

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République algérienne démocratique et populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
المركز الجامعي لعين تموشنت
Centre Universitaire Belhadj Bouchaib d'Ain-Temouchent Institut de Technologie
Département de Génie Electrique



Projet de fin d'études
Pour l'obtention du diplôme de Master en :
Filière : Télécommunications
Spécialité : Réseaux de Télécommunications

Thème

**Influence du substrat sur les performances des antennes
imprimées**

Présenté Par :

- ZENAGUI Sarra
- SAHRAOUI Rita Rania

Devant le jury composé de :

BENDIMERAD Karim	MAA	C.U.B.B (Ain Temouchent)	Président
FEROUANI Souheyla	MCA	C.U.B.B (Ain Temouchent)	Examinatrice
MOULESSEHOUL Wassila	MCB	C.U.B.B (Ain Temouchent)	Encadrante

Année universitaire 2019/2020

Remerciements

Ce travail a été réalisé au niveau de centre universitaire Belhadj Bouchaib Aintemouchent.

Notre gratitude s'adresse à Mme **Moulessehouli Wassila** pour son encadrement, son orientation, ses conseils et la disponibilité qu'elle nous a témoignée pour nous permettre de mener à bien ce travail.

Nous tenons à exprimer nos vifs remerciements à Mr **BENDIMERAD Karim** qui a accepté de présider le jury de soutenance, pour tout ce qu'il a pu nous apprendre ; qu'il trouve ici l'expression de notre profonde et sincère reconnaissance.

A Mme **FEROUANI Souheyla** pour nous avoir fait l'honneur d'accepter d'examiner ce travail.

Enfin, on remercie tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin dans l'élaboration de ce travail.

Dédicace

Je dédie ce mémoire à :

*Ma mère Khadidja, qui m'a soutenu et encouragé durant ces années
d'études.*

*Mon père Abdelkader, qui m'a fourni un soutien et une confiance sans
faillir.*

*Ma sœur Shemsdoha et mon petit frère Ahmed qui ont été à côté de
moi dans tous les obstacles.*

Tous ceux qui m'aiment.

Merci !

Sarra



Je dédie ce mémoire

*A mes chers parents et mon frère Adel
qui ont fait des sacrifices et crus en
moi tout au long de mon parcours
scolaire.*

*A mes amis, mes camarades et mes
cousines qui m'ont soutenue.*

*Sans oublier tous les professeurs que
ce soit du primaire, du moyen, du
secondaire ou de l'enseignement
supérieur.*

Rita

Résumé

Aujourd'hui, avec l'évolution du domaine de télécommunications, l'antenne est devenue le dispositif indispensable dans l'industrie des applications de communication multimédias (donné, voix, vidéo). Dans notre mémoire, nous avons implémenté sous le logiciel CST Microwave Studio une antenne rectangulaire, après le calcul des paramètres géométriques, afin d'étudier l'influence de la permittivité et l'épaisseur du substrat sur les caractéristiques de l'antenne imprimée (coefficient de réflexion, VSWR, gain, directivité...)

Mot clé : antenne imprimée, CST, Substrat.

Abstract

Today, with the evolution of the telecommunications domain, the antenna has become the indispensable device in the industry of multimedia communication applications (data, voice, video). In this work, we implemented a rectangular antenna using the CST Microwave Studio software, after the geometric parameters were calculated, in order to study the influence of both permittivity and thickness of the substrate on the characteristics of the printed antenna (coefficient reflection, VSWR, gain, directivity ...)

Keywords: patch antenna, CST, Substrat.

ملخص

اليوم، مع تطور مجال الاتصالات، أصبح الهوائي الجهاز الذي لا غنى عنه في صناعة تطبيقات اتصالات الوسائط المتعددة (البيانات والصوت والفيديو). في أطروحتنا، قمنا بتنفيذ هوائي مستطيل باستخدام برنامج CST Microwave Studio، بعد حساب المعلمات الهندسية، من أجل دراسة تأثير السماحية وسمك الركيزة على خصائص الهوائي المطبوع (المعامل) انعكاس، VSWR، كسب، اتجاهية...)

كلمات مفتاحية: هوائي مطبوع, CST, الركيزة.

Table des matières

Remerciements	i
Dédicace.....	ii
Résumé	iv
Table des matières.....	v
Liste des figures	vii
Liste des tableaux	ix
Liste des Acronymes.....	x

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

Chapitre I : Généralités sur les antennes imprimées

I.1-Introduction	2
I.2-Description des antennes imprimés	2
I.2.1- Le Plan de masse	3
I.2.2- Le Substrat	3
I.2.2.1 Type de substrat	3
I.2.2.2 Caractéristiques des matériaux diélectriques	4
I.2.2.3 Critères de sélection du substrat	5
I.2.3- L'élément rayonnant	6
I.3-Techniques d'alimentation	7
I.3.1-Alimentation par ligne micro-ruban dans le plan de l'élément rayonnant	7
I.3.2-Alimentation par sonde coaxiale	8
I.3.3-Alimentation par ouverture (ou par fente)	9
I.3.4-Alimentation par proximité	10
I.4-Comparaison entre les différentes techniques d'alimentation	11
I.5-Caractéristiques des antennes	11
I.5.1-Le Coefficient de réflexion S_{11}	11
I.5.2-La Directivité	11
I.5.3-Le Gain	12
I.5.4-Le Rendement	12
I.5.5-L'Ouverture	13
I.5.6-Impédance d'entrée	13

I.5.7- Le Diagramme de rayonnement	13
I.5.8-La bande passante (BP)	14
I.5.9-Fréquence de résonance	14
I.6-Avantages et limites des antennes imprimées	15
I.7-Les domaines d'applications des antennes imprimées	15
I.8-Conclusion	16

Chapitre II : Simulation et résultats

II.1 Introduction	17
II.2 Présentation du logiciel	17
II.3 Simulation et optimisation d'une antenne rectangulaire	18
II.3.1 Calcul des paramètres géométriques de l'antenne	18
II.3.2 La structure de l'antenne patch	19
II.3.3 Simulation et optimisation	19
II.4 Influence de la permittivité sur les performances de l'antenne	20
II.5 Influence de l'épaisseur de substrat sur les performances de l'antenne patch	30
II.6 Conclusion	36
Conclusion générale et perspectives	37
Références bibliographiques	38

Liste des figures

Figure I-1: Schéma d'une antenne à éléments rayonnants imprimées	2
Figure I-2: divers types d'éléments rayonnants	7
FigureI-3: Antenne imprimée alimentée par ligne micro-ruban	8
FigureI-4: Antenne imprimée alimentée par sonde coaxiale	9
FigureI-5: Antenne imprimée alimentée par fente	10
FigureI-6: Antenne imprimée alimentée par proximité.	10
FigureII-1 : Structure de l'antenne patch sous CST	19
FigureII-2 : Simulation du coefficient de réflexion S11	19
FigureII-3 : Résultat du coefficient de réflexionS11après optimisation	20
Figure II-4: VSWR du RF-350	21
FigureII-5 : Diagramme de rayonnement en 3D et en polaire du Gain	21
FigureII-6 : Diagramme de rayonnement en 3D et en polaire de la Directivité	22
Figure II-7: Coefficient de réflexion S11 du FR-4	23
Figure II-8 : VSWR du FR-4	23
Figure II-9 : Diagramme de rayonnement en 3D et en polaire du Gain	24
Figure II-10: Diagramme de rayonnement en 3D de la Directivité	24
Figure II-11 : Coefficient de réflexion S11 pour le Quartz	25
Figure II-12 : VSWR du Quartz.....	25
FigureII-13 : Diagramme de rayonnement en 3D et en polaire du Gain	26
Figure II-14 : diagramme de rayonnement en 3D de la directivité.....	26
Figure II-15: Coefficient de réflexion S11 du Téflon	27
Figure II-16 : Coefficient de réflexionS11 de l'Alumine	27
Figure II-17 : Coefficient de réflexion S11 du Silicium	28
FigureII-18 : Coefficient de réflexionS11 pour h=0.8 mm.....	30

Figure II-19 : VSWR pour $h=0.8\text{mm}$	30
FigureII-20 : Diagramme de rayonnement en 3D du Gain	31
FigureII-21 : Diagramme de rayonnement en 3D de la Directivité	31
Figure II-22 : Coefficient de réflexion S11 pour $h= 1.2\text{mm}$	32
Figure II-23 : Coefficient de réflexion S11 pour $h= 2\text{mm}$	32
Figure II-24 : Coefficient de réflexion S11 pour $h= 2.4 \text{ mm}$	33
Figure II-25 : Coefficient de réflexion S11 pour $h= 2.8 \text{ mm}$	33
Figure II-26 : Coefficient de réflexion S11 pour $h= 3.2 \text{ mm}$	34

Liste des tableaux

Tableau I-1: Les substrats soft	4
TableauI-2: Les substrats hard.....	4
TableauI-3 : Matériaux diélectriques.....	5
Tableau I-4 : Comparaison entre les différentes techniques d'alimentation.....	11
TableauII-1 : équations de calculs des dimensions de l'antenne patch rectangulaire	18
TableauII-2 : Influence du type de substrat sur les performances de l'antenne	29
Tableau II-3 : Influence de l'épaisseur de substrat sur les performances de l'antenne	35

Liste des Acronymes

T.M.M: Thermoset Microwave Material

GSM: Global System for Mobile communication

DCS: digital cellular system

MMICs: monolithic microwave integrated circuit

CST :Computer Simulation Technology

FIT : Finite Intégration Technique

Radar : **Radio Détection** And Ranging

3D : Trois dimensions

Wi-Fi: Wireless Fidelity

VSWR:voltage standing wave ratio

dB: decibel.

GHz: gigahertz.

MHz : megahertz

Introduction Générale

Introduction Générale

Introduction générale

Le concept de l'antenne patch est apparu dans les années 1950, mais le véritable développement ne s'est fait que dans les années 1970, et jusqu'au début des années 1990, les technologies micro-ruban étaient employées spécialement pour les applications militaires.

Avec le développement rapide de la technologie et le changement de communications filaires en communications sans fil, l'exigence d'antenne micro-ruban est devenue de plus en plus importante dans le domaine de communications et sur le marché de la téléphonie mobile grâce à l'avantage d'être facilement intégrées dans les surfaces planes, la taille assez minimale et le poids léger, la simplicité de fabrication, le faible coût et la bonne performance au niveau de résonance, elles sont les plus utilisées puisqu'elles permettent de répondre à de nombreuses contraintes imposées par le système de transmission.

L'objectif de ce mémoire est d'implémenter sous le logiciel une antenne imprimée d'une forme rectangulaire et étudier l'influence du substrat sur ces performances à l'aide de logiciel de simulation CST-MWS. Pour atteindre cet objectif, le présent travail est composé en deux chapitres :

Le premier chapitre est réservé pour une étude générale des antennes imprimées, ainsi que leurs caractéristiques physiques, électriques. Nous avons présenté aussi les différentes techniques d'alimentation et les domaines d'applications d'un élément rayonnant.

Le deuxième chapitre est dédié à l'implémentation sous le logiciel d'une antenne imprimée ensuite la simulation et l'interprétation des résultats obtenus.

Chapitre I

**Généralités sur les antennes
imprimées**

I.1-Introduction :

Le développement du domaine des télécommunications a fait apparaître la nécessité croissante de réaliser des dispositifs micro-ondes peu coûteux et peu encombrants faisant appel à une technologie simple à manipuler. Les systèmes micro-ondes à structure micro-ruban a été à l'origine de développement des antennes imprimées.

Les antennes imprimées sont les plus utilisées puisqu'elles permettent de répondre à de nombreuses contraintes imposées par le système de transmission. Leurs dimensions favorisent leurs intégrations sur de nombreux mobiles (téléphone portable, avion. . .) [1].

Dans ce chapitre nous donnons une présentation générale des antennes imprimées ainsi que leurs caractéristiques, les différentes méthodes d'alimentations et principe de fonctionnement en terminant par les avantages et limitations de ces derniers.

I.2-Description des antennes imprimées :

Une antenne à éléments rayonnants imprimés est constituée d'un plan de masse et d'un substrat diélectrique, dont la surface porte un ou plusieurs éléments métallisés, appelés en anglais « patch », « pavé » ou « motif » en français (voir *Figure I-1*).[2]

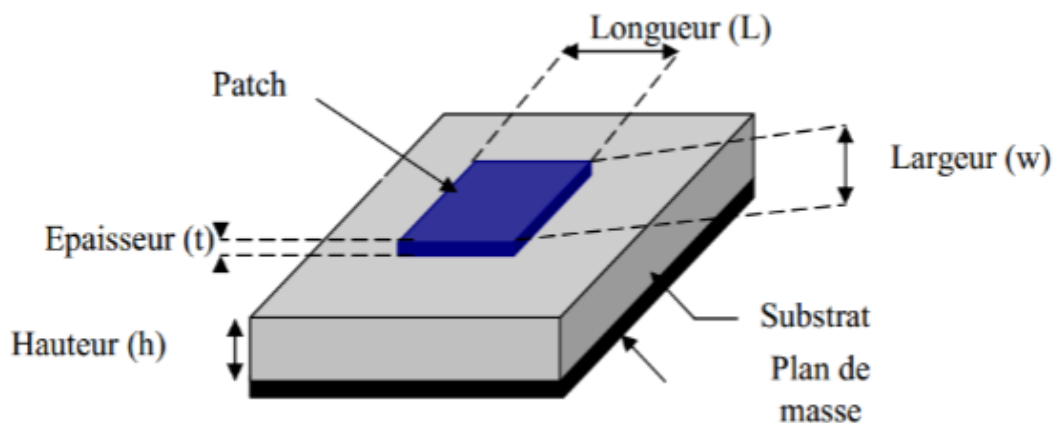


Figure I-1: Schéma d'une antenne à éléments rayonnants imprimées. [17]

Ces éléments rayonnants sont de différentes formes et leur alimentation peut être effectuée par divers procédés permettant d'obtenir un diagramme en polarisation linéaire ou circulaire.

Les paramètres physiques et géométriques liés à cette structure sont [2]:

- La permittivité relative de diélectrique (ϵ_r).
- La tangente des pertes ($\tan \delta$) dans ce même substrat, avec dominance des pertes par effet joule.
- L'épaisseur du diélectrique (elle doit rester faible par rapport à la longueur d'onde à transmettre).
- Les dimensions de l'élément rayonnant (L, W).

I.2.1- Le Plan de masse :

Il doit être théoriquement de dimension infinie mais en pratique celui-ci est plutôt, pour des raisons d'encombrement, de l'ordre de 3 ou 4 longueurs d'onde. Il arrive cependant que celui-ci soit très réduit, ce qui bien évidemment modifie les caractéristiques de l'antenne initiale, parfois de manière très prononcée [2].

