الجـــمـهوريـــــة الجـــــزائـرية الديمقـــــراطيـــــة الشـــــعبيـــــة
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التـــــعليـــــم العـــــــالي والبحـــــث العلـــــــمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جـــــــــــامعة أبي بكـر بلـــــــقايد – تـلمســـــــــــــان –
Université Abou bakr Belkaïd – Tlemcen –
Faculté de TECHNOLOGIE

MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

En : Télécommunications

Spécialité : Systèmes de Télécommunications

Par : ATIK Aya Chaimaa et BELABBACI Mohammed Boumediene

Sujet

Conception et simulation d'une antenne à fente bi-bande avec filtrage métallique intégré pour des applications en bande Ku.

Soutenu, le 22 / 06 / 2026, devant le jury composé de :

Mme DJELTI Hamida	MCA	Univ. Tlemcen	Présidente
Mr. DJEMAI Abderazzak	MCA	Univ. Tlemcen	Examinateur
Mr. IRID Sidi Mohammed Hadj	Professeur	Univ. Tlemcen	Encadrant
Mr. KOURDI Zakarya	MAA	ENSTTIC-Oran	Co-encadrant

Année universitaire 2025/2026

REMERCIEMENTS

Nous exprimons notre gratitude divine pour avoir doté l'humanité de la raison et de la capacité d'explorer les vérités de l'univers.
Nos sincères remerciements s'adressent tout d'abord à notre encadrant, M. Irid Sidi Mohammed Hadj, professeur à l'Université Abou-Beker Belkaid de Tlemcen, pour avoir accepté de superviser ce travail. Nous lui sommes reconnaissants pour son accompagnement, ses conseils précieux, sa patience infinie et le soutien inconditionnel qu'il nous a apporté tout au long de notre recherche.

Nous tenons également à remercier notre co-encadrant, M. Kourdi Zakarya, Maître Assistant à l'École Nationale Supérieure de Télécommunication et Technologies Informatiques et Communications d'Oran, pour avoir accepté de superviser notre projet malgré ses nombreuses responsabilités. Sa disponibilité, son expertise, son esprit de synthèse et ses conseils ont constitué une base essentielle pour la réussite de ce travail, tout en nous accordant une grande liberté d'expression.
Nos remerciements sincères vont également à Mme. Djelti Hamida, professeur à l'Université Abou-Beker Belkaid de Tlemcen, pour avoir eu l'honneur de présider le jury de soutenance, ainsi qu'à M. Djemai Abderazzak, également professeur à la même université, pour avoir examiné notre travail.

Enfin, nous souhaitons exprimer notre profonde gratitude à toutes les personnes qui nous ont soutenus dans les moments difficiles, nous ont encouragés et renforcé notre détermination à mener à bien ce projet.
Nos remerciements chaleureux vont également à nos familles et amis pour leur soutien et leurs conseils tout au long de cette démarche.

DEDICACE

Je dédie ce mémoire de fin d'études avec grand amour, sincérité et fierté :

à ma chère mère « MAMI »

Pour l'amour qu'elle m'a toujours donné, ses encouragements et toute l'aide

Qu'elle m'a apportée durant mes études. Que Dieu vous procure bonne santé

et longue vie, en espérant que vous serez toujours fiers de moi.

à mes chers frères, Marwane et Brahim, et à ma chére sœur, Romaissa

Qui ont partagé avec moi tous les moments d'émotion lors de la réalisation de

Ce travail. Il m'ont chaleureusement supporté et encouragé tout au long de

Mon parcours.

à toute ma famille et mes amis

Pour leur présence, leur soutien inestimable et leurs encouragements

constants qui m'ont donné la force d'avance

à mon cher binôme « Moha » et à toute sa famille

Pour son soutien moral, sa patience et sa compréhension tout au long de ce

projet. Merci pour tes efforts avec tous mes vœux de bonheur, de santé et de

réussite dans ta vie personnelle et professionnelle.

AYA

DEDICACE

Je dédie ce mémoire à mes chers parents, avec tout mon amour et ma profonde gratitude. Merci pour votre soutien, vos sacrifices et vos encouragements tout au long de mon parcours. Que Dieu vous accorde santé, bonheur et longue vie.

