



Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de génie électrique

MÉMOIRE DE MASTER

Domaine : Sciences et Technologie
Filière : Télécommunications
Spécialité : Réseaux et Télécommunications

Réf. :

Présenté et soutenu par :

- Belouafi Moulay Abdelkder
- Djeddi Imadeddine

Le : Mardi 03 Juin 2025

ETUDE ET SIMULATION D'UN RESEAU D'ANTENNES IMPRIMEES POUR LES SYSTEMES DE TELECOMMUNICATIONS SANS FILS

Jury :

Devant le Jury composé de :

Nom & Prénom	Grade	Qualité	Etablissement
Hamaizia Zahra	pr	Président	Univ-Biskra
Ameid sofiane	MAA	Examineur	Univ-Biskra
Boukredine Salah eddine	MAA	Encadreur	Univ-Biskra

Année universitaire : 2024/2025



Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de génie électrique

MÉMOIRE DE MASTER

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Télécommunications

Spécialité : Réseaux des Télécommunications

Réf. :

ETUDE ET SIMULATION D'UN RESEAU D'ANTENNES IMPRIMEES POUR LES SYSTEMES DE TELECOMMUNICATIONS SANS FILS

Le :

Présenté par :

Avis favorable de l'encadreur :

Signature Avis favorable du Président du Jury

Cachet et signature

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

نتقدم بالشكر الجزيل لله العليّ القدير الذي منّ علينا بالقوة والصبر لإنجاز هذا العمل المتواضع.

ونتقدم بجزيل الشكر والامتنان والتقدير لمشرفنا الأستاذ "بوكردين صلاح" على مرافقته لنا في اعداد هذه المذكرة بخبرته العلمية .

ونشكر أعضاء لجنة التحكيم ، وكل من ساعدنا في إنجاز هذا العمل. كما نشكر والدينا الأعزاء اللذين حرصا على تربيتنا إلى هذا المستوى التعليمي ، وجميع أفراد عائلة بلوافي وعائلة جدي.

A MES CHERS PARENTS

A MA SŒUR ET MES FRÈRES

A MES CHERS AMIS

A TOUS CEUX QUE J'AIME

Imad Fddine

لحمد لله على لذة الإنجاز، الحمد لله عند البدء وعند الختام . الحمد لله الذي بنعمته تتم الصالحات، وبتوفيقه
تتحقق المقاصد والغايات . الحمد لله على التمام، ونسأل المولى القبول والإخلاص فيه . إلى من كانا شديدي
الحرص لي على طلب العلم، ولم يبخلا عليّ بدعواتهما، والديّ الكريمين حفظهما الله ورعاهما ومتعهما بموفور
الصحة والعافية . إلى إخواني وأخواتي كل واحد باسمه، وإلى أبناءهم وأخص بالذكر الكتكوتين الصغيرين "آمنة"
و"مولاي عمار" . إلى جميع عائلة "بلوافي" أينما حلوا أو ارتحلوا . إلى زميلي في هذا العمل . . . إلى
جميع زملائي في الدفعة . وأخص بالذكر "توهامي حسان" و "زميلي عبد الرحمان" "إلى كل من ساندني من
قريب أو بعيد . إلى جميع هؤلاء أهدي ثمرة جهدي

بلوافي مولاي عبد القادر

LISTE DES FIGURES

LISTE DES FIGURES

Figure I-1Exemple d'antennes patch [33]	16
Figure I-2 Présentation d'une antenne patch. [1]	18
Figure I-3 Les différentes formes du patch [12].....	19
Figure I-4 Un système de communication radio par (OEM) [15]	21
Figure I-5Types de polarisation [1]	24
Figure I-6 Bande passante d'une antenne [39]	25
Figure I-7Antenne en mode d'émission [19].....	27
Figure I-8Distribution des charges et densité du courant sur une antenne microruban [15] ...	27
Figure I-9Alimentation par ligne microruban [15].....	28
Figure I-10Antenne micro ruban alimenté par câble coaxial [15].....	29
Figure I-11Type de la ligne microruban [7]	29
Figure I-12Alimentation de proximité. [1]	30
Figure I-13Circuit équivalent d'un patch alimenté par proximité [1]	30
Figure I-14Vue en coupe d'une ligne coplanaire [1].....	31
Figure I-15Alimentation couplée par fente [14].....	31
Figure I-16 Antenne patch microruban rectangulaire avec une ligne quarte d'onde [18].....	33
Figure I-17 Antenne patch microruban rectangulaire Alimenté par une ligne microruban simple [18]	33
Figure I-18Antenne patch circulaire [18]	37
Figure I-19 Antenne patch circulaire [18].....	37
Figure I-20antenne patch triangulaire. [18].....	40
Figure I-21 antenne patch triangulaire avec une ligne quarte d'onde [18]	40
Figure I-22Adaptation par quart d'onde [1]	42
Figure I-23 stub en circuit ouvert [1]	43
Figure I-24Modélisation [1]	43
Figure I-25Patch adapté par encoches de longueur [1]	43
Figure II-1 Géométrie d'un réseau linéaire [12].....	36
Figure II-2Géométrie d'un réseau planaire[14].....	37
Figure II-3 Géométrie d'un réseau circulaire [14].....	37
Figure II-4Géométrie d'un réseau cylindrique de M anneaux de rayon a espacés d'une distance d suivant [14]	38
Figure II-5Géométrie d'un réseau conique de M anneaux espacés d'une distance d et composés de N [14]	38
Figure II-6alimentation parallèle d'un réseau d'antennes [1].....	39
Figure II-7alimentation série d'un réseau d'antennes [1].....	39
Figure II-8Lignes effilées [12]	39
Figure II-9 transformateurs d'impédance $\lambda/4$ [12]	39
Figure II-10Déphaseurs en parallèle [12].....	41
Figure II-11Déphaseurs en série [12]	41
Figure II-12La jonction T [12]	41

LISTE DES FIGURES

Figure II-13Diviseur Wilkinson [12].....	42
Figure II-14 coupleur par proximité [12]	42
Figure II-15L'anneau hybride [12].....	43
Figure III-1 Une interface graphique du simulateur CST studio 2019.	47
Figure III-2Structure d'un patch rectangulaire simple.....	48
Figure III-3 plan de masse.....	48
Figure III-4 Antenne réseau à deux éléments.....	50
Figure III-5 Antenne réseau à quatre éléments.....	51
Figure III-6Performance de réflexion d'antenne à UN éléments (S1,1)	52
Figure III-7Performance de réflexion d'antenne à deux éléments (S1,1)	53
Figure III-8Performance de réflexion d'antenne à quatre éléments (S1,1)	53
Figure III-9Modèle de rayonnement 3D d'une antenne à UN éléments (Directivity)	55
Figure III-10Modèle de rayonnement 3D d'une antenne à UN éléments (Gain).....	56
Figure III-11Modèle de rayonnement 3D d'une antenne à Deux éléments (Directivity)	58
Figure III-12Modèle de rayonnement 3D d'une antenne à Deux éléments(Gain).....	59
Figure III-13Modèle de rayonnement 3D d'une antenne à quatre éléments(Directivity)	60
Figure III-14Modèle de rayonnement 3D d'une antenne à quatre éléments(Gain)	61
Figure III-15Représentation de l'impédance d'entrée d'une antenne à UN éléments en fonction de la fréquence	63
Figure III-16Représentation de l'impédance d'entrée d'une antenne à deux éléments en fonction de la fréquence	63
Figure III-17Représentation de l'impédance d'entrée d'une antenne à quatre éléments en fonction de la fréquence.....	64
Figure III-18Courbe de vswr d'une antenne à UN éléments	65
Figure III-19Courbe de vswr d'une antenne à deux éléments	65
Figure III-20Courbe de vswr d'une antenne à quatre éléments	65

LISTE DES TABLEAUX

Tableau III-1 Les dimensions de l'antenne patch rectangulaire proposée.....	49
Tableau III-2 Les équations paramétriques d'un patch rectangulaire.	49
Tableau III-3 Les dimensions (en mm) de l'antenne patch rectangulaire proposée.....	50
Tableau III-4 Dimensions d'une antenne patch rectangulaire à quatre éléments.....	51
Tableau III-5Étude comparative du coefficient de réflexion (S11) et de la bande passante des antennes à un, deux et quatre éléments.....	53
Tableau III-6Analyse des performances de l'antenne : gain, directivité et angle d'ouverture avec des éléments croissants.....	62

LISTE D'ABRÉVIATION

FR-4 : Retardateurs de flamme 4

CST: computer simulation technology

Résumé

Cet mémoire présente une étude de conception d'une antenne micro-patch, composée d'un, deux et quatre éléments ramifiés rectangulaires, fonctionnant à 2,4 GHz et alimentée par une grille micro-patch. L'antenne a été conçue sur un substrat FR-4 avec une constante diélectrique de 4,3 d'épaisseur, 1,6 mm de hauteur et différentes dimensions. Ce type d'antenne est largement utilisé dans divers systèmes de communication en raison de sa petite taille, de son faible coût, de sa légèreté, de son gain modéré et de son diagramme de rayonnement. Dans cette recherche, des ouvertures ont été ajoutées à l'antenne. L'antenne a été conçue et analysée par simulation numérique (CST).

Mots-clés : antenne patch, de gain, directionnel, perte de retour.

summary

This thesis presents a design study of a micro-patch antenna, composed of one, two, and four rectangular branched elements, operating at 2.4 GHz and fed by a micro-patch grid. The antenna was designed on an FR-4 substrate with a dielectric constant of 4.3, a thickness of 1.6 mm, and various dimensions. This type of antenna is widely used in various communication systems due to its small size, low cost, light weight, moderate gain, and radiation pattern. In this work, apertures were added to the antenna. The antenna was designed and analyzed by numerical simulation (CST)

Keywords: patch antenna, gain, directional, return loss.

ملخص

تقدم هذه المذكرة دراسة تصميمية لهوائي رقعة دقيقة، يتكون من عنصر واحد، وعنصرين، وأربعة عناصر متفرعة مستطيلة، تعمل بتردد 2.4 جيجا هرتز، وتغذيها شبكة رقعة دقيقة. صُمم الهوائي على ركيزة FR-4، بثابت عازل يبلغ سمكه 4.3 وارتفاعه 1.6 مم، وبأبعاد مختلفة. يُستخدم هذا النوع من الهوائيات على نطاق واسع في أنظمة الاتصالات المختلفة نظرًا لصغر حجمه، وتكلفته المنخفضة، ووزنه الخفيف، والكسب المعتدل، ونمط إشعاعه. في هذا البحث، أُضيفت فتحات إلى الهوائي. صُمم الهوائي وحُلل باستخدام تقنية المحاكاة الحاسوبية CST.

الكلمات المفتاحية: هوائي رقعة، كسب، اتجاهية، خسارة العائد.

SOMMAIRE



REMERCIEMENTS	I
DÉDICACE	II
LISTE DES FIGURES	IV
LISTE DES TABLEAUX.....	VI
LISTE D'ABREVIATION.....	VII
RESUME.....	VIII
SOMMAIRE	IX
 INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	 12
 chapiter I: Généralité Sur Les Antennes Imprimées	 13
I.1 Introduction	15
I.2 Historique	16
I.3 Définition des antennes imprimés	16
I.4 . Les types des antennes patches	17
I.5 Description des antennes imprimées ou patch	17
I.5.1 Choix du matériau de patch.....	19
I.5.2 Choix du substrat.....	21
I.6 Le rôle de l'antenne imprimée	21
I.7 Les caractéristiques des antennes imprimées	21
I.7.1 La directivité	22
I.7.2 Le gain.....	22
I.7.3 Rendement de l'antenne	23
I.7.4 Polarisation.....	24
I.7.5 Coefficient de réflexion S_{1,1}	24
I.7.6 Diagramme de rayonnement	26
I.7.7 La bande passante.....	26
I.7.8 Impédance d'entrée de l'antenne.....	26
I.8 Mécanisme de rayonnement des antennes imprimées.....	27

SOMMAIRE

I.8.1	VSWR	28
I.9	Méthodes d'alimentation d'antennes imprimées	28
I.10	Avantages, inconvénients des antennes imprimées.....	32
I.11	Modélisation des antennes patch.....	33
I.11.1	Antenne patch rectangulaire.....	33
I.11.2	Antenne patch circulaire.....	37
I.11.3	Antenne patch triangulaire	40
I.12	Techniques d'adaptation des antennes imprimées	42
I.12.1	Adaptation par ligne quart d'onde.....	42
I.12.2	Adaptation par stub	43
I.12.3	Adaptation avec encroaches	43
I.13	Les domaines d'applications des antennes imprimées	44
I.14	Conclusion.....	44
chapiter II:	Généralité Sur Les Réseaux D'antenne Imprimées.....	45
II.1	Introduction	34
II.2	Définition Un réseau d'antennes imprimées	34
II.3	Les types de réseaux d'antenne imprimées	35
II.3.1	Réseaux linéaires.....	35
II.3.2	Facteur de réseau	36
II.3.3	Réseaux planaires	36
II.3.4	Réseaux circulaires.....	37
II.3.5	Réseaux cylindriques.....	37
II.3.6	Réseaux coniques	38
II.4	Techniques d'alimentation des antennes imprimées	39
II.5	Adapter les patches de 100Ω à une ligne de 50Ω	39
II.6	Alimentation des réseaux d'antennes	40
II.6.1	Les dispositifs utilisés dans les réseaux	40
II.7	Avantages et inconvénients des réseaux d'antennes imprimées	43
II.7.1	Avantages	43
II.7.2	Inconvénients	44
II.8	Conclusion.....	44
chapiter III:	Simulations ET resultant's	45

SOMMAIRE

III.1 Introduction	46
III.2 Description du logiciel de simulation CST Studio Suite	46
III.3 Conception et simulation de l'antenne patch rectangulaire	47
III.3.1 Conception d'antenne patch rectangulaire Un éléments.....	47
III.3.2 Conception et simulation d'un réseau deux éléments.....	50
III.3.3 Conception et simulation d'un réseau quatre éléments	51
III.3.4 Simulation du paramètre S1, 1	52
III.3.5 Analyse des résultats du tableau (coefficient de réflexion (S1,1) et de la bande passante des antennes à un, deux et quatre éléments).....	54
III.4 Le diagramme de rayonnement d'antenne rectangulaire	55
III.4.1 Directivité.....	57
III.4.2 Gain	57
III.4.3Analyse des résultats du tableau(Gain ;Directivité L'angle D'ouverture)	62
III.5 Impédance d'entrée de l'antenne.....	62
III.5.1 L'importance de maintenir la valeur d'impédance constante à 50 ohms .	64
III.6 VSWR (Voltage Standing Wave Ratio) de l'antenne rectangulaire	64
III.6.1 analyse des résultats VSWR.....	66
III.7 Conclusion.....	66
III.8 Références	68

Introduction GÉNÉRALE

L'une des premières formes d'antennes patch a été développée par Sir Jagadish Chandra Bose. Le concept remonte à l'époque où les chercheurs ont commencé à explorer des structures d'antennes compactes et efficaces.

Cependant, les véritables avancées dans le domaine des antennes patch ont eu lieu au XXe siècle. Dans les années 1950, des chercheurs tels que D. M. Possar et G. R. Whinnery ont commencé à étudier les propriétés de rayonnement des antennes patch. Ils ont découvert que ces antennes pouvaient être conçues pour fonctionner aux fréquences micro-ondes et offrir des performances supérieures à celles des antennes filaires [1].

Aujourd'hui, les antennes patch sont largement utilisées dans de nombreux domaines des communications sans fil. Leur conception compacte et leur intégration dans les appareils électroniques en font un choix populaire pour des applications telles que les téléphones portables, les réseaux sans fil, les systèmes de navigation par satellite, et bien d'autres. Dans cet article, nous avons pour objectif d'améliorer les performances des antennes à 2.4 GHz, compatibles avec le Bluetooth et le Wi-Fi, et de présenter les résultats en détail, en soulignant leur évolution historique et leur impact significatif sur les systèmes de communication modernes. Le premier chapitre aborde divers aspects des antennes, notamment leur nature et leur rôle fondamental dans les systèmes de communication, ainsi que les différentes classifications et types d'antennes. Enfin, nous abordons les diverses applications des antennes dans divers domaines.

Dans le deuxième chapitre, nous explorons les principaux aspects des antennes patch. Nous examinons leur conception, leur structure et leurs différentes formes. Nous abordons également brièvement les différentes techniques d'analyse utilisées pour les étudier.

Dans le troisième chapitre, nous avons pour objectif de concevoir et de simuler des antennes patch à l'aide du logiciel CST, puis de présenter divers résultats.

chapiter I:

Généralité Sur Les Antennes Imprimées

I.1 Introduction

À notre époque moderne, le monde est témoin de développements technologiques sans fil.

Précédent, qui crée d'énormes opportunités pour améliorer divers aspects de la vie quotidienne

Parmi ces développements, le concept d'antenne imprimée se démarque. Surtout dans les petits appareils électroniques

Les antennes imprimées sont utilisées pour envoyer et recevoir des signaux électromagnétiques, mais elles servent également à améliorer la communication.

Dans ce chapitre, nous approfondirons le concept des antennes imprimées, leurs mécanismes de fonctionnement et le rôle des antennes patch dans le développement de ce type d'antennes.

Après cela, nous parlerons des réseaux d'antennes et explorerons des exemples pratiques et des applications d'antennes imprimées, en mettant l'accent sur les avantages que ces antennes peuvent apporter en termes d'amélioration de l'efficacité de l'utilisation de ce type d'antennes

De plus, nous discuterons des défis rencontrés lors de la mise en œuvre d'antennes imprimées et des solutions potentielles pour les surmonter, dans le but de fournir un aperçu complet de l'importance de ces antennes.

I.2 Historique

Le concept d'antennes imprimées, appelées aussi antennes micro-rubans (micro-strip patch en anglais) n'est pas un concept nouveau. Les premières publications apparaissent en 1953 avec Deschamps et en 1955 avec le dépôt d'un brevet français par Gutton et Baissinot. Les premières réalisations naissent avec Howell et Munson en 1970 [35].

Deux atouts majeurs vont entraîner un développement très important de ce type d'antennes : leur faible cout de réalisation, et leur capacité d'intégration. Elles sont aujourd'hui implantées dans de nombreux dispositifs d'électronique et constituent le type d'antenne privilégié aux fréquences microondes dans les systèmes de communications intégrés modernes [36].

I.3 Définition des antennes imprimés

Les antennes imprimées ou micro rubans, ou « patches » en anglais sont des éléments rayonnants planaires. L'antenne est réalisée par gravure d'un circuit imprimé. De part leur technologie de fabrication, ceux-ci peuvent être intégrés au plus près des circuits électroniques en occupant un volume réduit et se conformant à différents types de surface. L'antenne patch est un élément transducteur.



Figure I-1Exemple d'antennes patch [33]

Elle effectue ainsi deux fonctions fondamentales qui définissent le principe d'antenne de manière générale, il s'agit bien du Rayonnement (émission) et de la réception d'une onde électromagnétique évoluant avec une fréquence compatible à celle de l'antenne la Figure I.1 présente quelques exemples d'antennes.

I.4 . Les types des antennes patches

Il existe plusieurs types d'antennes, notamment

- Antennes patch microruban,
- des antennes microrubans,
- Fente F inversée planaire et antennes (PIFA)
- Antennes fractales.
- Petites antennes patch

La bande est largement utilisée dans les systèmes de communication sans fil en raison de son profil

Bas, léger et facile à fabriquer. Il est constitué de fines pellets

Un conducteur imprimé sur un substrat isolant et soutenu par de petites lignes de ruban.

L'extension de la bande passante des antennes est l'un des principaux sujets

Développement de la technologie des antennes. En plus des deux thèmes principaux des antennes

Les petites bandes apparues sur le marché dans les années 1970 gagnaient en popularité.

Partage de bande passante et multifréquence. La technologie haut débit et multi bande dans les antennes imprimées offre une utilisation

I.5 Description des antennes imprimées ou patch

Une antenne imprimée se compose d'un plan de masse et d'une ou plusieurs couches

Substrat de permittivités égales ou différentes ϵ_r (Figure I.2).

L'antenne imprimée est également constituée d'une partie métallique rayonnante de forme.