I.2.2- Le Substrat :

Le substrat joue un rôle double dans la technologie micro ruban. Il est à la fois un matériau diélectrique, où viennent se graver les circuits, et une pièce mécanique, car il supporte la structure. Cela implique des exigences à la fois sur le plan mécanique et électrique parfois difficiles à concilier, d'épaisseur généralement faible devant la longueur d'onde de fonctionnement, le substrat diélectrique affecte le comportement et les performances électromagnétiques de l'antenne. On préfère souvent utiliser des substrats à faibles pertes diélectriques ($\tan \delta < 10^{-3}$) qui favorisent le rendement de l'antenne et ceux à permittivité relative faible ($\epsilon_r < 3$) qui améliorent le rayonnement tout en diminuant les pertes par ondes de surface pour une hauteur donnée [3].

I.2.2.1 Type de substrat :

Généralement il y a deux types de substrats utilisés, les substrats dits soft et hard.

- Les substrats soft sont plus flexibles, moins chers et peuvent être facilement fabriqués, néanmoins, ils possèdent de grands coefficients d'expansion thermale (**Tableau I-1**) [4].

Substrat	Constante diélectrique relative (ϵ_r)	Constante diélectrique Effective (ϵ_{eff})	Pertes diélectrique $Tan\delta$
RT-Duroid-5880	2.2	2.1144	0.0011
RT-Duroid-5870	2.33	2.2352	0.0011
Neltec NX 9240	2.4	2.3002	0.0010
Arlon Diclاد 522	2.5	2.3931	0.0010
Benzocyclobu-ten	2.6	2.4859	0.0010

Tableau I-1: Les substrats soft [4]

- Par contre Les substrats *hard* (**Tableau I-2**) sont plus fiables, et ils possèdent des petits coefficients d'expansion thermique. Néanmoins ils sont plus chers et non flexibles.

Ce tableau présente quelques exemples du hard substrat :

Substrat	Constante diélectrique relative (ϵ_r)
Quartz	$\epsilon_r=3.78$
Saphire	$\epsilon_r=11.7$
GaAs	$\epsilon_r=12.3$

Tableau I-2: Les substrats hard.[4]

I.2.2.2 Caractéristiques des matériaux diélectriques :

Dans la conception des antennes patch plusieurs matériaux diélectriques de plusieurs catégories sont utilisés pour chaque nécessité de performance et de besoin de qualité. Car le domaine des

antennes est toujours non stable à cause de l'utilisation des ondes électromagnétiques et à cause de la forme et la taille de l'antenne requise, (voir *TableauI-3*)

CATEGORIE	EXEMPLE
Les matériaux céramiques	l'alumine (Al ₂ O ₃)
Les matériaux semi-conducteurs	Arséniure de Gallium (GaAs) Silicium (Si).
Les matériaux ferrimagnétiques	Ces matériaux comprennent les substrats Ferrite et YIG.
Les matériaux synthétiques	le polyéthylène, le polyester, le téflon, le polypropylène, etc
Les matériaux chiraux	on peut construire des matériaux chiraux en incluant périodiquement dans une matrice de matériau diélectrique des inclusions de matériau fortement conducteur.
Les matériaux T.M.M (Thermoset Microwave-Material)	substrats TMM-3, TMM-4, TMM-6, TMM-10
Les matériaux RO3000	Ils sont fabriqués par ajout de poudre céramique au Téflon et peuvent être utilisés à haute fréquence
Les matériaux composites	DUROID 5870 – TLC- ARLON 320 En ajoutant aux matériaux plastiques de la fibre de verre , ou de la poudre de céramique .
Les matériaux photoniques	cristaux photoniques

TableauI-3 : Matériaux diélectriques. [5]

I.2.2.3 Critères de sélection du substrat :

Les critères électriques constituent la première interrogation concernant le choix d'un matériau. Ces critères incluent la constante diélectrique, les pertes diélectriques ou facteur de dissipation qui est la partie imaginaire de la constante diélectrique [3].

Le choix du substrat repose sur différents paramètres. Il y a entre autres, la permittivité, la perméabilité, l'épaisseur du substrat, les pertes, la stabilité dans le temps, la stabilité en température ainsi que la bonne tenue face aux contraintes technologiques. Pour garantir d'une part, une bonne efficacité de rayonnement et d'autre part, une bande passante importante, l'épaisseur du substrat doit être la plus élevée possible. Mais cela risque dégénérer des ondes de surface [6].

La conception des antennes micro-rubans dans le domaine des ondes millimétriques est guidée par les critères suivants pour le choix du substrat [7] :

- Possibilité d'excitation par onde de surface ;
 - Effets de la constante et de la tangente de perte diélectrique sur la dispersion ;
 - Importance des pertes par diélectrique et par conducteur ;
 - Anisotropie dans le substrat ;
 - Effets de l'environnement tels que la température, l'humidité ;
 - Conditions mécaniques : Physiquement, le matériau doit résister aux contraintes Mécaniques, conserver sa forme originelle. Son facteur d'expansion doit être voisin de celui De la métallisation, car il est confronté à de fortes températures lors des soudures.
- Enfin, son état de surface doit être le plus parfait possible ;
- Coût de fabrication.

I.2.3-L'élément rayonnant :

C'est un bon conducteur tel que le cuivre, l'argent ou l'or. Afin de simplifier l'analyse et l'estimation des performances, le patch a généralement une forme rectangulaire, circulaire, triangulaire, elliptique ou autre forme connue (*Figure I-2*), les plus simples sont [8] :

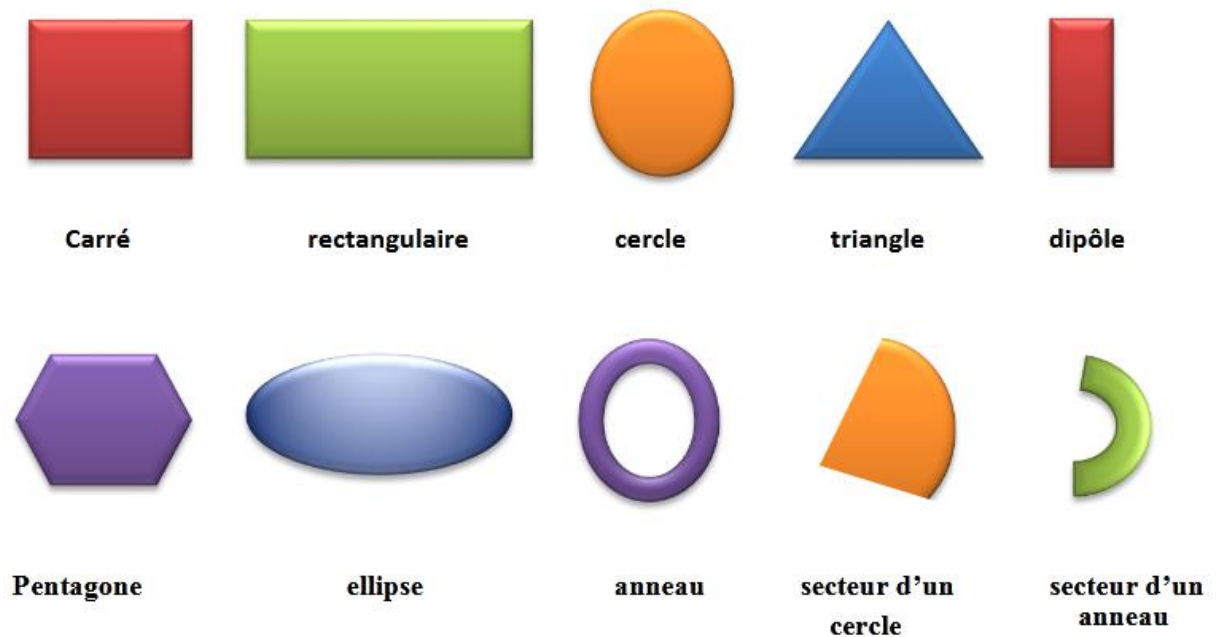


Figure I-2: divers types d'éléments rayonnants [8]

Le choix de la forme d'antenne dépendra du type d'application désiré et des paramètres qu'on cherche à optimiser (bande passante, gain et efficacité, impédance d'entrée, niveaux des lobes secondaires, ...etc.).

Parmi toutes les formes l'élément rectangulaire est sans contexte le plus facile à appréhender pour la compréhension des mécanismes de rayonnements des antennes patch.

I.3-Techniques d'alimentation :

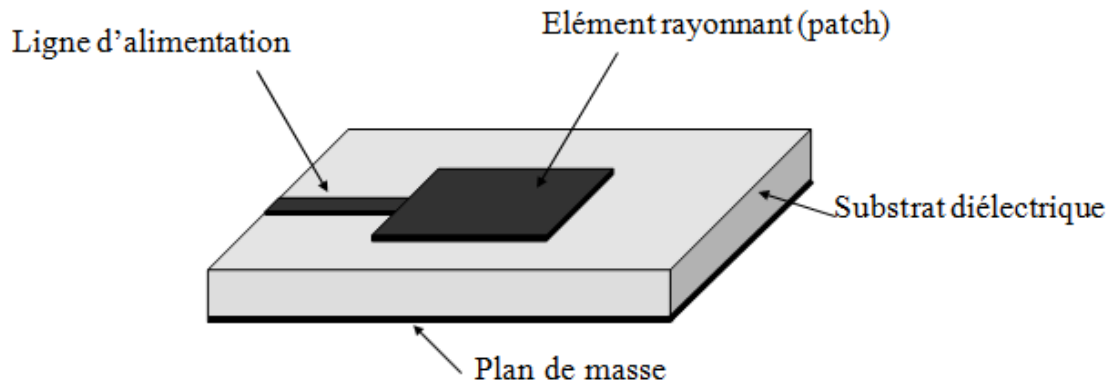
Les techniques d'alimentation des antennes imprimées peuvent être classées en deux catégories [9] :

- Alimentation par contact (par sonde ou ligne micro-ruban).
- Alimentation par proximité (couplage électromagnétique par ligne ou par fente).

I.3.1-Alimentation par ligne micro-ruban dans le plan de l'élément rayonnant :

L'élément rayonnant et sa ligne micro-ruban d'alimentation sont imprimés sur la même face du substrat (*FigureI-3*). Cette technique est facile à réaliser et permet une adaptation simple d'impédance, elle a l'inconvénient de générer un rayonnement parasite des lignes.

L'adaptation est obtenue soit en insérant un transformateur quart d'onde, soit en déplaçant le point d'alimentation. [9]

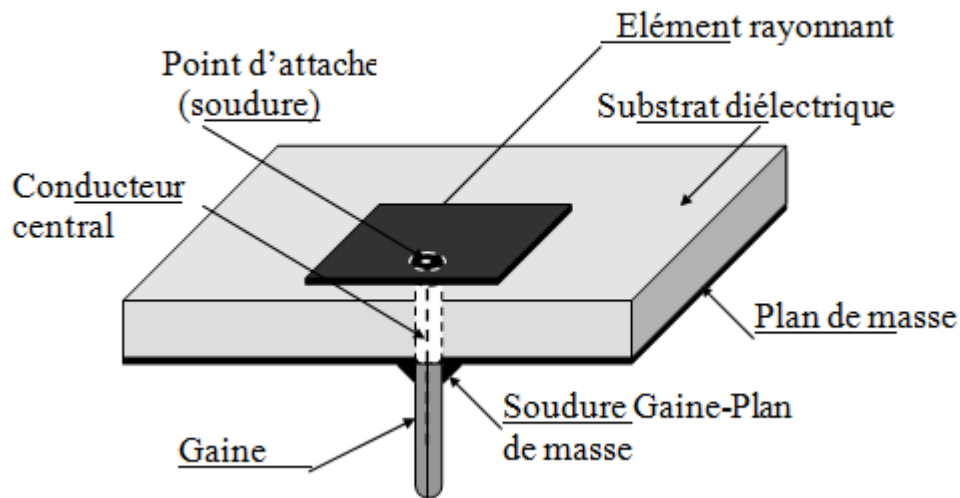


FigureI-3: Antenne imprimée alimentée par ligne micro-ruban [9]

I.3.2-Alimentation par sonde coaxiale :

Le conducteur intérieur du connecteur coaxial traverse le plan de masse et le diélectrique, il est directement soudé à l'élément rayonnant en un point où l'adaptation est obtenue, alors que le conducteur extérieur est relié au plan de masse (*FigureI-4*)

Cette technique est adaptée à une alimentation séparée de chaque élément du réseau. Elle est simple à réaliser. La position de l'alimentation détermine le type de mode excité, de plus elle contrôle l'adaptation de l'élément. Cependant, cette technique d'alimentation pose des problèmes technologiques du fait du percement du substrat et des soudures sur chaque élément rayonnant, surtout pour les grands réseaux [9].



FigureI-4: Antenne imprimée alimentée par sonde coaxiale [9]

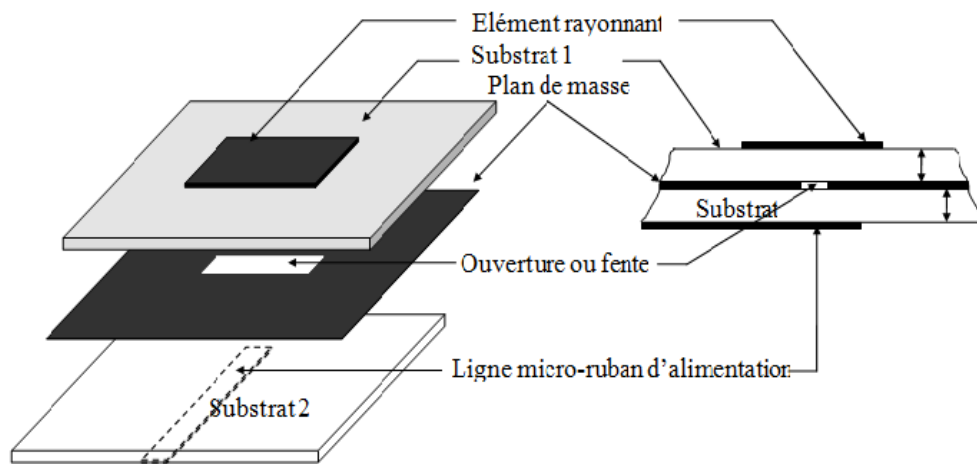
I.3.3-Alimentation par ouverture (ou par fente) :

L'élément rayonnant et la ligne micro-ruban d'alimentation sont placés de part et d'autre du plan de masse. La fente de couplage dans le plan de masse permet la circulation de l'énergie entre la ligne d'alimentation et l'élément rayonnant. Cette méthode nécessite un positionnement précis de la fente (*FigureI-5*). Elle apporte les avantages suivants :

- Isolation du circuit d'alimentation par l'intermédiaire du plan de masse. De ce fait, un rayonnement parasite faible, en fait ce rayonnement parasite se situe au-dessous du plan de masse, ce qui n'est pas la direction de propagation.
- Adaptation facile à réaliser en raison de grand nombre de paramètres comme la taille de l'ouverture et la longueur du stub de la ligne d'alimentation.