Je le dédie également à ma sœur Bouchra, à sa fille Rahaf, à mon beau-frère Abdelhaq, à mon frère Yaakoub ainsi qu'à ma sœur Zeyneb. Merci pour votre présence, votre affection et votre confiance qui m'ont toujours donné la force d'avancer.

J'adresse aussi mes sincères remerciements à ma binôme Chaimaa et à sa famille, en particulier à Mamii , pour leur soutien, leur gentillesse et leur bienveillance tout au long de cette période. Merci du fond du cœur, et je vous souhaite santé, bonheur et réussite.

Mohammed Boumediene

RÉSUMÉ:

Dans ce mémoire, il est présenté la conception et la simulation d'une antenne à fente bi-bande avec filtrage intégral en métal dans la bande Ku (12–18 GHz). L'antenne proposée repose sur une structure multicouche composée de deux substrats diélectriques, d'une couche intermédiaire en mousse à faible permittivité ($\varepsilon_r \approx 1{,}05$) ainsi que d'une cavité métallique assurant le confinement des champs électromagnétiques et la réduction des rayonnements parasites hors bande.

L'objectif principal est de concevoir une antenne capable de fonctionner de manière stable dans deux bandes de fréquences distinctes au sein de la bande Ku, tout en garantissant une bonne adaptation d'impédance à 50 Ω, une amélioration du gain et une directivité accrue. La technique de l'inset feed microruban est adoptée pour réaliser l'adaptation d'impédance sans recourir à des composants externes. Le dimensionnement analytique de l'antenne est effectué à partir des relations électromagnétiques classiques issues des équations de Maxwell.

Les simulations sont réalisées sous CST Microwave Studio en utilisant la méthode FDTD (Différences Finies dans le Domaine Temporel). Les performances de l'antenne sont évaluées à travers l'analyse du coefficient de réflexion S11, du VSWR, du gain, de la directivité et du diagramme de rayonnement. Les résultats obtenus démontrent que l'intégration de la structure multicouche métallique avec cavité de filtrage améliore significativement les performances électromagnétiques de l'antenne à fente en bande Ku, ouvrant ainsi la voie à des systèmes de communication satellitaires compacts et performants.

Mots-clés : Antenne à fente, Bi-bande, Bande Ku, Filtrage intégral en métal, Cavité métallique, Substrat diélectrique, Mousse, CST Microwave Studio, S11, VSWR, Gain, Directivité.

ABSTRACT:

This thesis presents the design and simulation of a dual-band slot antenna with full metal filtering in the Ku band (12–18 GHz). The proposed antenna is based on a multilayer structure composed of two dielectric substrates, an intermediate low-permittivity foam layer ($\varepsilon_r \approx 1.05$), and a metallic cavity ensuring the confinement of electromagnetic fields and the suppression of out-of-band parasitic radiation.

The main objective is to design an antenna capable of operating stably in two distinct frequency bands within the Ku band, while ensuring good impedance matching at 50 Ω, improved gain, and enhanced directivity. The microstrip inset feed technique is adopted to achieve impedance matching without external components. The analytical dimensioning of the antenna is performed using classical electromagnetic relations derived from Maxwell's equations.

Simulations are carried out using CST Microwave Studio with the FDTD (Finite Difference Time Domain) method. The antenna performance is evaluated through the analysis of the reflection coefficient S11, VSWR, gain, directivity, and radiation pattern. The obtained results demonstrate that the integration of the metallic multilayer structure with filtering cavity significantly improves the electromagnetic performance of the slot antenna in the Ku band, paving the way for compact and high-performance satellite communication systems.

Keywords: Slot antenna, Dual-band, Ku band, Full metal filtering, Metallic cavity, Dielectric substrate, Foam, CST Microwave Studio, S11, VSWR, Gain, Directivity.

:الملخص

تتناول هذا المذكرة تصميم ومحاكاة هوائي ذي فتحة ثنائي النطاق مع ترشيح معدني متكامل في نطاق Ku (12–18Ghz) يعتمد الهوائي المقترح على هيكل متعدد الطبقات يتكون من ركيزتين عازلتين، وطبقة إسفنجية متوسطة ذات سماحية كهربائية منخفضة ($\varepsilon_r \approx 1.05$)، وتجويف معدني يضمن حصر المجالات الكهرومغناطيسية والحد من الإشعاعات الطفيلية خارج النطاق.