Un élément rayonnant arbitraire, appelé patch, est déposé sur un substrat isolant

L'antenne imprimée est constituée d'une partie métallique rayonnante de forme [2]

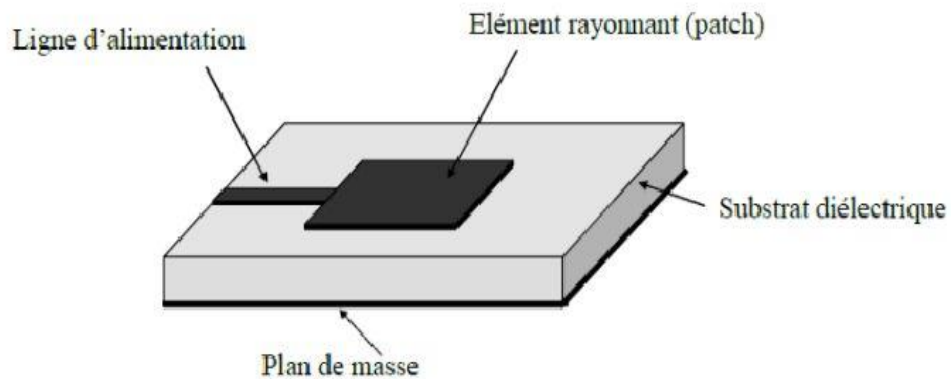


Figure I-2 Présentation d'une antenne patch. [1]

Un élément rayonnant arbitraire, appelé patch, est déposé sur un substrat isolant

Il existe plusieurs formes d'éléments radioactifs, mais les principales formes utilisées sont:

Carrés, rectangulaires, circulaires et ovales de par la simplicité de leur construction.

La figure (I-2) montre des éléments radioactifs simples. [1]

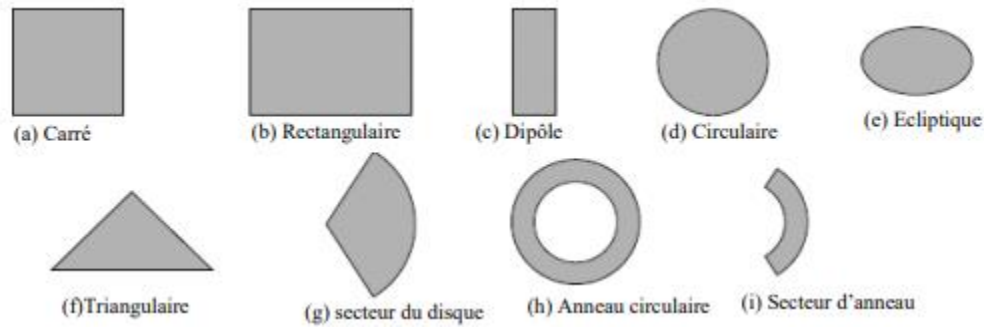


Figure I-3 Les différentes formes du patch [12]

I.5.1 Choix du matériau de patch

Les matériaux peuvent alors être classés selon leur susceptibilité et leurs variations en fonction de différents facteurs physiques. Lors du passage de l'onde dans l'antenne, le conducteur de patch s'échauffe et la chaleur est alors dissipée par effet Joule. Pour un métal

Pour un métal comme le cuivre, qui est un excellent conducteur, l'impédance de surface (Z_s) est principalement déterminée par sa conductivité électrique (σ) et la fréquence (f) de l'onde électromagnétique.

La relation approximative est la suivante: [27]

Cette équation est particulièrement importante en électromagnétisme lorsqu'il s'agit de l'interaction des ondes électromagnétiques avec les surfaces conductrices, en particulier à des fréquences élevées où la profondeur de la peau (la profondeur à laquelle l'onde électromagnétique pénètre dans le conducteur) est faible.

$$Z_s = \frac{E_{II}}{H_{II}} = \sqrt{\frac{i\omega\mu_0}{\sigma}} \quad \text{I-1}$$

où :

- i : est unite imaginaire
- $\omega = 2\pi f$ est la pulsation angulaire

- μ : est la perméabilité magnétique du matériau (pour le cuivre, elle est proche de celle du vide)
- Z_S : Cela représente l'impédance de surface d'un matériau.
- E_{II} : Cela représente la composante tangentielle du champ électrique à la surface du matériau
- H_{II} : Cela représente la composante tangentielle du champ magnétique à la surface du matériau
- σ : Il s'agit de la conductivité électrique du matériau

L'augmentation de l'impédance de surface à haute fréquence a une conséquence directe : une plus grande dissipation de puissance par effet Joule dans le conducteur. La puissance dissipée par unité de surface (P) est donnée par la relation : [27]

Afin de diminuer la puissance dissipée ou bien les pertes métalliques dans les dispositifs hyperfréquences, plusieurs auteurs ont proposé d'utiliser des supraconducteurs et particulièrement des céramiques à haute température critique. Dans le domaine des hyperfréquences, seuls les supraconducteurs de type II gardent leur état supraconducteur au-delà des valeurs élevées du champ et du courant. Au Gigahertz, la résistance de surface des supraconducteurs s'est révélée environ cent fois plus faible, que celle du cuivre. L'impédance complexe de la surface du patch supraconducteur (Z_s) est donnée par : [27]

$$Z_S = \sqrt{\omega\mu_0/(2.\sigma)} \quad \text{I-2}$$

Lorsque l'épaisseur du patch (t) est inférieure à trois fois l'épaisseur de la peau, l'équation (précédente) peut être approximée comme suit [27]

$$Z_S = \frac{1}{(t.\sigma)} \quad \text{I-3}$$

t : Épaisseur du patch

I.5.2 Choix du substrat

Le substrat est un élément essentiel dans la conception des antennes imprimées. Ses propriétés électromagnétiques influencent considérablement les performances de l'antenne. Le choix du substrat doit être fait en tenant compte du matériau du patch, des exigences de l'application et des compromis entre efficacité, bande passante et taille. [27]

I.6 Le rôle de l'antenne imprimée

Pour voir le rôle d'une antenne, on considère un système de communication radio de la figure(I-4), qui transmet des informations par l'intermédiaire d'onde électromagnétique



Figure I-4 Un système de communication radio par (OEM) [15]

L'antenne d'émission transforme le signal électrique de l'émetteur en onde électromagnétique radiée dans l'espace libre. Cette onde électromagnétique se propage dans

l'espace vers l'antenne de réception. En fonction du type et de la forme d'antenne utilisée, certaines directions de propagation peuvent être privilégiées. La puissance radiée par l'antenne d'émission se disperse dans l'espace. L'antenne de réception capte une faible partie de cette puissance et la transforme en signal électrique [2]

I.7 Les caractéristiques des antennes imprimées

Les antennes imprimées, en particulier les antennes microruban (Microstrip Patch Antennas), possèdent un ensemble de caractéristiques distinctives qui les ont rendues populaires dans de nombreuses applications sans fil. Voici quelques-unes des principales caractéristiques de ces antennes.

I.7.1 La directivité

La directivité $D(\theta, \varphi)$ est le rapport entre la puissance rayonnée par une antenne dans une direction donnée $P(\theta, \varphi)$ et la puissance que rayonnerait une antenne isotrope. Elle s'exprime par [3]

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

- $D(\theta, \varphi)$: Ceci représente la directivité de l'antenne en fonction des coordonnées sphériques
- 4π : Ce facteur découle du fait qu'un radiateur isotrope rayonne de la puissance uniformément sur une sphère
- $P(\theta, \varphi)$: Représente l'intensité de rayonnement de l'antenne dans la direction (θ, φ)
- P : Représente la puissance totale rayonnée par l'antenne.

Où : $P(\theta, \varphi)$ est la puissance rayonnée par une antenne, et (P_r) est la puissance totale rayonnée. La directivité d'une antenne peut être facilement estimée à partir du diagramme de rayonnement de l'antenne. On peut dire qu'une antenne plus directive quand l'antenne admet une faible

Ouverture de rayonnement, et qu'une antenne faiblement directive admet une large ouverture de rayonnement [4]

I.7.2 Le gain

Le gain de l'antenne dans une direction (θ, φ) est le rapport de la puissance $P(\theta, \varphi)$ définie ci-dessus à la puissance que rayonnerait la source isotrope par unité d'angle solide, à condition que les puissances d'alimentation soient les mêmes :

$$G(\theta, \varphi) = \frac{P(\theta, \varphi)}{P_a / 4\pi} \quad \text{I-5}$$

- $G(\theta, \varphi)$: Gain d'antenne en fonction des coordonnées sphériques
- P_a : Représente la puissance d'entrée totale acceptée par l'antenne.

Dans la direction de rayonnement maximal (θ_0, φ_0) On note le gain

$$G(\theta, \varphi) = G = 4\pi \cdot \frac{P_o(\theta_o, \varphi_o)}{P_a} \quad \text{I-6}$$

Nous voyons qu'en valeur naturelle, la relation entre gain et directivité est :

$$G = \eta D \quad \text{I-7}$$

$$\eta = \frac{P_r}{P_a} \quad \text{I-8}$$

- Gain (G), directivité (D) et efficacité (η)
- P_r : Ceci représente la puissance totale rayonnée par l'antenne. Il s'agit de la puissance que l'antenne émet réellement sous forme d'ondes électromagnétiques.

I.7.3 Rendement de l'antenne

Le rendement d'une antenne mesure son efficacité à convertir la puissance électrique reçue ou émise en ondes électromagnétiques. Un rendement élevé indique que la majorité de la puissance est utilisée pour la communication, tandis qu'un rendement faible signifie des pertes importantes.

Ces pertes peuvent être causées par divers facteurs tels que les pertes ohmiques, les réflexions ou les pertes diélectriques. Un bon rendement est crucial pour une communication sans fil fiable et efficace. Le rendement η d'une antenne est défini comme le rapport entre la puissance totale émise par l'antenne et la puissance fournie à l'antenne est défini comme [6]

D'après les équations, l'efficacité peut être exprimée par le rapport entre le gain et la directivité :

$$\eta = \frac{G(\theta, \varphi)}{D(\theta, \varphi)} \quad \text{I-9}$$

- $D(\theta, \varphi)$: Cela représente la directivité de l'antenne dans la direction

I.7.4 Polarisation

La polarisation d'une antenne consiste à orienter les ondes planes produites par cette antenne dans une direction précise. La polarisation d'une onde plane est généralement définie comme la variation du champ électrique E par rapport à un point d'observation donné dans le temps.

Trois catégories de polarisation existent : la polarisation linéaire, la polarisation circulaire et la polarisation elliptique [8]

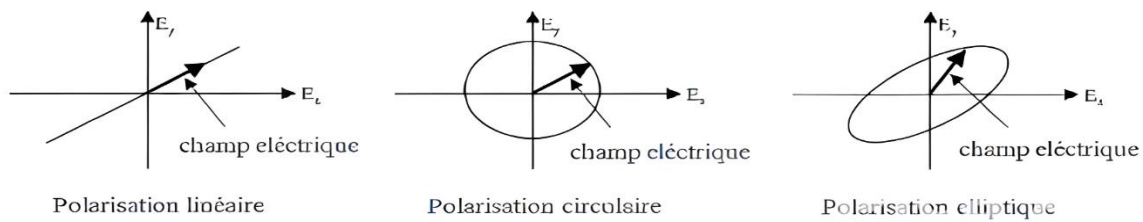


Figure I-5 Types de polarisation [1]

I.7.5 Coefficient de réflexion $S_{1,1}$

Le coefficient de réflexion S_{11} d'une antenne est une mesure qui décrit le rapport

De l'énergie réfléchi par l'antenne par rapport à l'énergie incidente. Il indique dans quelle mesure

L'antenne s'adapte à son environnement et transmet des signaux. $S_{1,1}$ est proche de

Zéro indiquant une bonne adaptation, ce qui signifie que la majeure partie de l'énergie lui est transférée

L'antenne réfléchit un peu. Un $S_{1,1}$ élevé indique une mauvaise adaptation à la quantité

Grande quantité d'énergie réfléchi. Ce paramètre est crucial dans la conception et la modification

Antennes pour maximiser l'efficacité de la transmission. [7]

On considère qu'une antenne est parfaitement adaptée lorsque son impédance d'entrée (Z_e) est égale à l'impédance de la ligne d'alimentation (Z_c), sinon on observe un coefficient de réflexion $S_{1,1}$

$$S_{1,1} = \frac{Z_e - Z_c}{Z_e + Z_c} = \frac{\text{onde réfléchie}}{\text{onde incidente}} \quad \text{I-10}$$

Couramment extrême en **dB**

$$S_{1,1} = 20 \log_{10}(s_{11}) \quad \text{I-11}$$

Z_e : Impédance d'entrée de l'antenne ($Z_e = R + jX$)

Z_c : Impédance caractéristique de la ligne.

On dit que l'antenne est adaptée si $S_{11} = 0$ donc $Z_e = Z_c$.

Ce rapport peut varier de 1 à l'infini. Dans la réalité, une adaptation satisfaisante est obtenue lorsque le taux d'onde stationnaire est inférieur à 2 [9]

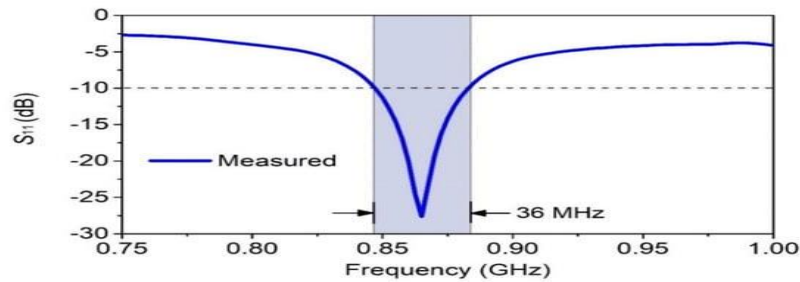


Figure I-6 Bande passante d'une antenne [39]

La figure (I-6) montre un graphique représentant le facteur S mesuré S_{11} .

(En dB) pour l'antenne.

La bande passante est donnée par :

$$BP(\%) = \frac{f_{max} - f_{min}}{f_c} \times 100 \quad \text{I-12}$$

$$f_c = \frac{f_{max} + f_{min}}{2} \quad \text{I-13}$$

f_c : Cela représente la fréquence centrale de la bande passante.

I.7.6 Diagramme de rayonnement

Il s'agit d'un diagramme représentant les variations de puissance rayonnée par une antenne par unité d'angle solide dans différentes directions de l'espace

$$P = \frac{P_r}{4\pi R^2} \quad \text{I-14}$$

P : Représente la densité de puissance à une distance R de la source.

$4\pi R^2$: représente l'aire de surface d'une sphère de rayon R

I.7.7 La bande passante

La bande passante est la plage sur laquelle l'énergie est transférée d'une source d'alimentation à

L'antenne (ou antenne vers récepteur) est au maximum. Dans la plupart des cas, la bande passante est définie en fonction du paramètre

De la réflexion. Il n'existe pas de normes précises pour la limite du coefficient de réflexion.

Cependant, la norme habituelle est que le coefficient de réflexion soit inférieur à -10 dB

Sur toute la bande passante.

Certaines antennes sont très sélectives (bandes de fréquences très étroites), d'autres sont

Il peut être utilisé sur une très large gamme de fréquences [11]

Figure I.6 : Exemple d'un coefficient de réflexion et bande passante d'une antenne

I.7.8 Impédance d'entrée de l'antenne

L'impédance d'entrée est l'impédance présentée par une antenne à ses bornes ou le rapport des composants appropriés du champ électrique au champ magnétique à un point. L'impédance de l'antenne est donnée par [12]

$$Z_a = R_a + jX_a \quad \text{I-15}$$

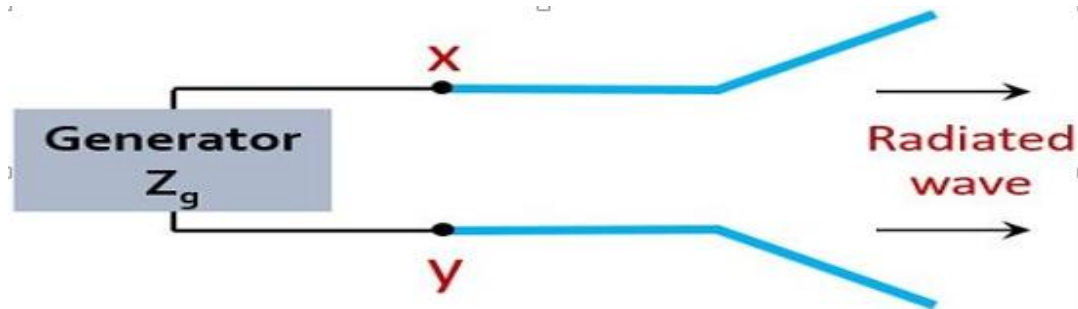


Figure I-7 Antenne en mode d'émission [19]

L'impédance d'entrée de l'antenne dépend bien évidemment de la géométrie de l'antenne mais aussi du couplage entre la ligne et l'antenne. L'impédance d'entrée de l'antenne doit être la plus proche possible de 50Ω dans sa partie réelle, et nulle dans sa partie imaginaire. Elle dépend du type d'alimentation [13]

I.8 Mécanisme de rayonnement des antennes imprimées

Le mécanisme de rayonnement d'une antenne imprimée se comprend à partir de sa forme géométrique, la littérature scientifique s'appuie généralement sur la théorie de l'optique. Ce paragraphe résume le principe de fonctionnement d'une antenne imprimée : Considérons une antenne micro-ruban rectangulaire alimentée par sonde, fonctionnant en mode fondamental et conduite par une tension entre la sonde et le plan de masse, ce qui

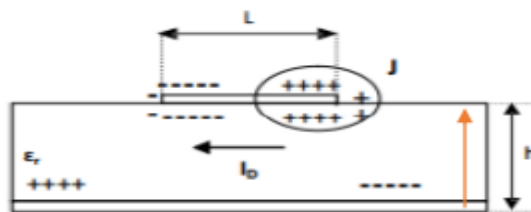


Figure I-8 Distribution des charges et densité du courant sur une antenne micro-ruban [15]

va provoquer l'apparition et la distribution de charges qui s'établit en dessous et au-dessus de l'élément, entre le plan de masse et le substrat comme montre la figure (I.8) et crée un champ électrique vertical entre le patch et le plan de masse [15] [14]

I.8.1 VSWR

VSWR est l'acronyme de Voltage Standing Wave Ratio, et est également appelé le rapport d'onde constante (SWR). VSWR est une fonction du coefficient de réflexion, qui décrit la puissance réfléchiée par l'antenne. Si le coefficient de réflexion est donné par S_{11} ou par coefficient de réflexion ou perte de retour [2], alors $|Γ|$ le VSWR est défini par la formule suivante :

$$VSWR = \frac{1+|S_{11}|}{1-|S_{11}|} \quad I-16$$

I.9 Méthodes d'alimentation d'antennes imprimées

Les quatre techniques d'alimentation les plus utilisées sont la ligne micro ruban. Les antennes patch sont alimentées de différentes manières selon les exigences de conception et les performances souhaitées. Voici quelques techniques courantes d'alimentation des antennes patch : la sonde coaxiale (techniques avec contact), le couplage par ouverture et le couplage par proximité (technique sans contact).

I.9.1.1 Alimentation directe par une ligne micro ruban

C'est largement utilisé dans les antennes imprimées, où la bande de cuivre de largeur inférieure au patch est connectée à la bordure. La technique est simple à mettre en œuvre et facile à

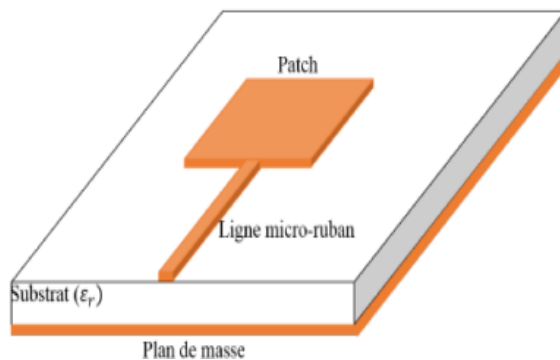


Figure I-9 Alimentation par ligne microruban [15]

adapter à la résonance, ce qui en fait l'option la plus sélectionnée. Cependant, les rayonnements produits sont des radiations indésirables. [25]

I.9.1.2 Alimentation coaxiale

L'alimentation par sonde coaxiale est une technologie éprouvée pour les antennes micro-rubans. Elle consiste à localiser le substrat afin de fixer le conducteur central du câble coaxial directement sur le patch. Cette méthode offre une grande flexibilité quant au point d'alimentation. Cependant, en raison des courants localisés et des pertes dues à la

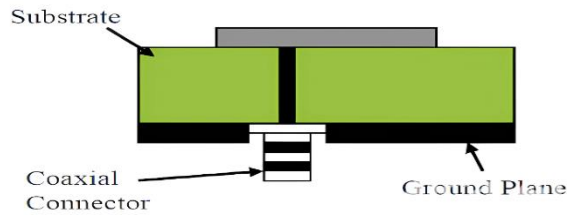


Figure I-10 Antenne micro ruban alimenté par câble coaxial [15]

perception du substrat et du plan de masse, elle peut entraîner des déséquilibres dans le diagramme de rayonnement. [24]

I.9.1.3 Alimentation par jonction d'ouverture

Cette méthode d'alimentation, dans laquelle le patch et la ligne sont reliés par un plan de masse, utilise des substrats à permittivité contrastée pour maximiser le rayonnement. Bien que cette technique présente des avantages en termes de bande passante, la structure multicouche complique sa mise en œuvre.