Mais cette technique présente quelques inconvénients, tels que :

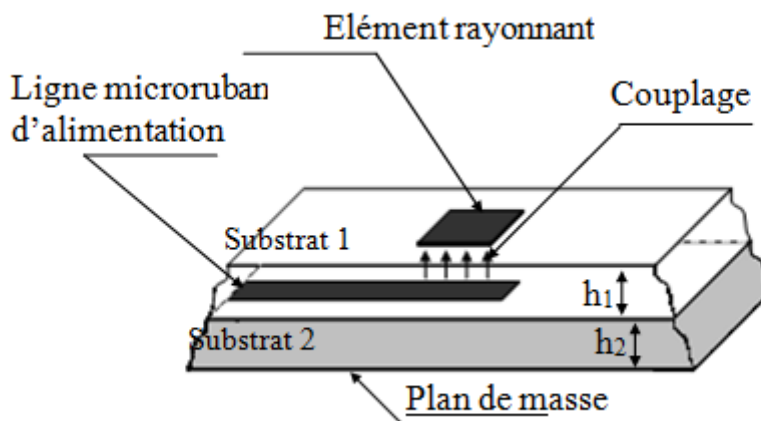
- Faible bande passante, mais peut être améliorée en jouant sur l'épaisseur du diélectrique et en superposant plusieurs éléments rayonnants.
- Difficile à mettre en œuvre [9].



FigureI-5: Antenne imprimée alimentée par fente [9]

I.3.4-Alimentation par proximité :

L'antenne est constituée de deux substrats diélectriques entre lesquels est située la ligne d'alimentation. L'élément rayonnant est imprimé sur le substrat supérieur. L'excitation se fait par couplage électromagnétique (*FigureI-6*). Cette technique permet d'améliorer la bande passante mais elle est difficile à réaliser [9].



FigureI-6: Antenne imprimée alimentée par proximité. [9]

I.4-Comparaison entre les différentes techniques d'alimentation (Tableau I.4)

Caractéristiques	Alimentation par ligne micro-ruban	Alimentation coaxiale	Alimentation couplée par ouverture	Alimentation Couplée par proximité
Rayonnement parasite de l'alimentation	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 (réalisé avec adaptation d'impédance)	2-5%	2-5%	2-5%	13%

Tableau I-4 : Comparaison entre les différentes techniques d'alimentation. [2]

I.5-Caractéristiques des antennes :

Une antenne peut être caractérisée par :

I.5.1-Le Coefficient de réflexion S_{11} :

Le coefficient de réflexion S_{11} 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 et l'adaptation des antennes, sa valeur doit être inférieure ou égale à -10dB[10].

I.5.2-La Directivité :

La directivité d'une antenne caractérise la manière dont cette antenne concentre son rayonnement dans certaines directions de l'espace. La directivité d'une antenne dans une direction (θ, φ) est le rapport de la puissance $P(\theta, \varphi)$ à la puissance que rayonnerait la source isotrope par unité d'angle solide.

$$D(\theta, \varphi) = \frac{p(\theta, \varphi)}{pr/4\pi} \quad (\text{I.1})$$

$$D(\theta, \varphi) = 4\pi \frac{p(\theta, \varphi)}{pr}$$

$$p_r = \iint_0^{4\pi} p(\theta, \varphi) d\Omega \quad (\text{I.2})$$

$$d\Omega = \sin\theta d\theta d\varphi \quad (\text{I.3})$$

Dans la direction de rayonnement maximal (θ_0, φ_0) la directivité est exprimée. [10] :

$$D(\theta_0, \varphi_0) = 4\pi \frac{p(\theta_0, \varphi_0)}{p_r} \quad (\text{I.4})$$

I.5.3-Le Gain :

Le gain $G(\theta, \varphi)$ d'une antenne dans une direction (θ, φ) est le rapport entre la puissance Rayonnée dans une direction donnée $P(\theta, \varphi)$ sur la puissance que rayonnerait une antenne isotrope sans pertes. En général, le gain G correspond au gain dans la direction de rayonnement maximal (θ_0, φ_0) .

Cette propriété caractérise la capacité d'une antenne à focaliser la puissance rayonnée dans une direction [10].

$$G(\theta, \varphi) = 4\pi \frac{p(\theta, \varphi)}{p_A} \quad (\text{I.5})$$

I.5.4-Le Rendement :

Le rendement η d'une antenne traduit sa capacité à transmettre la puissance électrique en entrée p_A sous forme de puissance rayonnée p_R . On le définit comme le rapport entre la puissance totale rayonnée par une antenne et la puissance qui lui est fournie. Le rendement est lié aux pertes dans le réseau de polarisation et dans les éléments rayonnants. Rendement relie le gain et la directivité [10].

$$p_R = \eta \cdot p_A \Rightarrow D = \eta \cdot G \quad (\text{I.6})$$

I.5.5-L'Ouverture :

Si G_m est le gain maximal d'une antenne donnée dans un plan bien déterminé, alors son ouverture dans ce plan est l'angle qui se trouve entre deux directions de ce plan ayant la moitié du gain maximal (gain à -3 dB), soit $G_m / 2$ [10].

I.5.6-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. Cette impédance est donnée par la formule :

$$Z_{in} = Z_0 \frac{(1+s_{11})}{(1-s_{11})} \quad (I.7)$$

Z_0 = impédance caractéristique de la ligne d'alimentation [10].

I.5.7- Le Diagramme de rayonnement :

Les antennes sont rarement omnidirectionnelles et émettent ou reçoivent dans des directions privilégiées. Le diagramme de rayonnement représente les variations de la puissance rayonnée par l'antenne dans les différentes directions de l'espace. Il indique les directions de l'espace (θ_0, φ_0) dans lesquelles la puissance rayonnée est maximale. Il est important de noter que le diagramme de rayonnement n'a de sens que si l'onde est sphérique. On trace dans le diagramme de rayonnement la fonction caractéristique de rayonnement $r(\theta, \varphi)$, qui varie entre 0 et 1 selon la direction. En général, le diagramme de rayonnement d'une antenne est représenté dans les plans horizontaux ($\theta = 90^\circ$) et verticaux ($\varphi = \text{constante}$), ou bien dans les plans E et H. [10].

$$r(\theta, \varphi) = \frac{p(\theta, \varphi)}{p_0(\theta_0, \varphi_0)} \quad (I.8)$$

$p(\theta, \varphi)$: Puissance rayonnée dans une direction quelconque

$p_0(\theta_0, \varphi_0)$: Puissance rayonnée max

I.5.8-La bande passante (BP) :

La bande passante d'une antenne peut être définie comme étant la gamme des fréquences utile, en laquelle l'antenne possède des capacités optimales pour émettre ou recevoir l'énergie électromagnétique correspondante dans l'espace environnement.

La valeur des limites sur les critères de fonctionnement de l'antenne définit un domaine de fréquences situées entre une valeur minimale f_{min} et une valeur maximale f_{max} .

La bande passante est donnée par :

$$BP (\%) = \left[\frac{f_{min} - f_{max}}{f_c} \right] \cdot 100 \quad (I.9)$$

Avec f_c est la fréquence centrale ou de résonance [11].

I.5.9-Fréquence de résonance :

La fréquence de résonance d'une antenne dépend d'abord de ses dimensions propres, mais aussi des éléments qui lui sont ajoutés [12]

La fréquence de résonance d'une antenne doit être sélectionnée de manière appropriée

- Le système de communication GSM 900 : (Global System for Mobile communication) un système radio-mobile basé sur la norme GSM à vocation urbaine et rurale (macro cellule) et utilise deux bandes de fréquences de 25MHz autour de 900 MHz les bandes fréquentielles sont [890-915] MHz et [935-960] MHz, ce fut le premier numérique implémenté en France. La fréquence de résonance prise est égale à 0.9 GHz.
- Le système de communication DCS 1800 : (digital cellular system) système radio mobile dérivé du GSM 900 à vocation urbaine (micro cellule) utilisant actuellement deux bandes de fréquences de 75 MHz autour de 1800 MHz, la première bande est de [1710-1785] Mhz et la deuxième [1805-1880] MHz. La fréquence de résonance est de 1.8 GHz.[11]

I.6-Avantages et limites des antennes imprimées :

Les antennes patch micro-ruban ont plusieurs avantages qui les rendent attrayantes pour beaucoup d'applications. Elles couvrent une large gamme de fréquence de 100 MHz à 100 GHz [13].

Ces avantages sont :

- Faible poids.
- Conforme sur les surfaces planaires et non fabriqué.
- Mécaniquement robuste.
- Souple en termes de fréquence de résonance
- Facile à intégrer avec les circuits MMICs (monolithic microwave integrated circuit) sur un même substrat.

D'autre part, elles ont quelques **limites** principales :

- Faible efficacité de rayonnement.
- Possibilité de fonctionnement en faible puissance.
- Effet de couplage du rayonnement de l'alimentation.
- Largeur de bande de fréquence très étroite (en général seulement une fraction d'un pour cent ou à la plupart des quelques pour cent).
- Le gain légèrement inférieur comparé aux antennes conventionnelles à micro-ondes

I.7-Les domaines d'applications des antennes imprimées :

Les domaines d'applications des antennes imprimées sont de plus en plus variés, les principales applications sont [14] :

- La téléphonie mobile,
- Les radars,
- Les télécommunications spatiales,

- La télémétrie des missiles et la télésurveillance,
- guidage des missiles et télédétection

I.8-Conclusion :

Dans ce chapitre on a présenté en premier lieu la description des antennes imprimées (antennes patch), leurs avantages et limitations, les différents types de substrats et leurs critères de sélection, leurs caractéristiques, ensuite on s'est penché sur les différentes techniques d'alimentation et on a clôturé le chapitre par un bref aperçu de leurs domaines d'application

Dans le chapitre suivant en utilisant le logiciel CST Microwave Studio, on va montrer l'influence du substrat sur les performances d'une antenne imprimée.

Chapitre II

Simulation et résultats

II.1 Introduction :

Dans ce chapitre nous allons faire l'implémentation puis la simulation d'une antenne imprimée rectangulaire à la fréquence de 2.45 GHz, en présentant un bref aperçu sur le logiciel de conception CST Microwave Studio.

Le travail de ce projet consiste à faire une étude sur l'effet du substrat à savoir la variation de la constante diélectrique et la variation de sa hauteur sur les caractéristiques de l'antenne imprimée (le coefficient de réflexion, la bande passante, l'impédance, le VSWR, la directivité et le gain).

II.2 Présentation du logiciel

Microwave Studio de CST (Computer Simulation Technology) c'est le logiciel que nous employons, fait usage de la méthode des intégrales finies (FIT, Finite Integration Technique) développée par Weiland en 1977, cette méthode FIT consiste à faire une discrétisation spatiale des équations de Maxwell sous leur forme intégrale. La FIT procède par la description des équations de Maxwell sur un espace de grille, en préservant les propriétés de conservation de l'énergie, et en constituant des équations différentielles particulières telles que celle de Poisson ou l'équation d'onde. Il s'agit d'une approche très sophistiquée, et on peut l'utiliser à la fois dans le domaine du temps et dans le domaine de fréquence [18]. Donc l'utilisateur est amené à représenter la structure de l'antenne, indiquer les caractéristiques des matériaux, définir les ports, valider et simuler le modèle dans le logiciel. La solution logicielle offerte par CST Microwave Studio, est une option très intéressante pour la conception d'antenne en micro-ruban. Des fonctions comme l'optimisation, l'édition en 3D, la modélisation par variable, la mise à la terre finie et la possibilité de définir les conditions aux bornes, en font un logiciel très intéressant pour la tâche à effectuer dans le cadre de ce travail. Cet outil est très complet pour le développement de composante micro-onde allant de composante en micro-ruban aux composantes coaxiales. Le CST Microwave Studio utilise deux techniques de discrétisation : une discrétisation surfacique (cellules en 2D) et une discrétisation volumique (cellule en 3D) [18].

II.3 Simulation et optimisation d'une antenne rectangulaire :

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

Etant donné un substrat (RF-35) qui a une permittivité relative $\epsilon_r=3.5$ avec une hauteur de $h=1.575$ mm et une fréquence d'utilisation ($f=2.45$ GHz), nous avons calculé la longueur et la largeur de l'antenne patch rectangulaire en utilisant les équations suivantes [10] (voir tableau II.1):

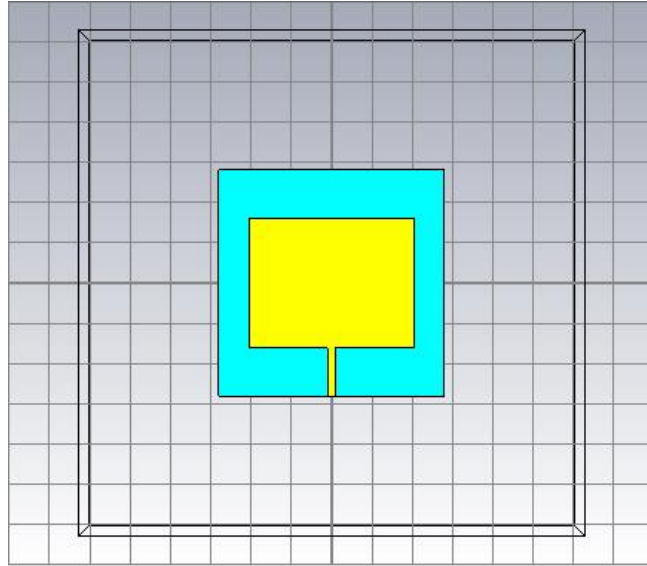
	Paramètres d'antenne	Equations
Plan de masse et Substrat	Longueur (L)	$L = L_{eff} - 2\Delta L$
	Longueur effective (L_{eff})	$L_{eff} = \frac{c}{2f\sqrt{\epsilon_{reff}}}$
	L'extension de la longueur (ΔL)	$\Delta L = 0.412h \frac{(\epsilon_{reff} + 0.3)\left(\frac{w}{h} + 0.264\right)}{(\epsilon_{reff} - 0.258)\left(\frac{w}{h} - 0.8\right)}$
	Constante diélectrique (ε_{reff})	$\epsilon_{reff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + 12 \frac{h}{w}\right)^{-1/2}$
	Largeur (W)	$w = \frac{c}{2f \sqrt{\frac{(\epsilon_r + 1)}{2}}}$
	Longueur du substrat (L_g)	$L_g = L * 2$
	Largeur du substrat (W_g)	$W_g = w * 2$
La ligne d'alimentation	La largeur W_f	$w_f = \frac{119.9}{\sqrt{2(\epsilon_r + 1)}} \left[\ln \left(4 \frac{h}{w} + \sqrt{16 \left(\frac{h}{w} \right)^2 + 2} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1} \right) \left(\ln \frac{\pi}{2} + \frac{1}{\epsilon_r} \ln \frac{4}{h} \right) \right]$

TableauII-1 : équations de calculs des dimensions de l'antenne patch rectangulaire [10]

II.3.2 La structure de l'antenne patch :

D'après les équations du tableau (**TableauII-1**), nous trouvons $W=40.79\text{mm}$, $L=32.26\text{ mm}$, et $W_f=2.8\text{mm}$,

