \frac{P_{\text{ray}}}{P_{\text{injectée}}} \quad (\text{I. 11})$$

Ce rapport caractérise les pertes à l'intérieur de l'antenne.

La directivité, le gain et le rendement sont reliés par la relation suivante :

$$G = \eta D \quad (\text{I. 12})$$

## I.6. Les avantages et limites des antennes imprimées

Actuellement, les antennes patches sont largement utilisées. Elles couvrent une large gamme de fréquence de 100 MHz à 100 GHz. Elles sont attrayantes pour beaucoup d'applications à causes de leurs nombreux avantages.

### I.6.1. Les avantages des antennes patch

Ces avantages sont :

- Faible poids ;
- Moins chers ;
- Polarisation linéaire et circulaire pour les télécommunications ;
- Possibilité de mettre en réseau pour améliorer la directivité et pour certaines applications [17]

### I.6.2. Les limites des antennes patch

D'une autre part, elles ont des limites qui sont :

- Faible efficacité de rayonnement ;
- Une bande passante étroite ;
- Faible gain ;

## **I.7. Les domaines d'applications des antennes imprimées**

Grâce aux nombreux avantages que les antennes imprimées nous offrent elles sont utilisées dans beaucoup de domaines. Parmi lesquelles nous pouvons citer :

- L'aviation ;
- La télémétrie et les antennes de communications sur les missiles ;
- Le radar ;
- Les armes intelligentes ;
- Les liaisons de communications entre les navires ou les satellites géostationnaire ;
- La téléphonie mobile ;
- Les systèmes GPS [18]

## **I.8. Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons fait une présentation générale des antennes imprimées ainsi que leur caractéristique, les différents types de substrats et leurs critères de sélections, ensuite les différentes techniques d'alimentation et d'adaptation des antennes patch. Nous avons cité aussi les avantages et inconvénients en clôturant sur les domaines d'application de ce type d'antenne.

Dans le chapitre nous allons étudier l'influence de la permittivité, de la variation de la hauteur du substrat et du changement d'alimentation sur les performances de l'antenne en utilisant le logiciel ADS.

## **Chapitre II. Conception d'une antenne patch rectangulaire pour les applications 10GHz**

## II.1. Introduction

Dans ce chapitre notre travail consiste à concevoir une antenne patch rectangulaire optimisée à la fréquence 10 GHz, dans le but d'analyser son fonctionnement et d'évaluer l'impact :

- De la permittivité relative ;
- De la hauteur du substrat ;
- Le changement de mode d'alimentation sur ses performances.

Plus précisément, l'objectif est de concevoir une antenne patch rectangulaire qui présente des performances optimales en termes de gain et de directivité. Pour ce faire, il convient d'analyser l'influence de la permittivité relative et de la hauteur du substrat ainsi que le changement du mode d'alimentation sur les performances de l'antenne en utilisant le logiciel ADS (Advanced Design System).

## II.2. Description du logiciel ADS

Il existe plusieurs logiciels de simulation électromagnétique (EM) comme le HFSS, le CST, le Feko et parmi tant d'autres dans lesquels ADS se démarque par sa polyvalence et offre plus de possibilité.

PathWave Advanced Design System (Système avancé de conception) (ADS) est un logiciel de conception électronique assistée par ordinateur (CAO) utilisé pour la simulation, la conception et la vérification de circuits électroniques haute fréquence et à large bande. Il est principalement utilisé dans l'industrie des télécommunications, de l'aérospatiale et de la défense pour concevoir des circuits intégrés, des antennes, des circuits RF/micro-ondes, des filtres, des amplificateurs, des oscillateurs et d'autres composants électroniques avancés.



**Figure II- 1** : Logo du logiciel ADS

ADS est équipé d'outils de simulation sophistiqués tels que des simulateurs électromagnétiques 3D, des simulateurs de circuits, des analyseurs de Fourier, des analyseurs de bruit et des analyseurs de paramètres S pour aider les ingénieurs à concevoir des circuits électroniques hautement performants. Il est également capable de gérer les signaux numériques et analogiques, les signaux RF, les signaux de puissance et les signaux mixtes.

Parmi ces outils LineCalc est utilisé pour calculer les dimensions (longueur et largeur) des lignes de transmission de plusieurs sortes (micro-ruban, coaxial etc...)

Il est notamment l'outil que nous avons utilisé pour calculer les dimensions de la ligne micro ruban de nos antenne patch dans la suite de ce travail.

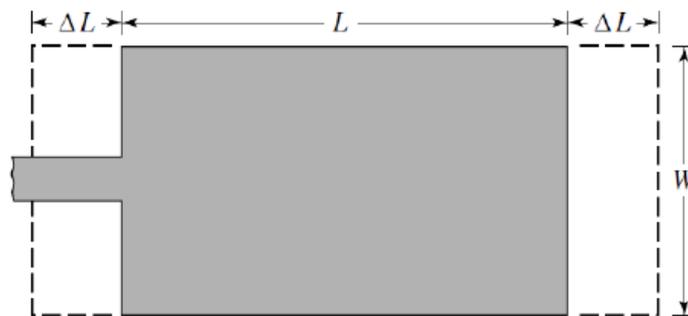
### **II.3. Cahier des charges**

Une méthodologie à suivre a été mis en place pour la conception de l'antenne patch rectangulaire. Celle-ci consiste :

- Choisir un logiciel de simulation (ADS) ;
- Calculer les paramètres géométriques de l'antenne patch qu'on souhaite réalisée à la fréquence désirée ;
- Adapter et optimiser l'antenne conçue puis étudier l'influence des paramètres géométriques de l'antenne sur ses performances ;
- Changer le type d'alimentation pour voir son impact aussi sur les performances
- Améliorer ses performances à travers la conception d'un réseau d'antenne (Chapitre III).

### II.3.1. Calcul des paramètres géométriques de l'antenne

Dans notre travail, nous avons choisi un patch rectangulaire avec un substrat de type RT-Duroid-5880 de permittivité relative  $\epsilon_r=2.2$  et d'épaisseur  $h=0.79\text{mm}$  à une fréquence  $f=10\text{GHz}$ . Les paramètres géométriques de cette antenne ont été calculés en utilisant les équations suivantes. (Voir le **Tableau II.1**)



**Figure II- 2 :** Structure d'une antenne imprimée avec ses dimensions

**Tableau II- 1** : Les équations de calcul des dimensions de l'antenne patch rectangulaire

	Les paramètres	Equations
Les dimensions du patch	La largeur <b>W</b>	$W = \frac{C}{2 * fr} * \sqrt{\frac{2}{\epsilon r + 1}}$
	La longueur <b>L</b>	$L = Leff - 2\Delta L$
	Longueur effective <b>Leff</b>	$Leff = \frac{C}{2 * fr \sqrt{\epsilon eff}}$
	L'extension de la longueur <b><math>\Delta L</math></b>	$\Delta L = 0.412 * h \frac{(\epsilon eff + 0.3) \left(\frac{W}{h} + 0.264\right)}{(\epsilon eff - 0.258) \left(\frac{W}{h} - 0.8\right)}$
	Constante diélectrique effective <b><math>\epsilon eff</math></b>	$\epsilon eff = \frac{\epsilon r + 1}{2} + \frac{\epsilon r - 1}{2} \left(1 + 12 * \frac{h}{w}\right)^{-1/2}$
Les dimensions de la ligne d'alimentation	La largeur de la ligne d'alimentation <b>Wf</b>	$\frac{Wf}{h} = \left(\frac{e^H}{8} - \frac{1}{4 * e^H}\right)^{-1}$ $H = \frac{Zc \sqrt{2 * (\epsilon r + 1)}}{119.9} + \frac{1}{2} * \frac{(\epsilon r - 1)}{(\epsilon r + 1)} * \left(\ln \frac{\pi}{2} + \frac{1}{\epsilon r} * \ln \frac{4}{\pi}\right)$
	La longueur de la ligne d'alimentation <b>Lf</b>	$Lf = \frac{\lambda}{4} = \left(\frac{\lambda 0}{4 * \sqrt{\epsilon eff}}\right)$ $\lambda 0 = \frac{C}{fr}$

Avec

$C=3*10^8$  m/s la vitesse de la lumière dans le vide ;

$Zc : 50\Omega$ .

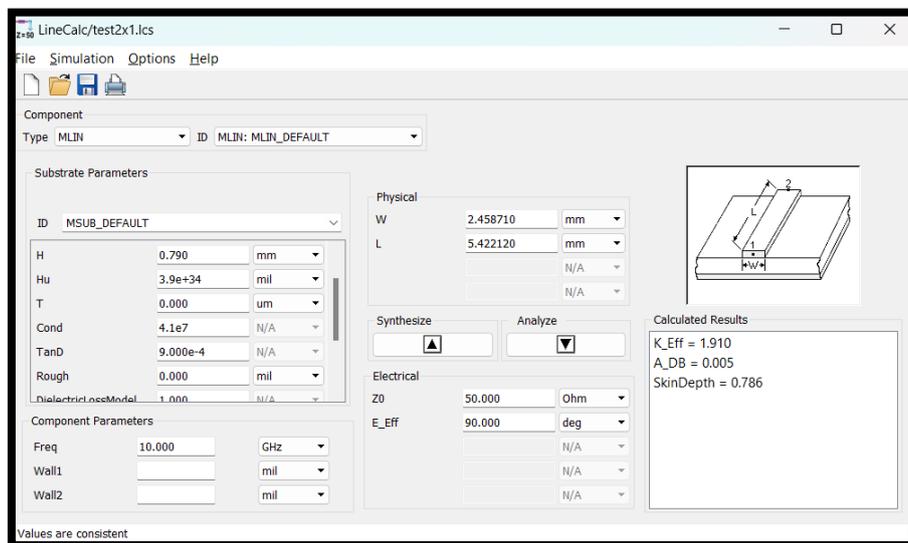
### II.3.1.1. La structure de l'antenne patch

D'après les équations que nous venons d'énumérer au-dessus nous trouvons les résultats suivants :

**Tableau II- 2 : Dimensions de l'antenne patch rectangulaire**

Paramètres	Valeur en (mm)
<b>L</b>	9.65
<b>W</b>	11.86
<b>L<sub>f</sub></b>	5.24
<b>W<sub>f</sub></b>	2.45

Ces mêmes résultats sont obtenus à travers les outils de calcul.



**Figure II- 3 : Calcul des dimensions de la ligne d'alimentation avec LineCalc**

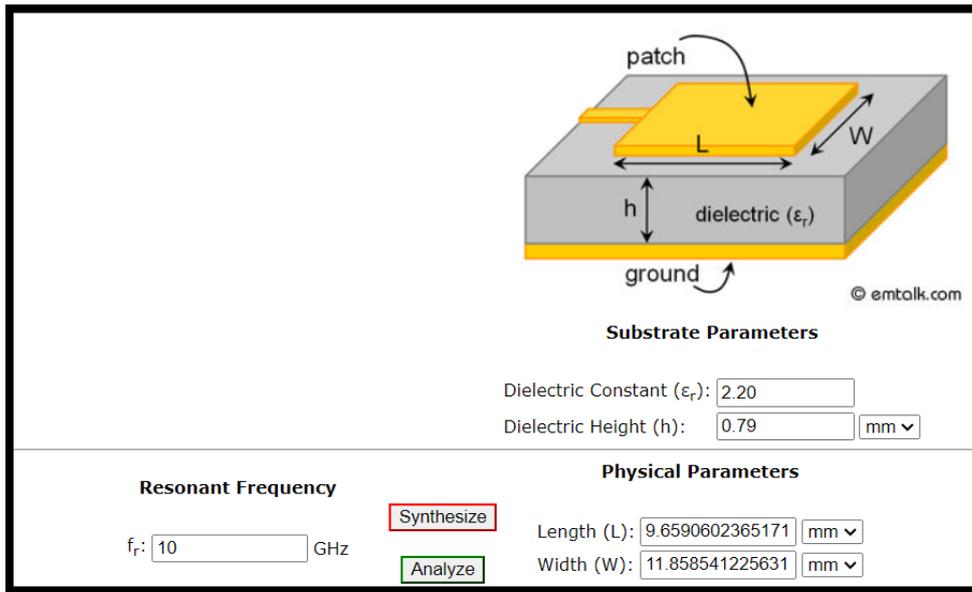


Figure II- 4 : Calcul des dimensions du patch sur emtalk

II.3.2. Simulation et optimisation

L'antenne choisie avec les paramètres calculés est simulé à partir du logiciel ADS par le schématique montré dans la **figure II-5**, le layout correspondant apparait dans la **figure II-6**