[24]

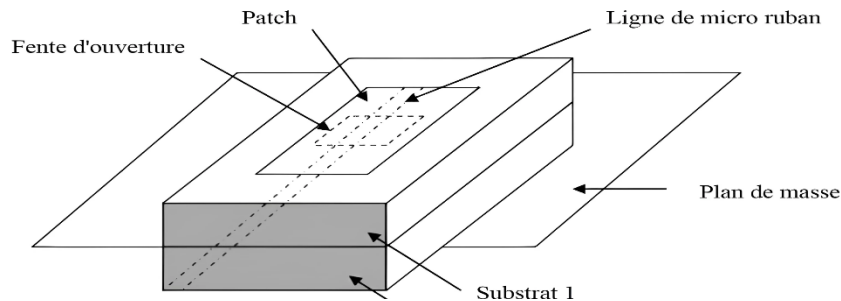


Figure I-11 Type de la ligne microruban [7]

I.9.1.4 Alimentation Par proximité

Le principe de base de la technique d'alimentation couplée de proximité repose sur le couplage électromagnétique entre une microbande et un élément rayonnant, séparés par deux substrats électriques. Ce couplage permet d'alimenter l'élément rayonnant sans connexion électrique directe. [26]

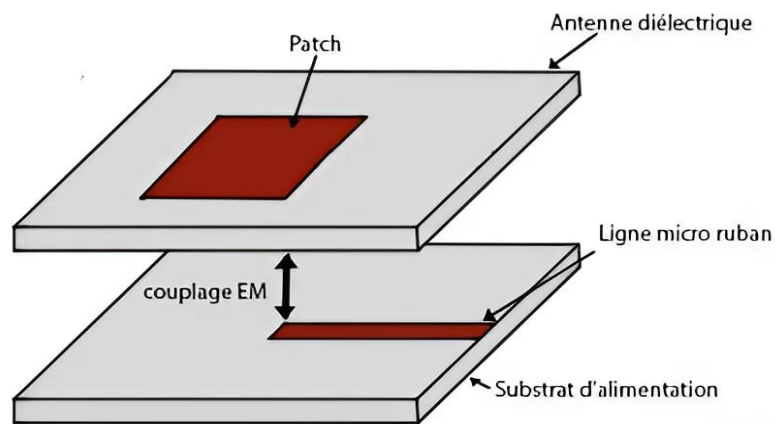


Figure I-12Alimentation de proximité. [1]

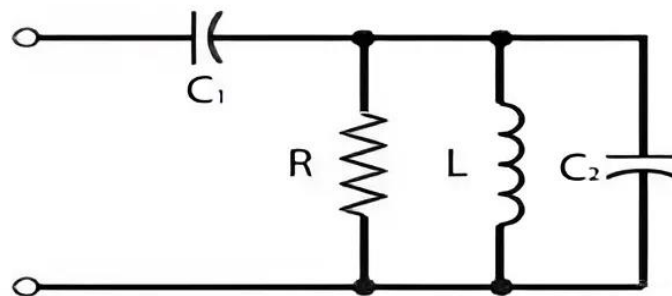


Figure I-13Circuit équivalent d'un patch alimenté par proximité [1]

Les deux principaux avantages de cette technique d'alimentation d'antenne sont une bande passante accrue, résultant de l'augmentation de l'épaisseur du substrat (plutôt que de l'élément rayonnant lui-même, le patch), ce qui diminue l'impact des ondes de surface et améliore

l'adaptation d'impédance sur une plage de fréquences plus large, et une diminution significative des rayonnements parasites, par rapport aux techniques d'alimentation directe. Elle entraîne cependant une complexité de mise en œuvre plus élevée. Un circuit équivalent composé d'une résistance (R), d'une inductance (L) et d'une capacité (C) peut être utilisé pour représenter le comportement de cette méthode d'alimentation, y compris son impédance d'entrée à l'entrée de la résonance.

I.9.1.5 Alimentation par guides d'ondes coplanaires

La ligne coplanaire : CPW (CoPlanar Waveguide en anglais), comme son nom l'indique ; présente le plan de masse au même niveau que la ligne de transmission (figure I.16). La disposition des conducteurs fait apparaître deux modes de propagation : un mode quasi TEM (dit mode impair) et un mode quasi TE (dit mode pair) (figure I.17) [18].

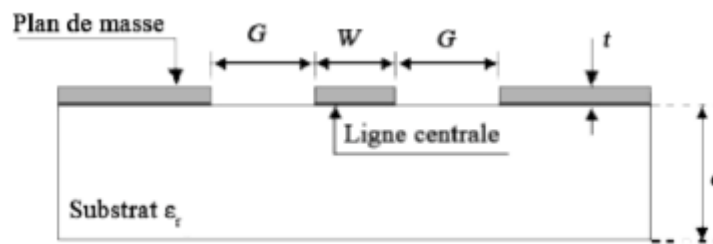


Figure I-14 Vue en coupe d'une ligne coplanaire [1]

I.9.1.6 Alimentation par couplage à travers une fente

Dans ce type d'alimentation, le patch et la ligne d'alimentation microruban sont séparés par le plan de masse (figure I.14). La jonction entre le patch et la ligne d'alimentation est faite par une fente ou une ouverture dans le plan de masse [1]. Généralement, afin d'optimiser le rayonnement

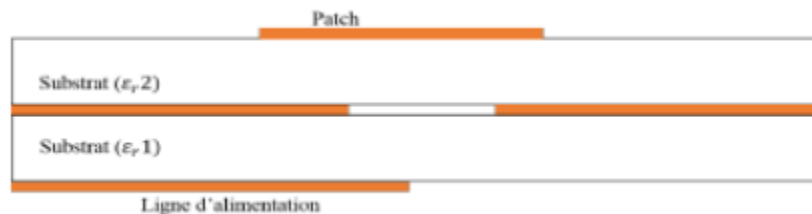


Figure I-15 Alimentation couplée par fente [14]

du patch ; des matériaux à permittivité élevée sont utilisés pour le substrat inférieur, par contre des matériaux à faible constante diélectrique sont utilisés pour le substrat supérieur.

I.10 Avantages, inconvénients des antennes imprimées

Les antennes imprimées, et plus particulièrement les antennes microruban (microstrip), sont devenues extrêmement populaires dans de nombreuses applications sans fil en raison de leurs nombreux avantages. Cependant, elles présentent également certains inconvénients qu'il est important de considérer lors de la conception d'un système.

Avantages :

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

Inconvénients :

- 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. [1]

Ces limitations sont connues depuis plusieurs années et des progrès considérables ont été réalisés depuis pour améliorer les performances des antennes patch. Notamment, leur bande

passante peut être augmentée jusqu'à 70 % en utilisant une configuration multicouche et leur gain peut s'accroître de 30 % en mettant en réseau plusieurs antennes. [25]

I.11 Modélisation des antennes patch

Dans le domaine de télécommunication les antennes imprimées sont les plus utilisées avec des diverses structures, et parmi ces derniers nous avons choisi d'étudier et de simuler dans notre travail trois formes d'antennes :

Antenne patch rectangulaire, circulaire et triangulaire. [31]

I.11.1 Antenne patch rectangulaire

Parmi toutes les formes, l'élément rectangulaire est sans contexte le plus facile à appréhender pour la compréhension des mécanismes de rayonnements des antennes microstrip. L'alimentation peut se faire par connexion directe avec une ligne microruban dont le point de jonction est sur l'axe de symétrie de l'élément [28-29].

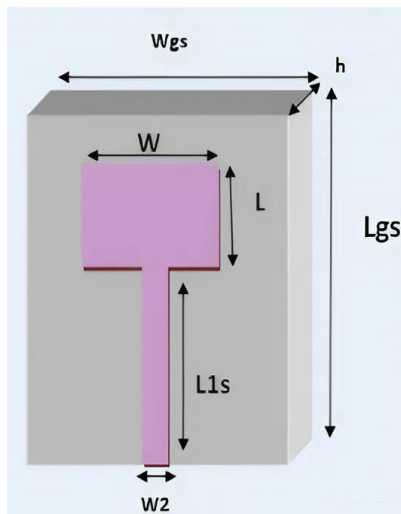


Figure I-17 Antenne patch microruban rectangulaire Alimenté par une ligne microruban simple [18]

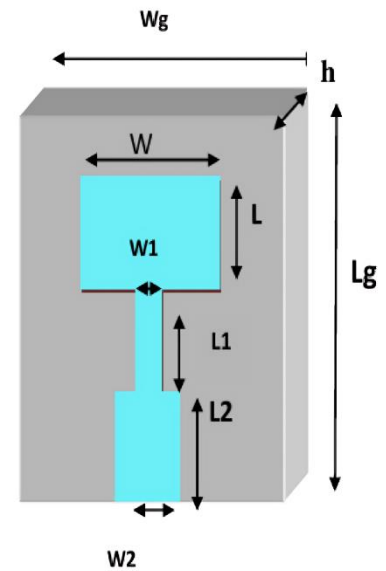


Figure I-16 Antenne patch microruban rectangulaire avec une ligne quarte d'onde [18]

I.11.1.1 Équations d'une petite antenne patch à bande rectangulaire

La conception d'une petite antenne patch rectangulaire nécessite des calculs préliminaires utilisant des équations pour estimer les dimensions (longueur et largeur) en fonction de la fréquence souhaitée et du type de matériau diélectrique (substrat). Ces équations prennent en compte les effets de bord et la permittivité effective du substrat. Il existe également des équations permettant d'estimer la bande passante attendue.

- **Patch La largeur**

Il s'agit d'une première étape cruciale dans le processus de conception d'une antenne patch. L'offre calculée devra

$$W = \frac{c}{2f_c} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad \text{I-17}$$

- W : L'affichage de l'antenne patch rectangulaire représente
- C : vitesse de la lumière dans le vide
- ϵ_r : Représente la tolérance relative
- $\epsilon_{eff} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}}$: Ce terme représente approximativement la constante diélectrique effective.

- **Patch Fréquence de résonance**

Une formule de base utilisée dans les premières étapes de la conception d'antennes patch. Pour atteindre une fréquence de résonance spécifique

$$f_r = \frac{c}{2L_{eff} \sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad \text{I-18}$$

- f_r : Représente la fréquence de résonance de l'antenne, généralement mesurée en hertz (Hz).
- L_{eff} : Environ la moitié de la longueur d'onde de l'onde à cette fréquence.
- ϵ_{eff} : La longueur effective du patch rectangulaire représente

- **Patch nstant diélectrique**

Constante diélectrique effective du substrat microruban. Dans une antenne microruban, les champs électromagnétiques ne sont pas complètement confinés dans le substrat diélectrique ; Certains d'entre eux s'étendent même dans l'air au-dessus du substrat. Le constant diélectrique effectif prend en compte cet environnement diélectrique mixte.

$$\varepsilon_{eff} = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \left(\frac{\varepsilon_r - 1}{2} \left[1 + 12 \frac{h}{w} \right]^{-\frac{1}{2}} \right) \quad \text{I-19}$$

h : Cela représente la hauteur ou l'épaisseur du substrat diélectrique

- **Patch La longueur**

Ce processus itératif permet de déterminer les dimensions physiques d'une antenne patch rectangulaire microruban pour une application spécifique.

$$L = L_{eff} - 2\Delta L \quad \text{I-20}$$

- L : La longueur physique de l'antenne patch rectangulaire représente
- $2\Delta L$: L'extension de la longueur à chaque extrémité du patch en raison des champs de bord.

- **Patch L'extension de la longueur (ΔL)**

Utilisé pour calculer la quantité d'augmentation de la longueur électrique aux extrémités d'une antenne micro patch en raison de l'effet des « champs de bord ».

$$\frac{\Delta L}{h} = 0.412 \frac{(\varepsilon_{eff} + 0.3) \left(\frac{w}{h} + 0.264 \right)}{(\varepsilon_{eff} - 0.258) \left(\frac{w}{h} + 0.8 \right)} \quad \text{I-21}$$

- **Substrat ET plan de masse**

La longueur :

Pour déterminer la longueur du plan de masse en fonction de la longueur du patch, de la hauteur du pieu et d'un facteur supplémentaire « a »

$$L_{gs} = L1s + 2a + 6 \times h \quad \text{I-22}$$

- L_{gs} : représente la longueur du niveau du sol
- $L1s$: Longueur physique du patch rayonnant

La largeur:

La largeur du patch est principalement choisie pour contrôler l'impédance d'entrée de l'antenne et assurer une bonne adaptation avec la ligne.

$$w_{gs} = 2a + 6 \times h \quad \text{I-23}$$

- w_{gs} : Représente l'affichage au niveau du sol
- **La longueur de la ligne**

La longueur de la ligne de transmission est choisie pour minimiser les pertes dues à la réflexion et, dans certains cas, pour obtenir une adaptation d'impédance entre la source et l'antenne.

Simple :

$$L1s = \frac{\lambda}{2} = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad \text{I-24}$$

- λ : représente la longueur d'onde de l'onde électromagnétique à l'intérieur du substrat isolant

quarte d'onde:

La longueur physique de la ligne de transmission est conçue pour être égale à un quart de la longueur d'onde à l'intérieur du substrat à la fréquence de fonctionnement.

$$L1 = \frac{\lambda}{4} = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad \text{I-25}$$

- λ_0 : représente la longueur d'onde dans l'espace libre

L'impédance caractéristique de la ligne microruban :

Ces formules sont essentielles dans la conception de circuits microrubans et d'antennes pour assurer une adaptation d'impédance et un transfert de signal appropriés.

$$Z_c \left\{ \begin{array}{l} \frac{60}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \ln \left[\frac{8h}{w_2} + \frac{w_2}{4h} \right] \frac{w_2}{h} \leq 1 \\ \frac{120}{\sqrt{\epsilon_{eff}} \left[\frac{w_2}{h} + 1.393 + 0.667 \ln \left(\frac{w_2}{h} + 1.44 \right) \right]} \frac{w_2}{h} \geq 1 \end{array} \right. \quad \text{I-26}$$

ϵ_{eff} : Permittivité effective du substrat

h : L'épaisseur du substrat

I.11.2 Antenne patch circulaire

Les patchs circulaires sont largement utilisés dans la pratique a cause de sans contexte le plus facile, L'alimentation est se fais par une ligne microruban.

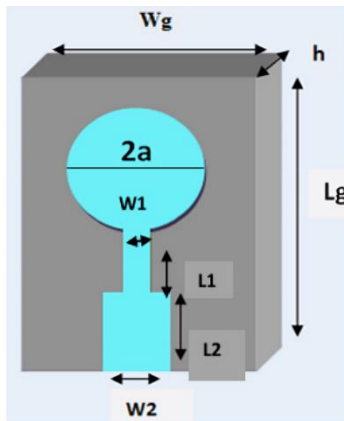


Figure I-18 Antenne patch circulaire [18]

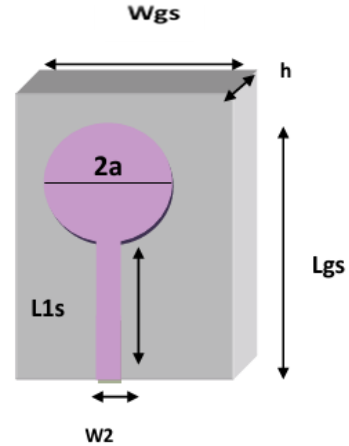


Figure I-19 Antenne patch circulaire [18]

I.11.2.1 Equations d'antenne patch circulaire

Les équations de conception des antennes patch circulaires à polarisation circulaire sont plus complexes et dépendent de la méthode utilisée pour générer la polarisation circulaire.

- **Patch Le rayon reel**

Le vrai rayon est l'une des dimensions de base que vous choisissez au début de

Votre conception. Elle est directement liée à la fréquence de résonance requise de

L'antenne.

$$a = \frac{F}{\left(1 + \frac{2h}{\pi \epsilon_r F \left[\ln \left(\frac{\pi F}{2h} \right) + 1.7726 \right]}\right)^{\frac{1}{2}}} \quad \text{I-27}$$

- F : Approximation initiale du rayon sans tenir compte des effets de bord et de la permittivité effective).

- **Patch Fréquence de résonance**

La fréquence de résonance d'une antenne patch dépend principalement des dimensions physiques du patch (longueur pour le rectangle, rayon pour le cercle) et des propriétés du substrat (permittivité effective)

$$f_r = \frac{c}{2L_{eff} \sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad \text{I-28}$$

- f_r : Fréquence de résonance requise

- **Constant diélectrique (ϵ_{eff})**

Une antenne patch est un type d'antenne sans fil à profil bas, constituée d'un élément rayonnant métallique plat (« patch ») monté au-dessus d'un plan de masse métallique. Ils sont séparés par une couche électriquement isolante appelée substrat.

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[1 + 12 \frac{h}{w} \right]^{-\frac{1}{2}} \quad \text{I-29}$$

- **Patch L'extension de la longueur (ΔL)**

La longueur de portée (ΔL) est un paramètre clé à prendre en compte dans la conception d'une antenne patch car elle corrige la longueur physique nécessaire pour atteindre la fréquence de résonance souhaitée tout en tenant compte des effets de bord.

$$\frac{\Delta L}{h} = 0.412 \frac{(\epsilon_{eff} + 0.3) \left(\frac{w}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon_{eff} - 0.258) \left(\frac{w}{h} + 0.8 \right)} \quad \text{I-30}$$

- **Substrat et plan de masse**

La longueur:

$$L_{gs} = L_{1s} + 2a + 6 \times h \quad \text{I-31}$$

La largeur:

$$w_{gs} = 2a + 6 \times h \quad \text{I-32}$$

- **La longueur de la ligne**

Simple:

$$L_{1s} = \frac{\lambda}{2} = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad \text{I-33}$$

Quarte d'onde:

$$L_1 = \frac{\lambda}{4} = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad \text{I-34}$$

- **L'impédance caractéristique de la ligne microruban**

$$Z_c = \left\{ \begin{array}{l} \frac{\frac{60}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \ln \left[\frac{8h}{w_2} + \frac{w_2}{4h} \right] \frac{w_2}{h} \leq 1 \\ \frac{120}{\sqrt{\epsilon_{eff}} \left[\frac{w_2}{h} + 1.393 + 0.667 \ln \left(\frac{w_2}{h} + 1.44 \right) \right] \frac{w_2}{h}} \geq 1 \end{array} \right\} \quad \text{I-35}$$

w : Largeur de la ligne micro ruban

h : Epaisseur du substrat diélectrique

ϵ_r : Permittivité relative

ϵ_{eff} : Permittivité effective

I.11.3 Antenne patch triangulaire

L'antenne triangulaire est choisie parce qu'elle occupe moins de surface sur le substrat que d'autres formes existantes telles que le substrat rectangulaire et circulaire. Le substrat FR-4 est choisi pour fabriquer l'antenne avec une épaisseur de $h = 1,6$ mm et une constante diélectrique de $\epsilon_r = 4.3$. Le substrat FR-4 est choisi pour son faible coût et sa résistance à. [30]

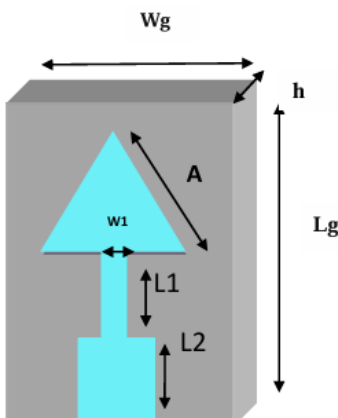


Figure I-21 antenne patch triangulaire avec une ligne quarte d'onde [18]

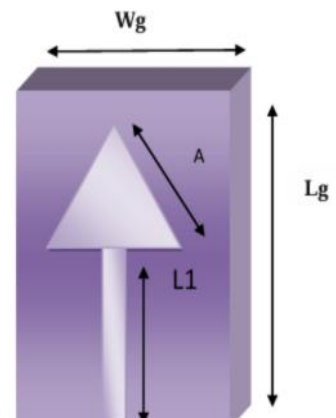


Figure I-20 antenne patch triangulaire. [18]

I.11.3.1 les équations d'antenne patch triangulaire

- patch Longueur de triangle

$$A = \frac{2c}{3f\sqrt{\epsilon r}} \quad \text{I-36}$$

- patch Fréquence de resonance

$$f_r = \frac{c}{2L_{eff}\sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad \text{I-37}$$

- patch constant diélectrique (ϵ_{eff})

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon r + 1}{2} \frac{\epsilon r - 1}{2} \left[1 + 12 \frac{h}{w} \right]^{-\frac{1}{2}} \quad \text{I-38}$$

- L'extension de la longueur (ΔL)

$$\frac{\Delta L}{h} = 0.412 \frac{(\epsilon_{eff} + 0.3) \left(\frac{w}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon_{eff} - 0.258) \left(\frac{w}{h} + 0.8 \right)} \quad \text{I-39}$$

- Substrat et plan de masse

La longueur:

$$L_{gs} = L1s + 2A + 6 \times h \quad \text{I-40}$$

La largeur:

$$w_{gs} = 2A + 6 \times h \quad \text{I-41}$$

Simple :

$$L1s = \frac{\lambda}{2} = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad \text{I-42}$$

quarte d'onde:

$$L1 = \frac{\lambda}{4} = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad \text{I-43}$$

- **L'impédance caractéristique de la ligne microruban**

$$Z_c = \left\{ \begin{array}{l} \frac{606}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \ln \left[\frac{8h}{w_2} + \frac{w_2}{4h} \right] \frac{w_2}{h} \leq 1 \\ \frac{120}{\sqrt{\epsilon_{eff}} \left[\frac{w_2}{h} + 1.393 + 0.667 \ln \left(\frac{w_2}{h} + 1.44 \right) \right]} \frac{w_2}{h} \geq 1 \end{array} \right\} \quad \text{I-44}$$

a : Longueur du triangle en mm,

c : vitesse de la lumière

ϵ_r : Constante diélectrique relative du matériau (FR4). Fr : fréquences de résonance.