يهدف العمل بشكل رئيسي إلى تصميم هوائٍ قادر على العمل باستقرار في نطاقين من الترددات ضمن نطاق Ku، مع ضمان مطابقة جيدة للمعاوقة عند 50 Ω وتحسين الكسب والاتجاهية. تُعتمد تقنية التغذية بالإدخال (Inset Feed) عبر خط الميكروستريب لتحقيق مطابقة المعاوقة دون الحاجة إلى مكونات خارجية. يُنجز التحجيم التحليلي للهوائي انطلاقاً من العلاقات الكهرومغناطيسية الكلاسيكية المستخلصة من معادلات ماكسويل.

تُجرى المحاكاة باستخدام برنامج CST Microwave Studio بالاعتماد على طريقة الفروق المحدودة في المجال الزمني (FDTD). يُقيَّم أداء الهوائي من خلال تحليل معامل الانعكاس S11، ونسبة موجة الوقوف VSWR، والكسب، والاتجاهية، ومخطط الإشعاع. تُثبت النتائج المحصل عليها أن دمج الهيكل المعدني متعدد الطبقات مع تجويف الترشيح يُحسّن بشكل ملحوظ الأداء الكهرومغناطيسي لهوائي الفتحة في نطاق Ku، مما يفتح الطريق نحو أنظمة اتصالات فضائية مدمجة وعالية الأداء.

الكلمات المفتاحية: هوائي فتحة، ثنائي النطاق، نطاق Ku، ترشيح معدني متكامل، تجويف معدني، ركيزة عازلة، إسفنج، برنامج CST Microwave Studio، S11، VSWR، الكسب، الاتجاهية.

TABLES DES MATIÈRES

Remerciements I

Dédicace II

Dédicace III

RÉSUMÉ: IV

Abstract: IV

الملخص: V

LISTE DES FIGURES X

LISTE DES TABLEAUX XII

LISTE DES ACRONYMES XIII

Introduction Générale A1

Contribution scientifique du travail A3

Chapitre I: Principes généraux des antennes et leurs application

I.1 Introduction 3

I.2 Le rôle des antennes 3

I.3 Système de communication sans fil 4

I.4 Principe de fonctionnement 5

I.5 Relation entre fréquence et longueur d'onde 6

I.6 Généralité sur les antennes 6

I.6.1 Types d'antennes 6

I.6.2 Antennes filaires 7

I.6.2.a Dipôle : 7

I.6.2.b Monopôle : 8

I.6.2.c Antenne Yagi-Uda : 9

I.6.3 Antennes imprimées 10

I.6.3.a Antenne Patch : 10

I.6.4 Antennes à ouverture 11

I.6.4.1 Antenne à fente (slot) : 11

I.6.4.2 Antenne à guide d'ondes : 12

I.6.5 Antennes réseau (arrays) : 13

I.6.6 Antenne parabolique : 14
I.6.7 Antenne hélicoïdale : 15
I.6.8 Antenne Cadre (Loop) : 16
I.7 Caractéristiques principales des antennes 18
I.7.1 Coefficient de réflexion (S11) 18
I.7.2 Impédance d'entrée : 18
I.7.3 VSWR (Voltage Standing Wave Ratio) 19
I.7.4 Gain 20
I.7.5 Bande passante 20
I.7.6 Polarisation 20
Linéaire : 21
Circulaire : 22
Elliptique : 22
I.7.7 Directivité 23
I.7.8 Diagramme de rayonnement 23
I.8 Conclusion 24

Chapitre II: Les Antennes à Fente

II.1 Introduction : 25
II.2 Principe de fonctionnement d'une antenne à fente : 25
II.3 Structure d'une antenne à fente : 26
II.3.1 Plan métallique (Ground Plane) : 26
II.3.1.a La fente (Slot) : 27
II.3.1.b Ligne d'alimentation : 27
II.3.1.c Substrat diélectrique : 27
II.4 Principes théoriques des antennes à fente : 28
II.4.1 Principe de complémentarité (principe de Babinet) : 28
II.4.2 Relation entre la longueur de la fente et la fréquence de résonance : 28
II.4.3 Influence de la largeur de la fente : 29
II.4.4 Influence du substrat diélectrique : 30
II.4.5 Coefficient de réflexion : 30
II.4.6 Relation entre dimensions et performances de l'antenne : 30
II.5 Types d'antennes à fente : 31
II.5.1 Antenne à fente rectangulaire 31