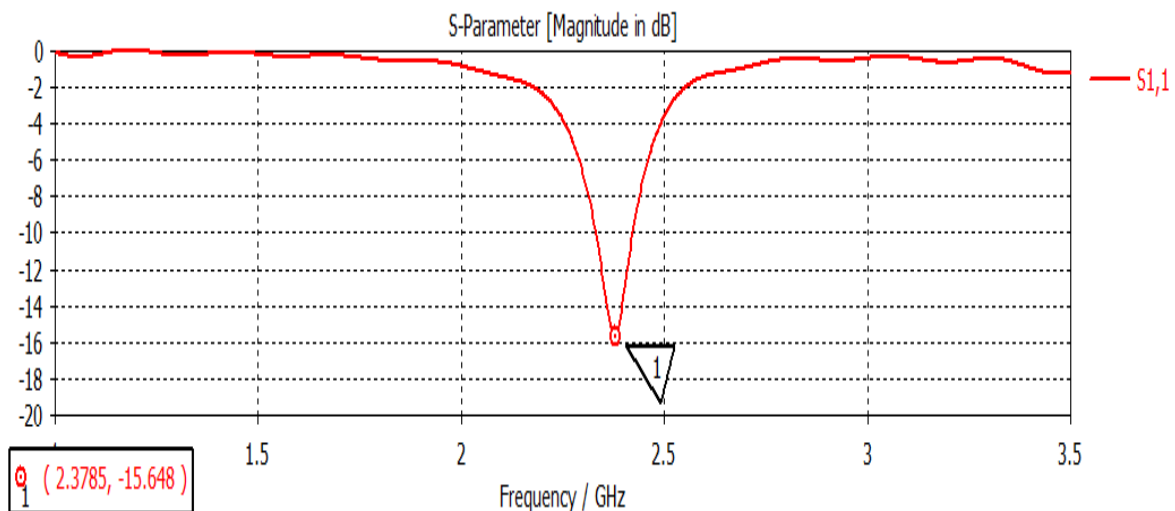
Nous faisons l'implémentation de l'antenne patch avec ces paramètres sous CST comme montré sur la figure suivante (**FigureII-1**) :



FigureII-1 : Structure de l'antenne patch sous CST

II.3.3 Simulation et optimisation

Après avoir simulé le coefficient de réflexion, nous voyons bien que notre antenne n'est pas bien adaptée à la fréquence de résonance voulu qui est 2.45 GHz (**FigureII-2**) :

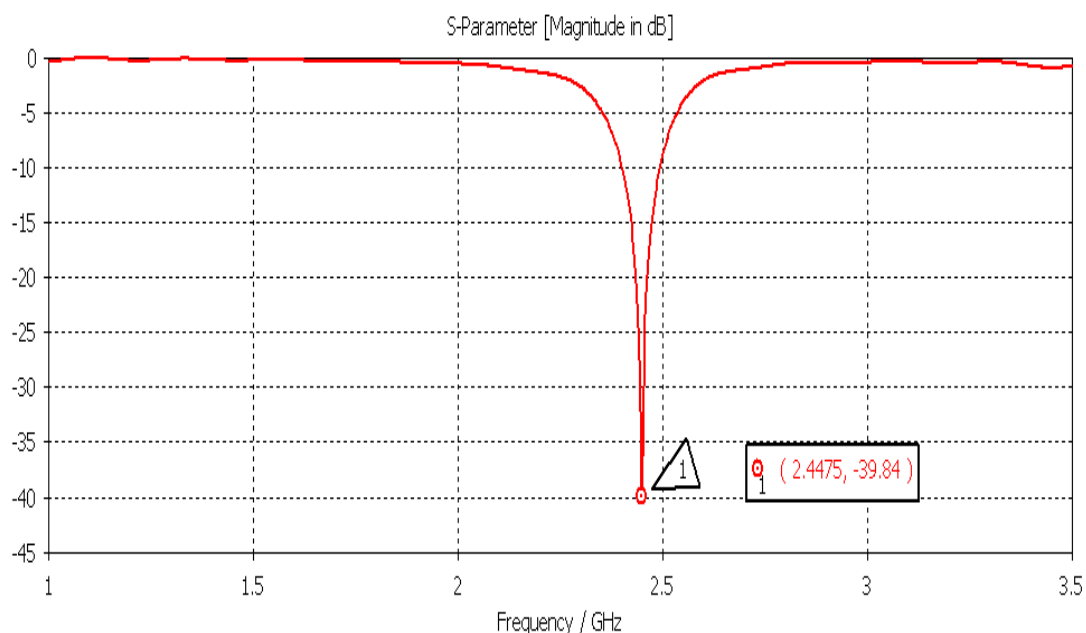


FigureII-2 : Simulation du coefficient de réflexion S11

C'est pour cette raison que nous allons faire une optimisation sur la longueur et la largeur du patch ainsi sur la longueur de la ligne, les dimensions trouvés après optimisations sont :

$L= 31.3$ mm, $W= 40.6$ mm et $W_f= 2$ mm.

Les résultats trouvés montrent bien l'adaptation à la fréquence 2.45 GHz, avec un coefficient de -39.84 dB(voir *FigureII-3*), donc c'est sur cette structure que nous allons faire les autres modifications :



FigureII-3 : Résultat du coefficient de réflexion S_{11} après optimisation

II.4 Influence de la permittivité sur les performances de l'antenne :

Notre travail consiste à faire varier la permittivité du substrat en prenant différents types qui existent sur le marché, et à partir de ces derniers nous allons voir l'influence de la permittivité sur les performances de l'antenne imprimée à savoir le coefficient de réflexion, le taux d'onde stationnaire, la directivité et le gain.

Les substrats choisis sont :

Le RF-35, le FR-4, l'Alumine, le Quartz, le Téflon, le Silicium, leurs permittivités changent entre 2.2 et 12.

- **Le RF-35**

La permittivité de ce substrat est de $\epsilon_r=3.5$, le coefficient de réflexion est montré sur (*FigureII-3*), Le taux d'onde stationnaire est < 2 (*Figure II-4: VSWR du RF-350*), ce qui montre que nous avons une bonne adaptation.

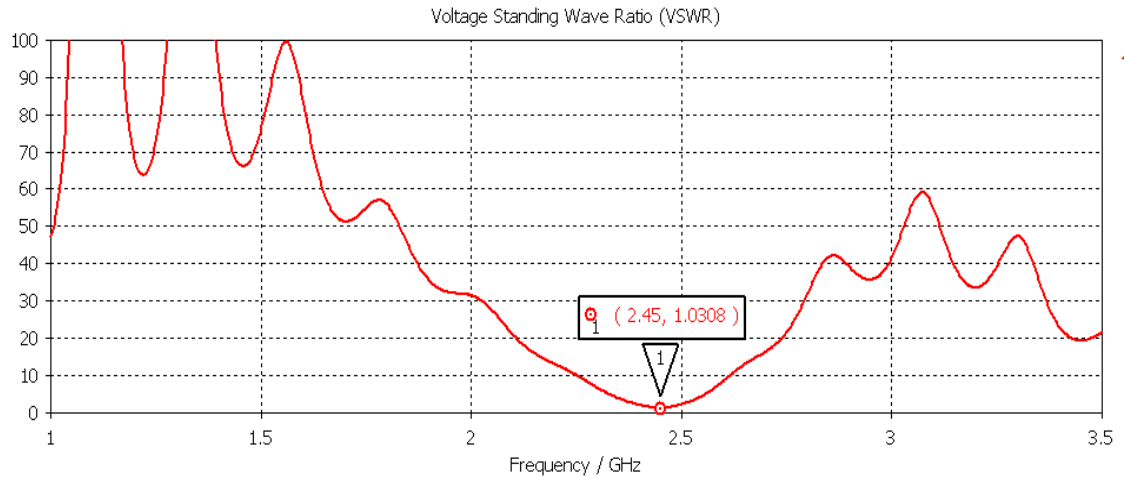


Figure II-4: VSWR du RF-350

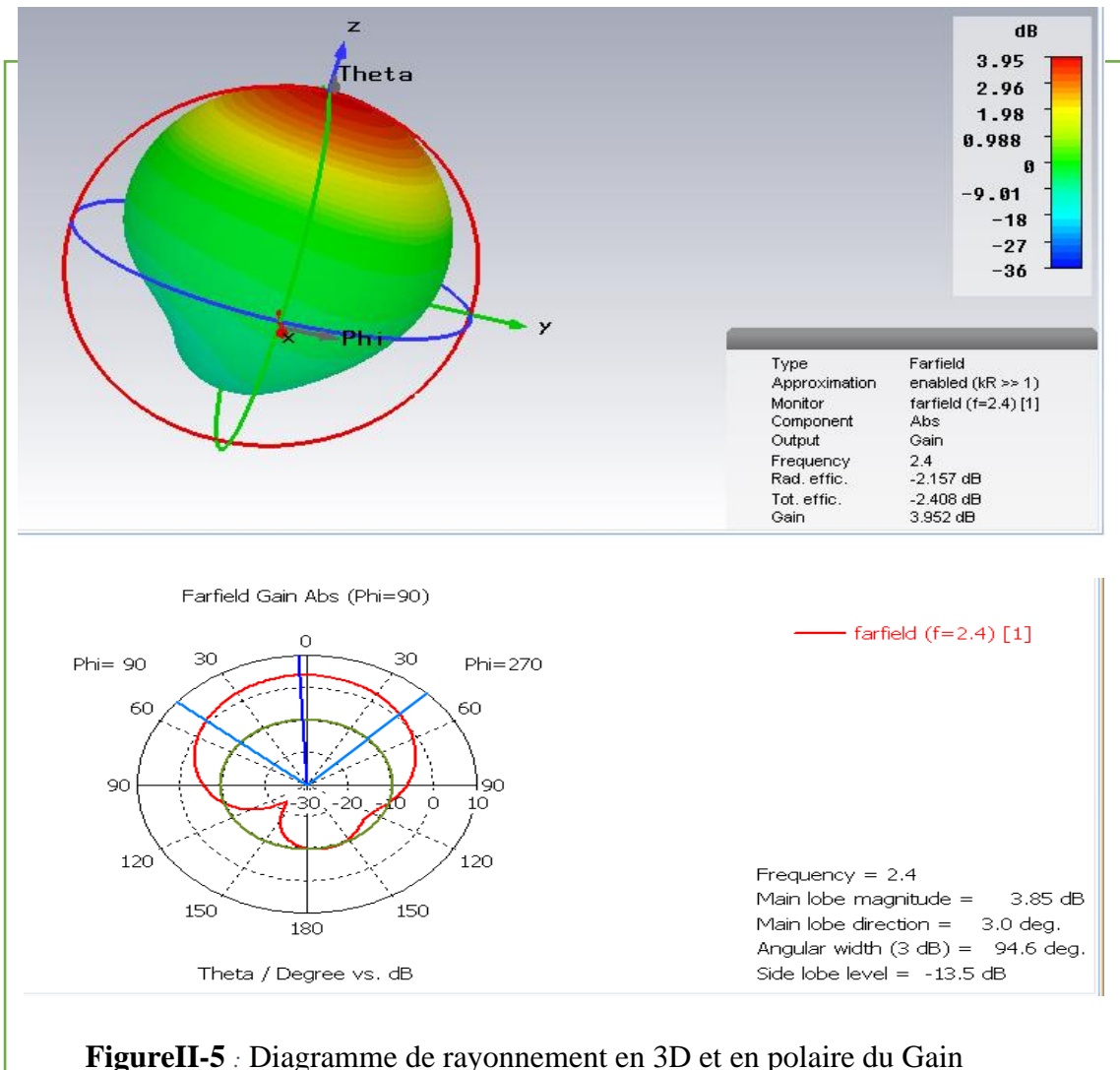
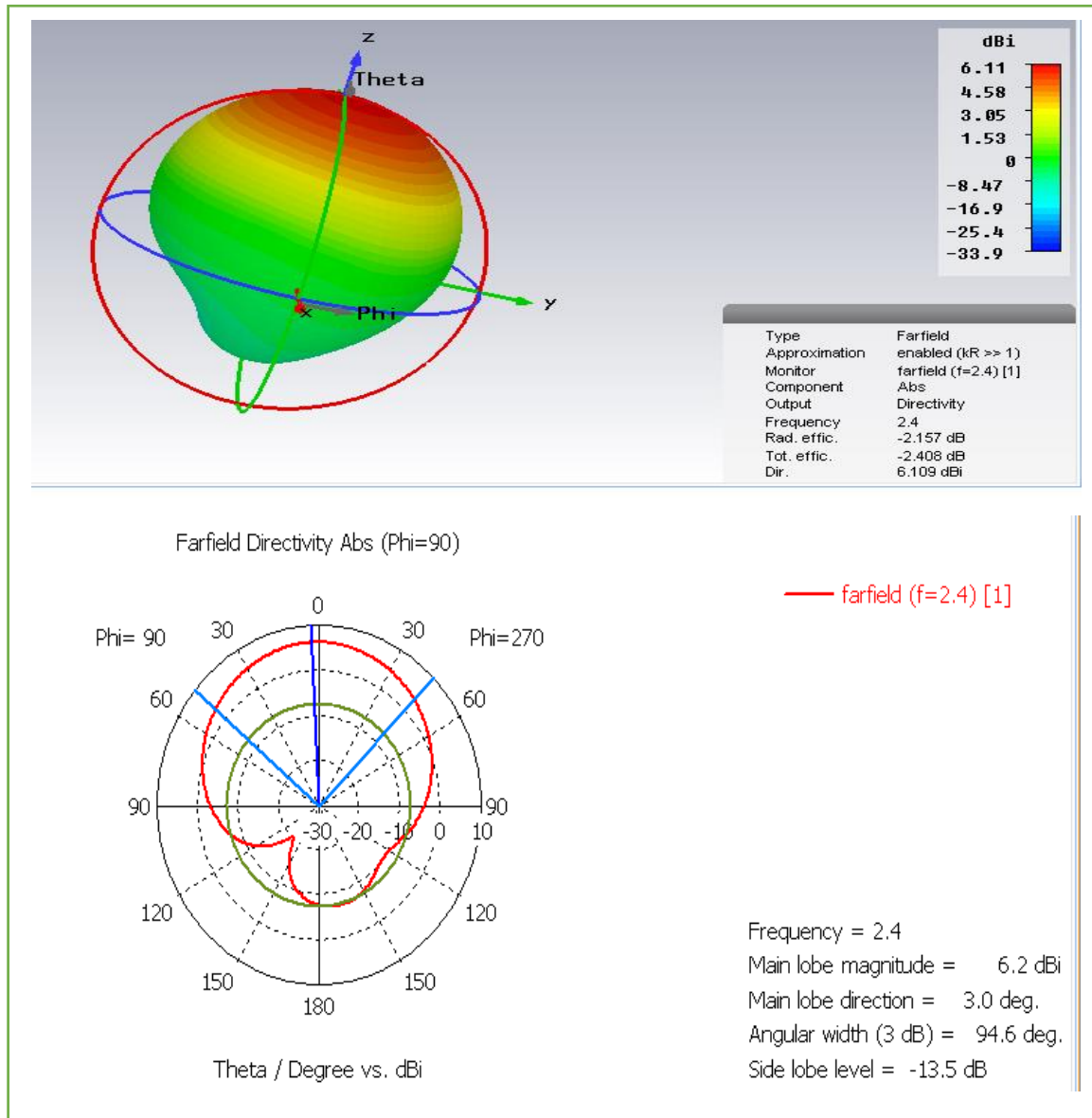


Figure II-5 : Diagramme de rayonnement en 3D et en polaire du Gain



FigureII-6 : Diagramme de rayonnement en 3D et en polaire de la Directivité

Le Gain de cette antenne obtenu avec le substrat RF-35 est de 3.95 dB(**FigureII-5**) et la Directivité est de 6.11 dB(**FigureII-6**).