Fr : La largeur du patch, pour une bonne efficacité de rayonnement

h : L'épaisseur du substrat diélectrique.

ϵ_{eff} : Permittivité effective du substrat.

I.12 Techniques d'adaptation des antennes imprimées

Chaque système qui transforme l'énergie sur une ligne de transmission a besoin d'adaptation, car la ligne transforme l'impédance de charge en une autre valeur d'impédance au droit de la source. Ce que voit la source dépend donc de l'impédance de charge, de la longueur électrique de la ligne et de son impédance caractéristique [18], [19]

I.12.1 Adaptation par ligne quart d'onde

Dans la construction de circuits hyperfréquences, on recherche souvent l'adaptation, c'est à dire à se ramener à une impédance différente (qui est souvent l'impédance caractéristique) de celle obtenue en fin de circuit [18], [19].

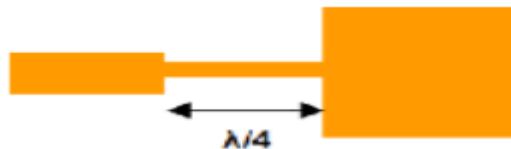


Figure I-22 Adaptation par quart d'onde [1]

I.12.2 Adaptation par stub

Une autre façon de procéder pour arriver à l'adaptation d'une charge quelconque consiste à utiliser un stub. Grâce à un stub en un circuit ouvert (open stub) ou en court-circuit (short stub). La solution retenue est généralement celle présentant le plus faible encombrement. Le raisonnement peut se faire en impédance mais il est plus facile de travailler dès le départ en admittance pour faire la somme des impédances parallèles ramenées [18], [19]. Un stub est un tronçon de ligne de longueur s que l'on branche en dérivation sur la ligne principale à une distance d de la charge.

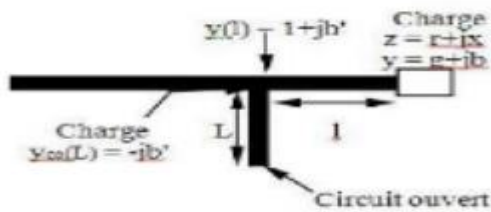


Figure I-23 stub en circuit ouvert [1]

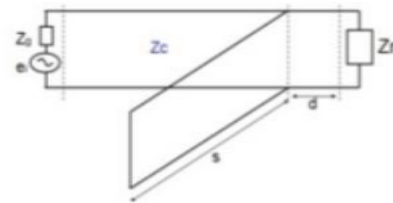


Figure I-24 Modélisation [1]

I.12.3 Adaptation avec encroaches

Pour adapter l'antenne, on utilise des encoches, il suffit de modifier la géométrie du patch. Les dimensions des encoches.

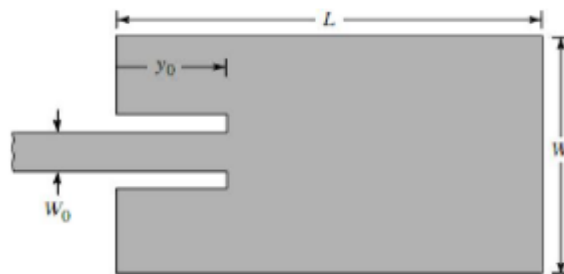


Figure I-25 Patch adapté par encoches de longueur [1]

I.13 Les domaines d'applications des antennes imprimées

Les domaines d'applications des antennes imprimées sont de plus en plus variés, les principales applications sont [20]

- La téléphonie mobile.
- Les radars.
- Les télécommunications spatiales.
- La télémétrie des missiles et la télésurveillance.
- Guidage des missiles et télédétection.

I.14 Conclusion

Ce chapitre s'ouvre sur une présentation exhaustive des antennes imprimées, en abordant d'abord leurs principes généraux et leur classification typologique. Nous développons une analyse détaillée couvrant plusieurs aspects essentiels : leurs propriétés électromagnétiques uniques, les mécanismes physiques gouvernant leur rayonnement, ainsi que les différentes techniques de conception et d'optimisation. Une attention particulière est portée aux méthodes d'alimentation, élément clé déterminant leurs performances, et aux approches analytiques permettant leur modélisation.

Cette étude révèle les avantages notables de ces antennes, notamment leur profil bas, leur facilité d'intégration et leur coût de fabrication réduit, tout en mettant en lumière leurs limitations intrinsèques, comme leur bande passante relativement étroite et leur sensibilité aux pertes diélectriques. L'examen critique de ces caractéristiques permet de mieux cerner le potentiel de cette technologie dans les systèmes de communication modernes, tout en identifiant les défis à relever pour son perfectionnement. Cette introduction sert ainsi de base pour les développements plus approfondis qui suivront dans le chapitre. [12]

chapiter II:

Généralité Sur Les Réseaux D'antenne Imprimées

II.1 Introduction

Pour améliorer les performances des antennes imprimées, on les associe en forme de réseau, car l'utilisation d'un seul élément est insuffisante pour répondre aux contraintes de rayonnement imposées par une application.

Le réseau d'antenne est un ensemble d'antennes radioélectriques espacées d'une distance «d» appelée «pas de réseau» et alimentées de façon synchrone par des dispositifs d'excitation permet de commander les amplitudes et les phases, le champ électromagnétique produit par ce réseau est la somme vectorielle des champs produits par chacun des éléments.

L'avantage principal de l'assemblage de plusieurs antennes permet de compenser les limitations des caractéristiques d'une seule antenne, ainsi que l'influence de nombreux facteurs tels que l'espacement entre les éléments, la taille du plan de masse ainsi que l'alimentation électrique des éléments, afin d'avoir un gain plus élevé et d'obtenir le diagramme de rayonnement souhaité [5].

II.2 Définition Un réseau d'antennes imprimées

Est un assemblage d'antennes élémentaires identiques (antennes filaires, cornets, patch) avec la même orientation, disposées selon une forme donnée et excitées par un système d'alimentation, afin de créer un rayonnement de forme particulière. Le rayonnement résultant est la superposition des rayonnements provenant de chaque élément, la puissance rayonnée est donc plus grande.

Le diagramme de rayonnement d'un réseau d'antenne est plus étroit que celui d'une antenne élémentaire, sa directivité et son gain sont aussi importants, c'est pour ces avantages que les systèmes de télécommunication récents utilisent les réseaux d'antennes comme dispositifs d'émission et de réception [21-22]

II.3 Les types de réseaux d'antenne imprimées

Le couplage entre les antennes élémentaires est un point délicat car ce couplage modifie légèrement les caractéristiques de rayonnement et d'adaptation, par conséquent, afin de concevoir et de réaliser un réseau d'antennes de bonne performance, on prend en considération plusieurs facteurs tel-que le gain, le diagramme de rayonnement, la taille maximale de l'antenne, le nombre d'éléments rayonnants nécessaires, la distance entre deux éléments rayonnants.

Les antennes réseau peuvent avoir différentes configurations géométriques [12]

II.3.1 Réseaux linéaires

C'est un ensemble de N éléments rayonnants déposés suivant une ligne droite le long

D'un axe (x, y ou z) comme illustré dans la figure (3) et séparés par une distance identique et excités par un même système d'alimentation. L'amplitude de l'alimentation de chacun des [6] Éléments est supposée identique mais chacun des éléments a un déphasage progressif qui dépend de la distance entre les éléments. Le champ électromagnétique « E » total de ce réseau Linéaire est la somme de champ de chacun de ses éléments est donné par l'équation (II-1) suivante :

$$E = E_0(I_0 + I_1 e^{jKd \cos \theta} + K + I_{N-1} e^{jK(N-1)d \cos \theta}) \quad \text{II-1}$$

- E : Le champ électrique total dans la région lointaine émis par un réseau d'antennes N à un point donné de l'espace
- E_0 : Le modèle de champ électrique dans la région éloignée d'un seul élément du réseau est représenté.
- I Courants d'excitation complexes appliqués à chacun des N éléments d'antenne du réseau
- K : Nombre d'onde, donné par la relation $K = \frac{2\pi}{\lambda}$
- d : Représente la distance entre les éléments d'antenne adjacents dans un réseau linéaire.

$$E = E_0 \sum_{n=0}^{N-1} (I_n) e^{jKd \cos \theta} \quad \text{II-2}$$

Où :

$$I_n = a_n e^{jn\alpha} \quad \text{II-3}$$

ET a_n : sont les coefficients de source

$$E = E_0 \sum_{n=0}^{N-1} (I_n) e^{j(Kd \cos \theta + \alpha)} \quad \text{II-4}$$

$$E = E_0 \sum_{n=0}^{N-1} (I_n) e^{jn\psi} \quad \text{II-5}$$

$\psi = kd \cos \theta + \alpha$ EST défini comme l'angle électrique où d EST la distance entre les antennes adjacentes, θ EST l'angle d'élévation, α EST la phase progressive de l'alimentation ET k EST le nombre d'onde donné par $k = 2\pi/\lambda$.

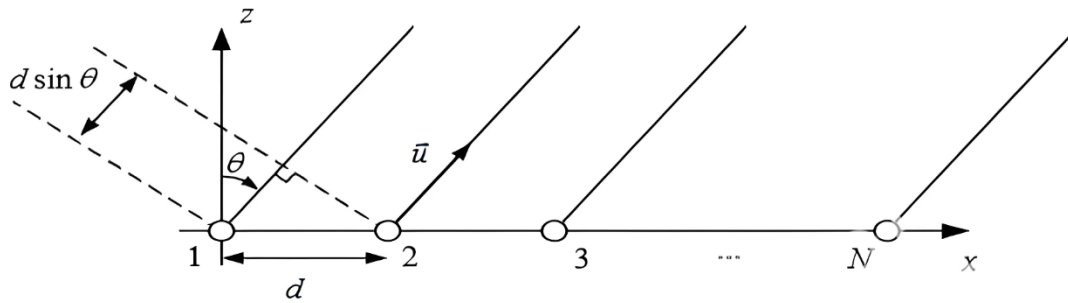


Figure II-1 Géométrie d'un réseau linéaire [12]

II.3.2 Facteur de réseau

La représentation de l'interférence entre les rayonnements de N éléments du réseau est appelée le facteur de réseau, ce dernier dépend du nombre et de la forme d'éléments d'antenne, de la fréquence de fonctionnement, l'excitation de chaque élément, ainsi que la distance entre les éléments. Le diagramme final du réseau est la multiplication du facteur de réseau avec le diagramme d'un élément unique rayonnant individuellement. Le facteur réseau est obtenu par la relation suivante : $FR = (FRI) * (\text{Champ d'un élément d'antenne})$ [5].

II.3.3 Réseaux plans

Un réseau planaire est la généralisation au plan de réseau linéaire, il peut prendre une forme de maillage rectangulaire, triangulaire ou circulaire [6]. Comme illustré dans la Figure(II.2)

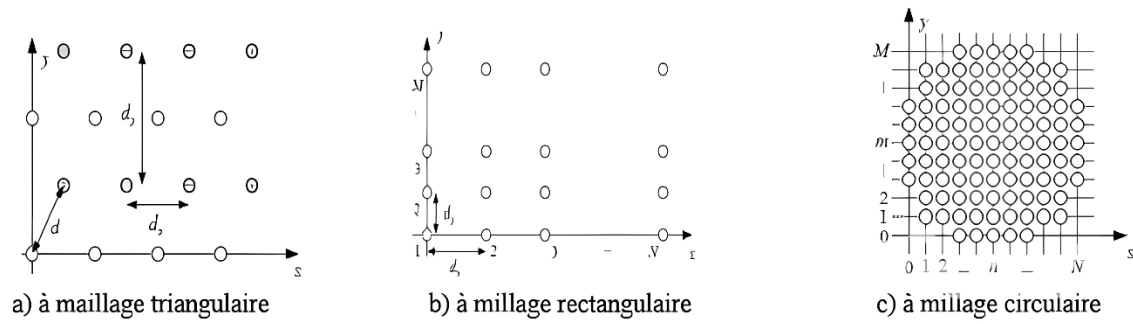


Figure II-2 Géométrie d'un réseau planaire [14]

II.3.4 Réseaux circulaires

C'est un réseau dont les éléments rayonnants sont répartis autour d'un cercle de rayon «a» tel qu'illustré dans la figure (3) [6]

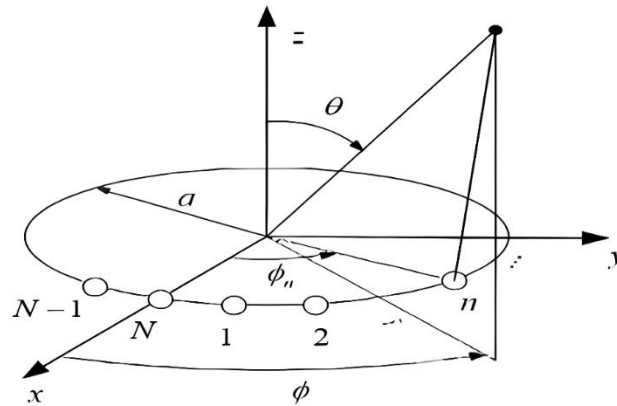


Figure II-3 Géométrie d'un réseau circulaire [14]

II.3.5 Réseaux cylindriques

Le réseau cylindrique est un assemblage de plusieurs réseaux circulaires selon un axe (x, y ou z) comme l'illustre le schéma de la Figure(4) [9]

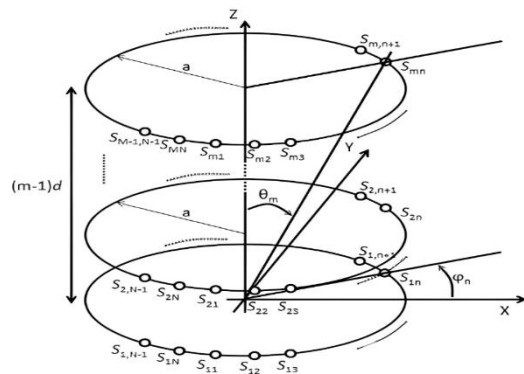


Figure II-4 Géométrie d'un réseau cylindrique de M anneaux de rayon a espacés d'une distance d suivant [14]

II.3.6 Réseaux coniques

C'est une autre généralisation de réseau circulaire dont les anneaux de N éléments ont des rayons différents, espacés avec la même distance « d ». Ils ont quasiment les propriétés que pour les réseaux cylindriques. La figure (5) montre la géométrie d'un réseau conique [9].

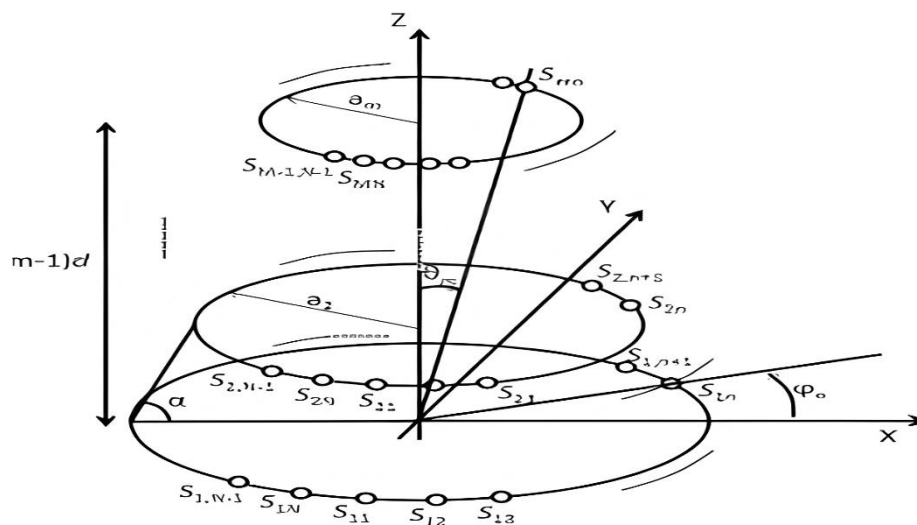


Figure II-5 Géométrie d'un réseau conique de M anneaux espacés d'une distance d et composés de N [14]

II.4 Techniques d'alimentation des antennes imprimées

Les antennes microruban trouvent des applications non seulement en tant qu'éléments rayonnants individuels, mais aussi et surtout dans des configurations en réseau.

Ces assemblages offrent une remarquable souplesse de conception, permettant de synthétiser des diagrammes de rayonnement complexes impossibles à obtenir avec un seul élément. Ils présentent de multiples fonctionnalités avancées, notamment le balayage électronique du faisceau, l'amélioration de la directivité, ainsi que diverses autres performances inaccessibles aux éléments isolés.

Sur le plan de l'alimentation, deux architectures principales existent : le réseau série, alimenté par une seule ligne de transmission comme le montre la figure (II.7), et le réseau parallèle, qui utilise plusieurs lignes d'alimentation selon un schéma de distribution illustré en figure (II.6).

Cette dualité d'approche permet d'adapter parfaitement le réseau aux exigences spécifiques de chaque application.



Figure II-7 alimentation série d'un réseau d'antennes [1]



Figure II-6 alimentation parallèle d'un réseau d'antennes [1]

II.5 Adapter les patchs de 100Ω à une ligne de 50Ω

Le réseau d'alimentation parallèle est conçu pour réaliser des divisions de puissance suivant une progression géométrique de raison 2 (2^n , où $n = 2, 4, 8, 16, 32$, etc.).

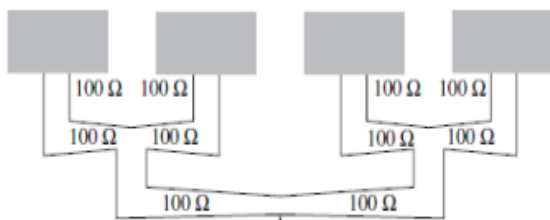


Figure II-8 Lignes effilées [12]

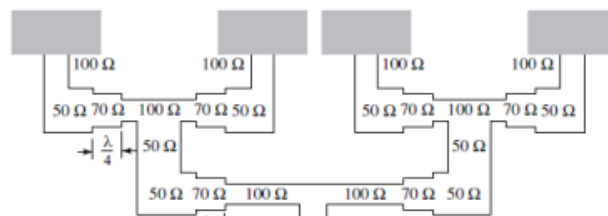


Figure II-9 transformateurs d'impédance $\lambda/4$ [12]

Cette configuration peut être implémentée de deux manières principales : soit par des lignes microruban effilées (Figure II.-8), permettant l'adaptation d'impédance entre les patchs (100Ω) et la ligne d'entrée (50Ω), soit via des transformateurs quart d'onde (Figure II-9), qui assurent une adaptation d'impédance optimale entre les différents étages du réseau. Ces deux approches offrent une flexibilité dans la conception des réseaux d'antennes pour répondre à des exigences spécifiques en termes d'impédance et de distribution de puissance.

II.6 Alimentation des réseaux d'antennes

L'objectif principal du réseau d'alimentation de l'antenne est d'assurer une excitation correcte en amplitude et en phase de tous les éléments du réseau.

II.6.1 Les dispositifs utilisés dans les réseaux

Puisque les éléments de réseau sont excités en amplitude et en phase, l'utilisation des déphaseurs et des diviseurs ou combineurs de puissance sont la base de l'alimentation du réseau d'antennes [7].