II.5.2 Antenne à fente circulaire 32
II.5.3 Antenne à fente annulaire 32
II.6 Paramètres de performance des antennes à fente : 33
II.6.1 Coefficient de réflexion (S11) 33
II.6.2 VSWR (Voltage Standing Wave Ratio) : 34
II.6.3 Gain 34
II.6.4 Diagramme de rayonnement 34
II.6.5 Bande passante 34
II.6.6 Polarisation 35
II.7Applications des antennes à fente en bande Ku : 35
II.7.1Les communications satellitaires 35
II.7.2Les systèmes radar 36
II.7.3Les liaisons micro-ondes 36
II.8 avantages et limitations des antennes à fente : 37
II.8.1 Avantages 37
II.8.2 Inconvénients 37
II.9 Conclusion 37
Chapitre III: Simulation d'une antenne à fente en bande Ku
III.1 Introduction 39
III.2 Généralités sur le logiciel CST Microwave Studio 39
III.2.1 Présentation du logiciel CST Microwave Studio 39
III.2.2 Méthodes de simulation utilisées 39
III.2.3 Présentation de l'environnement CST Studio Suite 40
III.3 Dimensionnement et calcul de l'antenne 41
III.3.1 Choix des fréquences de résonance 41
III.3.2 Calcul de la longueur d'onde dans l'air 41
III.3.3 Calcul de la longueur d'onde guidée 42
III.3.4 Calcul des dimensions de la fente 42
III.3.5 Calcul de la largeur optimale de la fente 42
III.3.6 Interprétation des résultats 43
III.4 Résultats de simulation et analyse des performances 43
III.4.1 Structure de l'antenne 43
III.4.1.a Intégration du filtrage intégral en métal 45

III.4.2 Paramètres de simulation 45
III.4.3 Coefficient de réflexion (S11) 46
III.4.4 VSWR 47
III.4.5 Gain et diagramme de rayonnement 48
III.4.6 Directivité 49
III.4.7 Impédance d'entrée 50
III.4.8 Adaptation d'impédance 50
III.4.9 Comparaison des performances avec les travaux existants 51
III.5 Conclusion 52
RÉFÉRENCES 54

LISTE DES FIGURES

Chapitre I : Principes généraux des antennes et leurs applications spatiales

Figure I. 1 : Schéma d'un système de communication radio entre un émetteur et un récepteur [1] 3
Figure I. 2: Schéma de principe d'un système de communication radio [1] 4
Figure I. 3:Illustration d'un réseau de communication sans fil [2] 5
Figure I. 4: Différents types d'antennes [3], [4], [5] 7
Figure I. 5: Une antenne dipôle (horizontal, en V inversé et vertical) [1], [4] 8
Figure I. 6: Antenne Dipôle VHF [1], [27] 8
Figure I. 7 : Antenne monopôle [1], [4] 9
Figure I. 8: Principe de fonctionnement d'une antenne monopôle [1], [4] 9
Figure I. 9: antenne Yagi-Uda [4], [28] 10
Figure I. 10: antenne patch [3], [29] 11
Figure I. 11 : Antenne à fentes rectangulaire [6], [7] 12
Figure I. 12: antenne à guide d'ondes [6], [7] 13
Figure I. 13 : Antennes réseau (arrays)[5] 14
Figure I. 14: Antenne dipôle array (88-525) MHz[5] 14
Figure I. 15: Antenne Parabolique [5] 15
Figure I. 16 : Antenne hélice axiale [4] 16
Figure I. 17 : Antenne Hélicoïdale [4] 16
Figure I. 18: Antenne Cadre (Loop) [4] 17
Figure I. 19: Schéma équivalent d'une antenne avec ligne de transmission [2] 18
Figure I. 20: Impédance d'entrée et de sortie d'un élément [1] 18
Figure I. 21: Relation entre l'onde stationnaire de tension et le VSWR [2] 19
Figure I. 22: Polarisation des antennes : linéaire, circulaire et elliptique [1] 21
Figure I. 23 : Polarisation linéaire [1] 21
Figure I. 24: La polarisation circulaire [1] 22
Figure I. 25: Polarisation elliptique [1] 22
Figure I. 26: Directivité d'une antenne [1] 23
Figure I. 27: Diagramme de rayonnement d'une antenne [1] 24