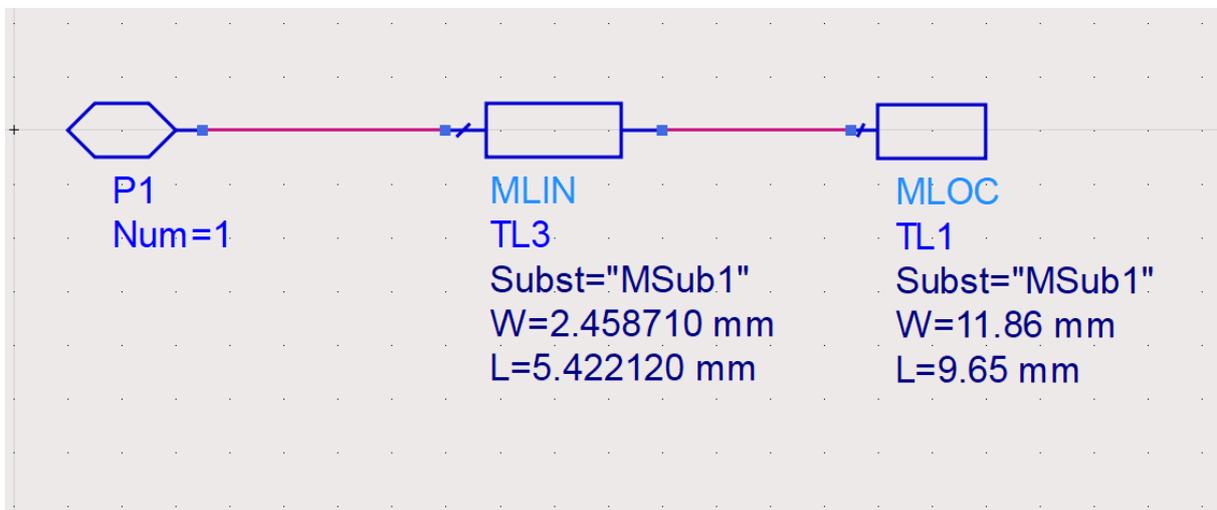


Figure II- 5 : Schématique de simulation de l'antenne patch sans adaptation

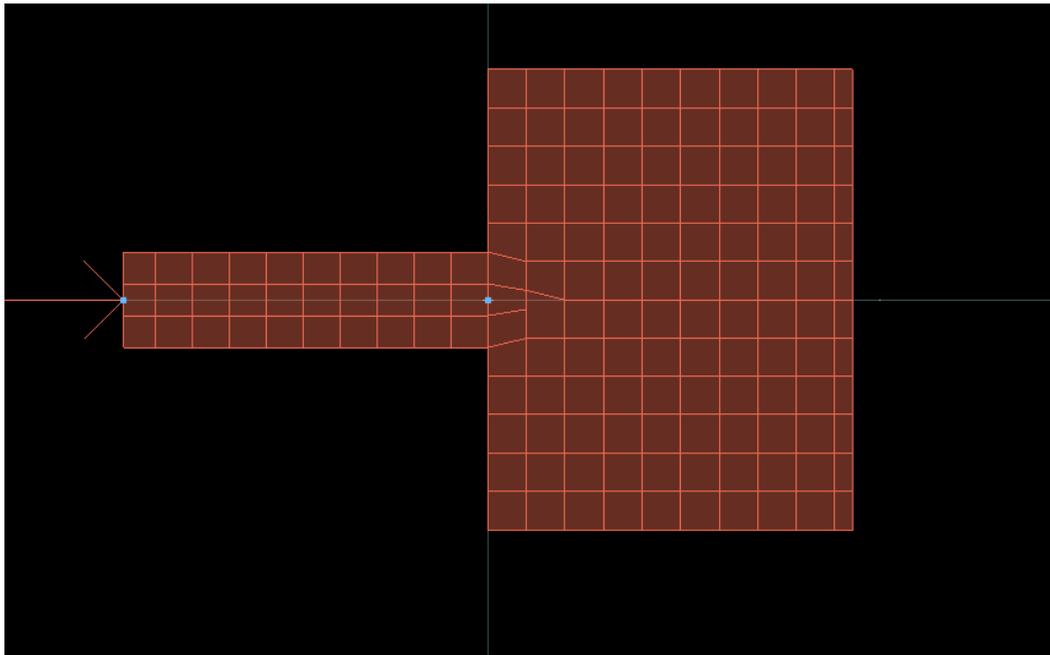


Figure II- 6 : Layout de l'antenne patch sans adaptation

Après avoir simulé, nous voyons bien que notre antenne n'est pas bien centrée à la fréquence de résonance qui est 10GHz et avec un coefficient de réflexion situé au-dessus de -10 dB donc une mauvaise adaptation (voir la figure II-7).

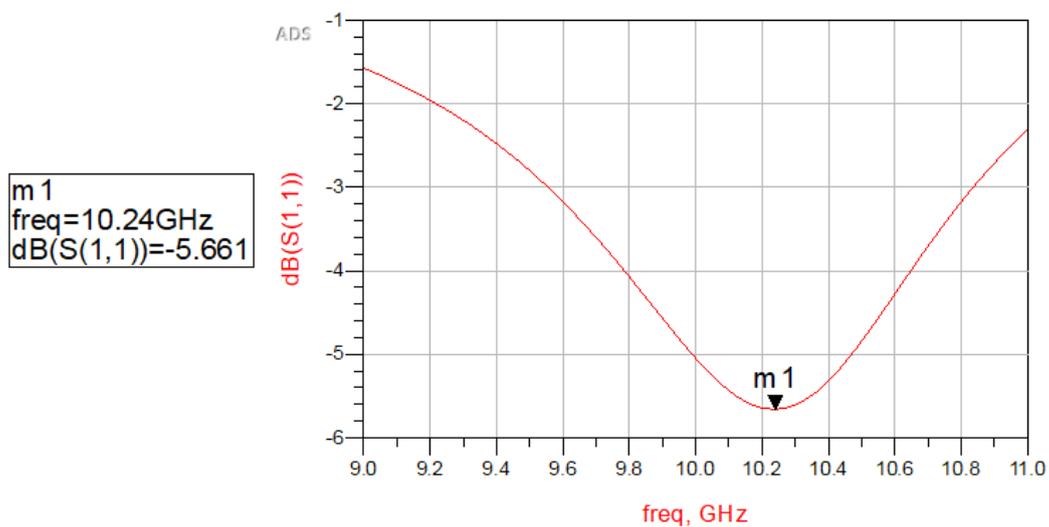
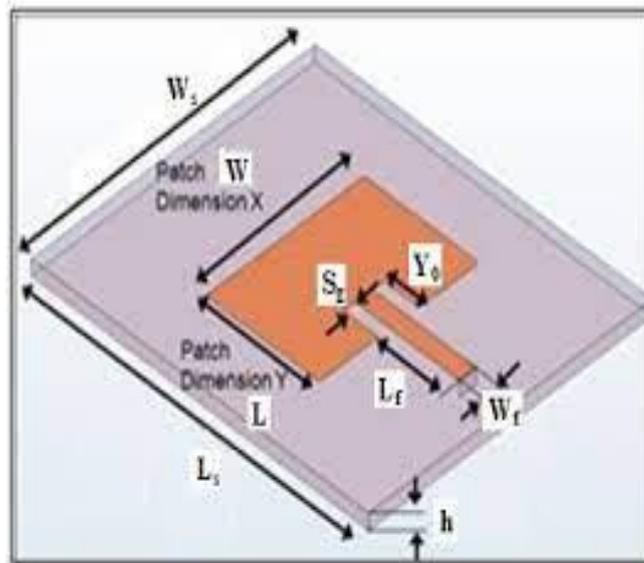


Figure II- 7 : S11 (dB) sans Adaptation

Pour cette raison nous allons faire une adaptation d'impédance à l'entrée du patch en utilisant l'adaptation par encoche et l'adaptation par ligne quart d'onde et par la suite optimiser notre antenne à la fréquence de résonance désirée.

**II.3.2.1. Adaptation par encoche**



**Figure II- 8 :** Antenne patch rectangulaire avec adaptation par encoche

**Tableau II- 3 :** Dimension de la ligne d'encoche

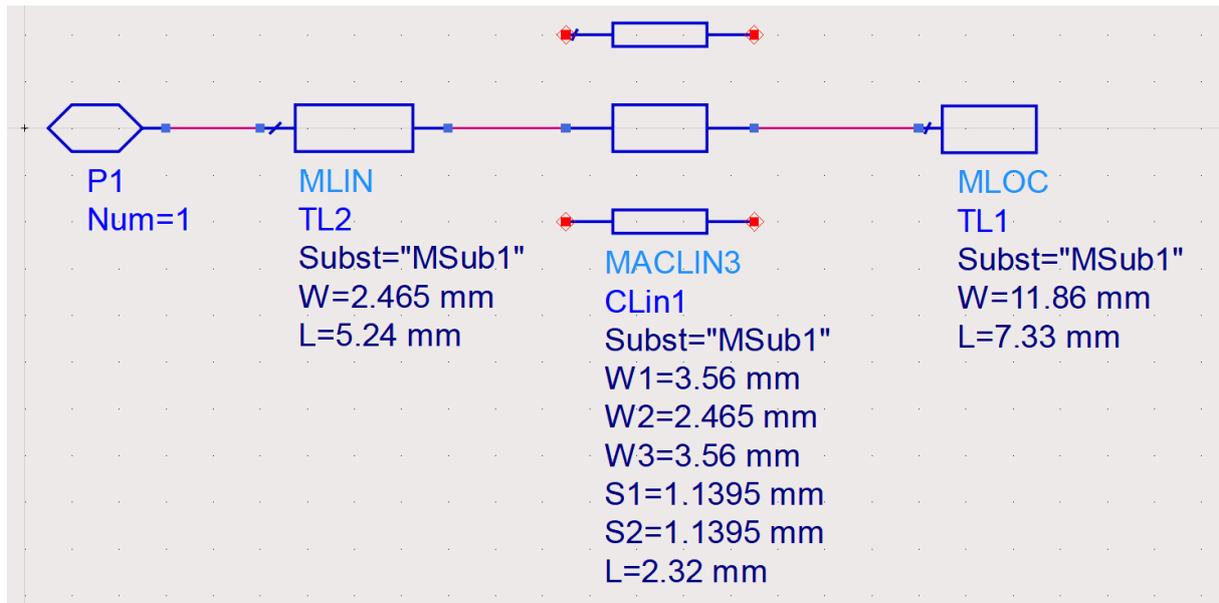
	Paramètres	Equations
Les dimensions de la ligne d'encoche	La profondeur l'encoche $Y_0$	$Y_0 = 10^{-4} (0.001699 * \epsilon_r^7 + 0.13761 * \epsilon_r^6 - 6.1783 * \epsilon_r^5 + 93.187 * \epsilon_r^4 - 682.69 * \epsilon_r^3 + 2561.9\epsilon_r^2 - 4043 * \epsilon_r^1 + 6697) * \frac{L}{2}$

D'après les équations du **tableau II-3** nous avons obtenus les résultats suivants :

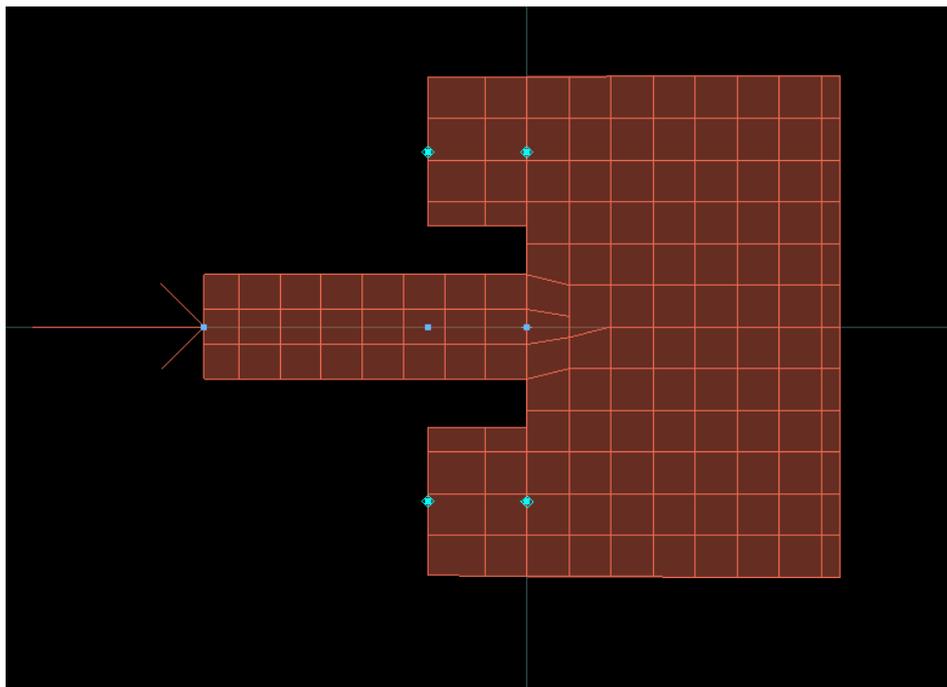
**Tableau II- 4 :** Résultats des dimensions de la ligne d'encoche

Dimension de l'encoche	Dimensions (mm)
La profondeur de l'encoche $Y_0$	2.32
La largeur de l'encoche $S_g$	1.1395

Après avoir calculé les paramètres de la ligne d'encoche voir le **tableau II-4** nous obtenons à partir du logiciel ADS le schématique et le layout de l'antenne dans les figures respectives **figure II-9** et **figure II-10**.