II.6.1.1 Les Déphaseurs

Le signal d'entrée est divisé et envoyé à différentes antennes. En contrôlant la phase du signal alimentant chaque antenne à l'aide de déphaseurs.

- **Les déphaseurs à lignes**

Sont constitués d'un ensemble de lignes de longueurs différentes. Des commutateurs permettent d'insérer l'impédance de chaque tronçon de ligne selon la phase désirée.

- **Les déphaseurs à ferrites**

Sont constitués d'un barreau de ferrite autour duquel est enroulé un fil qui sert à fixer la valeur du champ magnétique du barreau. Le champ magnétique est varié l'intensité d'excitation. Les



Figure II-11 Déphaseurs en série [12]

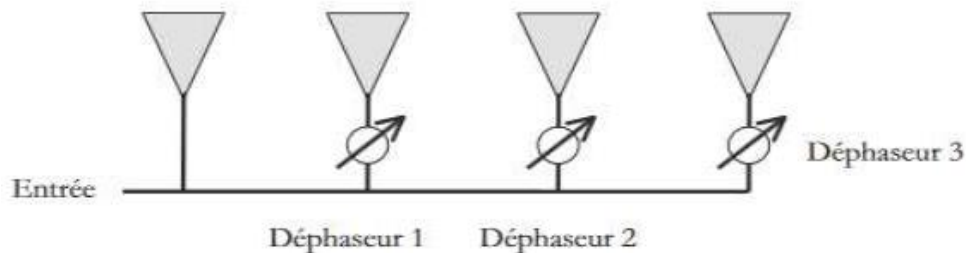


Figure II-10 Déphaseurs en parallèle [12]

déphaseurs sont placés en parallèle ou en série comme présentés dans les figure (11).

- **Les Diviseurs ou combineurs**

C'est un dispositif à trois accès, l'un à l'entrée et deux ou plusieurs accès à la sortie qui peuvent être isolés ou non. Chaque sortie d'un diviseur est considérée comme une entrée d'un autre diviseur, les combinaisons sont variées selon le choix d'alimentation série ou parallèle et le type d'élément rayonnant. Parmi les diviseurs utiliser en distingue [7].

La jonction T:

C'est un modèle facile à réaliser mais l'absence de l'isolation entre les deux ports de sortie peut engendrer un couplage entre deux éléments adjacents qui influe sur le diagramme de

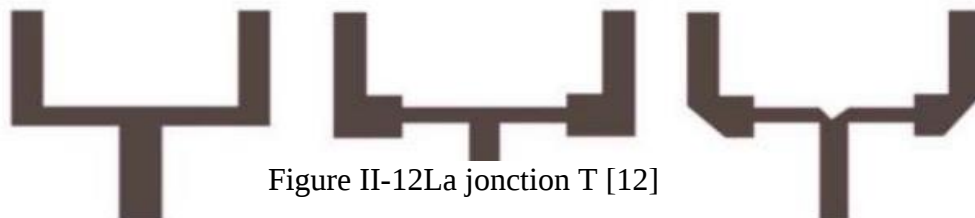


Figure II-12 La jonction T [12]

rayonnement du réseau, elle peut être compensée par la suppression d'une section triangulaire de la ligne comme illustré dans la figure (10) [5].

Diviseur de Wilkinson:

Afin que l'alimentation soit totalement adaptée est préférable d'utiliser d'un diviseur de type Wilkinson, il possède de propriétés spéciales telle que : Réseau à faible perte d'insertion et d'isolation, isolation élevée entre les ports de sortie assurée par une résistance R , mais L'inconvénient de ce circuit est d'apparaître au niveau de la soudure des deux bords de la résistance. Le diviseur Wilkinson est présenté dans la figure (13) [5].

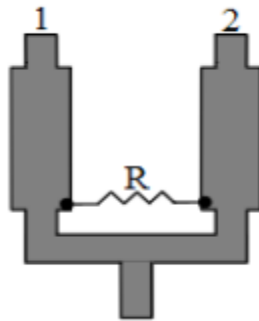


Figure II-13 Diviseur Wilkinson [12]

Le coupleur par proximité:

C'est un coupleur directif, une certaine partie de la puissance incidente est couplée hors du système, l'alimentation est réalisée par couplage à travers une ouverture dans le plan de masse du réseau d'alimentation. Ce couplage résulte des pertes [5].

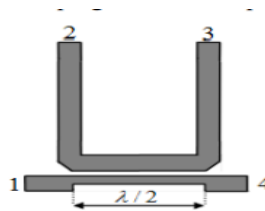


Figure II-14 coupleur par proximité [12]

L'anneau hybride:

Les signaux à la sortie de l'anneau hybride ont la même amplitude et déphasées l'un par rapport à l'autre par 0° et 180° , leur avantage est résidant dans ses performances qui restent satisfaisantes pour les hautes fréquences. L'anneau hybride illustré dans la figure (18) [5].

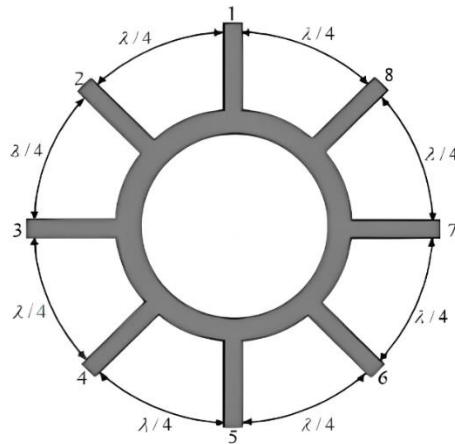


Figure II-15 L'anneau hybride [12]

II.7 Avantages et inconvénients des réseaux d'antennes imprimées

Les réseaux d'antennes imprimées héritent des avantages et des inconvénients des antennes imprimées individuelles, mais la mise en réseau introduit des caractéristiques spécifiques qui amplifient certains aspects et en atténuent d'autres.

II.7.1 Avantages

- Faible poids et l'encombrement réduit (en particulier en épaisseur)
- La possibilité de générer la polarisation circulaire est également très intéressante dans de nombreuses applications telles que les télécommunications spatiales, la navigation, les systèmes radars [38].
- La mise en réseau permet d'atteindre des gains élevés.

-La possibilité de jouer sur de nombreux facteurs pour adapter le diagramme notamment aux exigences les plus variées des cahiers des charges.

II.7.2 Inconvénients

- la complexité de réalisation compte tenu des précisions à assurer sur les faibles largeurs des différentes lignes aux fréquences de travail élevées.
- Tout en étant acceptable, le niveau de gain d'un réseau d'antennes imprimées demeure en dessous de celui de certains dispositifs rayonnants micro-ondes [38].

II.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exploré les fondements et les concepts clés relatifs aux réseaux d'antennes imprimées. En commençant par la définition de ces réseaux et leur importance dans les applications sans fil modernes, nous avons abordé les différents types de configurations, qu'elles soient linéaires, planaires, circulaires, cylindriques ou coniques, en soulignant les caractéristiques distinctives de chaque type.

Nous avons également examiné les techniques de base pour l'alimentation des antennes imprimées et la manière d'adapter l'impédance du patch d'antenne à la ligne de transmission, ainsi que les méthodes d'alimentation des réseaux eux-mêmes et les dispositifs utilisés à cet effet. Enfin, nous avons effectué une évaluation complète des principaux avantages et inconvénients qui caractérisent les réseaux d'antennes imprimées, ce qui nous donne une perspective équilibrée sur leurs utilisations et leurs limites.

La compréhension de ces généralités constitue une base essentielle pour progresser vers une étude et une analyse plus détaillées des performances et de la conception des réseaux d'antennes imprimées dans les chapitres suivants.

chapter III:

Simulations ET resultant's

III.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous aborderons en profondeur la conception d'une antenne patch rectangulaire destinée aux applications satellitaires opérant dans la bande C, plus précisément autour de la fréquence de 2.4 GHz, en utilisant le logiciel CST Microwave Studio. Nous commencerons par présenter un aperçu concis du logiciel de conception CST Microwave Studio, mettant en lumière ses capacités et son interface.

Ensuite, nous détaillerons méticuleusement chaque étape du processus de simulation. Cette exploration pas à pas nous permettra de suivre une démarche structurée pour atteindre notre objectif principal : la conception et l'optimisation de l'antenne patch rectangulaire pour l'application satellitaire spécifiée. Nous examinerons les paramètres clés de l'antenne, les configurations possibles, et les techniques de simulation nécessaires pour évaluer ses performances et valider sa conception.

III.2 Description du logiciel de simulation CST Studio Suite

Fondé en 1992, le logiciel de simulation électromagnétique CST STUDIO SUITE est l'aboutissement de nombreuses années de recherche et de développement dans les solutions les plus efficaces et précises de calcul pour la conception électromagnétique. CST Microwave Studio est un logiciel de simulation électromagnétique de structure passives en 3 Dimensions basé sur la résolution des équations de Maxwell suivant la technique des équations intégrales (FIT, Finité Intégration Technique).

Cette méthode numérique offre une discrétisation de l'espace permettant la description directement en 3D de tous les composants des systèmes décrits, ce qui lui permet d'être appliqué à de nombreux problèmes électromagnétiques allant de la statique aux hyperfréquences en analyses temporelle et fréquentielle.

De plus, contrairement à la plupart des logiciels de simulation électromagnétique, CST discrétise la forme intégrale des équations de Maxwell plutôt que leurs formes différentielles, et ce qui est l'une de ses caractéristiques clé de ce simulateur. CST Microwave Studio fait partie de CST

DEIGN STUDIO suite, et offre un certain nombre de solveurs différents selon le type d'application et du problème rencontré

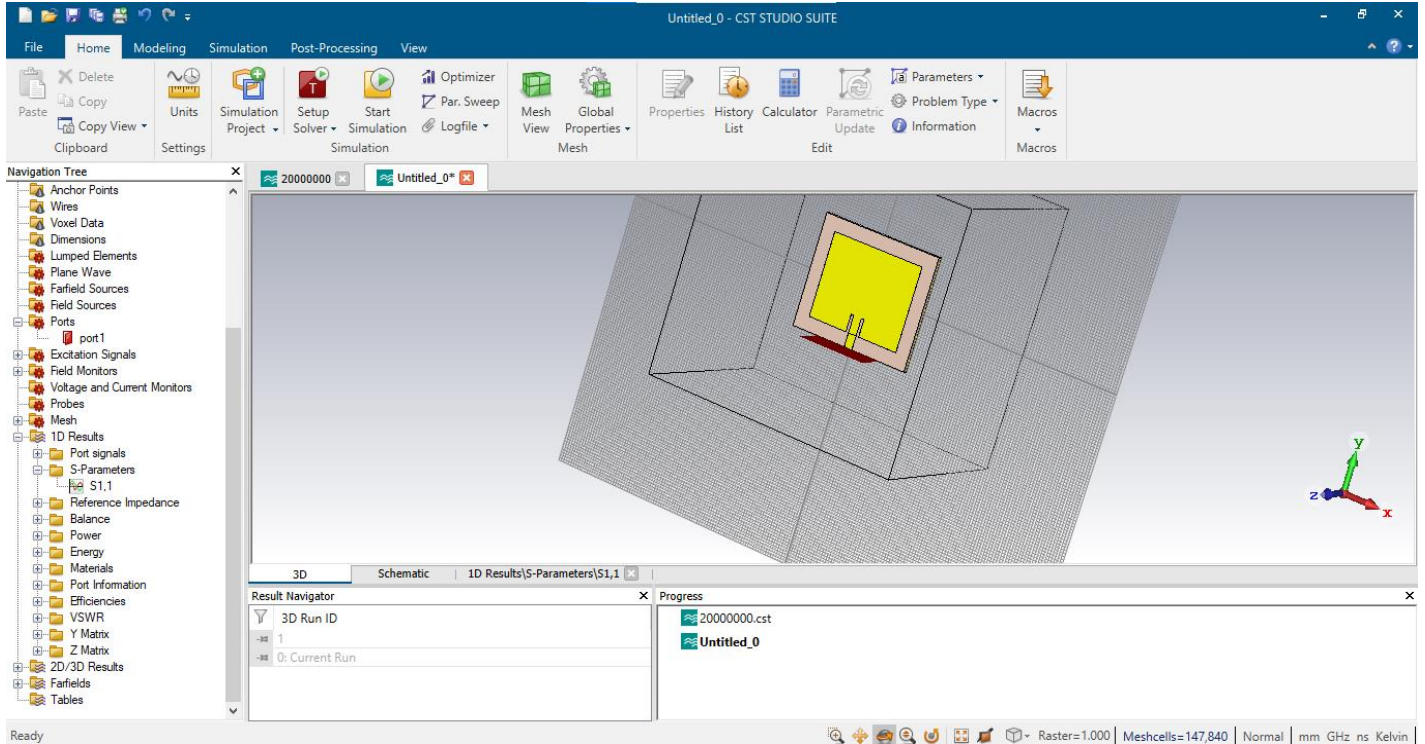


Figure III-1 Une interface graphique du simulateur CST studio 2019.

III.3 Conception et simulation de l'antenne patch rectangulaire

Dans cette section, nous simulerons une antenne patch rectangulaire alimentée par un microruban de 50 ohms. Les spécifications suivantes ont été utilisées :

III.3.1 Conception d'antenne patch rectangulaire Un éléments

L'antenne proposée est une antenne patch rectangulaire conçue avec un patch de Dimensions ($W \times L$) Elle est adaptée pour une impédance d'entrée de 50Ω . Le substrat Utilisé est de type FR-4(LOSSY), présentant une permittivité relative $\epsilon_r=4.3$ et une Epaisseur $h=1.6$ mm . Le plan

de masse, de dimensions ($L_{gs} \times w_{gs}$) est constitué du même matériau que le patch, à savoir du cuivre, et possède la même épaisseur $ht = 0.035 \text{ mm}$

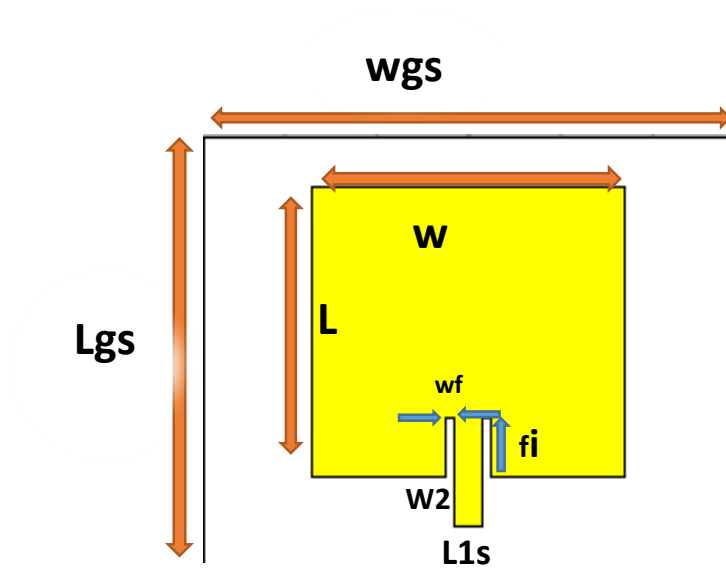


Figure III-2 Structure d'un patch rectangulaire simple.

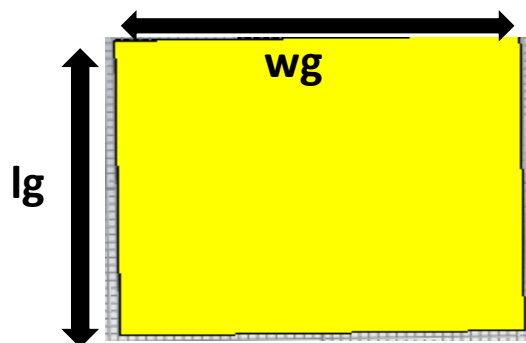


Figure III-3 plan de masse

Paramètre	Valeur	Unité
Fréquence de résonance	2.4	Ghz
Largeur du substrat (wgs)	43.6	mm
Longueur du substrat (Lgs)	38.6	mm
Largeur du patch (w)	34	mm
Longueur du patch (L)	29	mm
Largeur de l'encart (fi)	6	mm
Longueur de l'encart (wf)	1.5	mm
Longueur de la ligne de transmission Microstrip (w2)	9.6	mm
Largeur de la ligne de transmission Microstrip (L1s)	3	mm
Constante diélectrique du substrat (ϵ_r)	4.3	mm
La hauteur du substrat diélectrique (h)	1.6	mm
La hauteur du conducteur (ht)	0.035	mm
Longueur de l'intrigue (lg)	38.6	mm
Largeur de l'intrigue (wg)	43.6	mm

Tableau III-1 Les dimensions de l'antenne patch rectangulaire proposée

Paramètres de l'antenne	Equation
Longueur reel du patch	$L = L_{\text{eff}} - 2\Delta L$
Longueur effective	$L_{\text{eff}} = \frac{c}{2fr\sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}}$
extension de longueur	$\Delta L = \frac{0.412h(\epsilon_{\text{eff}} + 0.3)(\frac{L}{h} + 0.264)}{(\epsilon_{\text{eff}} - 0.258)(\frac{L}{h} + 0.8)}$
Constante diélectrique	$\epsilon_{\text{eff}} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} (1 + 12 h/L)^{-1/2}$
Largeur du patch	$W = \frac{c}{2fr\sqrt{\epsilon + 1}}$
Longueur du substrat	$L_{\text{gs}} = w + 6h$
Largeur du substrat	$w_{\text{gs}} = L + 6h$
Largeur de la ligne	$L1s = \frac{8e^A}{e^{2A} - 2} \times h$ $\text{Avec } A = \frac{z\sqrt{2(\epsilon+1)}}{120} + \frac{1}{2} \left(\frac{\epsilon_r-1}{\epsilon_r+1} \right) \times \left(h \ln\left(\frac{\pi}{2} + \frac{1}{\epsilon_r}\right) \times \ln\left(\frac{\pi}{4}\right) \right)$

Tableau III-2 Les équations paramétriques d'un patch rectangulaire.

III.3.2 Conception et simulation d'un réseau deux éléments

L'antenne proposée est une antenne patch à deux éléments ($w \times L$). La distance entre les deux patches (d) .

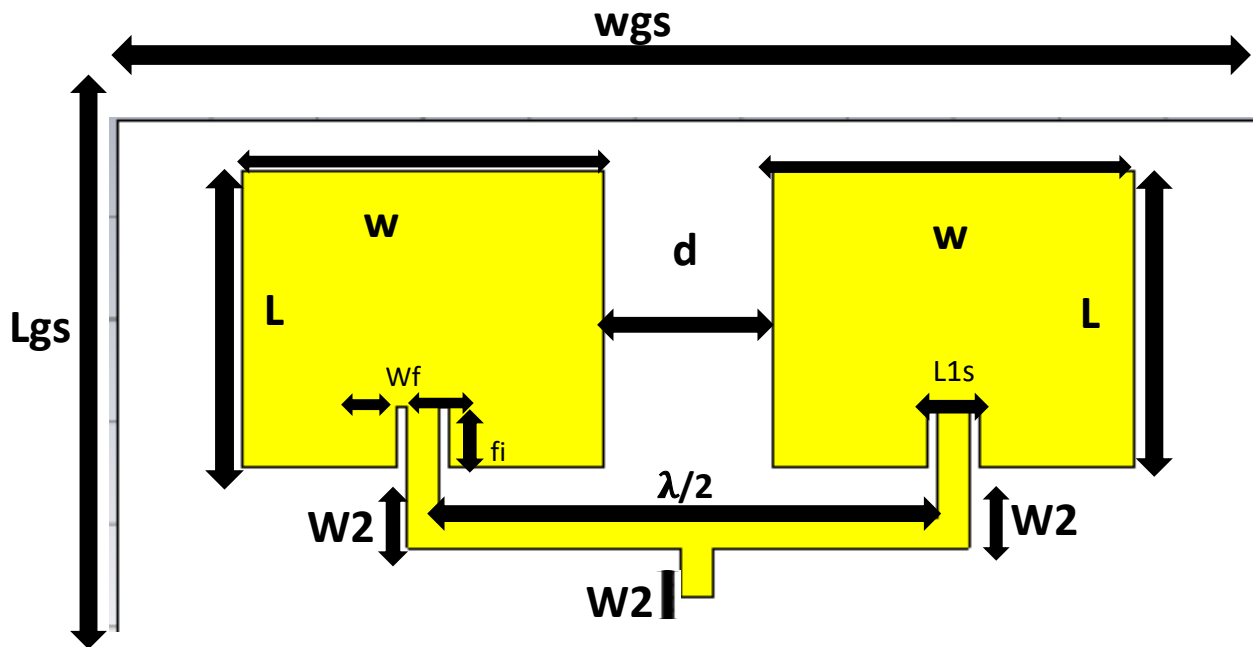


Figure III-4 Antenne réseau à deux éléments.