Chapitre II : Les Antennes à Fente

Figure II. 1: Antenne à fente (Slot Antenna) [8] 25
Figure II. 2: Principe de fonctionnement et exemple d'antenne à fente [8] 26
Figure II. 3: Schéma illustrant le rayonnement d'une antenne à fente [15] 27
Figure II. 4: Structure d'une antenne à fente [9] 28
Figure II. 5: Antenne à fente rectangulaire [8] 32
Figure II. 6: Antenne à fente circulaire [8] 32
Figure II. 7: : Antenne à fente annulaire [9] 33
Figure II. 8: Paramètres de performance des antennes à fente [8] 35
Figure II. 9 : Illustration des communications satellitaires [9] 36
Figure II. 10 : Illustration les systèmes radar [30] 36
Figure II. 11: Liaisons micro-ondes point à point [15] 37

Chapitre III : Simulation d'une antenne à fente en bande Ku

Figure III. 1: Interface générale du logiciel CST Studio Suite [16] 40
Figure III. 2: Vue supérieure de l'antenne proposée sous CST [16] 44
Figure III. 3: Architecture multicouche et composants de l'antenne proposée sous CST Microwave Studio 44
Figure III. 4: Structure multicouche avec cavité métallique intégrée assurant le filtrage électromagnétique de l'antenne sous CST. 45
Figure III. 5Paramètres géométriques de l'antenne utilisés pour la simulation sous CST [16]. 46
Figure III. 6: Coefficient de réflexion S11 de l'antenne en fonction de la fréquence sous CST [16]. 47
Figure III. 7: Variation du VSWR en fonction de la fréquence sous CST. 47
Figure III. 8: Diagramme de rayonnement 3D de l'antenne à f1 ≈ 11.64 GHz sous CST. 48
Figure III. 9: Diagramme de rayonnement 3D de l'antenne à f2 ≈ 15.7 GHz sous CST. 48
Figure III. 10: Diagramme de directivité 3D de l'antenne à f1 ≈ 11.64 GHz sous CST. 49

Figure III. 11: Diagramme de directivité 3D de l'antenne à f2 ≈ 15.7 GHz sous CST. 49
Figure III. 12: Impédance de référence (50 Ω) utilisée pour l'adaptation de l'antenne. 50

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre I : Principes généraux des antennes et leurs applications spatiales

Tableau I. 1: Équations fondamentales de Maxwell [8], [15]. 5
Tableau I. 2: Paramètres principaux caractérisant les performances d'une antenne [1], [5], [8] .. 17

Chapitre II : Les Antennes à Fente

Tableau II. 1: Tableau des types de fentes d'antenne [29], [26], [19] 31

Chapitre III : Simulation d'une antenne à fente en bande Ku

Tableau III. 1: Comparaison des performances des antennes à fente dans la bande Ku 51

LISTE DES ACRONYMES

RF: Radio Frequency (Radiofréquence)

CST : Computer Simulation Technology

S11 : Coefficient de réflexion (réflectivité d'entrée)

VSWR : Voltage Standing Wave Ratio (Rapport d'ondes stationnaires de tension)

GHz : Gigahertz (milliards de Hz)

dBi : Décibels par rapport à une antenne isotrope (Gain isotrope)

LTE : Long Term Evolution (de la télécommunication mobile, si présente)

EBG : Electromagnetic Band Gap (Structure à bande interdite électromagnétique)

UWB: Ultra-Wide Band (Très large bande)

VHF: Very High Frequency (Très haute fréquence)

UHF : Ultra High Frequency (Ultra haute fréquence)

IMF : Impedance Matching Facility (Facilité d'adaptation d'impédance, si mentionné)

FEM : Finite Element Method (Méthode des éléments finis)

FDTD : Finite Difference Time Domain (Méthode des différences finies dans le domaine temporel)

MF: Medium Frequency (Fréquence moyenne)

HF: High Frequency (Haute fréquence)

Introduction Générale

Avec l'évolution rapide des systèmes de télécommunications modernes, les technologies RF nécessitent des antennes capables d'assurer une transmission fiable, compacte et efficace aux fréquences micro-ondes [1], [2].

Dans ce contexte, les applications satellitaires, radar et les systèmes de transmission à haut débit imposent des exigences de plus en plus élevées en matière de gain, de directivité, de bande passante et d'adaptation d'impédance [3], [4], [5].