- **Le FR-4**

A une permittivité $\epsilon_r = 4.3$ et une tangente de perte $\tan\delta = 0.018$

Les résultats observés sur les figures II.7 puis II.8: nous obtenons un coefficient de réflexion de -13.65 dB à la fréquence de 2.45 GHz, donc l'antenne est bien adaptée à la fréquence voulue, avec un rapport d'onde stationnaire qui vaut 1.5:

les évolutions des gains et directivité sont présentées respectivement sur les Figures II.9 et II.10

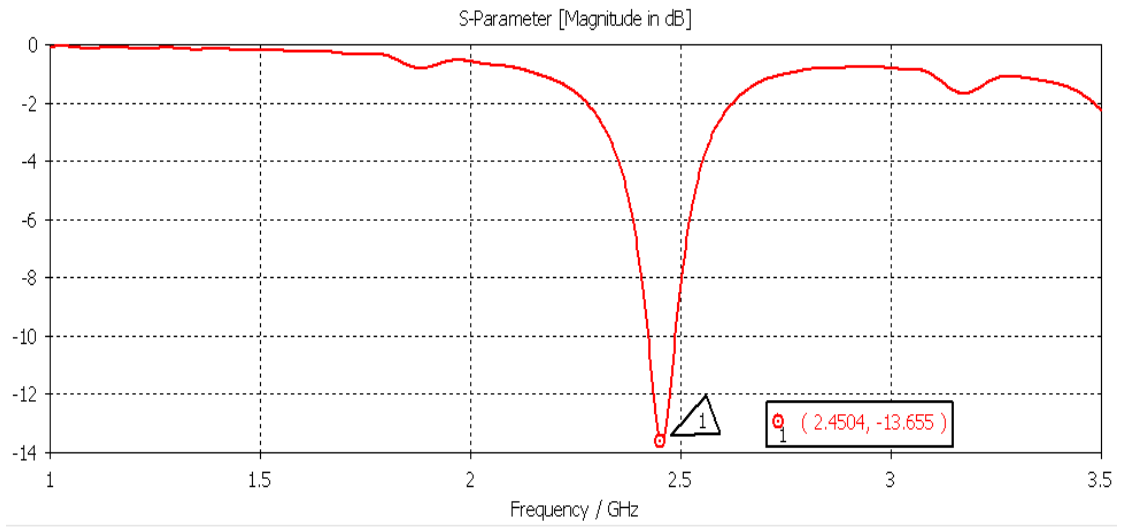


Figure II-7: Coefficient de réflexion S11 du FR-4

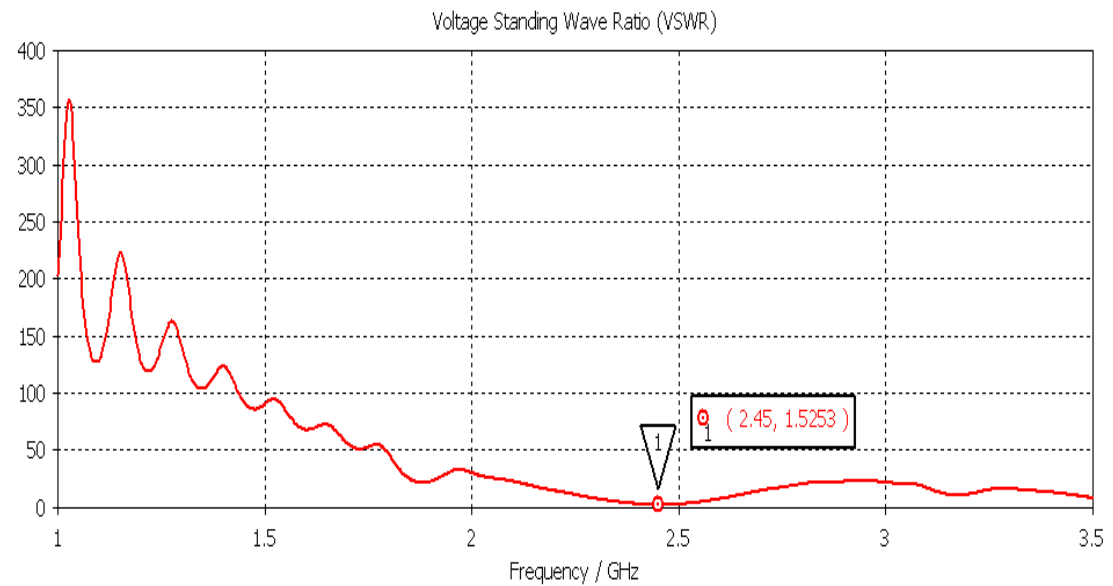


Figure II-8 : VSWR du FR-4

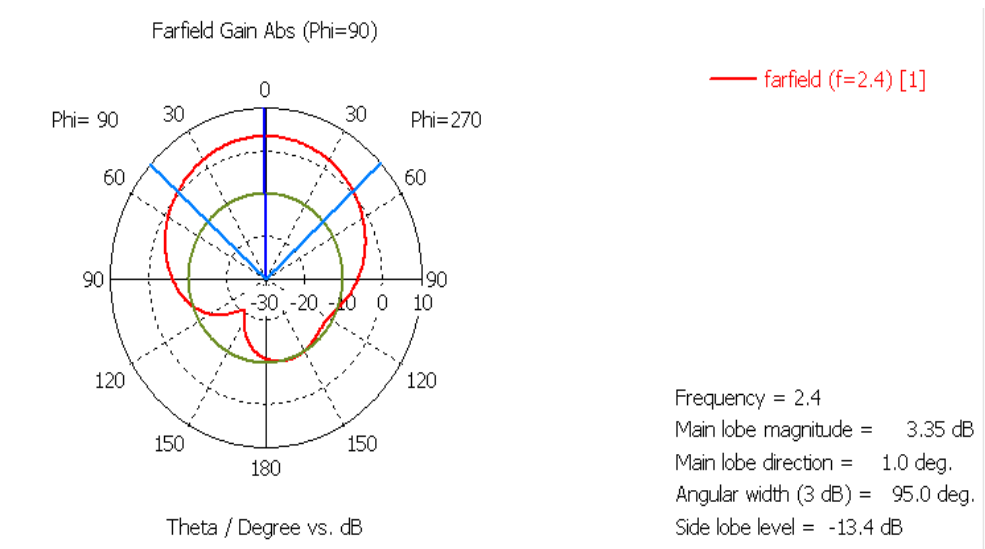
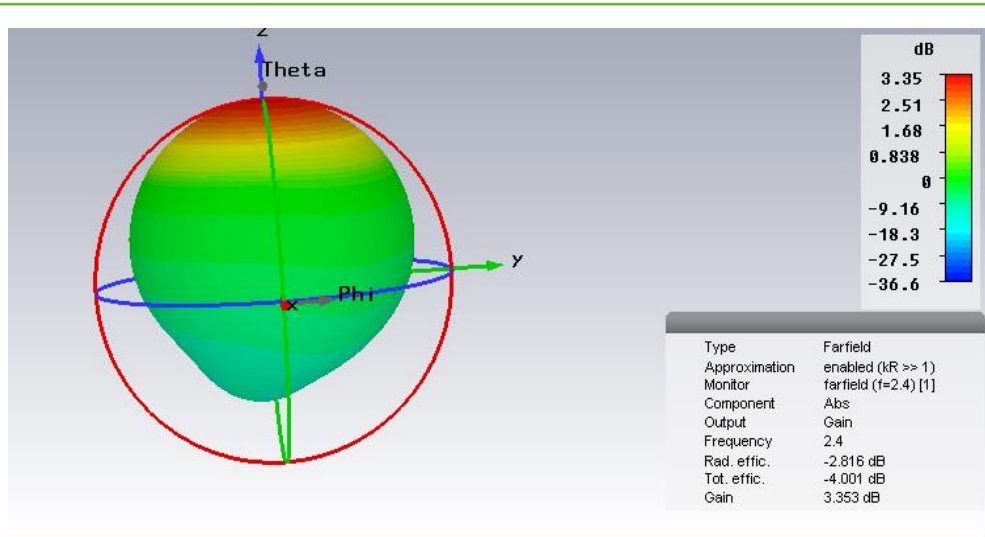


Figure II-9 :Diagramme de rayonnement en 3D et en polaire du Gain

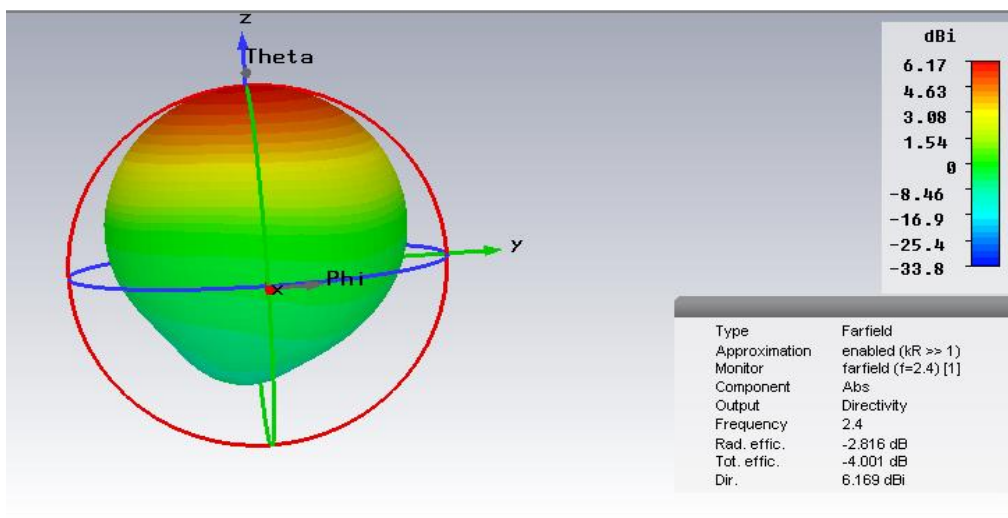


Figure II-10: Diagramme de rayonnement en 3D de la Directivité

• **Le Quartz :**

A une permittivité $\epsilon_r = 3.78$ et une tangente de perte $\text{Tan}\delta = 0.006$

Les évolutions des quatre grandeurs précédentes sont présentées sur les Figures II.11, II.12, II.13 et II.14