Paramètre	Valeur	Unité
Fréquence de résonance	2.4	Ghz
Largeur du substrat (w_{gs})	63.6	mm
Longueur du substrat (L_{gs})	52.6	mm
Largeur du patch (w)	34	mm
Longueur du patch (L)	29	mm
Largeur de l'encart (f_i)	6	mm
Longueur de l'encart (w_f)	1	mm
Longueur de la ligne de transmission Microstrip (w_2)	9.6	mm
Largeur de la ligne de transmission Microstrip (L_{1s})	3	mm
La distance entre les patches(d)	3.2	mm
Constante diélectrique du substrat (ϵ_r)	4.3	mm
La hauteur du substrat diélectrique (h)	1.6	mm
La hauteur du conducteur (h_t)	0.035	mm
La distance entre les patches ($\lambda/2$)	6.1	mm

Tableau III-3 Les dimensions (en mm) de l'antenne patch rectangulaire proposée.

III.3.3 Conception et simulation d'un réseau quatre éléments

L'antenne proposée est une antenne patch à quatre éléments en parallèle, chaque paire d'éléments étant en série (largeur x longueur). La distance entre les patches (d) correspond à la distance entre les paires (d1).

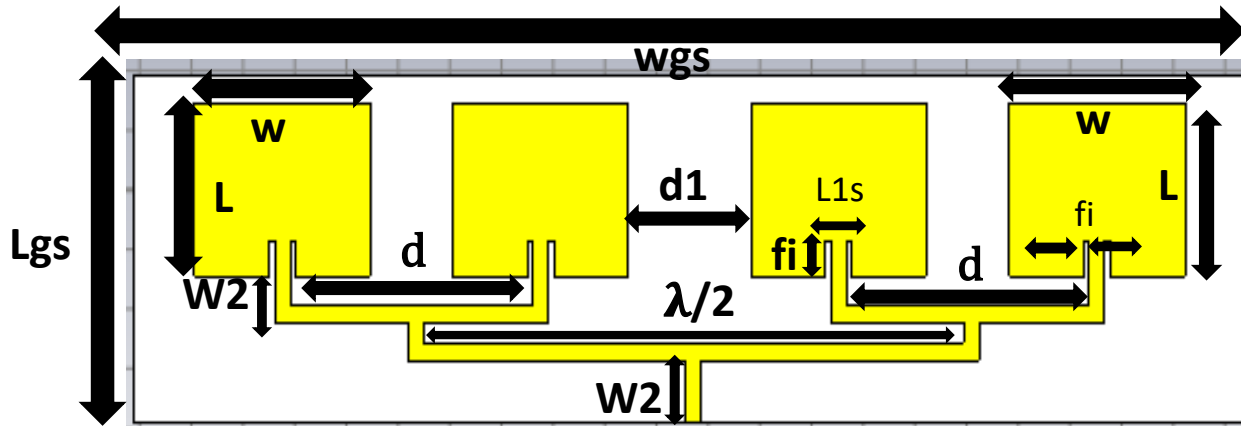


Figure III-5 Antenne réseau à quatre éléments.

Paramètre	Valeur	Unité
Fréquence de résonance	2.4	Ghz
Largeur du substrat (wgs)	63.6	mm
Longueur du substrat (Lgs)	52.6	mm
Largeur du patch (w)	34	mm
Longueur du patch (L)	29	mm
Largeur de l'encart (fi)	6	mm
Longueur de l'encart (wf)	1	mm
Longueur de la ligne de transmission Microstrip (w2)	9.6	mm
Largeur de la ligne de transmission Microstrip (L1s)	3	mm
Constante diélectrique du substrat (ϵ_r)	4.3	mm
La hauteur du substrat diélectrique (h)	1.6	mm
La hauteur du conducteur (ht)	0.035	mm
La distance entre les patches (d)	6.1	mm
$\lambda/2$	110.6	mm
La distance entre les patches (d1)	4.2	mm

Tableau III-4 Dimensions d'une antenne patch rectangulaire à quatre éléments

III.3.4 Simulation du paramètre $S_{1,1}$

La simulation du paramètre $S(1,1)$ implique de calculer le coefficient de réflexion d'entrée d'un circuit, qui représente la fraction de l'onde incidente réfléchi par le circuit lorsqu'une onde est envoyée sur le port d'entrée. En d'autres termes, $S(1,1)$ indique comment le circuit se comporte comme une charge pour le signal incident.

UN ELEMENTS

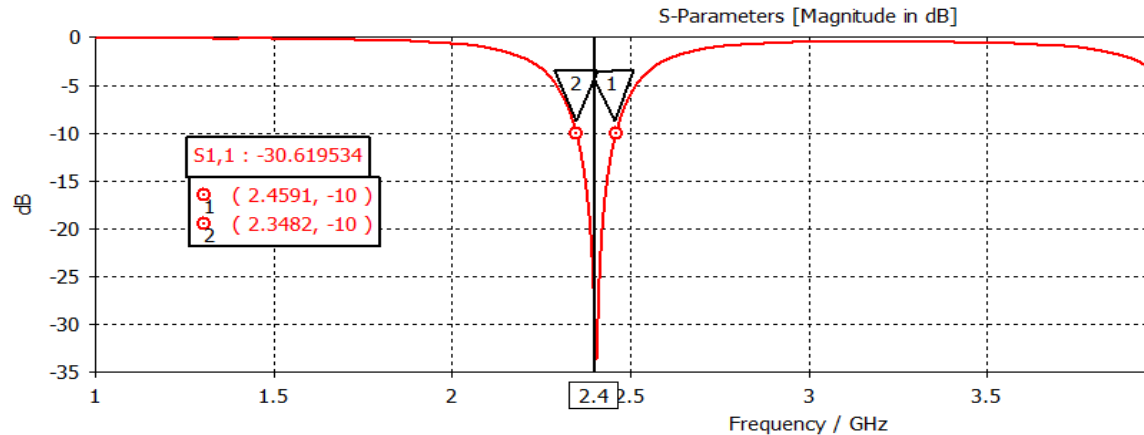


Figure III-6 Performance de réflexion d'antenne à UN éléments ($S_{1,1}$)

Il y a un indicateur vertical à la fréquence de 2,4 GHz, indiquant un point important sur la courbe. À cette fréquence, la valeur de $S_{1,1}$ est.

Environ -30,619534 dB. Il s'agit d'une valeur très faible, indiquant une excellente correspondance de l'antenne ou de l'appareil à cette fréquence. La fréquence de résonance d'une antenne est souvent considérée comme la fréquence à laquelle $S_{1,1}$

À sa valeur la plus basse.

- $F_{max}=2.4591$
- $F_{min}=2.3482$

Calculs bande passante(un éléments)

Nous avons bien une adaptation à la fréquence de 2.4 GHz avec un coefficient de réflexion $S_{1,1}$ égale à -30.619 dB, et une bande passante BP= 4.658%.

$$BP = \frac{F_{max} - F_{min}}{F_C} \quad \text{III-1}$$

$$F_C = \frac{F_{max} + F_{min}}{2}$$

III-2

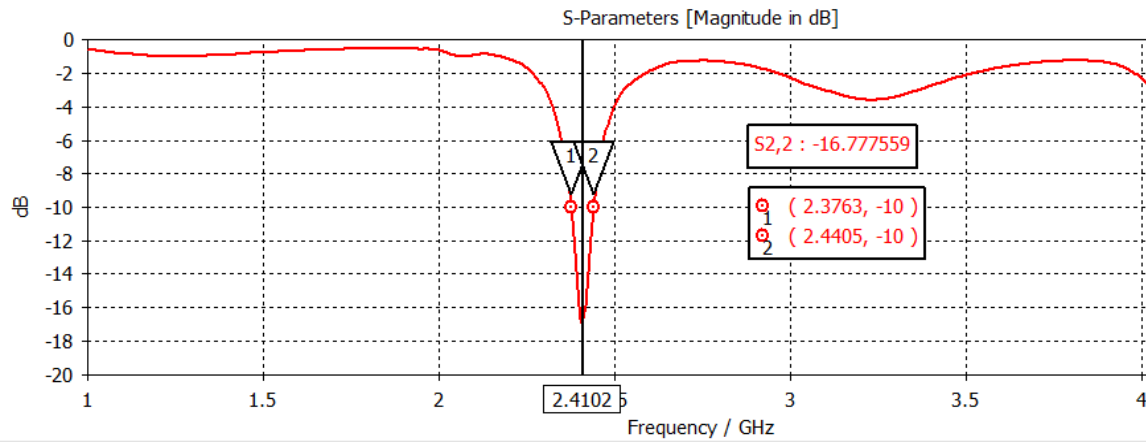
DEUX ELEMENTS

Figure III-7 Performance de réflexion d'antenne à deux éléments (S1,1)

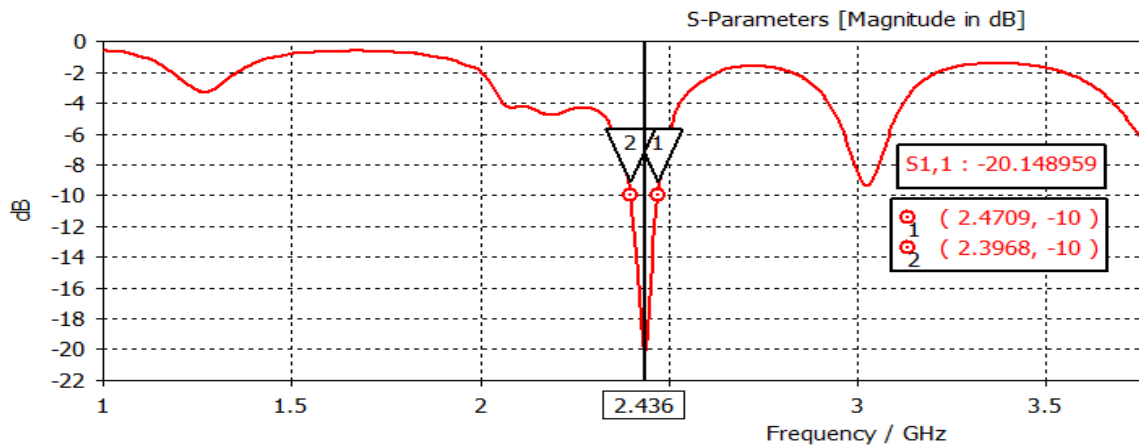
QUATRE ELEMENTS

Figure III-8 Performance de réflexion d'antenne à quatre éléments (S1,1)

	Un élément	Deux éléments	quatre éléments
$S_{1,1}$ (dB)	-30.6195 dB	-16.777 dB	-20.1489 dB
F_{min} (Ghz)	2.3482	2.3763	2.3968
F_{max} (Ghz)	2.4591	2.4405	2.4709
BP(%)	4.658	2.66	3.04

Tableau III-5 Étude comparative du coefficient de réflexion (S11) et de la bande passante des antennes à un, deux et quatre éléments

III.3.5 Analyse des résultats du tableau (coefficient de réflexion (S11) et de la bande passante des antennes à un, deux et quatre éléments)

Les données indiquent que l'antenne mono-élément atteint le meilleur coefficient de réflexion (S1.1) à environ -30,6195 dB, démontrant la meilleure adaptation d'impédance et la plus faible puissance réfléchie. Cette configuration présente également la bande passante la plus large (4,658 %). Alors que la valeur S1.1 augmente (devient moins négative) et que le rapport de bande passante diminue avec l'ajout d'éléments (deux et quatre éléments), la valeur S1.1 pour quatre éléments (-20,1489 dB) est meilleure que pour deux éléments (-16,777 dB). Cela démontre que l'ajout d'éléments peut avoir un impact négatif sur l'adaptation d'impédance idéale et réduire la bande passante disponible au point de résonance, indiquant un compromis entre l'amélioration du gain/directivité et l'adaptation impédance/bande passante.

III.4 Le diagramme de rayonnement d'antenne rectangulaire

Le diagramme de rayonnement d'une antenne rectangulaire, comme une antenne patch rectangulaire, décrit la distribution spatiale de la puissance rayonnée par l'antenne. Il permet de visualiser comment l'énergie est répartie dans différentes directions. En d'autres termes, il montre les "lobes" d'émission, c'est-à-dire les directions où la puissance rayonnée est maximale.

UN ELEMENTS

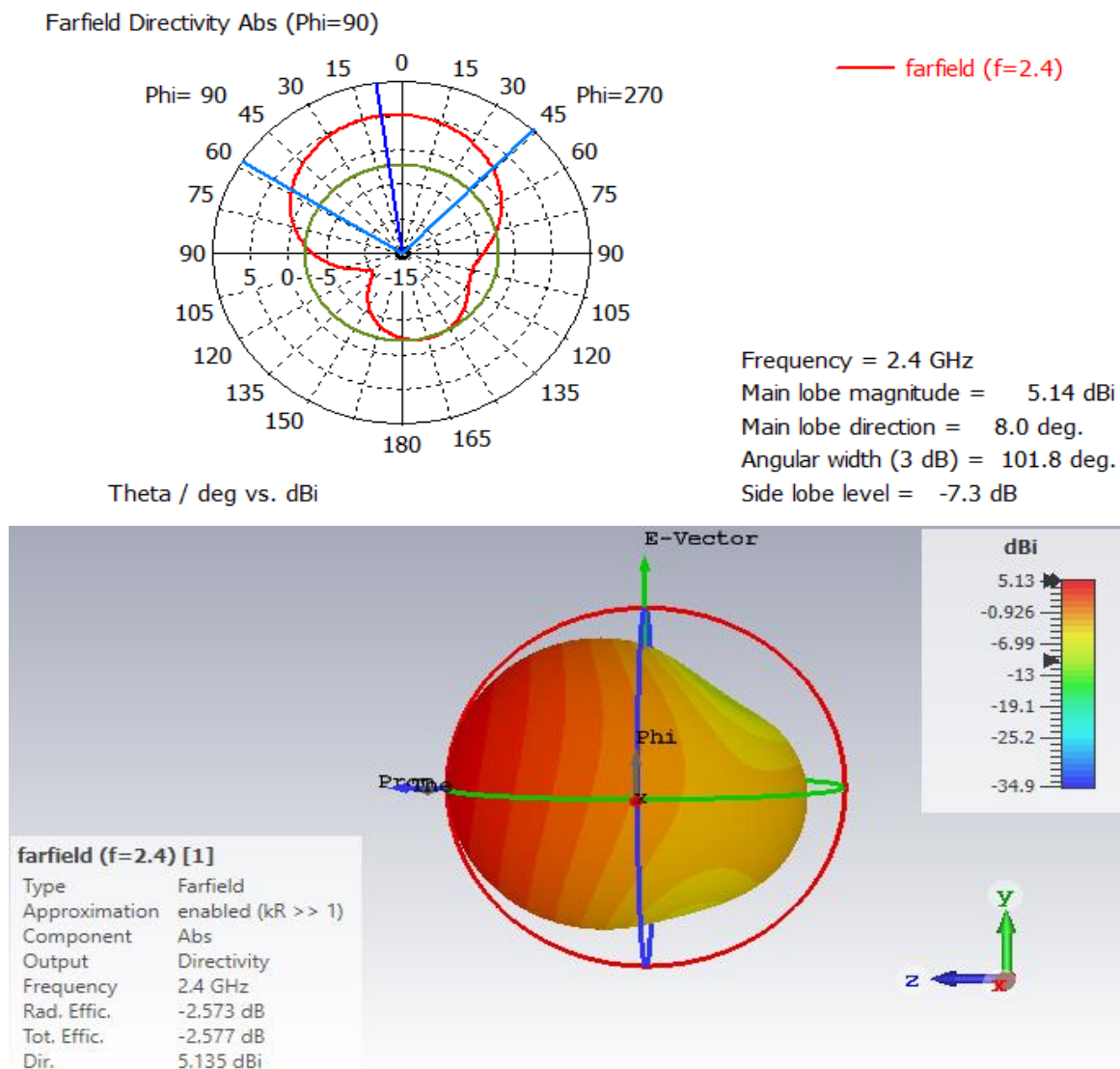


Figure III-9Modèle de rayonnement 3D d'une antenne à UN éléments (Directivity)

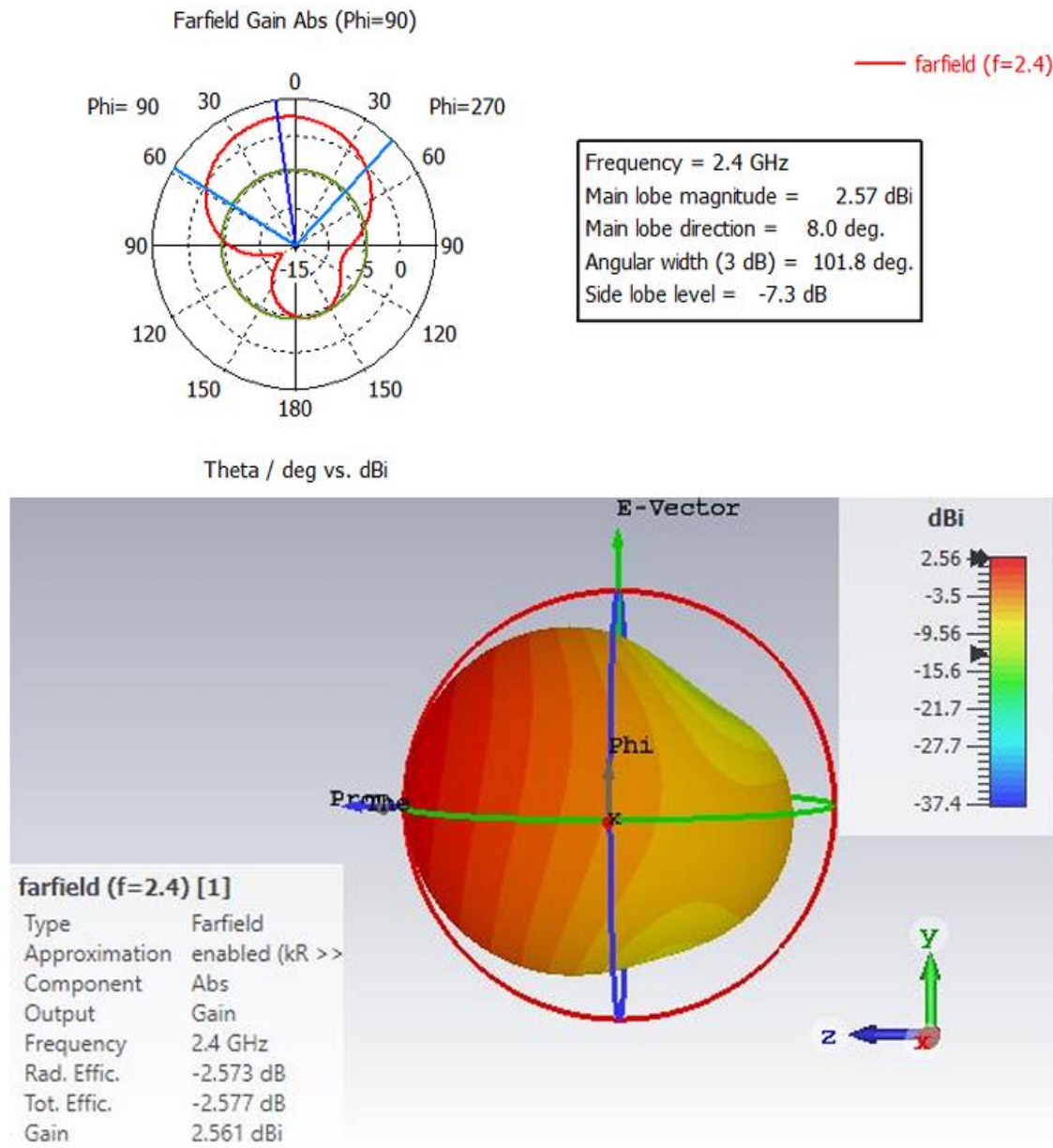


Figure III-10 Modèle de rayonnement 3D d'une antenne à UN éléments (Gain)

III.4.1 Directivité

Il est souhaitable de maximiser le diagramme de rayonnement de la réponse de l'antenne dans une direction fixe afin d'émettre ou de recevoir de la puissance. De même, la directivité ne dépend que de la forme du diagramme de rayonnement. La directivité obtenue pour l'antenne conçue est de 5,135 dB à 2,4 GHz, comme illustré à la figure (9). [39]

III.4.2 Gain

Le gain est un paramètre essentiel de toute antenne. Il correspond au rapport entre l'intensité du champ rayonné par l'antenne de référence et l'intensité du champ rayonné par l'antenne de référence. Le gain d'antenne, généralement exprimé en dB, désigne simplement la direction du rayonnement maximal.