**Figure II- 9** : Schématique de l' antenne adaptée par encoche



**Figure II- 10** : Layout de l'adaptation par encoche

Avec l'adaptation par encoche, nous obtenons un coefficient de réflexion de -34.178 dB à la fréquence 10.33 GHz, ce qui reste loin de la fréquence désirée 10 GHz (**Figure II-11**)

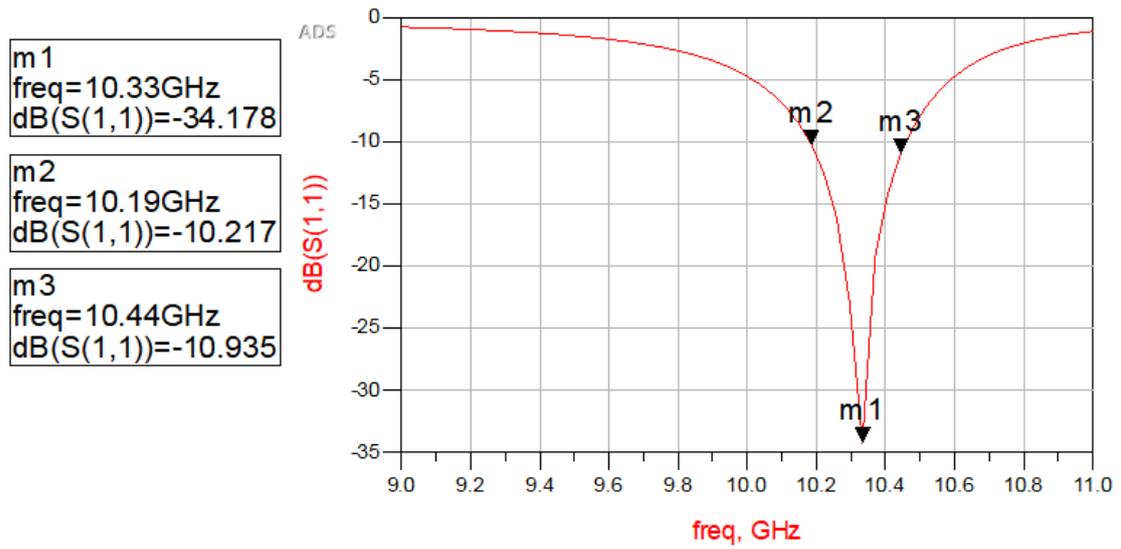


Figure II- 11 : S11(dB) de l'antenne adaptée par encoche

II.3.2.2. Adaptation par ligne quart d'onde

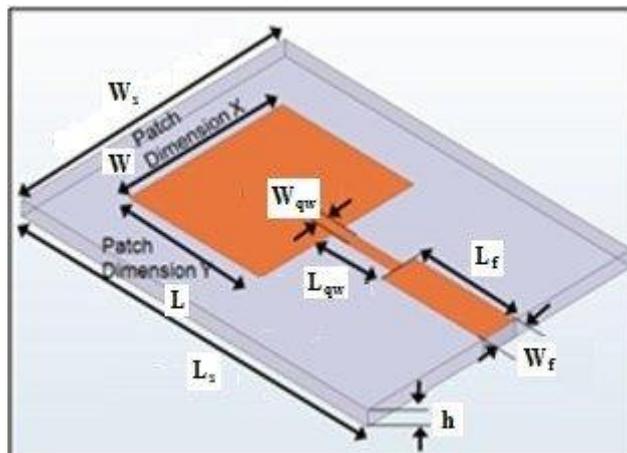


Figure II- 12 : Adaptation par ligne quart d'onde

**Tableau II- 5** : Les dimensions de la ligne quart d'onde

	Paramètres	Equations
Les dimensions de la ligne quart d'onde	La longueur de la ligne quart d'onde <b>L<sub>qw</sub></b>	$L_{qw} = \frac{\lambda}{4} = \frac{C}{4 * fr}$
	La largeur de la ligne quart d'onde <b>W<sub>qw</sub></b>	$Z_c = 90 * \frac{\epsilon_r^2}{\epsilon_r - 1} * \left(\frac{L}{W}\right)^2$ $ZT = \sqrt{50 * Z_c}$ $ZT = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} * \ln\left(\frac{8 * h}{W_{qw}} + \frac{W_{qw}}{4 * h}\right)$

Avec

$Z_c$  : l'impédance d'entrée ;

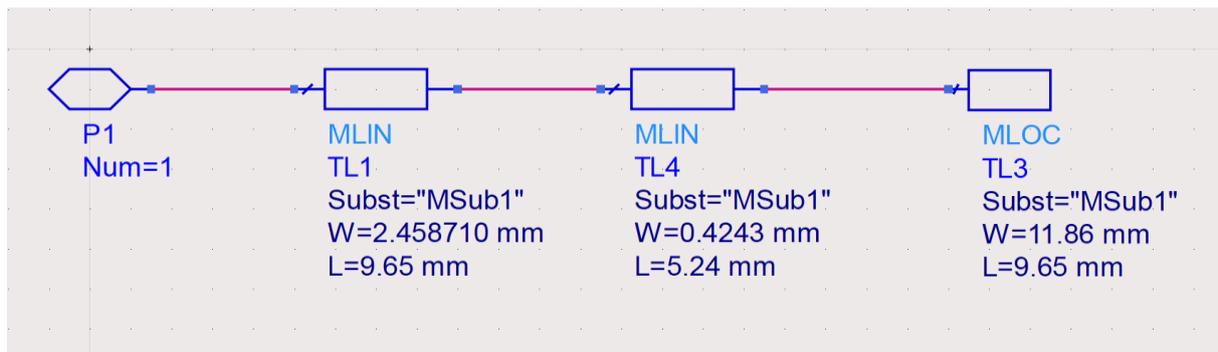
$ZT$ =l'impédance caractéristique d'entrée de la section de transition ;

D'après les équations dans le **tableau II-5** nous avons obtenus les résultats suivants :

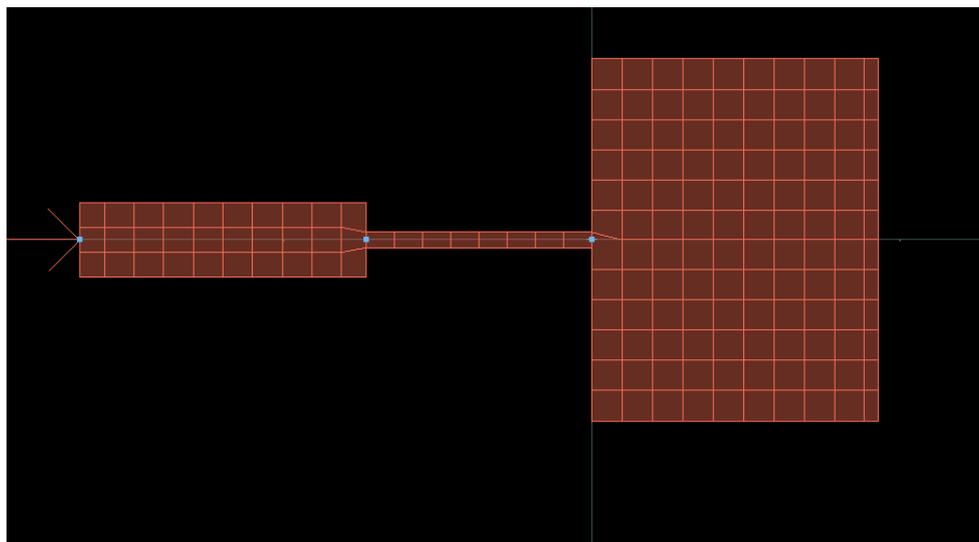
**Tableau II- 6** : Dimensions de la ligne quart d'onde

Dimension de la ligne quart d'onde	Dimensions (mm)
La longueur de la ligne quart d'onde <b>L<sub>qw</sub></b>	5.24
La largeur de la ligne quart d'onde <b>W<sub>qw</sub></b>	0.4243

Après avoir calculé les paramètres de la ligne d'encoche voir le **tableau II-6** nous obtenons à partir du logiciel ADS le schématique et le layout de l'antenne dans les figures respectives **figure II-13** et **figure II-14**

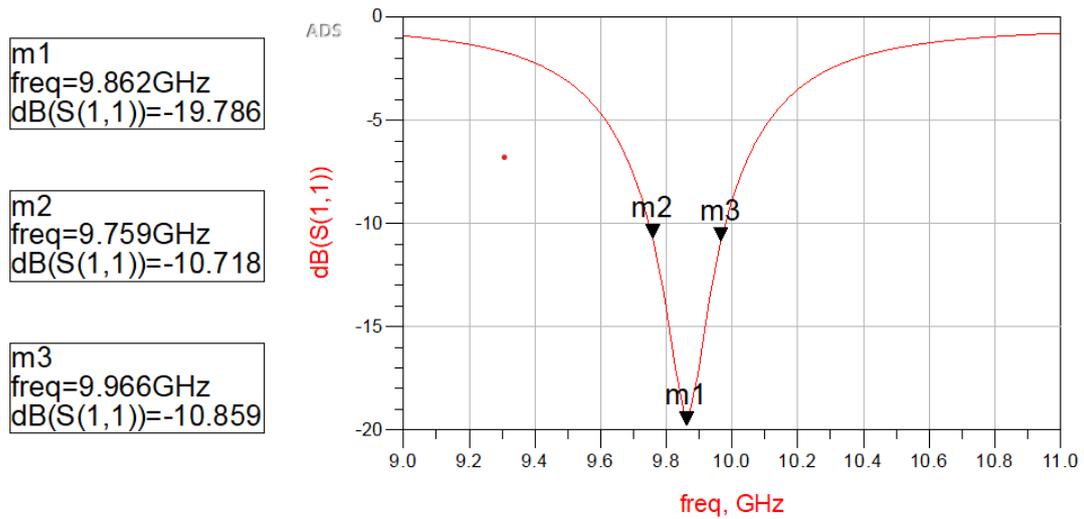


**Figure II- 13 :** Schématisation de l'adaptation par ligne quart d'onde



**Figure II- 14 :** Layout de l'adaptation par ligne quart d'onde

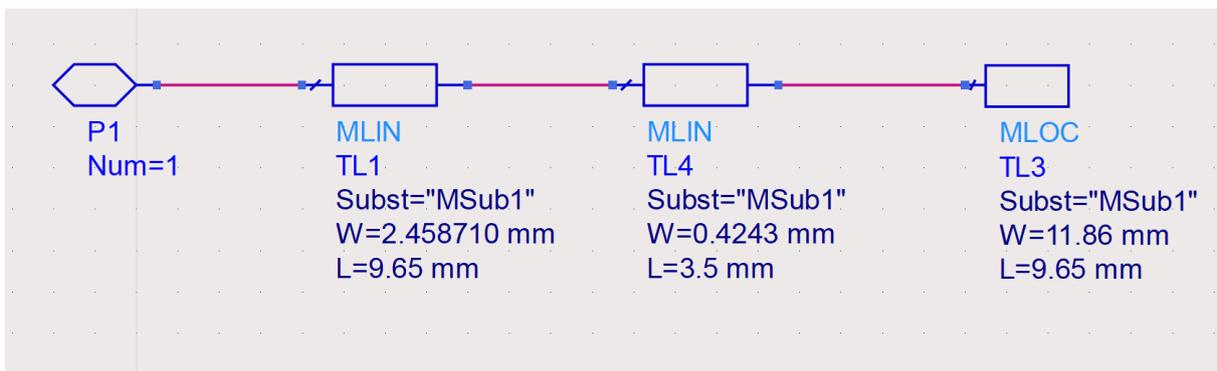
Avec l'adaptation par quart d'onde, nous obtenons un coefficient de réflexion de -19.78 dB à la fréquence 9.86 GHz. (**Figure II-15**).



**Figure II- 15 :** Coefficient de réflexion S11(dB) de l'antenne adaptée par ligne quart d'onde

Avec les deux techniques nous arrivons à avoir une bonne adaptation mais avec une fréquence non centrée à 10 GHz. Pour atteindre cet objectif nous avons agi sur certains paramètres géométriques de l'antenne pour les deux méthodes.

L'adaptation par ligne quart d'onde nous a permis d'avoir de meilleur résultat que celle obtenue par encoche. Notant que ces résultats ont été obtenu en agissant sur la longueur de la ligne quart d'onde **L<sub>qw</sub>** de 5.24mm à 3.5 mm (**Figure II-16**).



**Figure II- 16 :** Schématique de l'adaptation par ligne quart d'onde centré à la fréquence de résonance

Après avoir agi sur la longueur de la ligne quart d'onde nous obtenons une bonne adaptation avec un S11(dB) de -33.418 à la fréquence de résonance voulue (**Figure II-17**).

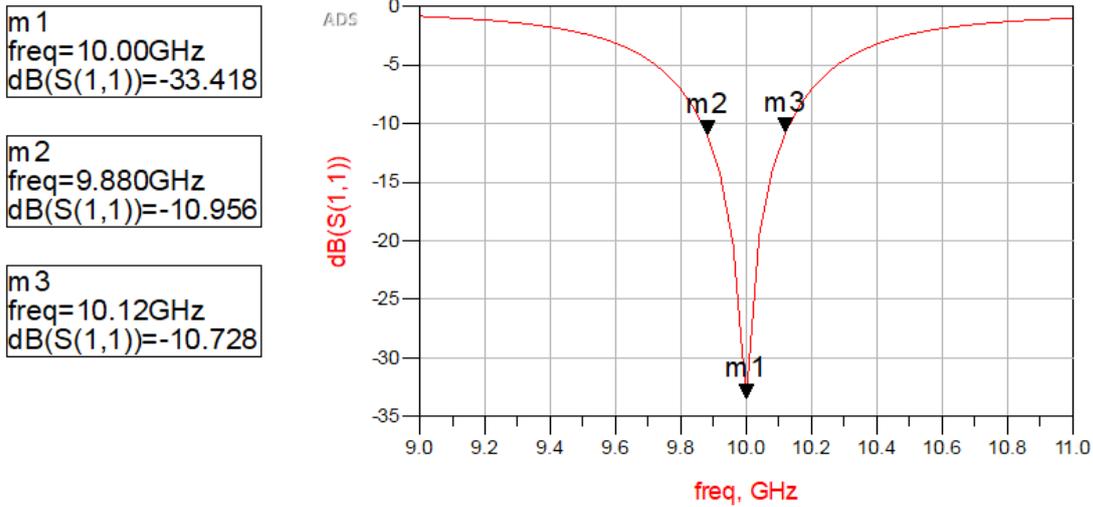


Figure II- 17 : S11(dB) de l'adaptation par ligne quart d'onde centré à la fréquence de résonance

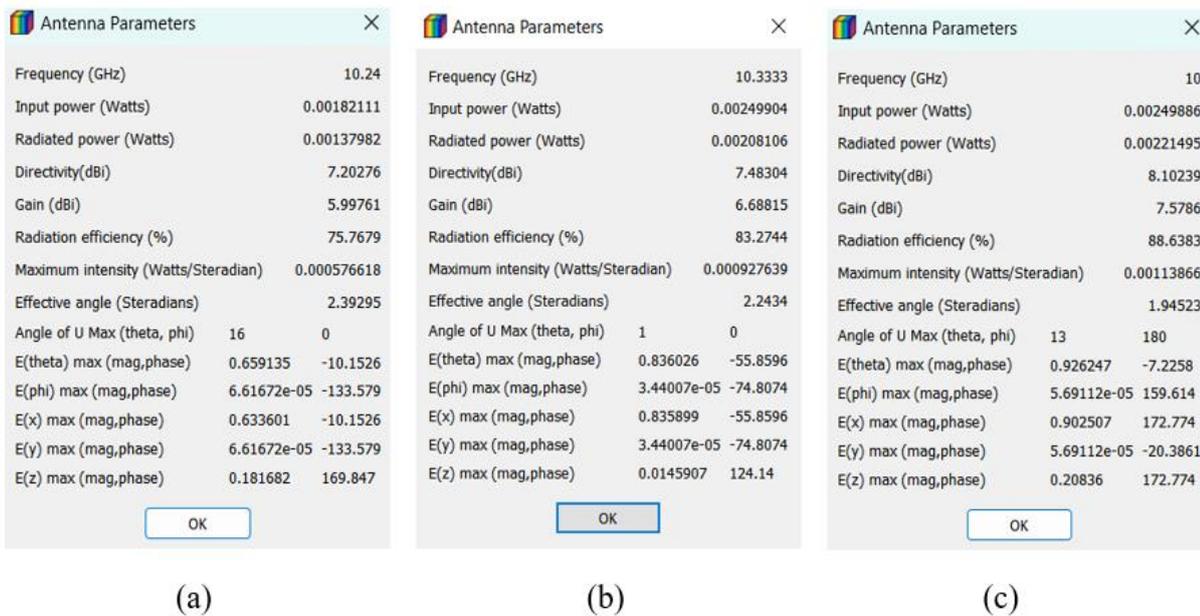


Figure II- 18 : (a) performance de l'antenne sans adaptation  
 (b) performance de l'antenne adaptée par encoche  
 (c) performance de l'antenne adaptée par ligne quart d'onde

II.3.2.3. Comparaison des résultats

D'après les figures II-11 et II-17 on constate que nous avons une bonne adaptation de l'antenne patch en utilisant la technique de quart d'onde malgré que l'adaptation par encoche nous donne un meilleur coefficient de réflexion mais elle n'est pas adaptée à la fréquence de résonance 10 GHz.