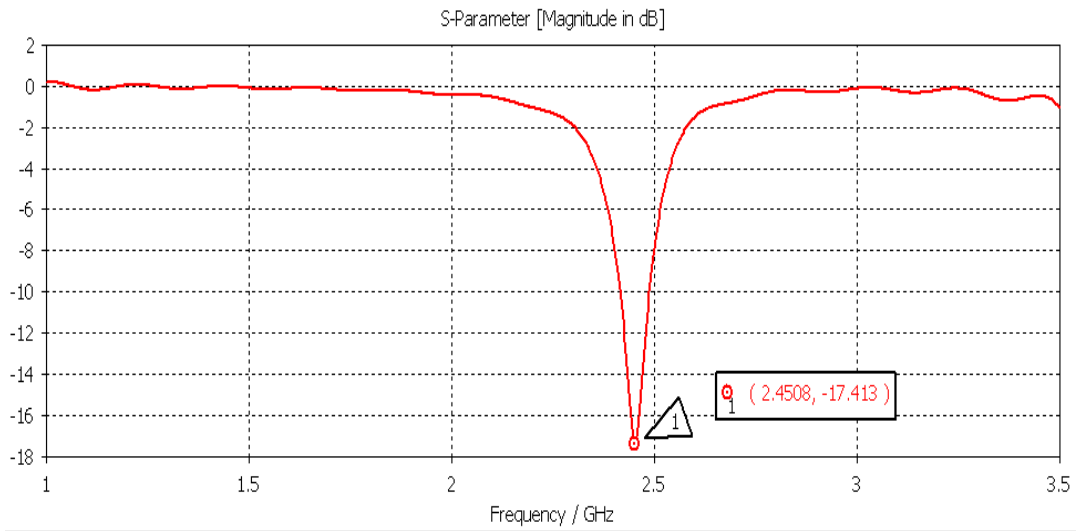


Figure II-11 : Coefficient de réflexion S11 pour le Quartz

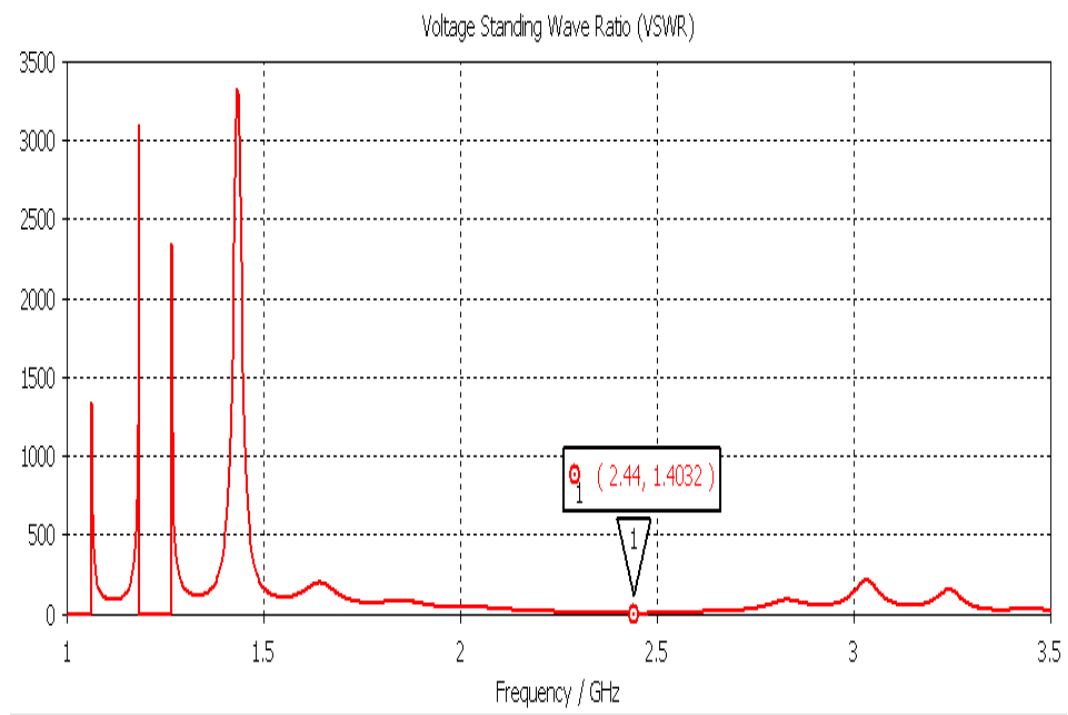
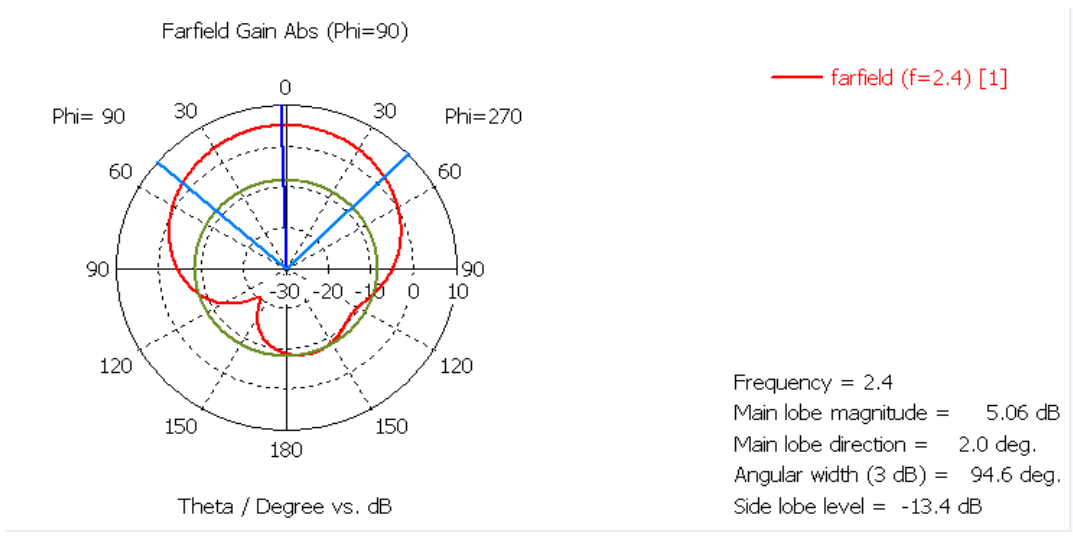
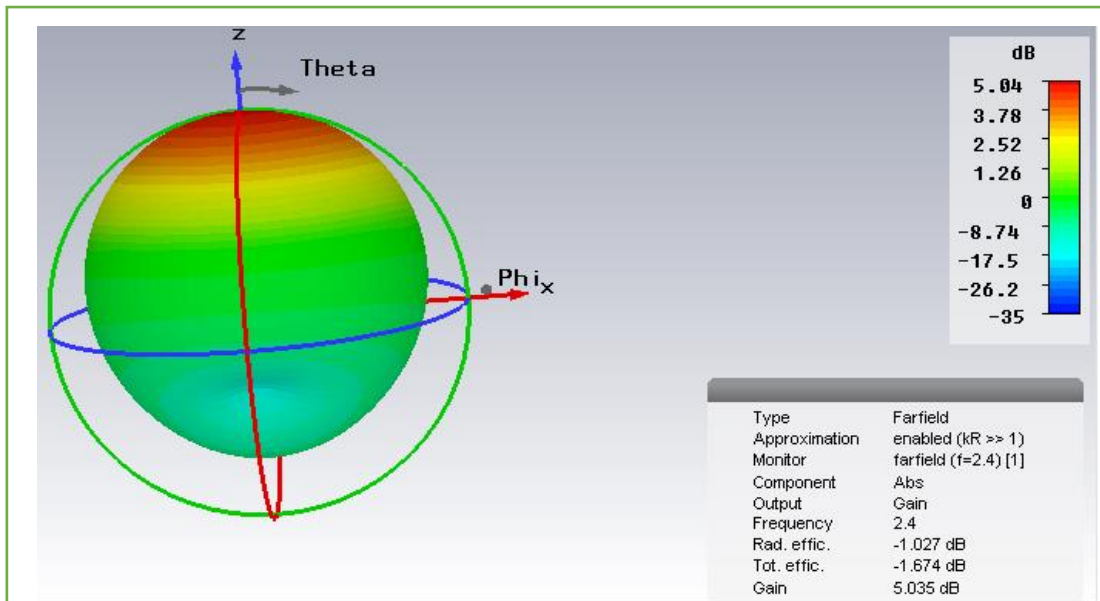


Figure II-12 : VSWR du Quartz



FigureII-13 : Diagramme de rayonnement en 3D et en polaire du Gain

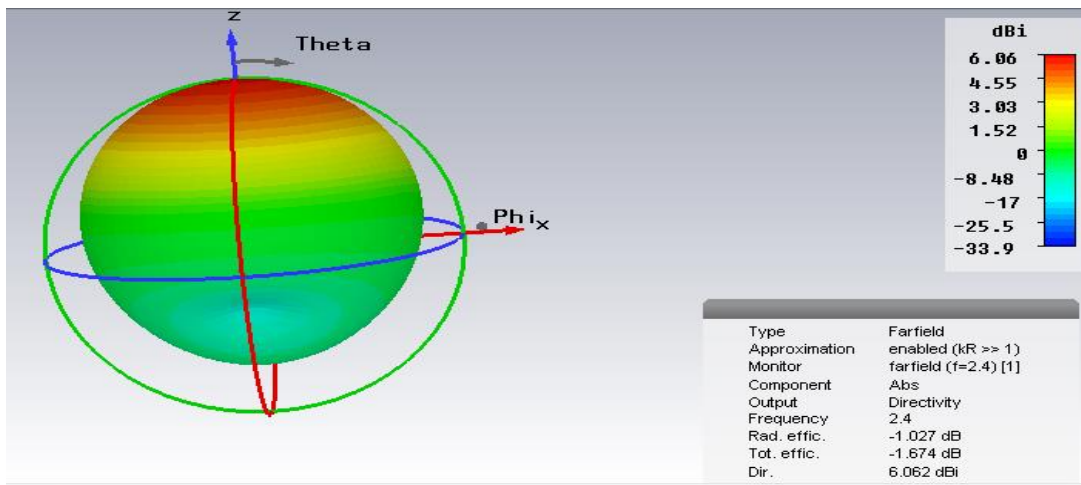


Figure II-14 : diagramme de rayonnement en 3D de la directivité

- **Le Teflon :**

L'évolution du coefficient de réflexion est présentée sur la Figure II.15

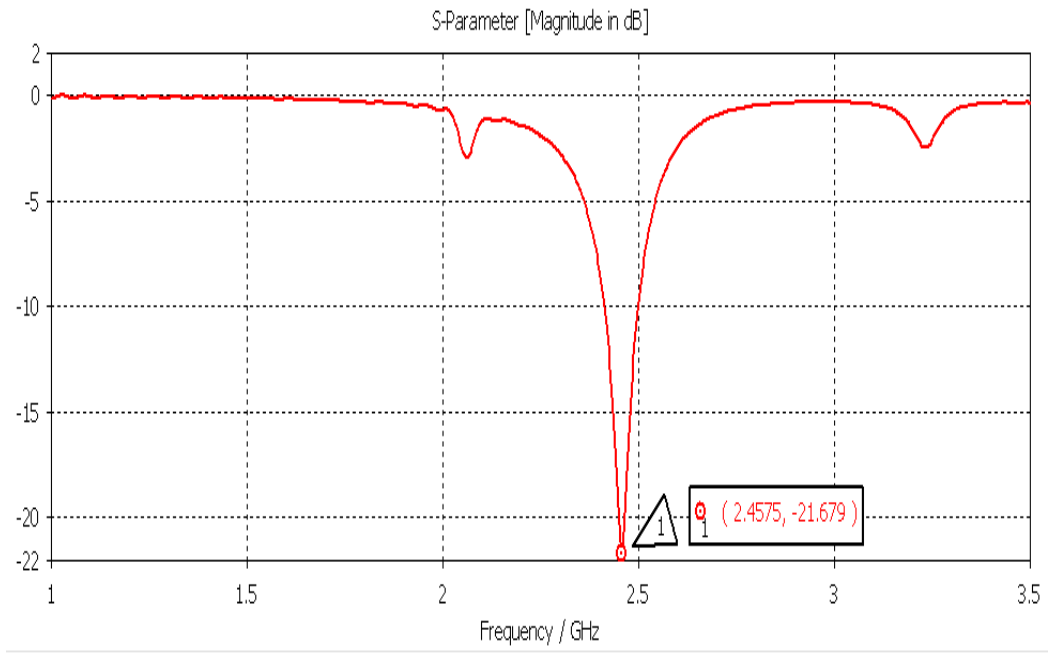


Figure II-15: Coefficient de réflexion S11 du Téflon

- **L'Alumine :**

L'évolution du coefficient de réflexion est présentée sur la Figure II.16

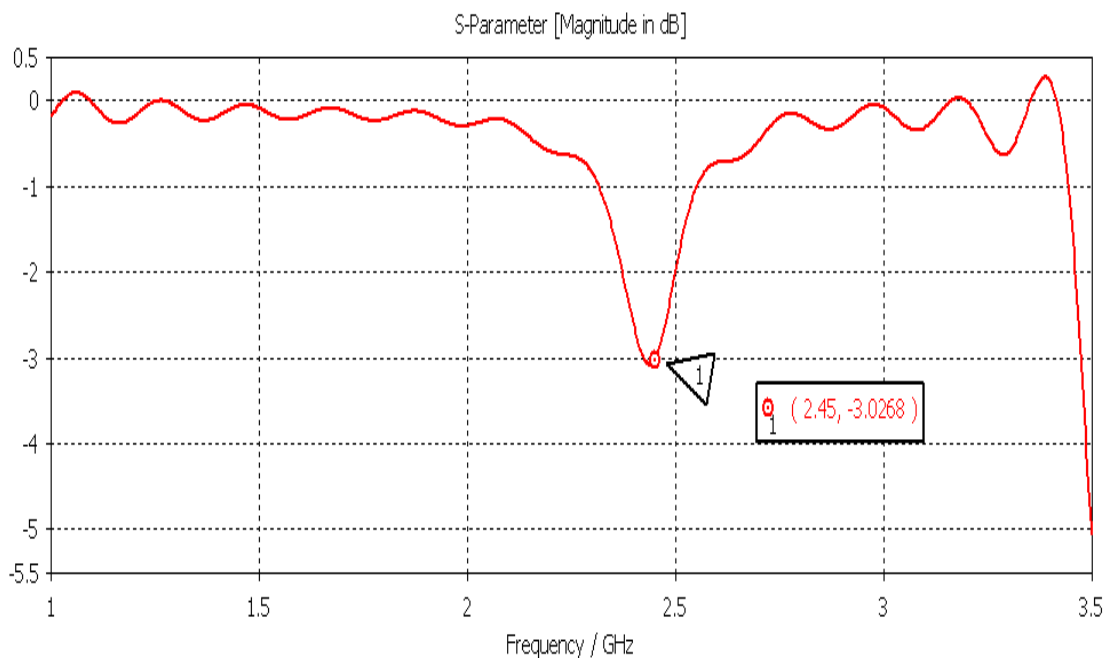


Figure II-16 : Coefficient de réflexion S11 de l'Alumine

• Le Silicium :

L'évolution du coefficient de réflexion est présentée sur la Figure II.17

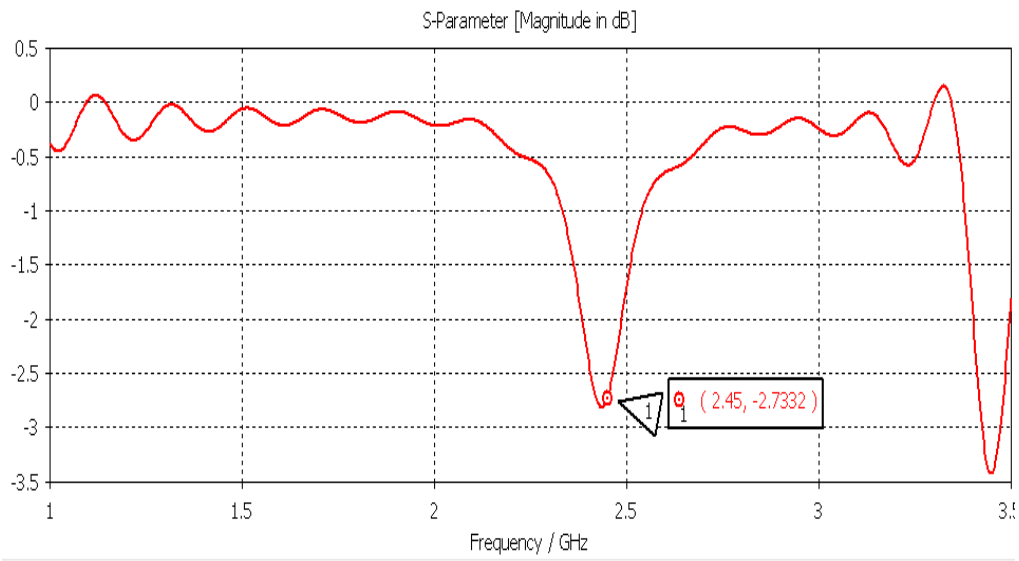


Figure II-17 : Coefficient de réflexion S11 du Silicium

• Résumé et commentaire des résultats

Nous avons résumé tous les résultats dans le tableau (*TableauII-2*), à savoir le S11, le VSWR, le calcul de la Bande passante, le Gain et la Directivité, et d'après celui-ci, nous remarquons qu'avec la même épaisseur du substrat $h = 1.575$ mm nous avons :

- Au niveau du coefficient de réflexion S11, la progression en fonction de la constante diélectrique n'est pas linéaire : elle croit jusqu'à une certaine valeur et ensuite elle décroît.
- La Directivité est proportionnellement inverse avec les valeurs de la permittivité : plus la permittivité augmente et moins sera la valeur de la Directivité.
- Le Gain n'est pas proportionnelle à la permittivité, il est maximum pour une faible valeur de la constante diélectrique.
- La Bande passante décroît avec l'augmentation de la constante diélectrique.
- Plus la permittivité augmente et moins sera l'adaptation, ainsi la valeur du VSWR augmente
- Nous remarquons que le substrat (RF-35) qui a une constante diélectrique faible a donné de bons résultats sur toutes les performances (S11, VSWR, gain, directivité...) à la fréquence 2.45

GHz par rapport aux autres substrats qui ont adaptation insuffisante tel que l'Alumine et Silicium.