Dans cette étude, le gain de l'antenne proposée à la fréquence de 2,4 GHz est de 2,561 dB, comme illustré à la figure(10) . [39]

DEUX ELEMENTS

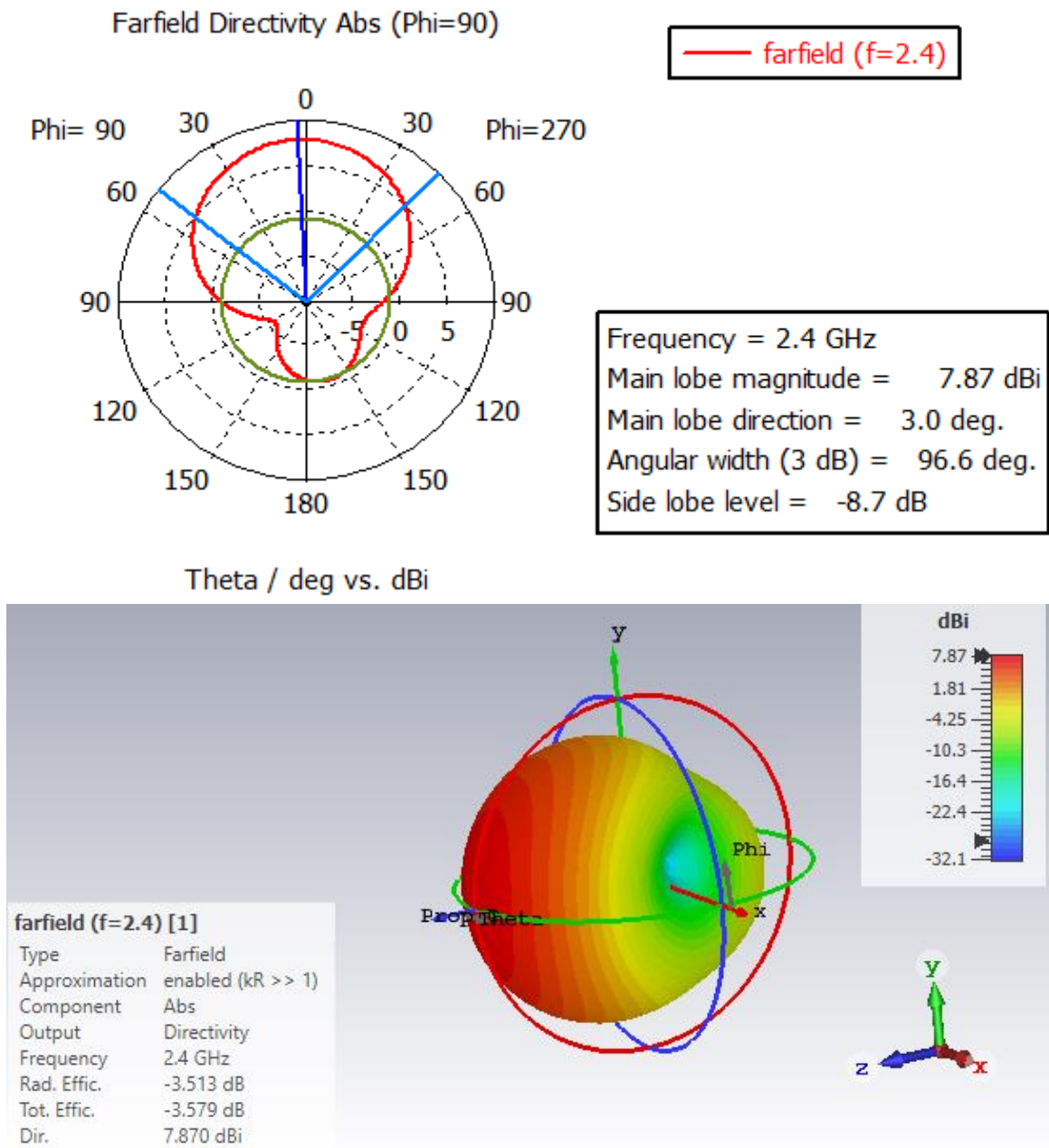


Figure III-11Modèle de rayonnement 3D d'une antenne à Deux éléments (Directivity)

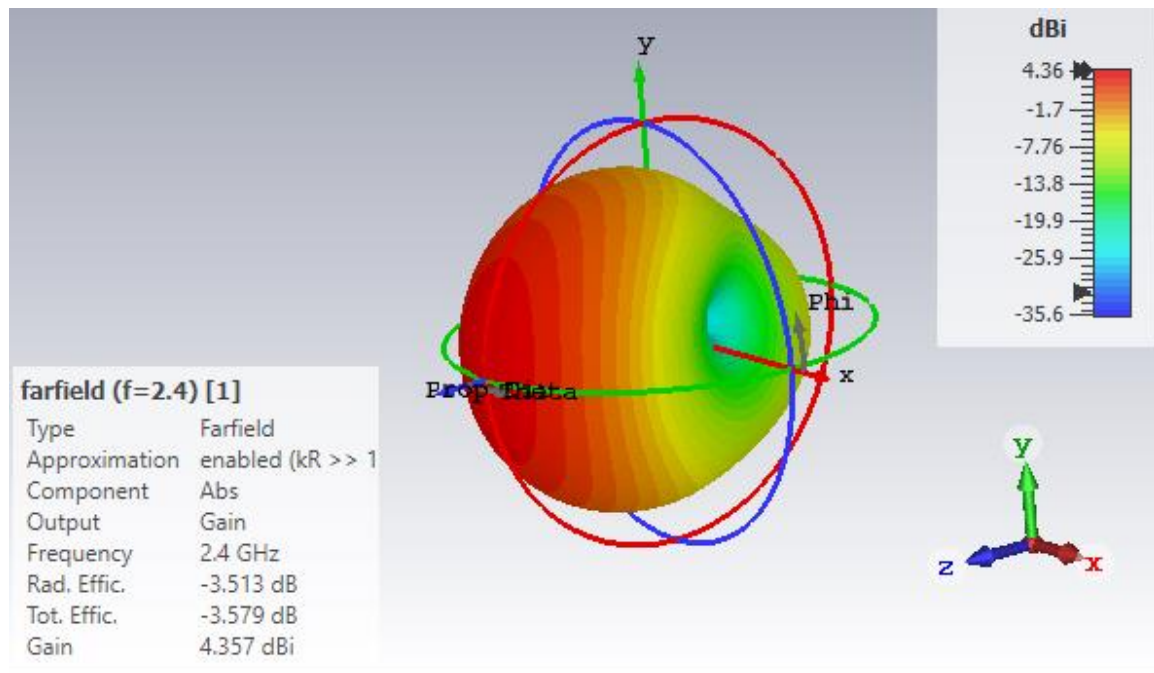
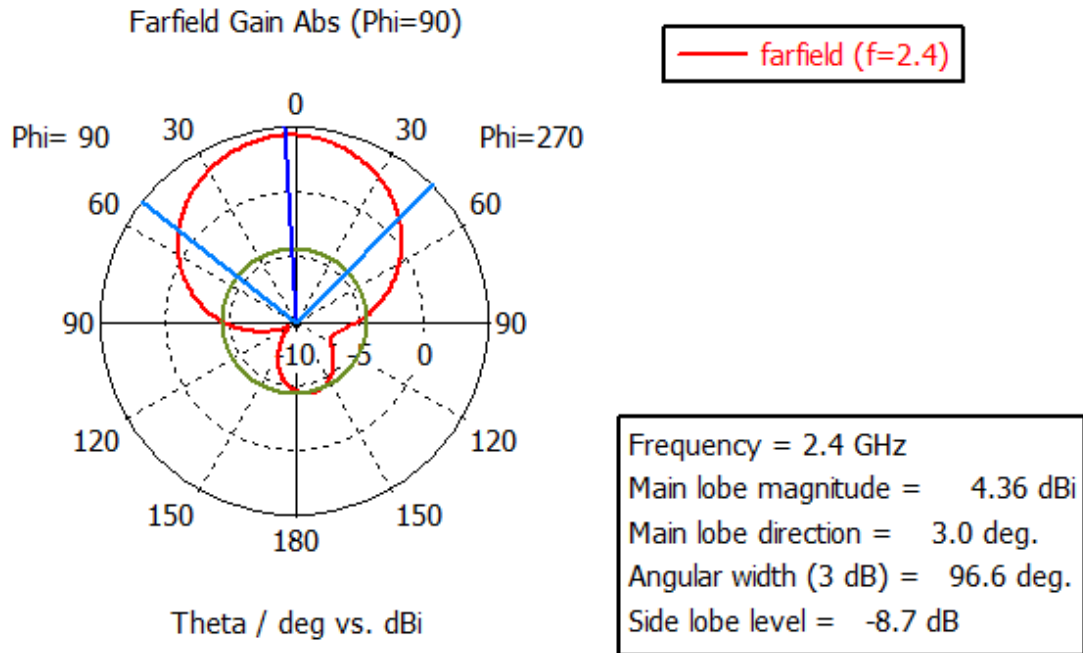


Figure III-12Modèle de rayonnement 3D d'une antenne à Deux éléments(Gain)

QUATRE ELEMENTS

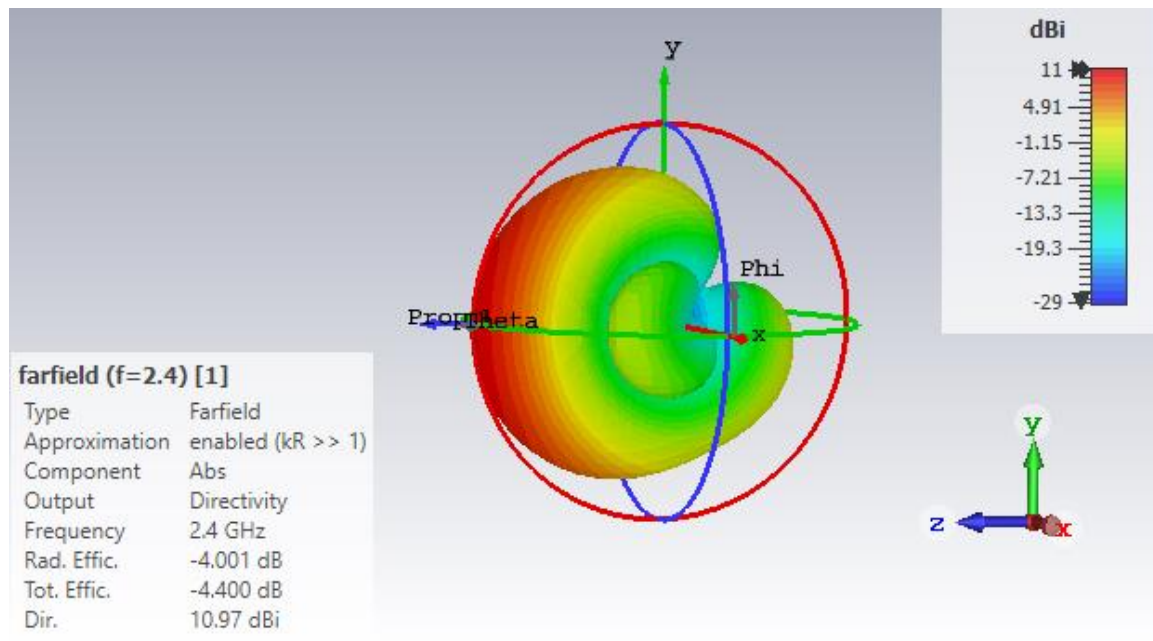
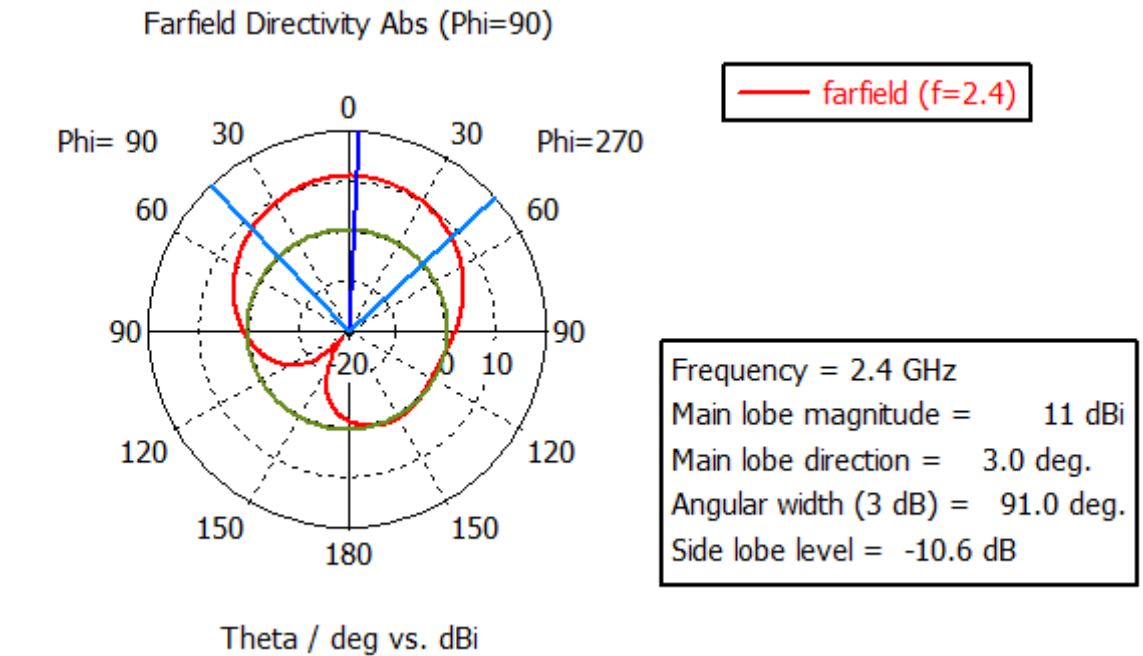


Figure III-13Modèle de rayonnement 3D d'une antenne à quatre éléments(Directivity)

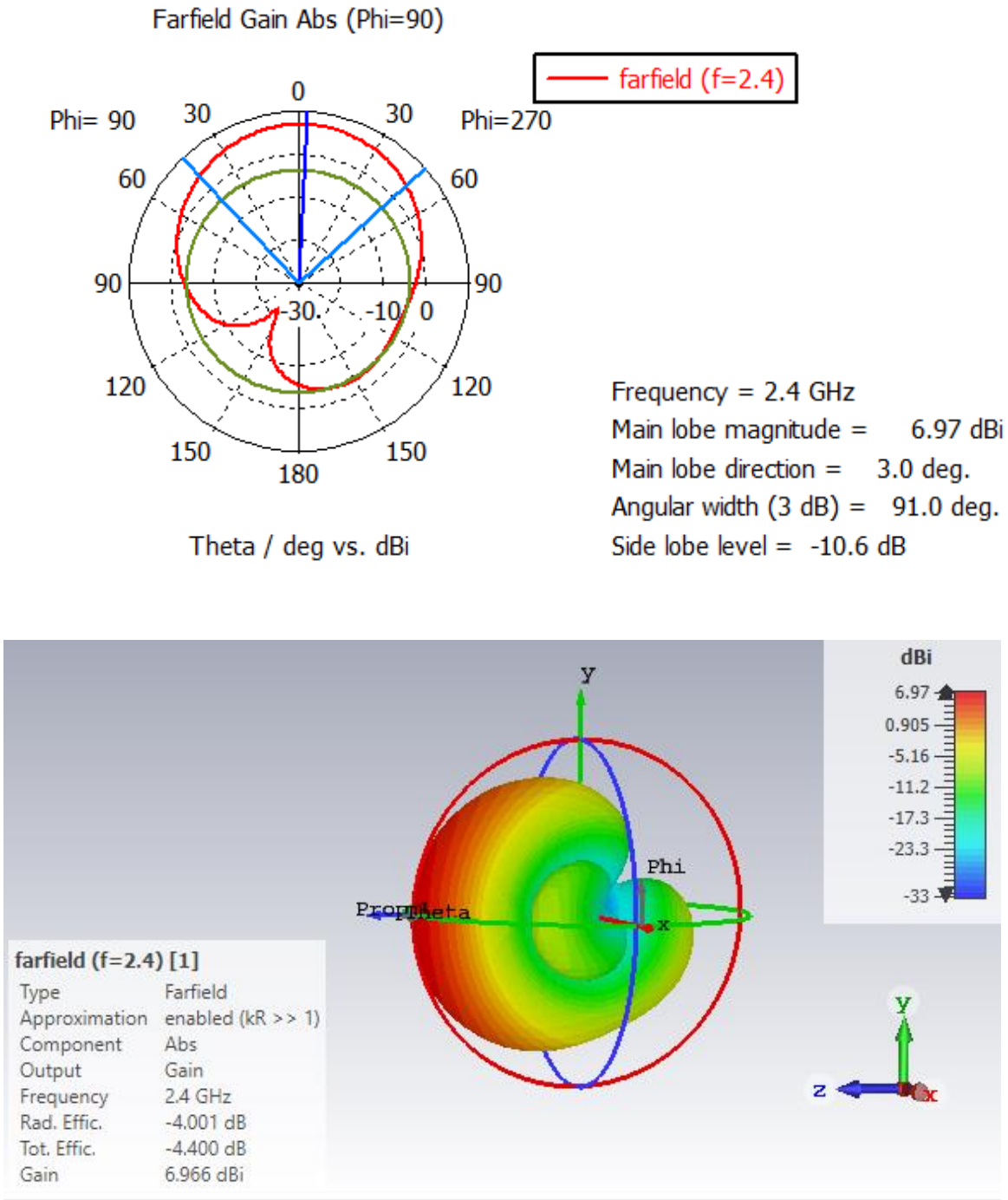


Figure III-14Modèle de rayonnement 3D d'une antenne à quatre éléments(Gain)

	Fréquence	Gain	Directivité	L'angle D'ouverture
Un éléments	2.4 Ghz	2.561	5.135 dBi	101.8°
Deux éléments	2.4 Ghz	4.357	7.870 dBi	96.6°
quatre éléments	2.4 Ghz	6.966 dBi	10.97 dBi	91 °

Tableau III-6 Analyse des performances de l'antenne : gain, directivité et angle d'ouverture avec des éléments croissants

III.4.3 Analyse des résultats du tableau (Gain ; Directivité L'angle D'ouverture)

Ce tableau démontre clairement qu'augmenter le nombre d'éléments dans la conception d'une antenne (d'un à quatre éléments) à une fréquence constante de 2.4 GHz conduit à une amélioration significative des performances de l'antenne en termes de gain et de directivité. Avec chaque augmentation du nombre d'éléments, le gain et la directivité augmentent progressivement, indiquant une meilleure capacité de l'antenne à amplifier et à concentrer le signal. En contrepartie, l'angle d'ouverture diminue à mesure que le nombre d'éléments augmente, ce qui signifie que le faisceau de rayonnement devient plus étroit et plus directionnel. Cette conclusion confirme le principe d'ingénierie selon lequel l'ajout d'éléments à une antenne peut améliorer son efficacité à diriger l'énergie, ce qui est souhaitable dans de nombreuses applications de communication pour augmenter la portée et réduire les interférences.

III.5 Impédance d'entrée de l'antenne

L'impédance d'entrée d'une antenne est la résistance qu'elle présente au courant alternatif à sa fréquence de fonctionnement. Elle est exprimée en ohms et représente le rapport entre la tension et le courant à son point d'alimentation. Cette valeur est cruciale car elle détermine l'efficacité avec laquelle l'antenne peut transmettre et recevoir des signaux radio, en particulier lorsqu'elle est connectée à un circuit ou une ligne de transmission.