**Tableau II- 7 : Comparaison des résultats**

Paramètres de l'antenne	Antenne sans adaptation	Antenne adaptée par encoche	Antenne adaptée par ligne quart d'onde
S11(dB)	-5.661	-34.178	-33.418
Directivité (dBi)	7.20	7.48	8.10
Gain (dBi)	5.99	6.68	7.57
La bande passante(MHz)	-	250	240
Fréquence	10,24	10,33	10

### II.3.3. Influence de la permittivité du substrat sur les performances de l'antenne

Puisque l'adaptation avec la ligne quart d'onde nous a donné des meilleurs résultats, nous allons l'utiliser pour étudier la variation de la permittivité sur les performances de l'antenne patch.

Notre travail consiste à faire varier la permittivité et à partir de ces derniers nous allons voir l'influence de la permittivité sur les performances de l'antenne à savoir la bande passante, le coefficient de réflexion, le gain et la directivité en fixant la hauteur du substrat à  $h=0.79\text{mm}$ .

Les substrats choisis sont : le Téflon, le Rogers\_RT\_Duroid5880, le Rogers\_RO30031 et le FR\_4 leurs permittivités varient entre 2 à 4.6

- **Cas du Téflon**

La permittivité de ce substrat est  $\epsilon_r=2$  avec une tang  $\delta=0.000194$

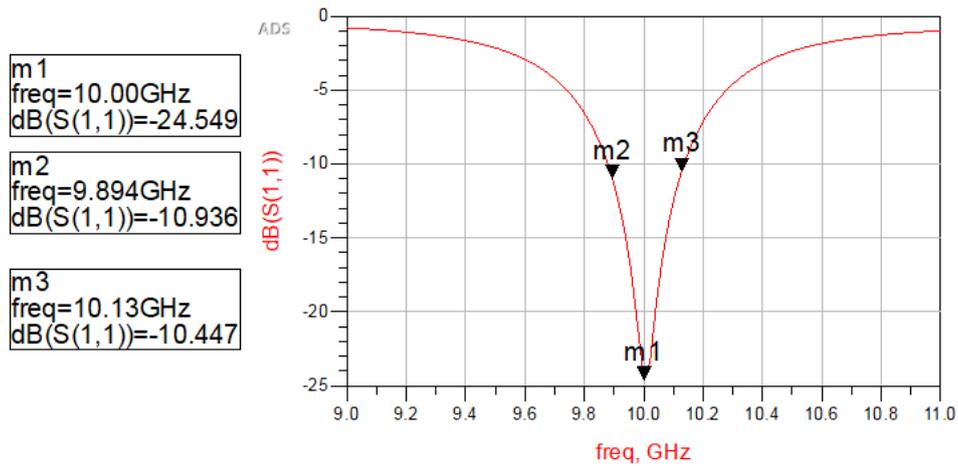


Figure II- 19 : Coefficient de réflexion pour  $\epsilon_r = 2$

- Cas du Rogers\_RO30031

La permittivité de ce substrat est  $\epsilon_r = 3$  avec une tang  $\delta = 0.0013$

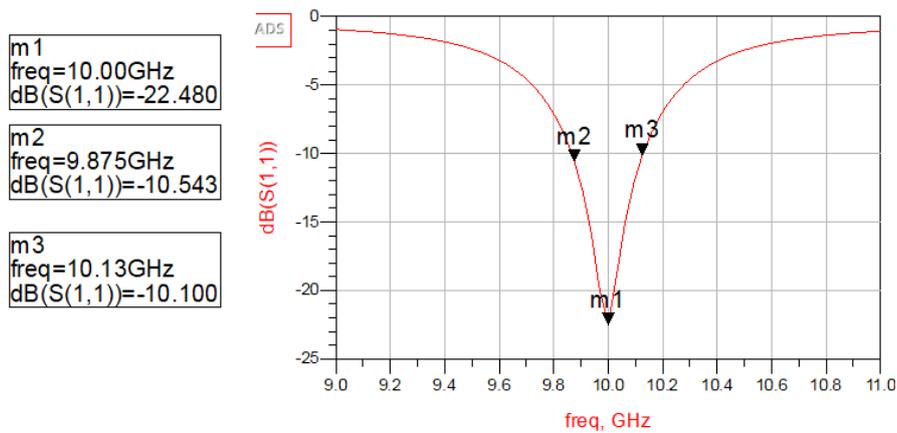


Figure II- 20 : Coefficient de réflexion pour  $\epsilon_r = 3$

- Cas du FR\_4

Sa permittivité  $\epsilon_r = 4.6$  avec une tang  $\delta = 0.01$

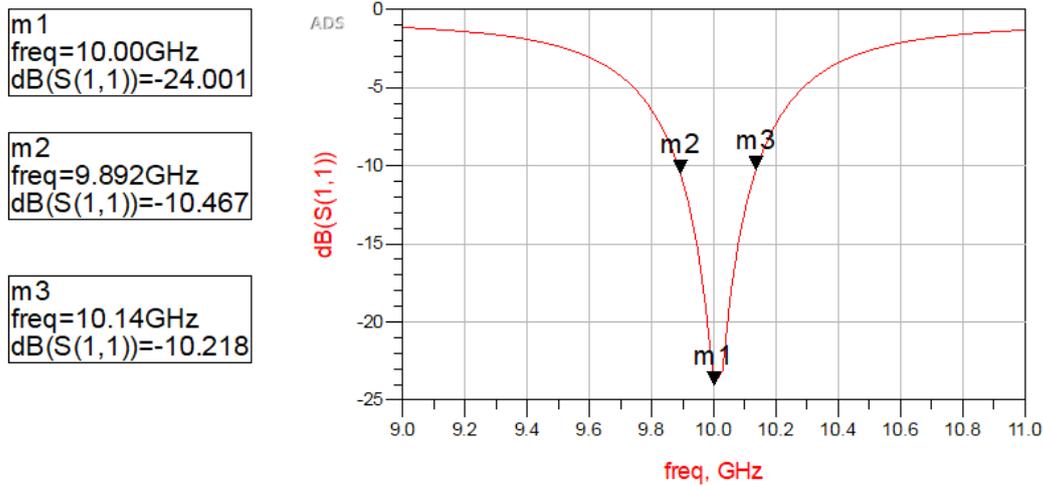


Figure II- 21 : Coefficient de réflexion pour  $\epsilon_r = 4.6$

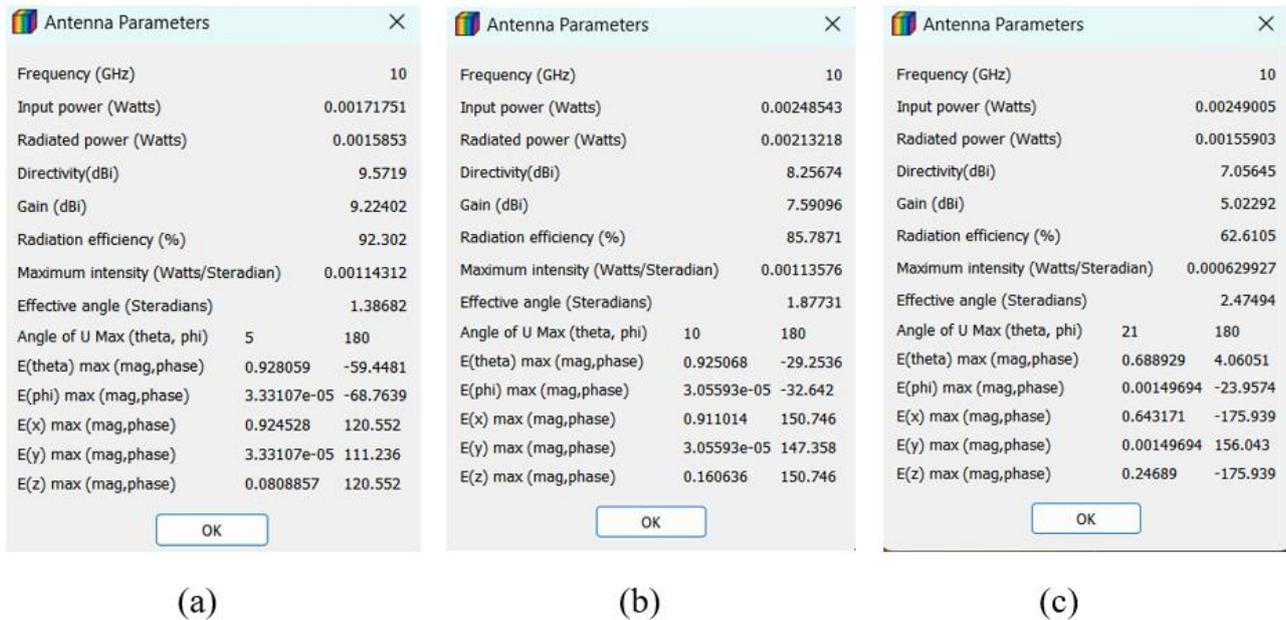


Figure II- 22 : (a) performance de l'antenne avec  $\epsilon_r = 2$   
 (b) performance de l'antenne avec  $\epsilon_r = 3$   
 (c) performance de l'antenne avec  $\epsilon_r = 4.6$

La démarche de la variation de la permittivité  $\epsilon_r$  du substrat est résumé dans le **tableau II-8**

**Tableau II- 8** : Influence de la permittivité sur les performances de l'antenne

	Substrat	Téflon	RT_Duroid5880	Rogers_RO3003	FR_4
Calcul des dimensions (mm)	$\epsilon_r$	2	2.2	3	4.6
	W	12.24	11.86	10.60	8.96
	L	10.10	9.65	8.31	6.73
	Wf	2.607400	2.458710	2.011000	1.4956
	W <sub>qw</sub>	0.468	0.4243	0.2535	0.0841
	L <sub>qw</sub>	3.7	3.5	2.4	2.3
Les caractéristiques	Fr(GHz)	10	10	10	10
	S11(dB)	-24.549	-33.418	-20.43	-23.73
	Directivité(dB)	9.57	8.10	7.45	7.05
	Gain	9.22	7.57	6.77	5.02
	Bande passante(MHz)	240	240	266	250

**Remarque** : Pour avoir la fréquence de résonance de 10GHz nous avons agis sur la longueur de la ligne quart d'onde pour pouvoir faire la comparaison entre les différentes permittivités.

**Tableau II- 9** : Les fréquences obtenues avant optimisation

Substrat	Téflon	RT_Duroid5880	Rogers_RO3003	FR_4
Fréquence simulée(GHz)	9.88	9.88	9.80	9.68

### • Commentaire des résultats

Nous avons résumé tous les résultats dans le **tableau II-8** à savoir le coefficient de réflexion S11(dB), la fréquence de résonance, la directivité, le gain et la bande passante. A partir de celui, nous remarquons qu'en maintenant la hauteur du substrat à  $h=0.79\text{mm}$  et en faisant varier sa permittivité nous avons :

- La progression du coefficient de réflexion en fonction de la permittivité qui n'est pas linéaire : elle croit à certaine valeur et décroît à d'autre valeur ;

- La directivité et le gain sont inversement proportionnelle avec les valeurs de la permittivité ;
- La bande passante n'est pas linéaire : elle croit à une certaine valeur et commence à décroître;
- Plus on augmente la permittivité plus les dimensions du patch sont réduites.