Parmi les différentes structures utilisées dans le domaine des antennes micro-ondes, les antennes à fente occupent une place importante grâce à leur robustesse mécanique, leur simplicité de fabrication ainsi que leur capacité à fonctionner efficacement dans les bandes de fréquences élevées [6], [7].

Ces antennes présentent également l'avantage d'être facilement intégrables dans des structures métalliques et des guides d'ondes, ce qui les rend particulièrement adaptées aux applications spatiales et satellitaires [8], [9].

La bande Ku, comprise entre 12 GHz et 18 GHz, est largement exploitée dans les communications satellitaires, les systèmes radar ainsi que les liaisons micro-ondes point à point [10], [11].

Cette bande permet notamment la transmission de données à haut débit tout en utilisant des antennes de dimensions relativement réduites [9], [12].

Dans ce travail, une antenne à fente bi-bande intégrant une structure multicouche métallique avec cavité de filtrage est proposée et étudiée.

Plusieurs travaux récents ont porté sur les antennes à fente destinées aux applications satellitaires en bande Ku. Certaines conceptions permettent d'obtenir un fonctionnement bi-bande avec un gain compris entre 5 et 8 dBi, tandis que d'autres privilégient l'élargissement de la bande passante au détriment de la directivité. Comparée à ces travaux, la structure proposée dans ce mémoire intègre une cavité métallique de filtrage et une architecture multicouche permettant d'améliorer l'adaptation d'impédance, le gain et la directivité, tout en réduisant les rayonnements parasites hors bande.

L’objectif principal consiste à concevoir une antenne capable d’assurer un fonctionnement stable dans deux bandes de fréquences situées dans la bande Ku tout en garantissant une bonne adaptation d’impédance, une amélioration du gain et une meilleure directivité [13], [14].

La méthodologie adoptée repose d’abord sur une étude théorique des principes fondamentaux des antennes et des structures à fente. Ensuite, un dimensionnement analytique de l’antenne est réalisé à partir des relations électromagnétiques classiques [8], [15].

Enfin, la structure proposée est modélisée et simulée sous CST Microwave Studio afin d’évaluer les performances électromagnétiques de l’antenne à travers l’analyse du coefficient de réflexion S11, du VSWR, du gain, de la directivité et du diagramme de rayonnement [16], [17].

Les résultats obtenus permettent de démontrer l’intérêt des structures multicouches métalliques pour l’amélioration des performances des antennes à fente fonctionnant dans la bande Ku [14], [18].

CONTRIBUTION SCIENTIFIQUE DU TRAVAIL

La contribution principale de ce mémoire réside dans la conception et l'optimisation d'une antenne à fente bi-bande intégrant une structure multicouche métallique destinée aux applications micro-ondes dans la bande Ku .

L'antenne proposée repose sur l'utilisation de deux substrats diélectriques associés à une couche intermédiaire en mousse ainsi qu'à une cavité métallique permettant d'améliorer le confinement des champs électromagnétiques .

Cette configuration contribue à :

- Améliorer l'adaptation d'impédance ;
- Réduire les pertes par réflexion ;
- Obtenir un fonctionnement bi-bande stable ;
- Améliorer la directivité du rayonnement ;
- Augmenter les performances globales de l'antenne dans la bande Ku .

Les simulations réalisées sous CST Microwave Studio montrent que l'intégration du filtrage métallique permet d'obtenir de bonnes performances électromagnétiques aux fréquences de résonance étudiées .

Chapitre I

Principes généraux des antennes et leurs application

I.1 Introduction

Une antenne joue un rôle fondamental dans les systèmes de communication radiofréquence (RF), en assurant la transition entre la ligne de transmission et l'espace libre afin de permettre la transmission ou la réception des ondes électromagnétiques. Elle assure ainsi la conversion de l'énergie électrique en onde électromagnétique rayonnée, et inversement. Par conséquent, l'antenne constitue un élément essentiel dans les systèmes de communication sans fil, puisqu'elle établit la liaison entre l'émetteur ou le récepteur et le milieu de propagation [1].