UN ELEMENTS

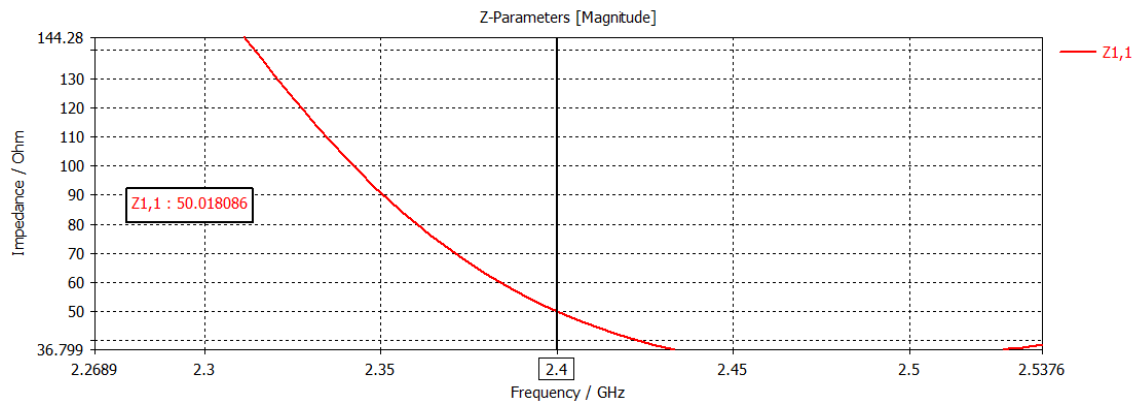


Figure III-15 Représentation de l'impédance d'entrée d'une antenne à UN éléments en fonction de la fréquence

DEUX ELEMENTS

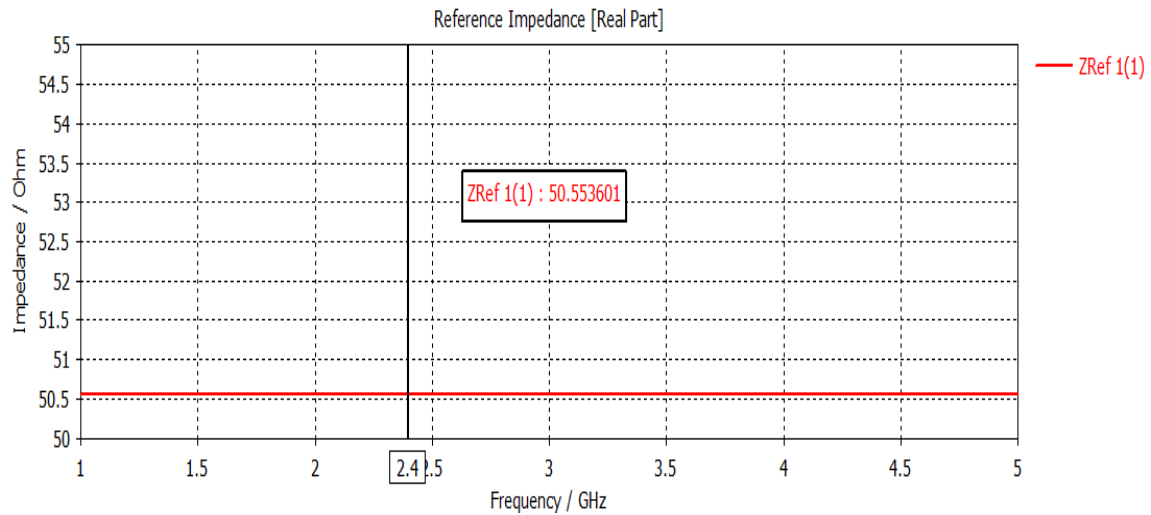


Figure III-16 Représentation de l'impédance d'entrée d'une antenne à deux éléments en fonction de la fréquence

QUATRE ELEMENTS

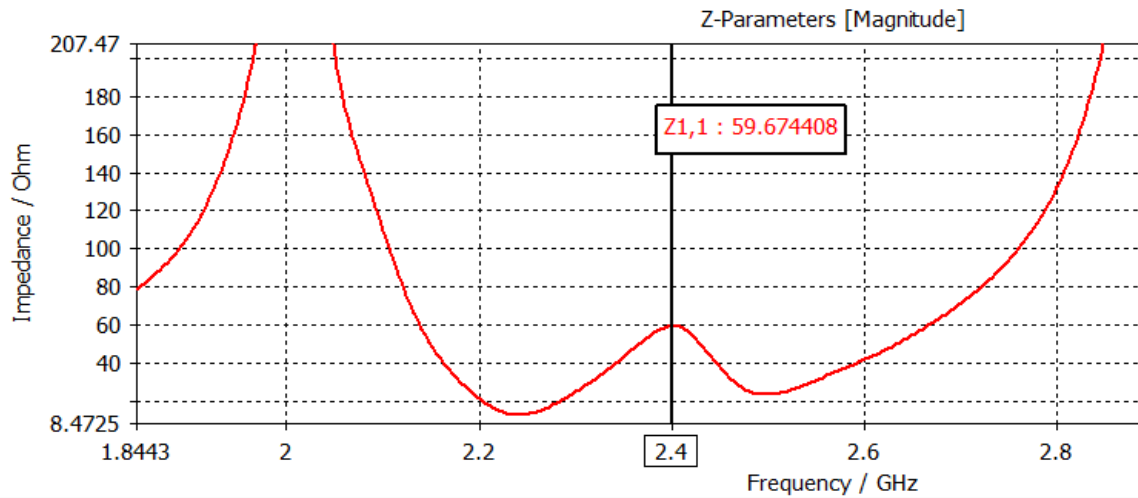


Figure III-17 Représentation de l'impédance d'entrée d'une antenne à quatre éléments en fonction de la fréquence

III.5.1 L'importance de maintenir la valeur d'impédance constante à 50 ohms

Le maintien d'une impédance d'antenne de 50 ohms garantit une efficacité de transfert de puissance maximale, réduit la perte de signal, prévient les dommages potentiels à l'équipement, maintient la qualité du signal et est conforme aux normes industrielles reconnues mondialement.

III.6 VSWR (Voltage Standing Wave Ratio) de l'antenne rectangulaire

Le rapport d'ondes stationnaires (ROS) d'une antenne rectangulaire mesure l'efficacité du transfert de puissance d'une source à l'antenne et indique l'adéquation de l'impédance de l'antenne à celle de la ligne de transmission. Un ROS faible (proche de 1) indique une bonne adaptation, ce qui signifie que la majeure partie de la puissance transmise est absorbée par l'antenne et non réfléchi, tandis qu'un ROS élevé indique une inadéquation et un transfert de puissance médiocre.

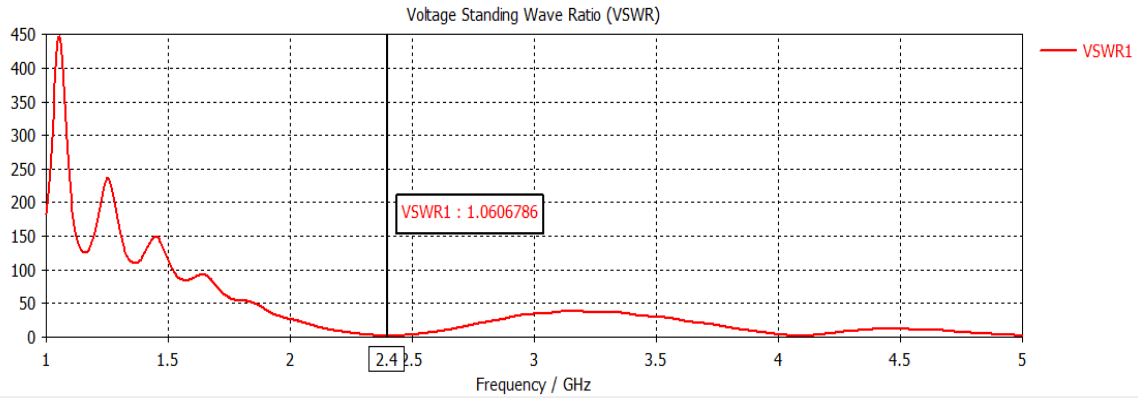
UN ELEMENTS

Figure III-18 Courbe de vswr d'une antenne à UN éléments

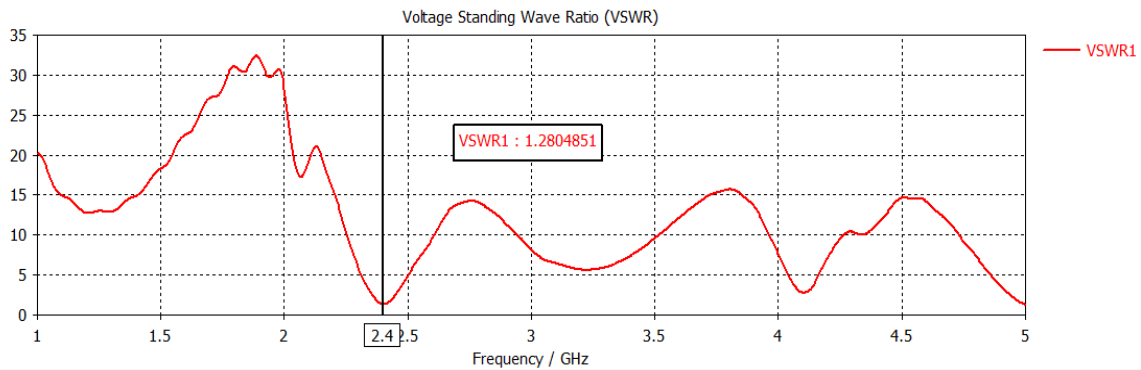
DEUX ELEMENTS

Figure III-19 Courbe de vswr d'une antenne à deux éléments

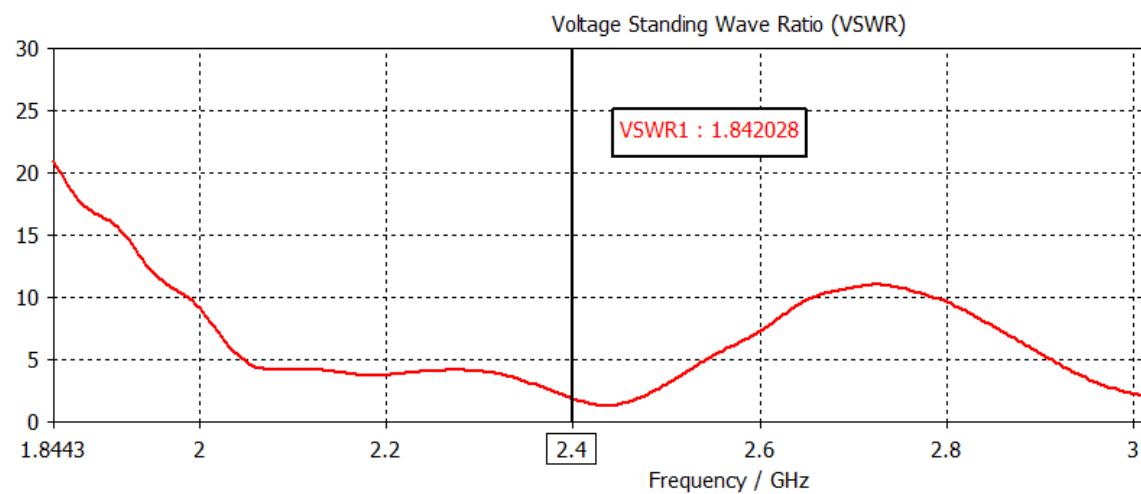
QUATRE ELEMENTS

Figure III-20 Courbe de vswr d'une antenne à quatre éléments

III.6.1 Analyse Des Résultats VSWR

L'antenne à quatre éléments présente un ROS très élevé (1,84 à 2,4 GHz), tandis que l'antenne à deux éléments présente une légère amélioration (1,28 à la même fréquence). L'amélioration est plus marquée avec l'antenne à un seul élément, où le ROS diminue encore, atteignant 1,6 à 2,4 GHz. Ces valeurs indiquent que moins il y a d'éléments, plus l'antenne offre de performances en termes de transmission de puissance et de réduction des réflexions à 2,4 GHz, les valeurs proches de 1 étant optimales. Cela confirme qu'une conception comportant moins d'éléments peut améliorer l'efficacité de la transmission du signal à la fréquence cible, réduisant ainsi les pertes de puissance et améliorant la qualité de la communication.

III.7 Conclusion

Une étude de l'antenne rectangulaire à 2,4 GHz montre que l'augmentation du nombre d'éléments améliore significativement les caractéristiques de rayonnement. Le gain et la directivité augmentent à mesure que l'angle d'ouverture se rétrécit, ce qui indique une meilleure amplification et directivité du signal. Cependant, cette amélioration n'est pas linéaire pour tous les autres paramètres de performance ; si l'antenne mono-élément présente la meilleure adaptation d'impédance avec un ROS d'environ 1,06 (le plus faible parmi les configurations testées), c'est elle qui obtient le meilleur coefficient de réflexion (S_{11}) et la bande passante la plus large. Cela suggère un compromis dans la conception de l'antenne, car l'amélioration du gain et de la directivité par l'augmentation du nombre d'éléments peut avoir un impact négatif sur l'adaptation d'impédance ou la bande passante à la fréquence cible, nécessitant un équilibrage minutieux pour répondre aux exigences spécifiques de l'application.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Ce projet, que nous avons présenté, nous a permis de concevoir et de simuler une antenne patch rectangulaire omnidirectionnelle alimentée par une ligne de transmission en cloche.

fournit des informations générales sur les antennes (rôle, classification, types d'antennes, etc.) consacré aux antennes patch (structure, différentes formes, principe de fonctionnement, gain, impédance d'entrée, directivité, etc.) décrit la conception et la simulation de l'antenne patch rectangulaire. La conception a été simulée à l'aide du programme CST. Les résultats obtenus sont acceptables en termes de coefficient de réflexion, de rapport d'ondes stationnaires, d'impédance d'entrée, etc. Sur la base des résultats de simulation, nous constatons que nos résultats, comparés à ceux de la référence [2], présentent des incohérences et parfois une détérioration par rapport aux résultats de cet article.

En conclusion, ce travail vise à concevoir et à simuler une antenne patch omnidirectionnelle fonctionnant sur le système CST (computer simulation technology). On peut dire que cet objectif a été atteint avec succès, car les résultats de simulation sont, en général, similaires à ceux de cet article. Dans le prolongement de ces travaux, nous proposons d'utiliser d'autres types d'alimentations, en modifiant la forme du patch, le matériau du substrat, ainsi que le nombre et la forme des éléments parasites. L'idée principale est de fabriquer l'antenne et d'effectuer des mesures.

III.8 Références

- [1]. Melle Sidi Yakoub Wafa , Melle Khatir BenMeheimda Bochra « Conception d'un réseau d'antennes patch pour les applications satellitaires en bande C » Université–Ain Temouchent- Belhadj Bouchaib ,2021.
- [2] Toukali Samira , Yaalaoui Khadra « Conception et simulation d'un réseau linéaire d'antennes imprimées » Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj ,2021
- [3]ZAOUI, BACHIR. Modélisation d'une antenne micro-rubancompacte. Université Chahid Hamma Lakhdar El Oued : s.n., 02/06/2015
- [4]ouverture de rayonnement, et qu'une antenne faiblement directive admet une large ouverture de rayonnement
- [5]RABIA, ZAINAB. Design and Performance Analysis of Switched BeamSeries-FedPatch Antenna Array for 60 GHZ wpan. 2014.
- [6]BELKHIRI, Hossam Eddine et SEGHIRI Oussama .(2020). Conception et simulation d'un réseau d'antennes micro-rubans triangulaires à BIE à deux éléments. (Doctoral dissertation, Université de M'Sila-Mohamed Boudiaf).
- [7] Ladjal Sarra, Chaâbour Ahlem « Etude et Conception d'antenne patch planaire avec réseau de fentes pour des applications de communication multifréquence » Université Echahid Cheikh Larbi Tébéssi – Tébessa 2024
- [8] Réalisé par Sara MANSAR Madiha ALAOUI Tahar EL BAHR ,« Antennes PATCH », 2015
- [9] BELKHIRI, Hossam Eddine et SEGHIRI Oussama .(2020). Conception et simulation d'un réseau d'antennes micro-rubans triangulaires à BIE à deux éléments. (Doctoral dissertation, Université de M'Sila-Mohamed Boudiaf).
- [10] <https://astrax.github.io/FormationPythonHAP2019-2020/pub/antenne/antenne-bs.html#perez1997electromagnetisme>
- [11] Mohamed Mansouri ,El Haithem Ezzeroug« Conception et Simulation d'une antenne patch ultra large bande« , En vue de l'obtention du Diplôme MASTER EN AÉRONAUTIQUE ;2018
- [12] ZITOUNI Ahmed "Polycopié de Cours " UNIVERSITE HASSIBA BENBOUALI DE CHLEF, 2018
- [13]MohamedMansouri et El haithemEzzeroug, « Conception et simulation d'une antenne Patch ultra large bande [1-8 GHz] », Mémoire Master en aéronautique. l'institut d'aéronautique et des études spatiales.
- [14] R. M. Lamine, " Modélisation et simulation des antennes en onde millimétrique à base de métamatériaux " Thèse de magister, Université Ziane Achour de Djelfa, 2018.

Références

- [15] M. Guerroui, « Conception d'une nouvelle antenne pour une application GPR » Thèse de doctorat, Université 8 Mai 1945 GUELMA, 2022.
- [16] D. Ziani, « Réseaux d'antennes MIMO ultra large bande pour système radar microonde » Thèse de doctorat, Université de Tlemcen, 2019
- [17] O. Barkat, « Etude et synthèse des caractéristiques de réseaux d'antennes imprimées Supraconductrices dans la Bande Millimétrique » Thèse de doctorat, Université Mentouri Constantine, 2009.
- [18] Ben Tahar Zohra et Ben Abdesselam Sarah Yamina, « Réalisation d'une Interface graphique de Calcul des paramètres d'antennes patch et conception logicielle », Mémoire de Fin d'Etudes MASTER. Centre Universitaire Belhadj Bouchaib d'Ain-Temouchent, 2019.
- [19] Fouad Benamrane, « Conception d'une antenne Patch Microstrip »; Master télécom hyperfréquence mémoire online; Université Sidi Mohamed Ben Abdellah (Fés) Maroc 2011.
- [20] D.M. POZAR, « Microstrip Antennas », IEEE, Vol.80 N 1, pp.79-91, January 1992. [21] R.J. Mailloux, « Phased Array Antenna Handbook », Second Edition Artech House, Inc, 2005. [22] W.K. CHEN, the Electrical Engineering Handbook Elsevier Inc, 2004.
- [23] L. Josefsson, P. Persson, « Conformal Array Antenna Theory and Design », IEEE antenna and propagation society, Wiley-Interscience 2006.
- [24] Z. N. Chen and M.-Y.-W. Chia, "Broadband Planar Antennas," John Wiley & Sons, Ltd, 2006
- [25] Gherbi Djihene "Etude et conception d'une antenne reconfigurable en utilisant des composants actifs" Université 8 Mai 1945 Guelma, 2023
- [26] Pradeep, "Project report on microstrip patch antenna," University Kurukshetra, 2005.
- [27] BARKAT OUARDA "Etude et Synthèse des Caractéristiques de Réseaux d'antennes Imprimées Supraconductrices dans la Bande Millimétrique" UNIVERSITE MENTOURI – CONSTANTINE ; 2009
- [28] Alexandre Boyer. « Antennes » Support De Cours Enoncé De Travaux Dirigés. Institut National Des Sciences Appliquées De Toulouse, octobre 2011.
- [29] Mr. ARAB Tarek. « Etude des matériaux composites (Titanate oxyde) : application pour la réalisation des substrats d'antennes miniatures ». UNIVERSITE SETIF-1 .UFAS (ALGERIE). 4/11/2014.
- [30] M. Arulaalan and L. Nithyanandan. « Analysis of Microstrip Line Feed Triangular Patch Antenna for WLAN (2.4GHz). Proc. of Int. Conf. on Advances in Communication, Network, and Computing, CNC, 2014.
- [31] BEN TAHAR Zohra, BEN ABDESSELAM Sarah Yamina « Réalisation d'une Interface graphique de Calcul des paramètres d'antennes patch et conception logicielle » Universitaire Belhadj Bouchaib d'Ain-Temouchent. 2019

Références

- [33] NELSON JORGE , Gonçalves Fonseca. Etude de Systèmes Micro-ondes d'Alimentation d'Antennes Réseau pour Application Multifaisceaux. Université de Toulouse : s.n., 15/10/2010
- [34] KADRI, BOUFELDJA. Modélisation des Synthèse de Réseaux Periodiques et non periodiques d'antenne micro-rubans par l'application d'un algorithme Génétique-Flou. 2011.
- [35] M. F. Bendahmane et F. T. Bendimerad, « Etude du couplage entre antennes imprimées » éditions universitaires européennes 2014 ISBN : 978-3-8417-3788-5.
- [36] V. Patrick, support de cour « Antennes » Master Recherche Télécommunications Hautes Fréquences et Optiques IRCOM, Université de Limoges.
- [37] BARKAT OUARDA.' Etude et Synthèse des Caractéristiques de Réseaux d'antennes Imprimées Supraconductrices dans la Bande Millimétrique' UNIVERSITE MENTOURI – CONSTANTINE' 2009
- [38] H. AKSAS. Conception et réalisation d'antennes réseaux imprimées larges-bandes a motifs optimisés. Master's thesis, Ecole Militaire Polytechnique, 2014
- [39] Md Ziaur Rahman; Mohammed Mynuddin "Design and Simulation of High Performance Rectangular Microstrip Patch Antenna Using CST Microwave Studio" University Dhaka, Bangladesh; University Statesboro, GA, USA; August 2020.
- [40] YANG, L. (2020). "The measurement of antenna VSWR by means of a Vector Network Analyzer".