### II.3.4. Influence de l'épaisseur du substrat sur les performances de l'antenne

Nous allons utiliser la même antenne (**Figure-16**) pour étudier la variation de la hauteur du substrat sur ses performances en fixant la permittivité à  $\epsilon_r=2.2$

- **h=0.2mm**

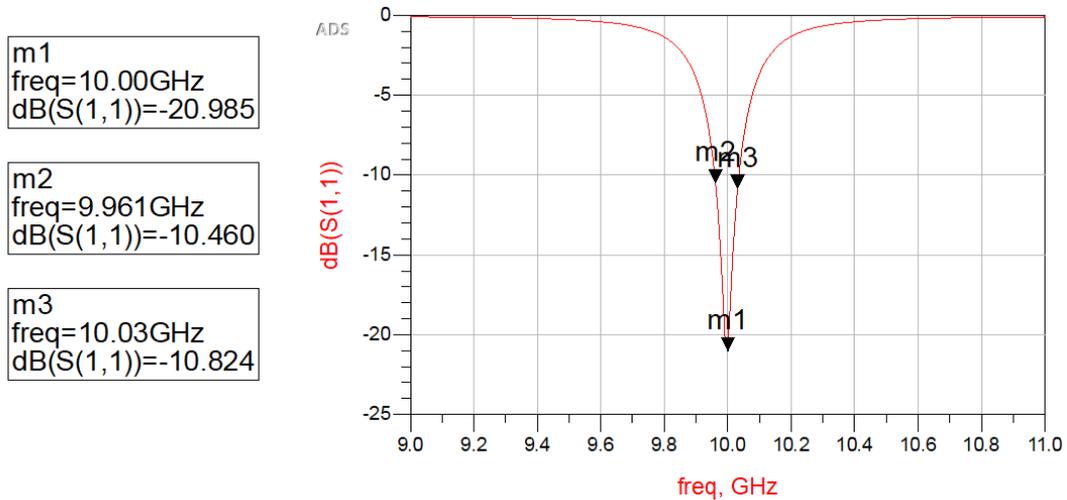
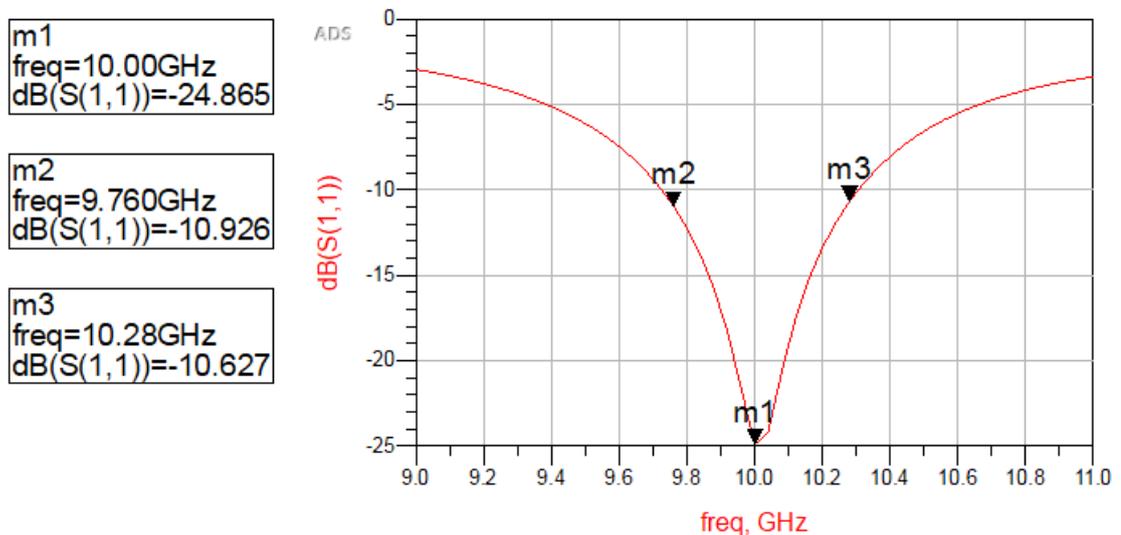


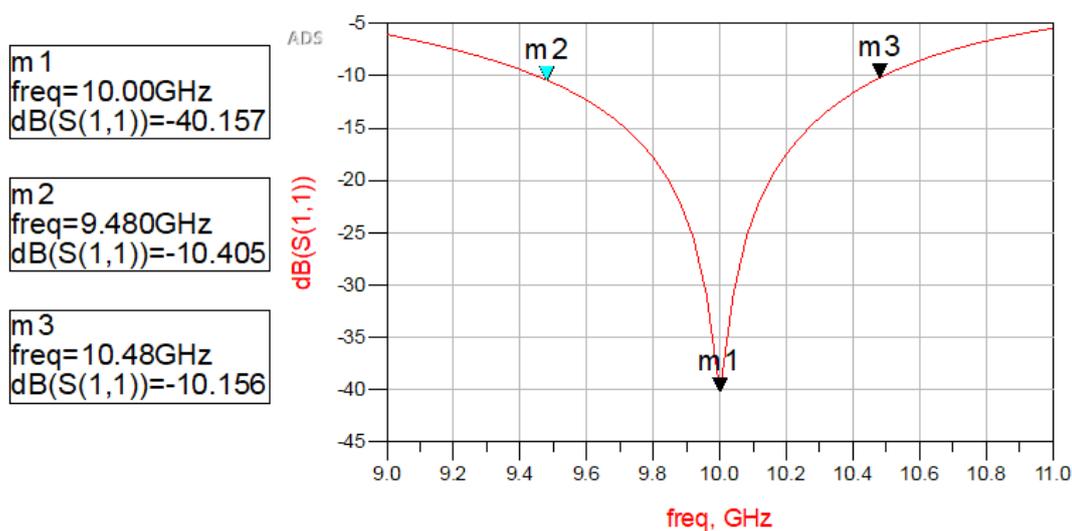
Figure II- 23 : Coefficient de réflexion pour h=0.2mm

- **h=1.5mm**



**Figure II- 24** : Coefficient de réflexion pour h=1.5 mm

- h=2mm

**Figure II- 25** : Coefficient de réflexion pour h=2 mm

La démarche de la variation de la hauteur  $h$  du substrat est récapitulé dans le **tableau II-10**

**Tableau II- 10** : Influence de la hauteur du substrat sur les performance de l'antenne

	Hauteur(mm)	0.2	0.79	1.5	2
Calcul des dimensions du patch(mm)	W	11.86	11.86	11.86	11.86
	L	10.2	9.65	9.13	8.74
	Wf	0.616907	2.458710	4.832150	6.669220
	Wqw	0.12	0.4243	0.89	1.395
	Lqw	2.8	3.5	4.8	5.7
Les caractéristiques	S11(dB)	-20.98	-33.41	-24.84	-40.15
	Fr(GHz)	10	10	10	10
	Directivité(dB)	7.56	8.25	9.02	9.69
	Gain	7.10	7.59	7.94	8.15
	Bande passante(MHz)	70	240	860	1000

**Remarque** : Pour avoir la fréquence de résonance désire (10GHz) nous avons agis sur la longueur de la ligne quart d'onde pour pouvoir faire la comparaison.

**Tableau II- 11** : Les fréquences obtenues avant optimisation

Hauteur(mm)	<b>0.2</b>	<b>0.79</b>	<b>1.5</b>	<b>2</b>
Fréquence simulée(GHz)	9.76	9.88	9.88	10.04

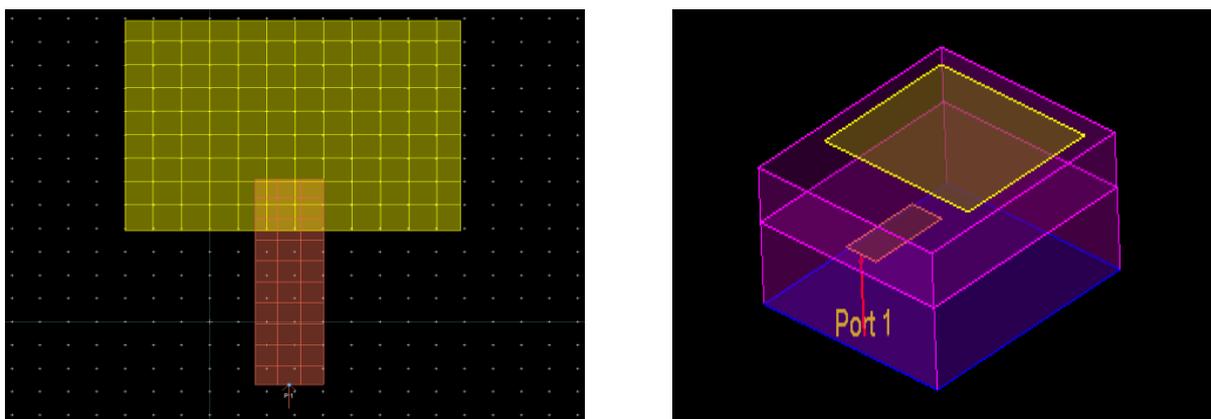
- **Commentaires des résultats**

- Le coefficient de réflexion S11(dB) croit à certaines valeurs et décroît à d'autres valeurs.
- La directivité et le gain sont proportionnelle avec la hauteur du substrat : Plus la hauteur augmente plus le gain et la directivité augmentent.
- Plus la hauteur du substrat augmente plus la bande passante s'élargie alors il y a une relation linéaire entre la hauteur du substrat et la bande passante.

### II.3.5. Effet du changement du type d'alimentation sur les performances de l'antenne : Alimentation par proximité

Elle fait partir de l'alimentation sans contact utilisant deux diélectriques entre lesquelles se trouve la ligne d'alimentation.

Nous avons choisi comme substrat inférieur de la ligne, du Téflon de permittivité relative  $\epsilon_r=2$  et d'épaisseur  $h=0.395\text{mm}$  et pour le substrat supérieur du patch du Duroid\_RT\_5880 de permittivité  $=2.2$  et d'épaisseur  $h=0.395\text{mm}$ .



**Figure II- 26** : Layout d'une antenne alimentée par proximité en 2D et 3D

Un moyen de pouvoir adapter en impédance l'antenne proposée et de choisir la position d'alimentation (agir sur la profondeur de la ligne d'alimentation).

Le **tableau II-12** résume l'étude faite en variant la profondeur de la ligne d'alimentation

Profondeur(mm)	0.5	1	1.5	2	2.3	2.5	3
S11(dB)	-3..54	-9.12	-16.24	-29.17	-32.34	-28.43	-23.19
Fr(GHz)	9.81	9.73	9.70	9.70	9.72	9.72	9.76
Bande passante(MHz)	-	-	220	270	300	280	300
Directivité(dBi)	7.89	7.83	7.81	7.80	7.79	7.79	7.79
Gain(dBi)	7.49	7.44	7.41	7.40	7.39	7.39	9.39

**Tableau II- 12 :** Variation de la profondeur de la ligne

A partir 1.5 mm nous arrivons à avoir une bonne adaptation d'impédance mais la fréquence reste décalée d'où la nécessité de la réajuster à 10 GHz. Pour cela on se propose de faire varier la longueur du patch, les résultats obtenus figurent dans le **tableau II-13**.

**Tableau II- 13 :** Variation de la longueur du patch

Longueur(mm)	9.65	9.5	9.3	9.31
Fr(GHz)	9.72	9.85	10.02	10
S11(dB)	-36.72	-35.57	-36.68	-33.19
Bande passante (MHz)	300	300	300	320
Directivité(dBi)	7.79	7.80	7.82	7.82
Gain(dBi)	7.39	7.40	7.41	7.42

Par rapport à ces résultats on peut remarquer que la longueur correspondante à 10GHz est 9.31 mm. Cette valeur nous permet d'avoir des performances optimales (Gain, directivité bande passante)

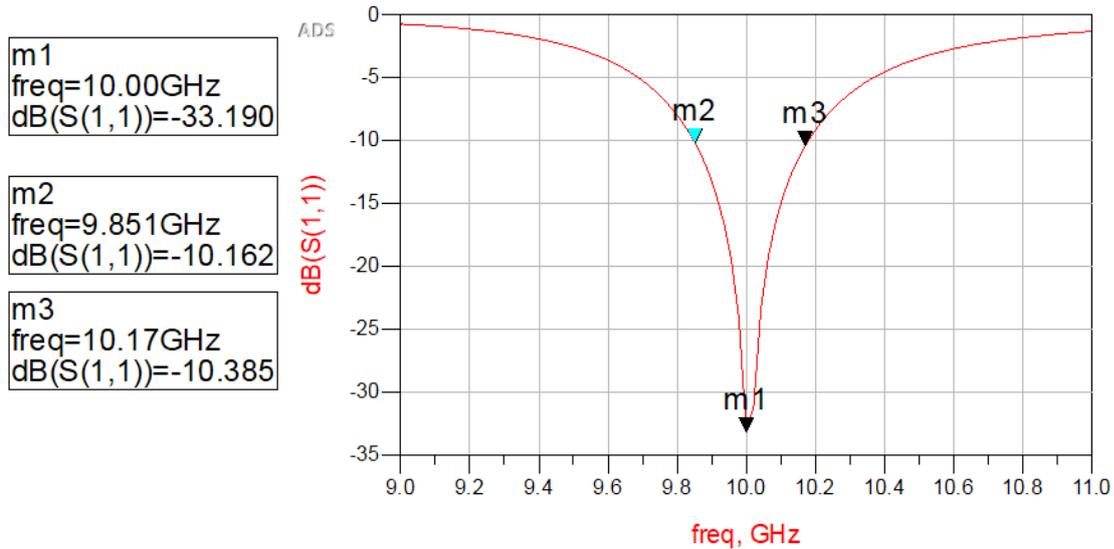


Figure II- 27 : S11 (dB) de l'antenne alimentée par proximité à 10 GHz

Tableau II- 14 : Comparaison entre deux types d'alimentations

Paramètre	Alimentation par micro-ruban	Alimentation par proximité
S11(dB)	-33.418	-33.19
Directivité (dBi)	8.10	7.82
Gain(dBi)	7.57	7.42
Bande passante(MHz)	240	320
Fr(GHz)	10	10

### • Comparaison des résultats

D'après les résultats du **Tableau II- 14** nous remarquons que l'alimentation par proximité augmente la bande passante par rapport à l'alimentation par micro-ruban en revanche la directivité dans le cas de l'alimentation par ligne micro-ruban reste meilleur par rapport à l'alimentation par proximité.

## II.4. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons étudié l'influence de la permittivité, de la variation de la hauteur du substrat et du changement du type d'alimentation sur les performances de l'antenne patch rectangulaire sous le logiciel ADS. Les résultats obtenus sont :

- L'antenne ayant une permittivité faible donne des meilleurs résultats par rapport aux antennes ayant des permittivités élevées,

- La hauteur du substrat influe sur la bande passante : plus l'épaisseur du substrat augmente plus la bande passante s'élargie.
- La bande passante de l'alimentation par proximité est meilleure que celle de l'alimentation par micro-ruban.