Dans un système d'émission, le signal électrique généré par le circuit RF est acheminé vers l'antenne à travers une ligne de transmission, telle qu'un câble coaxial, une ligne micro-ruban (microstrip) ou un guide d'ondes. L'antenne transforme ensuite cette énergie électrique en onde électromagnétique capable de se propager dans l'espace libre. En réception, le phénomène inverse se produit : l'antenne capte les ondes incidentes et les convertit en signaux électriques exploitables par le récepteur [1], [2].

Parmi les différentes structures d'antennes existantes, l'antenne à fente (slot antenna) occupe une place importante dans les applications micro-ondes grâce à sa robustesse mécanique, sa simplicité de fabrication et sa facilité d'intégration dans les structures métalliques. Dans certains systèmes RF, elle peut également intégrer une fonction de filtrage permettant de sélectionner la bande de fréquences utile tout en réduisant les interférences indésirables [6], [14].

Dans ce travail, l'étude porte particulièrement sur les applications fonctionnant dans la bande Ku (12–18 GHz), largement utilisée dans les systèmes de communications satellitaires, les radars et les liaisons micro-ondes à haut débit [10], [11].

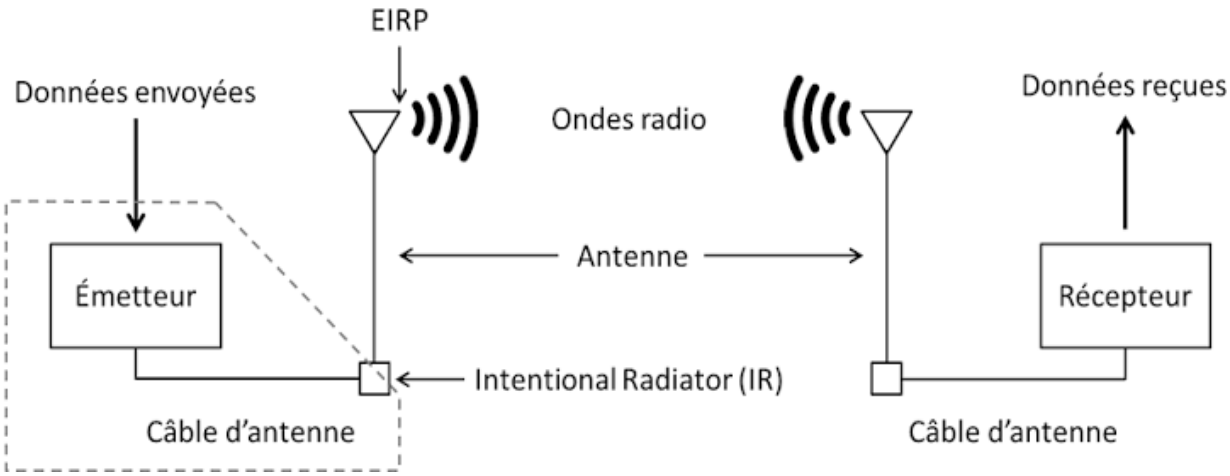


Figure I. 1 : *Schéma d'un système de communication radio entre un émetteur et un récepteur [1]*

I.2 Le rôle des antennes

Les principales fonctions d'une antenne sont les suivantes :

- Assurer une bonne adaptation entre l'équipement radio et le milieu de propagation afin de minimiser les pertes de puissance [1].
- Permettre la transmission et la réception de l'énergie électromagnétique entre l'émetteur et le récepteur [1], [2].
- Diriger le rayonnement électromagnétique dans une direction privilégiée selon l'application, afin d'améliorer l'efficacité globale du système [5].

De manière générale, une antenne doit garantir une transmission efficace du signal avec un minimum de pertes et de distorsions, ce qui représente un critère essentiel dans les systèmes de communication modernes [1], [5].