H=1.575 mm	Téflon	RF-35	Quartz	FR-4	Alumine	Silicium
Permittivité relative (ϵ_r)	2.17	3.5	3.78	4.3	9.8	11.9
Tan δ	0.009	0.018	0.006	0.018	<0.002	0.0002
Largeur de patch (mm)	48.6	40.6	40.6	37.6	26	24.09
Longueur du patch (mm)	39.8	31.3	30	27.9	18.8	17
S _{1,1} (dB)	-21.67	-39.84	-17.4	-13.65	-3.02	-2.73
Directivité (dB)	6.447	6.19	6.19	6.16	5.827	5.79
Gain (dB)	5.516	3.84	5.058	3.350	4.280	4.75
BP (%)	3.37	3.37	2.04	2.44	-	-
Impédance (Ω)	45.59	49.58	44.56	43.17	26.74	24.35
VSWR	1.213	1.03	1.48	1.52	5.79	6.01

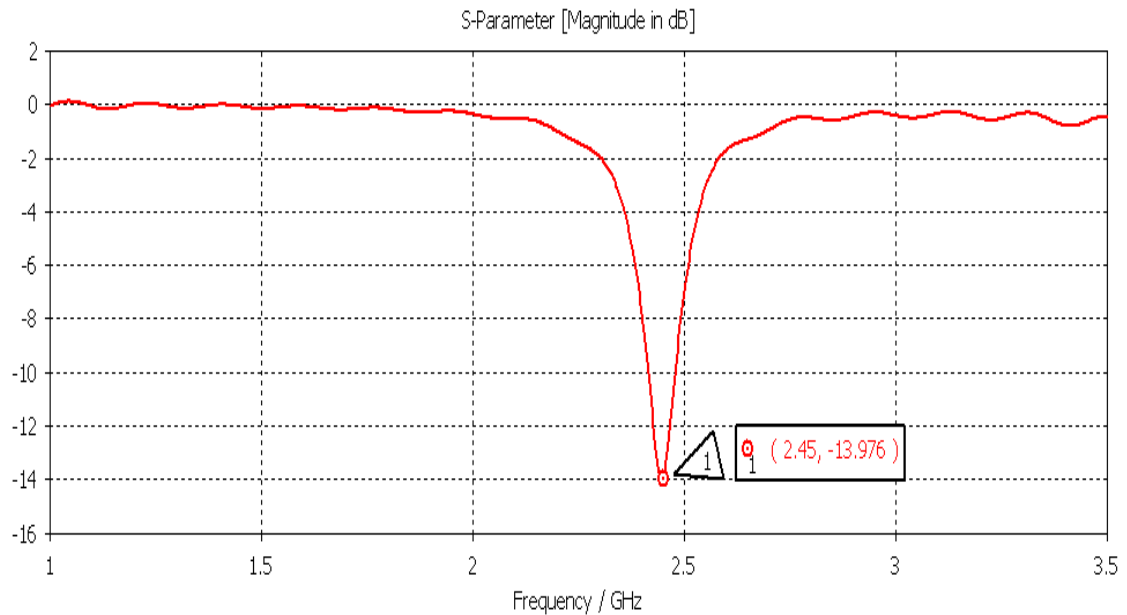
TableauII-2 : Influence du type de substrat sur les performances de l'antenne

II.5 Influence de l'épaisseur de substrat sur les performances de l'antenne patch :

Puisque Le RF-35 a donné des meilleurs résultats on va utiliser ce type de substrat pour étudier la variation d'épaisseur de substrat sur les performances de l'antenne patch.

L'évolution des quatre grandeurs vues précédemment est présentée sur les Figures II.18, II.19, II.20 et II.21

- **h=0.8mm :**



FigureII-18 : Coefficient de réflexionS11 pour h=0.8 mm

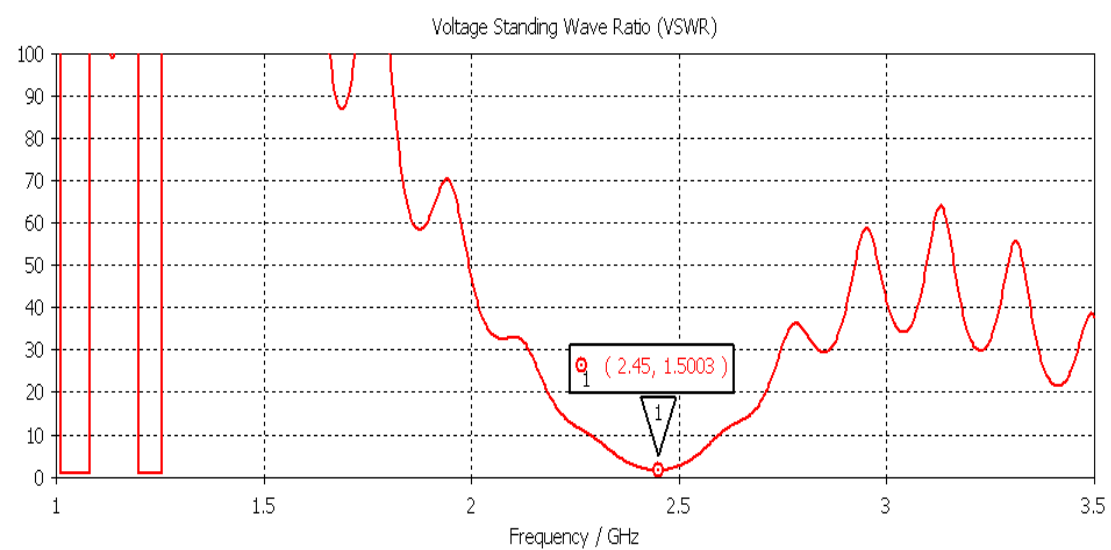
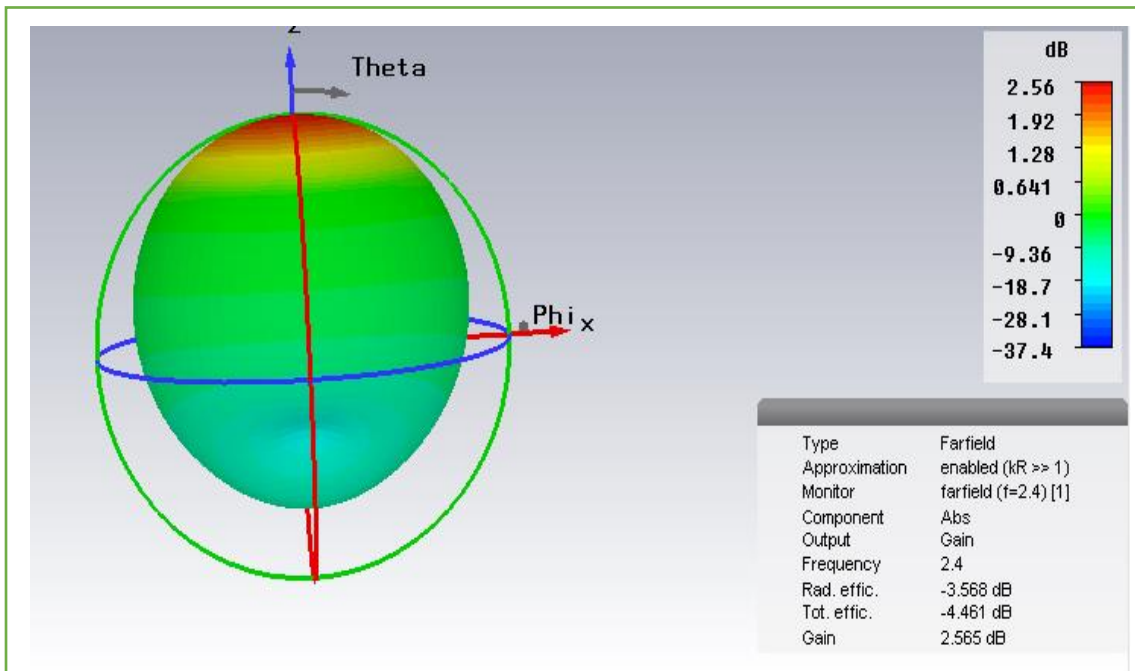
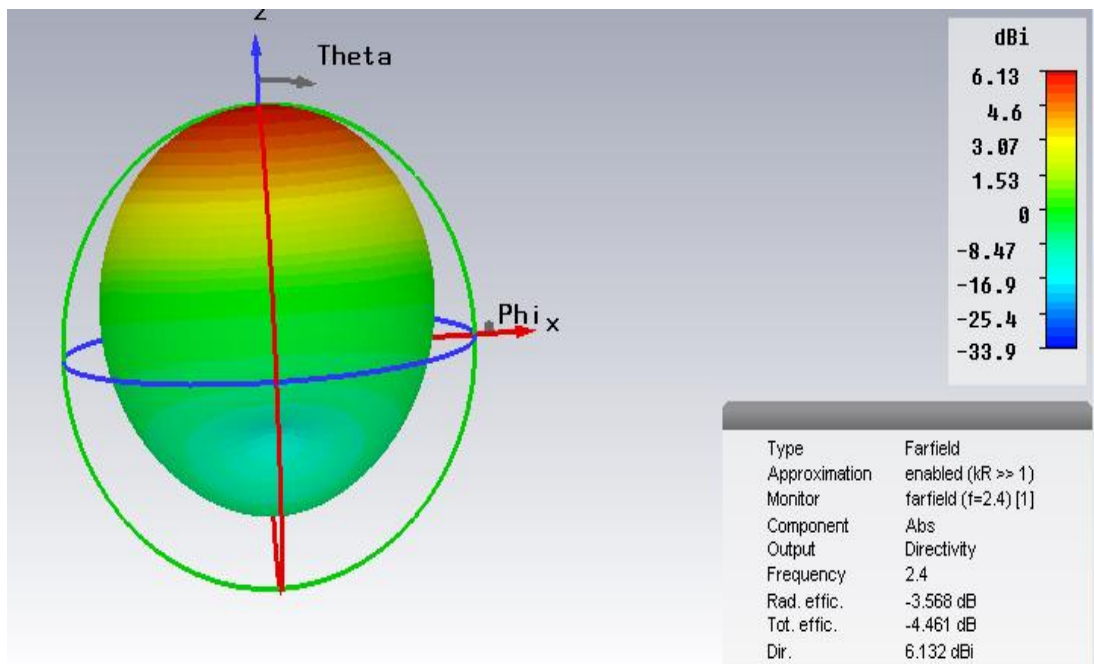


Figure II-19 : VSWR pour h=0.8mm



FigureII-20 : Diagramme de rayonnement en 3D du Gain



FigureIII-21 : Diagramme de rayonnement en 3D de la Directivité

Nous remarquons bien que pour cette épaisseur du substrat le coefficient de réflexion a diminué (voir *FigureII-18*), le gain et la directivité ont chuté aussi (*FigureII-20*) (*FigureIII-21*).