## **Chapitre III. Le réseau d'antenne imprimé**

### III.1. Introduction

La communication sans fil ne cesse d'évoluer ces dernières décennies. Le besoin de communiquer sur les grandes distances avec une grande capacité de transmissions des informations, a donné naissance aux nouvelles technologies de télécommunication dans lesquelles l'utilisation d'une antenne unitaire est souvent insuffisante pour répondre aux contraintes de rayonnement imposées. Alors, il est possible de former un ensemble d'éléments rayonnants pour avoir la caractéristique de rayonnement désirée.

L'antenne étant l'organe clé de la télécommunication terrestre et spatiale. C'est grâce à elle que l'énergie électrique est transformée en énergie électromagnétique rayonnée dans l'espace. Le gain et la directivité des antennes élémentaires sont souvent assez faibles pour répondre aux exigences de certaines applications. Leur association crée un réseau dont la particularité est d'avoir un gain plus élevé dans une directivité privilégiée. [16]

Ce troisième chapitre propose un réseau d'antennes alimenté en parallèle dans le but de tester son aptitude à améliorer les performances de l'antenne élémentaire conçue précédemment

### III.2. Technique d'alimentation d'un réseau d'antenne imprimée

L'alimentation d'un réseau d'antenne a pour but d'assurer la répartition de l'énergie sur les différentes antennes élémentaires en respectant la loi de pondération. Dans le cas d'un réseau d'antenne patch le principe de répartition de l'énergie se fait par des lignes micro-rubans et des transformateurs quart d'onde. Selon le besoin, le réseau d'excitation d'antenne peut avoir différentes l'architectures. On en distingue deux qui sont :

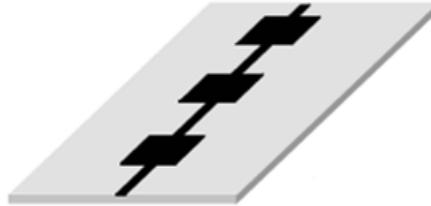
- Alimentation en série
- Alimentation en parallèle

L'alimentation en série aura une bande passante plus étroite que celle en parallèle car les lois de pondération sont plus sensibles à la fréquence de résonance.

#### III.2.1. Alimentation en série

Les éléments rayonnants sont alimentés en série c'est-à-dire sont disposées linéairement et sont reliés les uns après les autres à travers une ligne de transmission. Chaque ligne comporte à l'entrée un déphaseur, lui-même relié en quadrature à un guide de puissance commun.

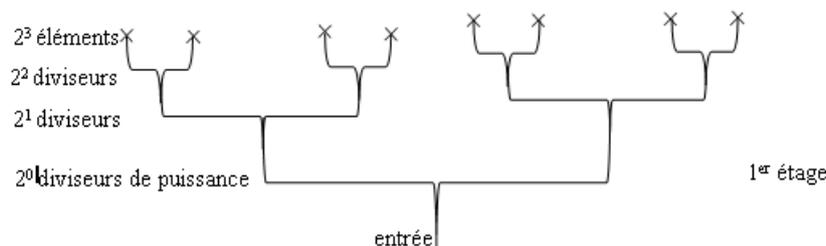
La distance entre les antennes doit être égale et le signal doit atteindre le déphaseur avec la même phase pour éviter une erreur de phase. [16] [19]



**Figure III- 1 :** Alimentation en série

### III.2.2. Alimentation en parallèle

Ce circuit d'alimentation possède une entrée et plusieurs sorties égales aux nombres des éléments rayonnants. Cette technique consiste à alimenter  $2^n$  éléments rayonnants pour  $n$  étages et de  $2^{n-1}$  diviseurs de puissance pour chaque étage. Il est important de noter que les réseaux en parallèles ont des longueurs de ligne plus longues et plus de courbures ce qui crée plus de pertes surtout dans les bandes millimétriques. Afin que la répartition d'énergie sur les différentes antennes élémentaires soit uniforme il est judicieux d'utiliser un diviseur de puissance. Parmi les diviseurs utilisés nous avons :



**Figure III- 2 :** Alimentation en parallèle

#### III.2.2.1. Diviseur de Wilkinson

Afin que la répartition de la puissance entre les différents éléments soit équitable il est préférable d'utiliser un diviseur de type de Wilkinson, il possède des propriétés spéciales telle que : réseau à faible perte d'insertion et d'isolation entre les ports de sorti est assurée par une résistance  $R$ , mais son principal inconvénient apparait au niveau de la soudure des deux bords de la résistance [20].

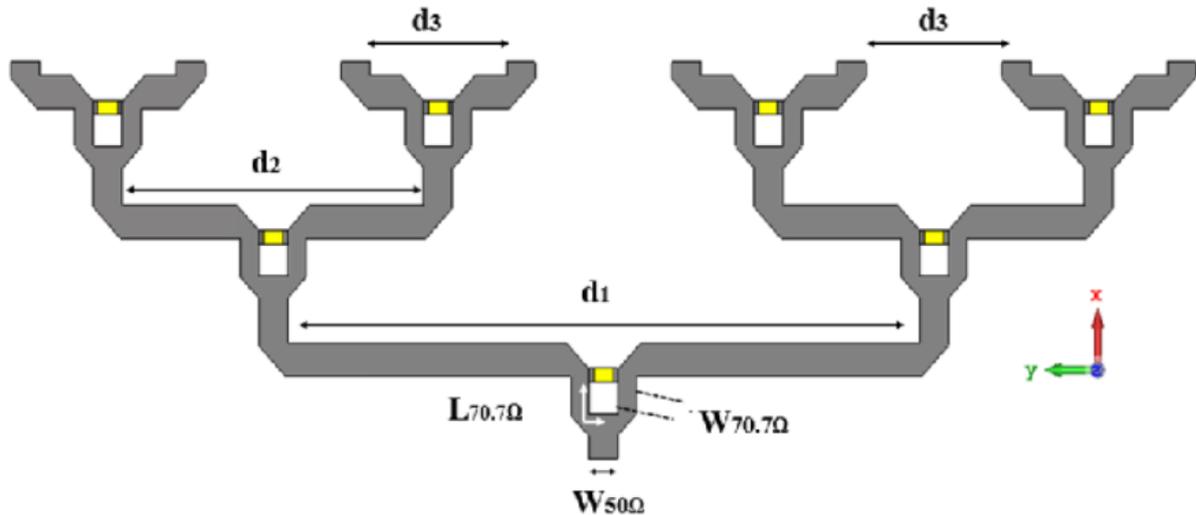


Figure III- 3 : Un réseau d'antenne diviseur avec Wilkinson

III.2.2.2. La transformée en quart d'onde

C'est une méthode d'adaptation d'impédance utilisée dans les réseaux d'antennes et bien d'autres applications pour minimiser les pertes de puissance entre la ligne d'alimentation et la charge et pour que la répartition de la puissance entre les éléments soit équitable.

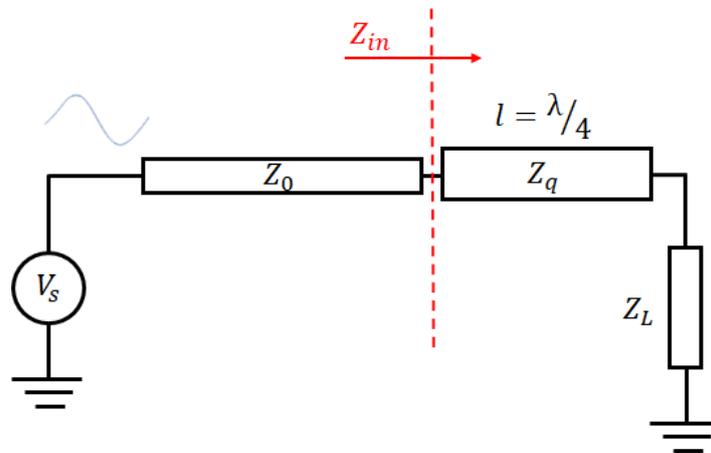


Figure III- 4 : Transformée en quart d'onde

$$Zq = \sqrt{Z0 * Zl} \tag{III.1}$$

Dans le cas d'un réseau d'antenne l'impédance d'entrée  $Z0=50 \Omega$ , l'impédance la charge  $Zl=100 \Omega$  et entre les deux est situé une ligne quart d'onde d'impédance  $Zq=70 \Omega$

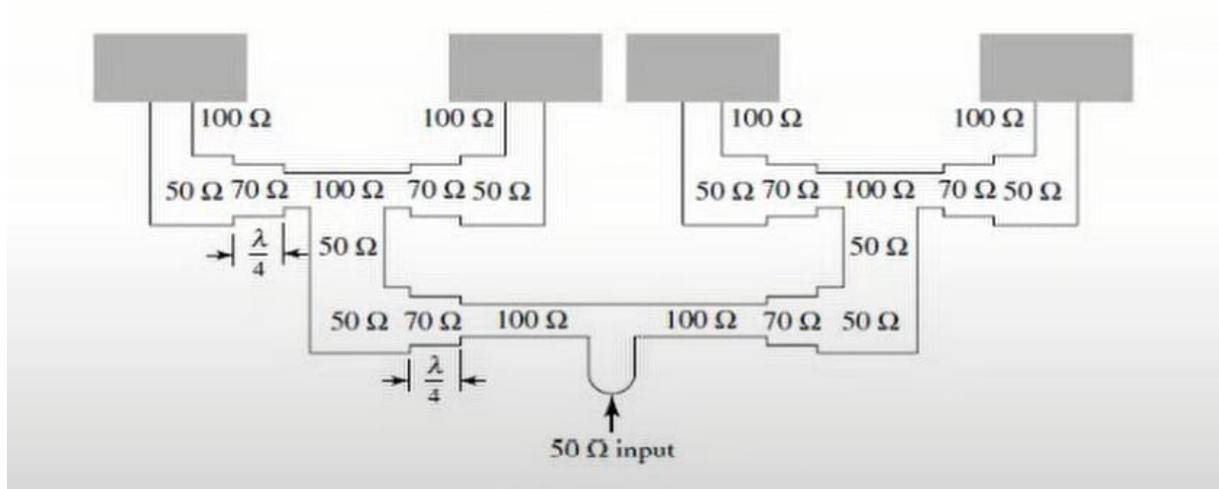


Figure III- 5 : Un réseau d'antenne avec la transformée en quart d'onde

### III.3. Domaines d'applications des réseaux d'antennes

Les réseaux d'antennes patch sont utilisés dans plusieurs applications telles que dans :

- La téléphonie mobile (les terminaux portatifs GSM, DCS, PCS, etc.)
- Antennes sur stations de bases ;
- Télévisions directe domestique ou dans les véhicules ;
- Les systèmes radars,
- Aéronautique (systèmes d'atterrissages) ;
- Les applications de télémédecine et de télémésure. [16]

### III.4. Simulation et discussions des résultats

Dans la suite de ce chapitre nous allons faire la simulation des réseaux d'antennes patch ayant les mêmes dimensions que celle utilisée dans le chapitre II (**Figure II- 28**) alimentés en parallèle en utilisant la transformée en quart d'onde.

#### III.4.1. Réseau d'antennes à 2 éléments

Dans nos réseaux d'antennes les lignes de 50 Ω ont une largeur  $W=2.45710$  mm, de 70 Ω ont une largeur  $W=1.430830$  mm et de 100 Ω ont une largeur  $W=0.713563$  mm.

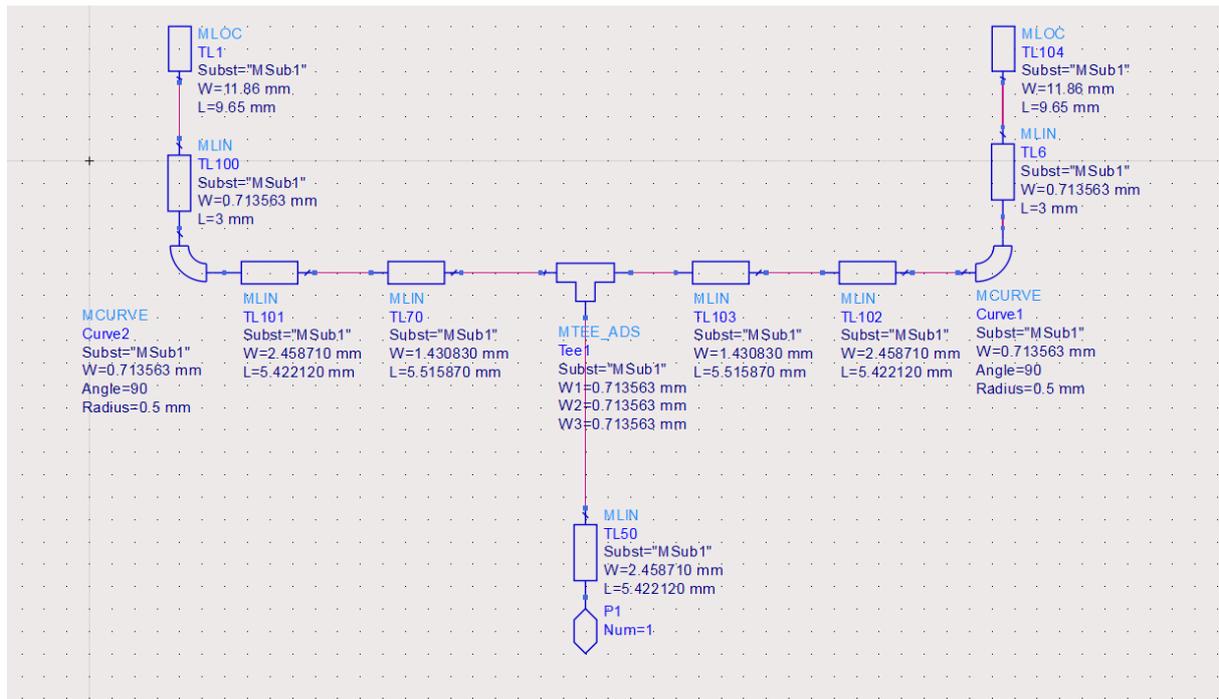


Figure III- 6 : Schématique d'un réseau d'antenne à 2 éléments

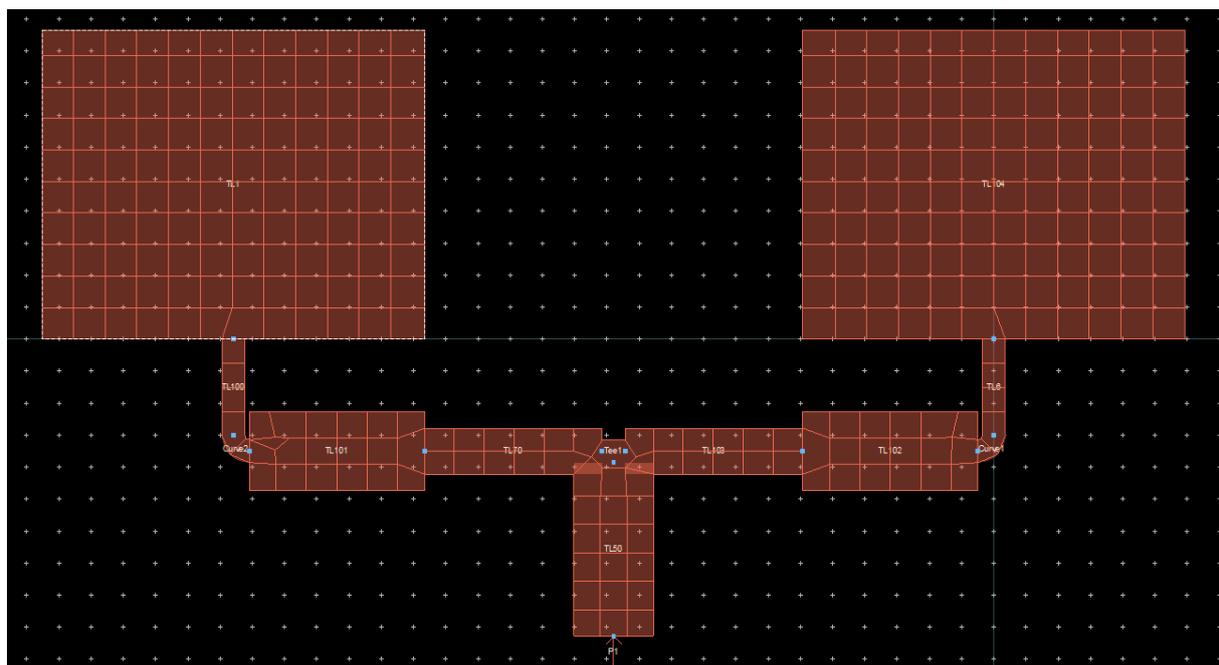


Figure III- 7 : Layout pour un réseau d'antenne à 2 éléments

La **figure III-8** montre la variation du coefficient de réflexion d'un réseau d'antenne à 2 éléments avec un S11 (dB) de -31.897 et une bande passante de 303MHz à la fréquence de résonance de 10GHz.

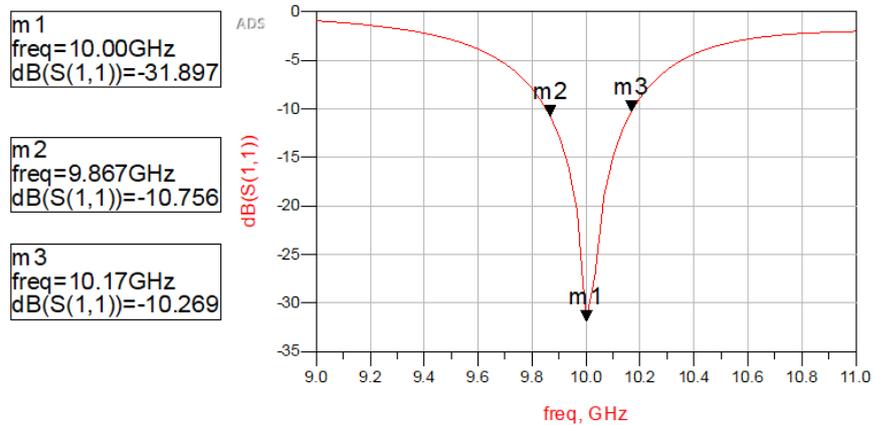
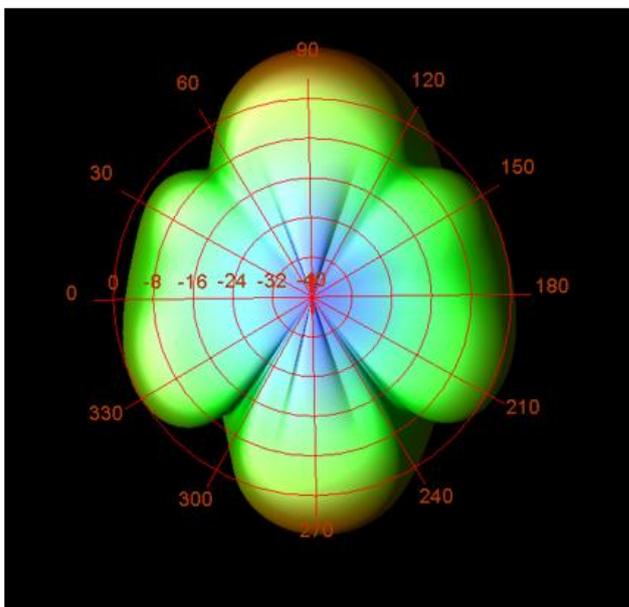
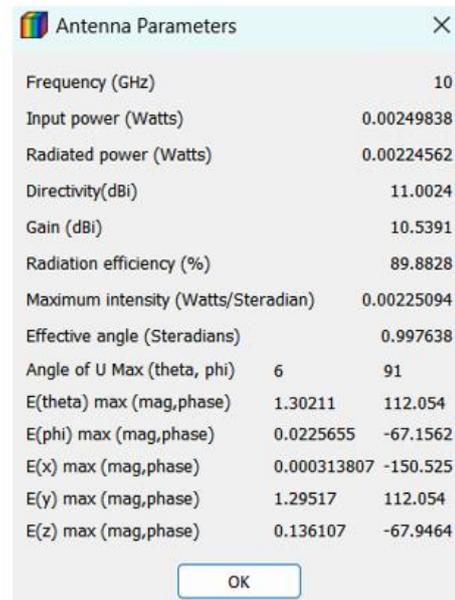


Figure III- 8 : S11(dB) pour un réseau d'antenne à 2 éléments

La **FigureIII-9** représente le diagramme de rayonnement en 2D d'un réseau d'antenne à 2 éléments avec une directivité de 11(dBi) et un gain de 10.53 (dBi). Par rapport au diagramme de rayonnement(a) on remarque qu'il présente un lobe principal entre assez large et les lobes secondaires sont moins importants.



(a)



(b)

Figure III- 9 : (a) Diagramme de rayonnement en 2D d'un réseau d'antenne à 2 éléments (b)Paramètre d'un réseau d'antenne à 2 éléments



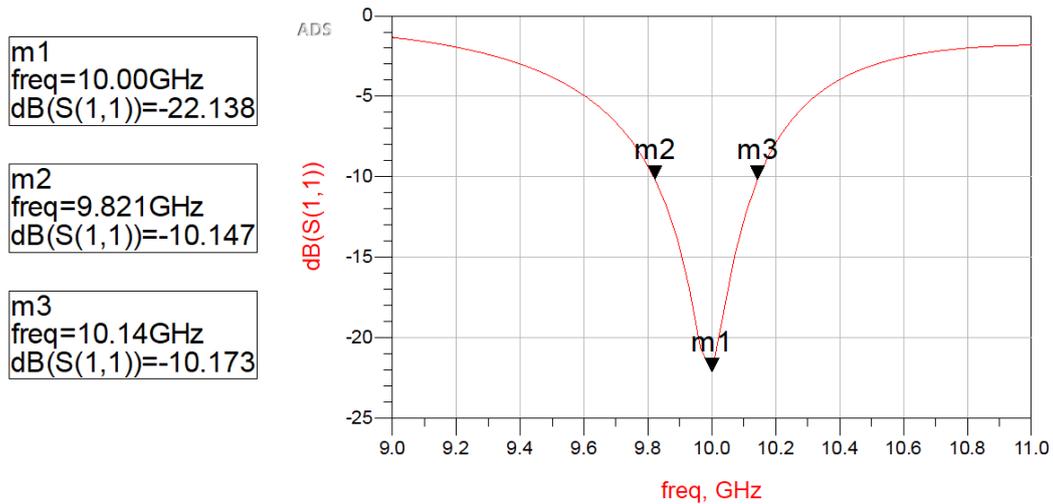


Figure III- 12 : Coefficient de réflexion pour un réseau d'antenne à 4 éléments

Figure-13 représente le diagramme de rayonnement en 2D d'un réseau d'antenne à 2 éléments avec une directivité de 13.97(dBi) et un gain de 13.57 (dBi). Selon la figure (a) on remarque que le diagramme présente un lobe principal plus étroit que le diagramme du réseau 2 éléments.

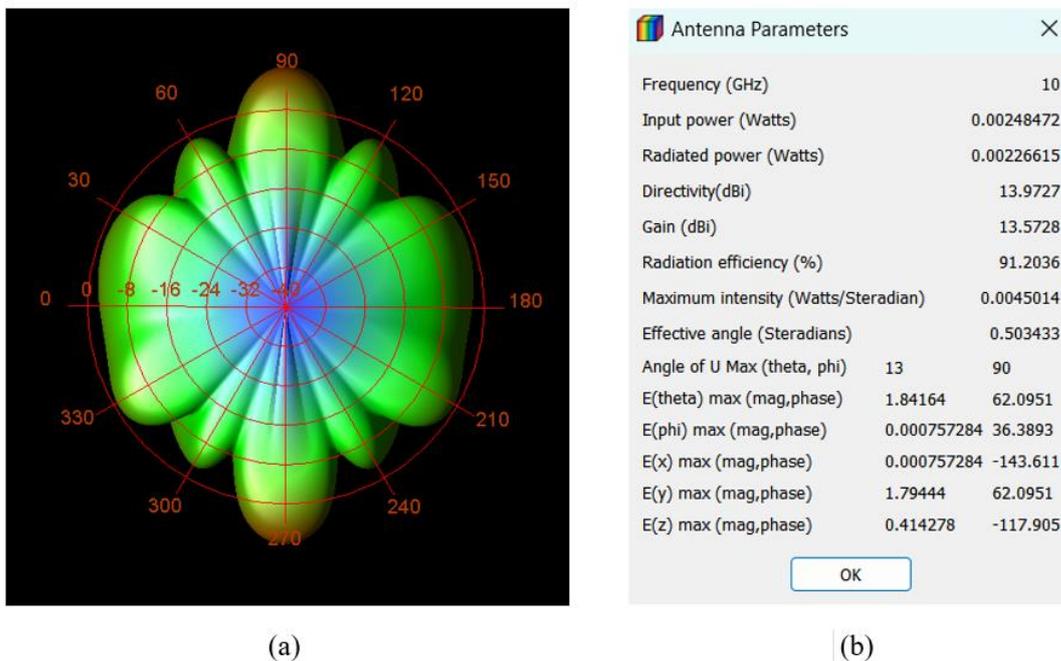


Figure III- 13 : (a) Diagramme de rayonnement en 2D d'un réseau d'antenne à 4 éléments  
(b)Paramètre d'un réseau d'antenne à 4 éléments

### III.4.3. Réseau d'antennes à 8 éléments

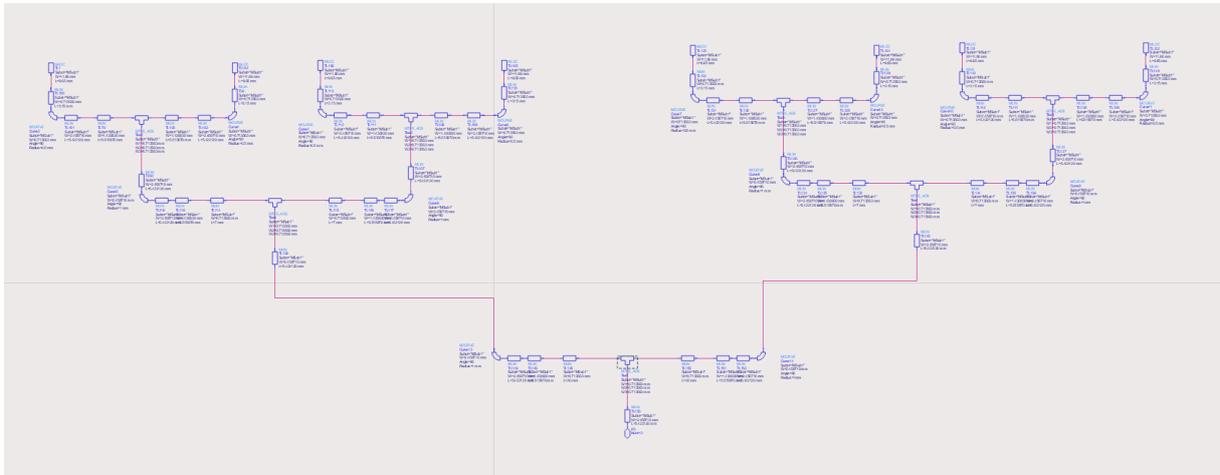


Figure III- 14 : Schématique d'un réseau d'antenne à 8 éléments

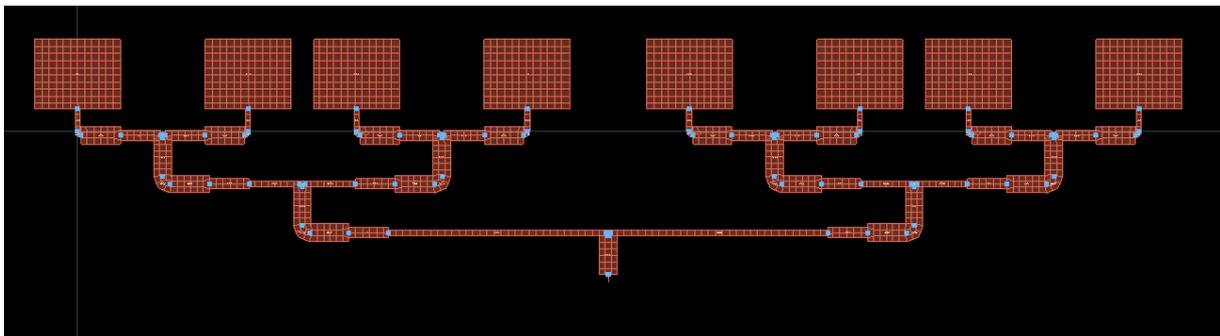


Figure III- 15 : Layout pour une antenne à 8 éléments

Figure III-16 représente la variation du coefficient de réflexion d'un réseau d'antenne à 8 éléments avec un S11 (dB) de -26.825 et une bande passante de 360MHz à la fréquence de résonance de 10GHz.