- **h=1.2 mm:**

L'évolution du coefficient de réflexion est présentée sur la Figure II.22

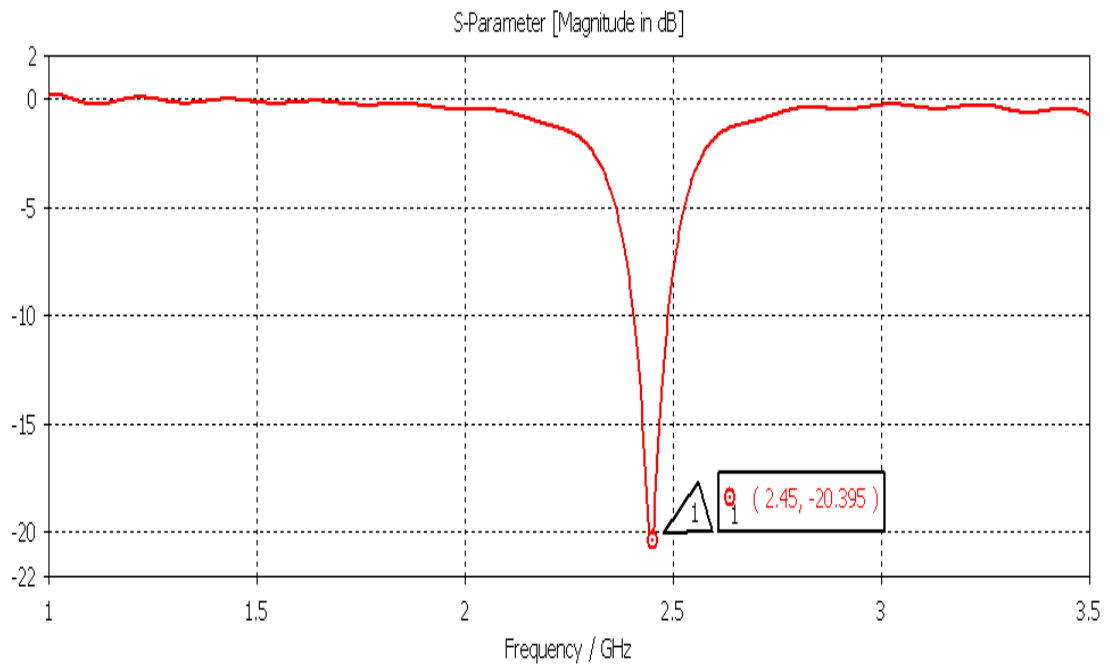


Figure II-22: Coefficient de réflexion S11 pour h= 1.2mm

- **h=2.0mm:**

L'évolution du coefficient de réflexion est présentée sur la Figure II.23

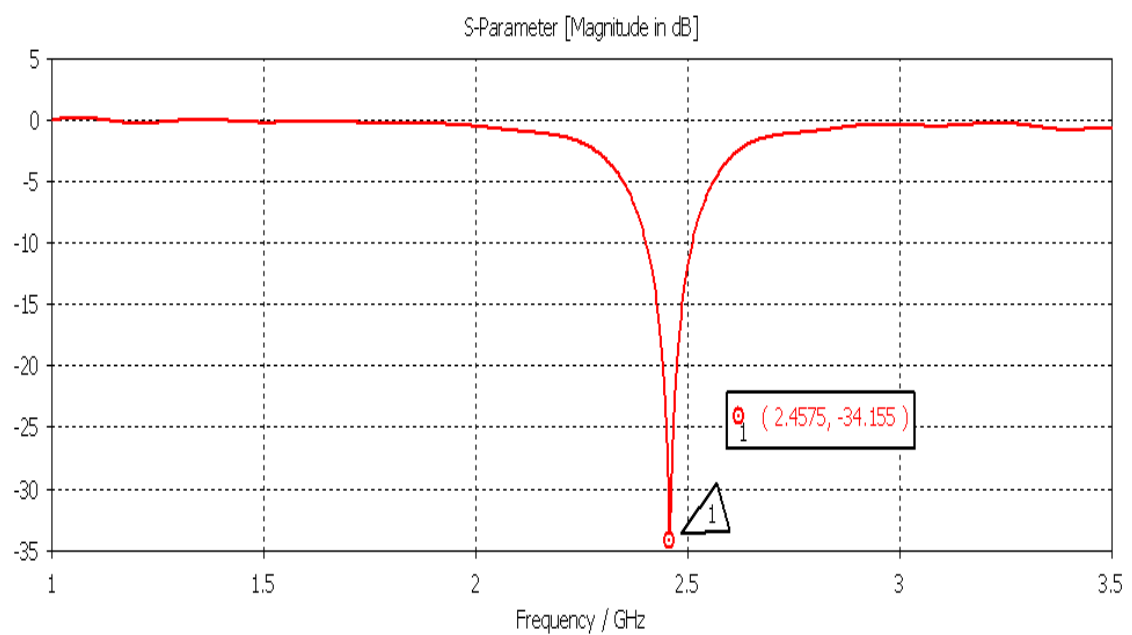


Figure II-23: Coefficient de réflexion S11 pour h= 2mm

- **h=2.4 mm :**

L'évolution du coefficient de réflexion est présentée sur la Figure II.24

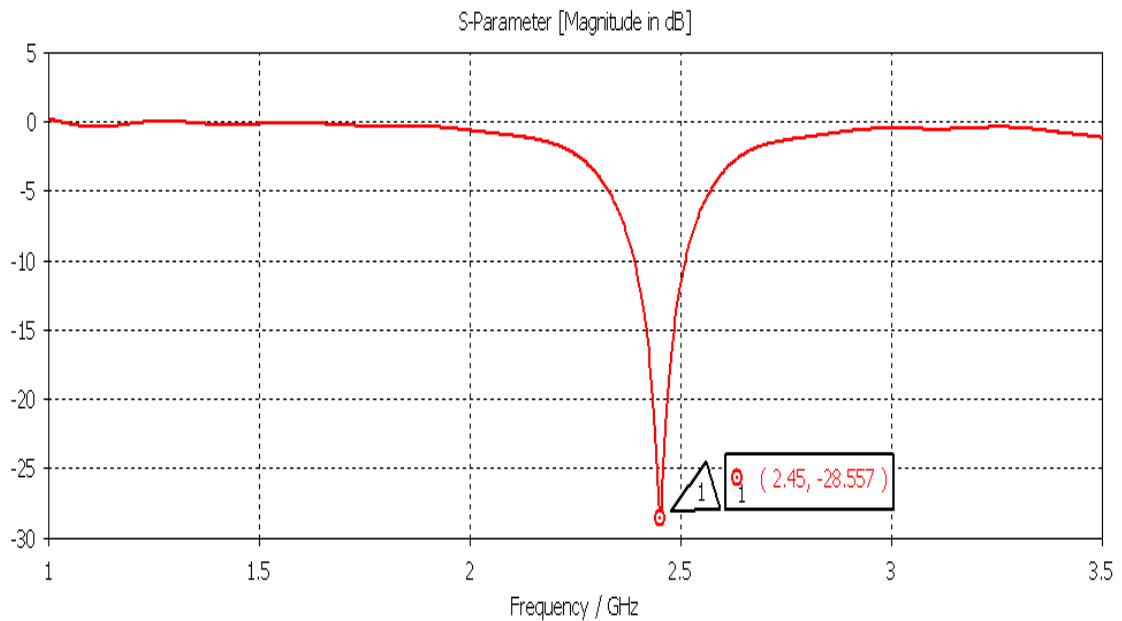


Figure II-24: Coefficient de réflexion S11 pour h= 2.4 mm

- **h=2.8mm :**

L'évolution du coefficient de réflexion est présentée sur la Figure II.25

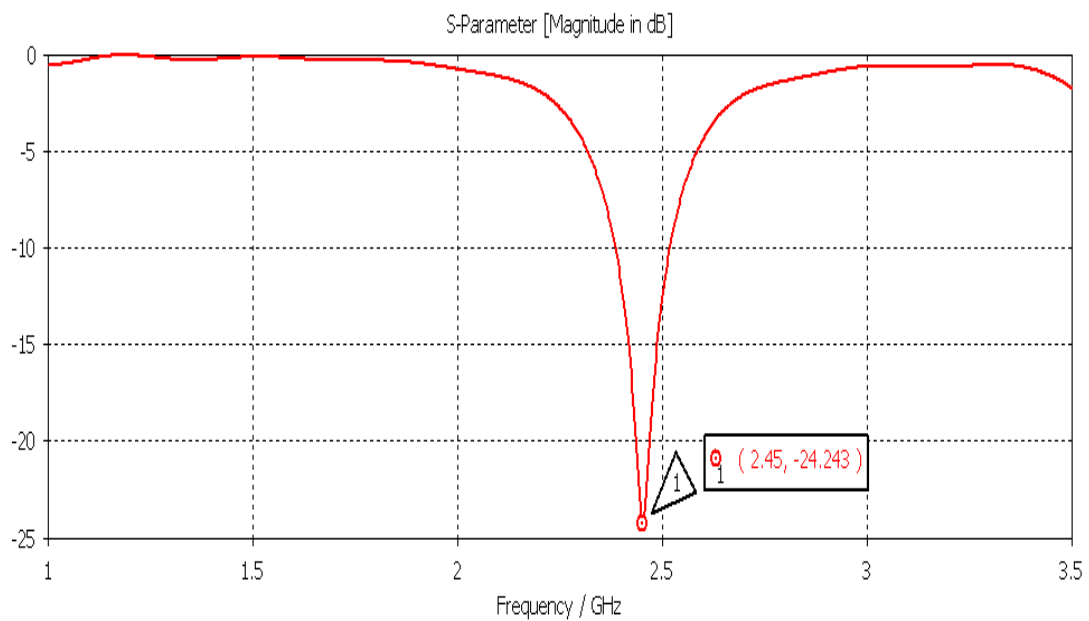


Figure II-25: Coefficient de réflexion S11 pour h= 2.8 mm

- **h=3.2mm :**

L'évolution du coefficient de réflexion est présentée sur la Figure II.26

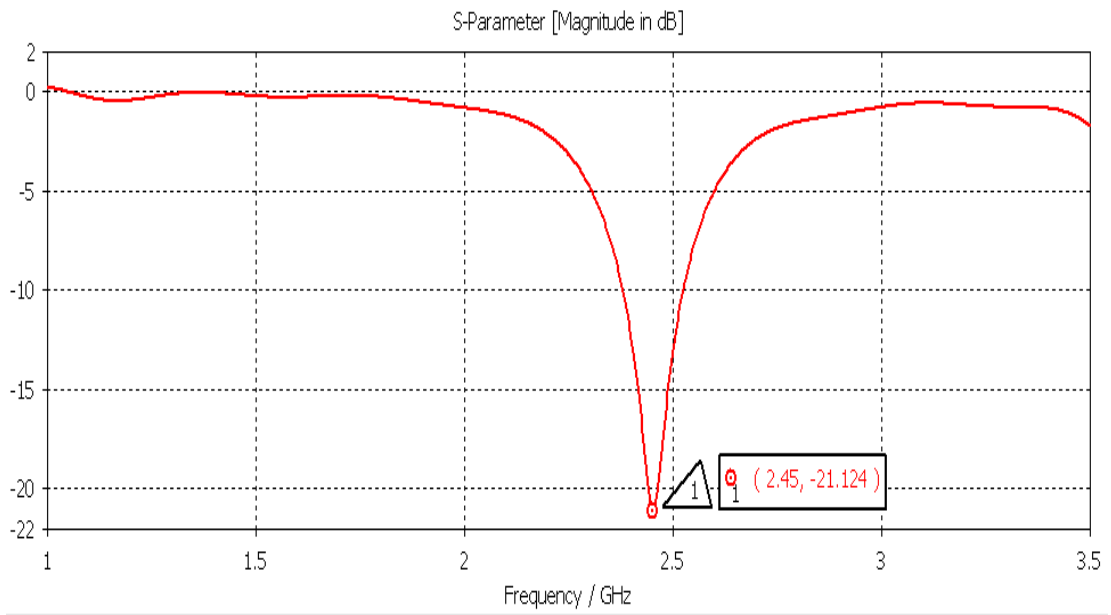


Figure II-26: Coefficient de réflexion S11 pour h= 3.2 mm

- **Résumé des résultats :**

Le tableau (*Tableau II-3*) regroupe tous les résultats des changements de l'épaisseur du substrat en fonction des performances de l'antenne imprimée :

(mm)	H=0.8	H=1.2	H=1.575	H=2.0	H=2.4	H=2.8	H=3.2
S11 (dB)	-13.97	-20.39	-39.84	-34.15	-28.55	-24.24	-21.12
VSWR	1.5	1.211	1.03	1.10	1.07	1.13	1.19
Gain (dB)	2.56	3.427	3.84	4.25	4.47	4.63	4.71
Directivité (dB)	6.13	6.13	6.197	6.09	6.06	6.03	6.01
Bande passante (%)	2.44	3.26	3.67	4.48	4.89	5.30	5.71
Impédance (Ω)	43.31	45.32	47.55	47.15	46.61	46.03	45.47
Largeur de patch (mm)	40.6	40.6	40.6	40.6	40.6	40.6	40.6
Longueur de patch (mm)	31.7	31.5	31.3	31	30.9	30.7	30.5

Tableau II-3 : Influence de l'épaisseur de substrat sur les performances de l'antenne

- **Commentaires :**

D'après les résultats du tableau (*Tableau II-3*), nous remarquons que :

- Le coefficient de réflexion S11 augmente avec l'épaisseur du substrat jusqu'à une certaine valeur puis il commence à diminuer [18].
- La valeur du gain est proportionnelle avec l'épaisseur,
- La progression de la directivité en fonction de l'épaisseur n'est pas linéaire, elle croît au-delà d'une certaine valeur de l'épaisseur (1.575mm), elle commence à décroître.
- Plus on augmente l'épaisseur du substrat et plus la bande passante augmente, donc il y'a une relation linéaire entre l'épaisseur du substrat et la bande passante.
- L'épaisseur ($h=1.575\text{mm}$) a donné des meilleurs résultats surtout au niveau de (coefficient de réflexion, le VSWR, la directivité, le gain et la bande passante) à la fréquence (2.45Ghz)

II.6 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons étudié l'influence du type de substrat et la variation de son épaisseur sur les performances de l'antenne patch rectangulaire sous logiciel CST Microwave studio, nous avons abouti à une conclusion telle que :

- Le substrat qui a une constante diélectrique faible donne des meilleurs résultats par rapport aux substrats qui ont une forte permittivité,
- L'épaisseur du substrat influe sur la bande passante, donc l'augmentation de la hauteur du substrat élargit la Bande passante.

Conclusion Générale

Conclusion générale et perspectives

L'organisation de notre travail nous a permis de bien assimiler l'ensemble des connaissances collectées dans le domaine des antennes, En ayant ces connaissances de base, l'étude des antennes patch nous est moins compliqué.

En premier lieu nous avons donné des généralités sur les antennes imprimées en parlant de leurs caractéristiques, leurs techniques d'alimentations ainsi quelques domaines d'applications...

Ensuite dans le deuxième chapitre nous avons entamé la simulation d'une antenne rectangulaire en calculant ces paramètres géométriques à l'aide de logiciel de simulation CST pour étudié l'influence des divers types de permittivité sur les performances de l'antenne comme S11 , le gain , directivité.....ainsi que l'effet du changement de l'épaisseur de substrat sur les caractéristiques des antennes imprimées et le souci de réalisation et d'adaptation tout en gardant les caractéristiques physiques et électriques meilleurs que possible

On peut conclure que :

- Le substrat qui a une constante diélectrique faible donne des meilleurs résultats par rapport aux substrats qui ont une forte permittivité.
- L'augmentation de la hauteur du substrat élargit la Bande passante.

Comme perspective, nous envisagerons de poursuivre ce travail et accéder à la structure bande interdite photonique (BIP).

Références bibliographiques :

- [1] **ATTI Bakouche, MEKKAOUCHE Magdoula** « L'effet des caractéristiques de l'antenne patch sur sa directivité » Master (2014), Université ABDERRAHMANE MIRA-Bejaia.
- [2] **BOUSSAHA SOMIA** « Contribution à l'étude et à la modélisation des antennes imprimées rectangulaires » Master (2012), Université 8Mai 1945 – Guelma.
- [3] **Mr IRANKUNDA Germain & Mr UFITEYEZU Emmanuel** « Etude et Conception d'une antenne patch Rectangulaire pour les Réseaux Personnels Sans fils _WPAN à 60 GHz. » Master (2011), Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene.
- [4] **D. Rakesh**«Systematic evaluation of square patch antenna performance based on permittivity of the material » International Journal of Engineering Science and Technology (IJEST)march 2011.
- [5]**Belazzoug.F**« Etude D'une Antenne Micro-ruban Triangulaire A Bande Interdite Photonique (BIP) 2D » Master (2016), UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA.
- [6]**MouradHASSAD** « Modélisation d'une antenne patch réalisée sur un substrat à tenseurs de permittivité et de perméabilité diagonaux » Master (2009), Université de Batna.
- [7]**AmelBOUFRIOUA** « Contribution à l'étude des antennes a patch résistif et parfaitement conducteur tenant compte d'une source d'excitation et des nouvelles formes asymptotiques de courant » Master (2006), Université Mentouri de Constantine.
- [8] **Hamaizia, Zahra** « Conception et simulation d'un réseau d'antennes micro-rubans circulaires pour les applications radar » Master (2015).
- [9]**DeghfelWalid et MerzouguiRami.** « Etude et conception d'une antenne patch ultra large bande ULB à bande rejetée » Master (2017), Université Mohamed Boudiaf –Msila.
- [10] **BEN TAHAR Zohra, BEN ABDESSELAM Sarah Yamina** « Réalisation d'une Interface graphique de Calcul des paramètres d'antennes patch et conception logicielle » Master(2019) ,Centre Universitaire Belhadj Bouchaib d'Ain-Temouchent.

[11] **MELIHISouhila et FENGAL Tine-hinane** « Thème Antenne de Téléphonie mobile, caractérisation et optimisation » Université ABDERRAHMANE MIRA-Bejaia, Master (2016)

[12] https://fr.wikipedia.org/wiki/Antenne_radio%C3%A9lectrique#Fr%C3%A9quence_d'utilisation dernier accès :09/05/2020

[13] **Mr. ARAB Tarek** « Etude des matériaux composites (Titanate oxyde) : application pour la réalisation des substrats d'antennes miniatures » Master(2014) ,UNIVERSITE SETIF-1.

[14] **D.M. POZAR** "Microstrip Antennas ", IEEE, Vol.80 N° 1, pp .79-91, January 1992.

[15] **G.Poitau**, "Contribution au développement d'un isolateur coplanaire à résonance par la méthode des différence finies dans le domaine teemporel", thèse de Doctorat INSA Lyon, (Juillet 2002)

[16] **G. F. Pedersan, J Bach** " Hand set antenna for mobile communication, integration, diversity and performance", URSI Review of Radio of science, pp-119-139, (1996)

[17] **GUENNACH Mohamed** « Conception d'une antenne ''PIFA'' multi-bandes pour applications sans fil » , Master(2016), Université Sidi Mohamed Ben Abdellah.