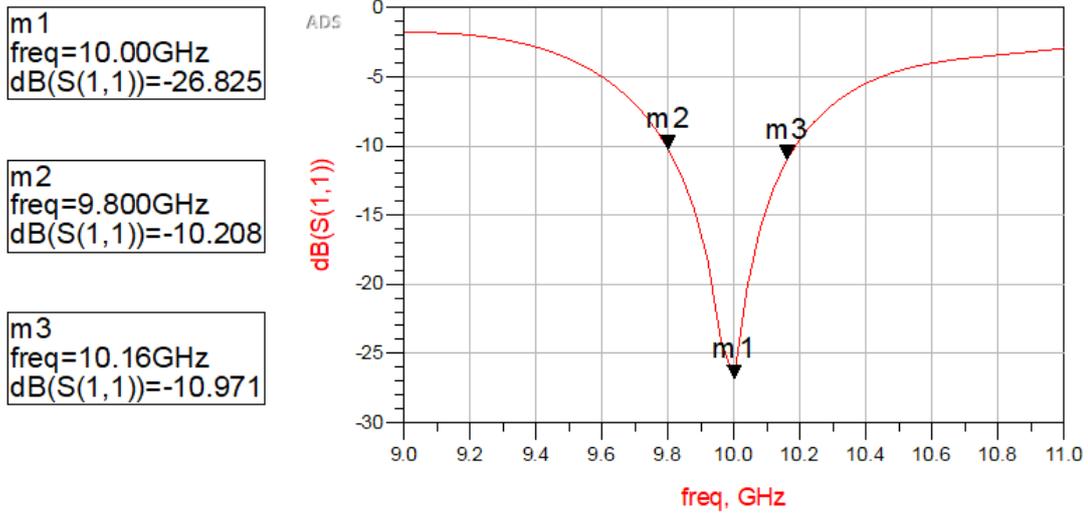


Figure III- 16 : Coefficient de réflexion pour un réseau d'antenne à 8 éléments

Figure III- 17 représente le diagramme de rayonnement en 2D d'un réseau d'antenne à 8 éléments avec une directivité de 17.16(dBi) et un gain de 16.74 (dBi). Selon la figure (a) on remarque que le diagramme présente un lobe principal encore plus étroit que le diagramme du réseau à 4 éléments présenté dans la Figure III-13(a).

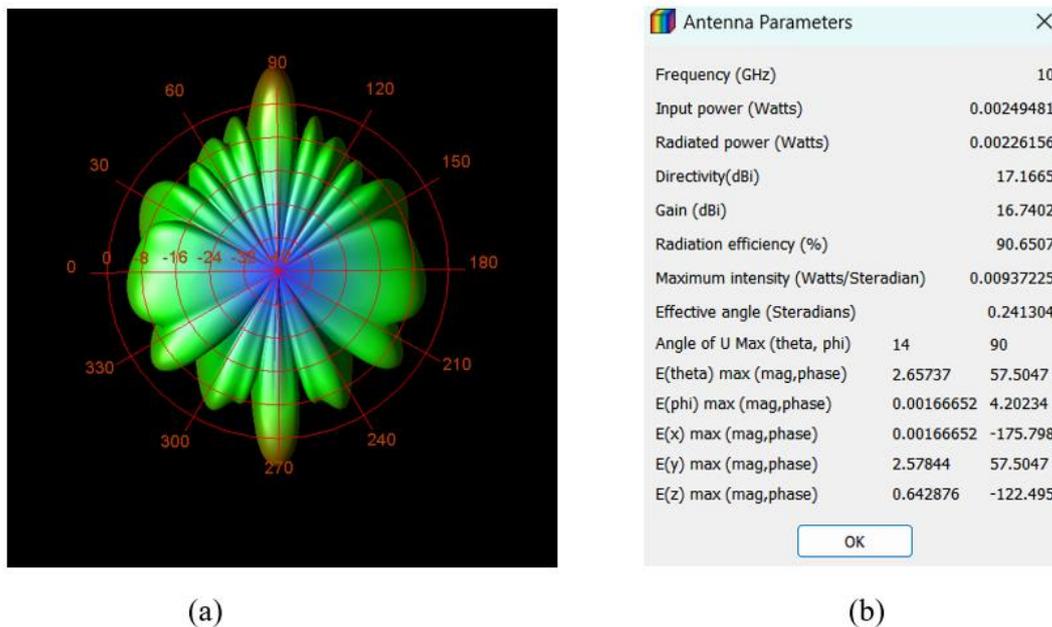


Figure III- 17 : (a) Diagramme de rayonnement en 2D d'un réseau d'antenne à 8 éléments  
(b)Paramètre d'un réseau d'antenne à 8 éléments

**Tableau-III 1** : Résultats des différents structures de l'antenne

	<b>S11(dB)</b>	<b>Directivité(dBi)</b>	<b>Gain(dBi)</b>	<b>Bande passante(MHz)</b>	<b>Fr(GHz)</b>
Antenne à 1 élément	-33.148	8.10	7.57	283	10
Réseau d'antenne a 2 éléments	-31.89	11	10.53	303	10
Réseau d'antenne a 4 éléments	-22.138	13.97	13.57	319	10
Réseau d'antenne a 8 éléments	-26.82	17.16	16.74	360	10

A partir du **Tableau III- 1** nous remarquons que:

- Plus le nombre d'éléments rayonnants augmente dans le réseau d'antenne plus la directivité et le gain augmentent ;
- La bande passante d'un réseau d'antenne est plus large que celle d'un seul élément ;
- Le S11 d'une seule antenne est plus importante que le S11 d'un réseau d'antenne.

### III.5. Conclusion

Au cours de ce chapitre nous avons étudié et simulé la conception d'un réseau d'antennes patch et comparé ces résultats à celle de l'antenne élémentaire étudié dans le chapitre II.

Nous remarquons une augmentation considérable des performances en terme de directivité, gain, et bande passante et une diminution du coefficient de réflexion lié aux difficultés d'adaptation de l'antenne à plusieurs éléments.

Le résultat obtenu par la formation d'un réseau d'antenne est promoteur vis-à-vis de l'utilisation de la structure proposée (réseau alimenté en parallèle) comparé aux performances d'une antenne patch rectangulaire.

## Conclusion générale

L'antenne étant l'élément indispensable dans la transmission sans fil, le patch trouve son potentiel par rapport aux autres antennes sur son faible coût, sa réalisation facile, son utilisation dans les applications à hautes fréquences.

Ce mémoire nous a permis d'étudier l'influence des paramètres géométriques sur les performances d'une antenne patch rectangulaire fonctionnant dans la bande des 10GHz. Ce type d'antenne opérant en X band est utilisé dans de nombreux domaines tels que le secteur militaire, les radars, les communications par satellite, les applications médicales.

La simulation a été faite sur le logiciel ADS largement utilisé pour la conception des circuits à hautes fréquences dans le domaine professionnel. En revanche, peu de projets (PFE) ont effectués leurs simulations sur ADS, ceci nous a fortement incité à établir un cahier des charges où la simulation est faite par ADS. Ce manuscrit contient des détails approfondis sur les manières de faire la simulation sur ADS.

Les résultats obtenus ont montré que :

- Les substrats ayant les faibles permittivités présentent des bonnes performances par rapport aux substrats ayant des permittivités élevées ;
- Il existe une relation de linéarité entre la bande passante et la hauteur du substrat plus la hauteur augmente plus la bande passante s'élargie

Le changement de la ligne d'alimentation nous prouve que l'alimentation par proximité offre une large bande passante par rapport à l'alimentation par ligne micro-ruban.

L'alimentation par proximité laisse beaucoup de possibilité d'étude à explorer, comme le changement de la hauteur et de la permittivité des substrats, le changement de la position d'alimentation.

Nous avons pu observer des améliorations en passant vers la structure de réseau d'antenne patch en parallèles, surtout au niveau de la directivité et du gain par rapport à l'antenne unitaire. Cela montre l'intérêt d'utiliser un réseau d'antenne (Nx1) pour les applications qui requièrent des performances plus élevés, sachant que l'antenne patch lui-même est connue pour son faible gain et sa faible bande passante.

Dans ce contexte, plusieurs voies en perspectives peuvent être explorés :

- Simulation d'un réseau d'antenne à alimentation série ;

- La comparaison entre les deux réseaux : alimentation parallèle et alimentation série ;
- Variation de la distance entre les éléments rayonnants ;
- Etablir un réseau d'antenne avec une structure plus complexe qui est l'alimentation par proximité puisque celle-ci nous a permis d'avoir une antenne élémentaire avec une bande passante plus large que celle offerte par l'alimentation miro ruban.

## *Références bibliographiques*

- [1] Y. W. SIDI et B. . B. KHATIR, «Conception d'un réseau d'antennes patch pour les applications satellitaires en bande C,» Master en Télécommunications, Université Belhadj Bouchai- Ain Temouchent, 2021.
- [2] F. P. RAKOTOMAMONJY, «Etude et conception d'une antenne patch pour la bande de 2.4 GHz,» Licence en Télécommunications, Université d'ANTANANARIVO, 2017.
- [3] H. MOURAD, «Modélisation d'une antenne patch réalisé sur substrat à tenseurs de permittivité et de perméabilité diagonaux,» Magister en Electronique, Université de Batna, 2009.
- [4] S. Boussaha, «Contribution à l'étude et la modélisation des antennes imprimées rectangulaire Applications aux systèmes de communication,» Magister en Télécommunications, Université 8Mai 1945 – Guelma, 2012.
- [5] S. ZENAGUI et R. R. SAHRAOUI, «Influence de substrat sur les performances des antennes imprimées,» Master en Télécommunications, Université Belhadj Bouchaib d'Ain-Temouchent, 2020.
- [6] M. BENMEZIANE et E. S. SALEMI, «Etude et Simulation des paramètres d'une antenne patch rectangulaires 2.45GHz sous l'effet de la température,» Master en Systèmes des Télécommunications, Université Dr. Yahia Fares de Médéa , 2021.
- [7] N. E. H. KADI et H. S. BEN, «Conception d'une antenne UHF pour la réception de la Télévision,» Master en Systèmes en Télécommunications, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2020.
- [8] W. ABDELLAOUI et F. CHERGUI , «Etude de l'antenne patch rectangulaire par le modèle de la cavité,» Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, 2012.
- [9] B. OUADIAA et R. ABDELATI, «Etude paramétrique des antennes patchs rectangulaire alimentées par proximité,» *Mediterranean Telecommunications journal*, vol. 1, pp. 2-3, 2016.
- [10] A. BELGUESSOUM, «Conception et réalisation d'une antenne multibandes alimentée par un guide d'onde coplonaire CPW,» Thèse de doctorat, Université d'Ottawa, 2008.
- [11] A. CHAIMA, «Etude et conception d'une antenne reconfigurable pour les applications WLAN,» Master en Electronique, Université Mohamed Boudiaf- M'Sila, 2018.
- [12] H. M. YOUSOUFI et G. NDLOVU, «Antennes imprimées à polarisation circulaire alimentées par couplage par fente pour des application 5G,» Master en Systèmes des télécommunications, Université de Mostaganem, 2022.
- [13] . Y. BENCHERIF et F. BOUGUENINA , «Réseaux d'antenne patch pour application spatial,» Mastre en Réseaux Télécommunications, Université Belhadj Bouchaib–Ain Temouchent, 2021.
- [14] M. GUENNACH, «Conception d'une antenne "PIFA" multibandes pour des applications sans fil,» Ingénieur d'Etat en Systemes Electroniques & Télécommunications, Université Sidi Mohamed Ben Abdellah Fès, 2016.

- [15] H. . E. BELKHIRI et . O. SEGHIRI , «Conception et simulation d'un réseau d'antennes micro-rubans triangulaires à BIEà deux éléments,» Master en Systèmes des télécommunication , Université Mohamed Boudiaf - M'SILA, 2020.
- [16] A. LARBI et T. M. MEHTAR, «Conceptions et simulations des techniques d'alimentation d'un réseau d'antennes micro-rubans,» Master en Réseaux Telecommunications, Université Belhadj Bouchaib –Ain Temouchent, 2022.
- [17] B. ABDELOUAHAB, «Etude d'une antenne microruban excitée par une ligne imprimée,» Thèse de doctorat, Université de Batna-2.
- [18] H. E. BELKHIRI et O. SEGUIRI, «Conception et simulation d'un réseau d'antennes micro-rubans triangulaires a BIE à deux éléments,» Master en Systèmes des Telecommunications, Université Mohamed Boudiaf -M'SILA, 2020.
- [19] N. GUELLIL , «Etude et conception d'un réseau d'antennes beamforming à base de la matrice de Butler en utilisant ADS Momentum,» Masgister en Communication, Université Ferhat Abbas-Setif 1-UFAS (ALGERIE) .
- [20] S. TOUKALI et K. YAALAOUI, «Conception et simulation d'un réseau linéaire d'antennes imprimées,» Master en Systèmes des Télécommunications, Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj(Algérie), 2021.