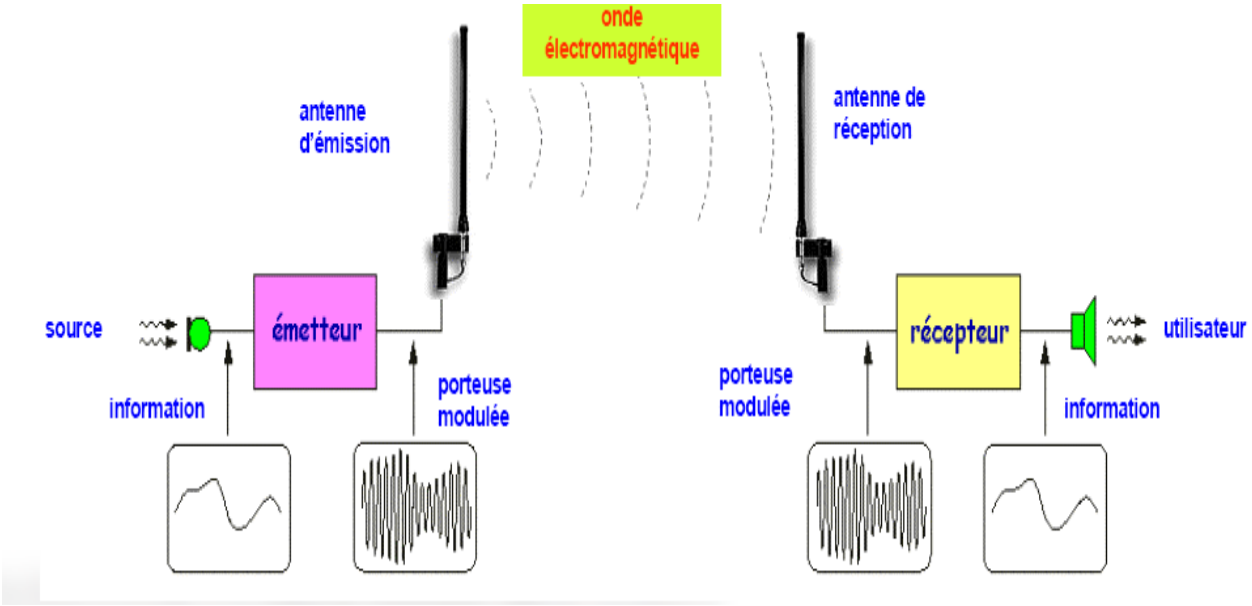


Figure I. 2: *Schéma de principe d'un système de communication radio [1]*

I.3 Système de communication sans fil

Un système de communication sans fil est généralement composé de trois éléments principaux : l'émetteur, le canal de propagation et le récepteur [2].

- Le bloc d'émission : il génère le signal électrique et le transmet vers l'antenne pour être rayonné dans l'espace libre [2].
- Le canal de propagation : il représente le milieu dans lequel l'onde électromagnétique se propage entre l'émetteur et le récepteur [24].
- Le bloc de réception : il capte le signal à l'aide d'une antenne et le convertit en un signal électrique exploitable par le récepteur [2], [19].



***Figure I. 3**:Illustration d'un réseau de communication sans fil [2]*

I.4 Principe de fonctionnement

Le fonctionnement d'une antenne repose sur les lois fondamentales de l'électromagnétisme décrites par les équations de Maxwell [8], [15]

Ces équations constituent les quatre lois fondamentales unifiant l'électricité et le magnétisme au sein d'un champ électromagnétique unique [6].

Nom	Equations	
Maxwell-Gauss (électrique)	$\nabla \cdot E = \rho/\varepsilon_0$	$div\,(E) = \rho\,/\,\varepsilon_0$
Maxwell-Gauss (magnétique)	$\nabla \cdot B = 0$	$div\,(B) = 0$
Maxwell-Faraday	$\nabla \times E = -\,\partial B\,/\,\partial t$	$rot\,(E) = -\,\partial B\,/\,\partial t$
Maxwell-Ampère	$\nabla \times H = J + \partial D\,/\,\partial t$	$rot\,(H) = J + \partial D\,/\,\partial t$

***Tableau I. 1:** Équations fondamentales de Maxwell [8], [15].*

Elles permettent de comprendre les mécanismes de génération et de propagation des ondes électromagnétiques dans l'espace libre.

Lorsqu'un courant alternatif circule dans un conducteur, il génère un champ magnétique variable. Ce champ magnétique induit à son tour un champ électrique variable. L'interaction entre ces deux champs produit une onde électromagnétique capable de se propager dans l'espace libre [25], [26].

Le rayonnement d'une antenne dépend principalement :

- De la géométrie de l'antenne [1] ;
- De ses dimensions électriques [3] ;
- De la fréquence de fonctionnement [2] ;
- De la distribution du courant sur la structure rayonnante [1], [22].

Une antenne efficace est conçue de manière à optimiser la distribution du courant afin de maximiser le rayonnement et de minimiser les pertes internes [1], [22].

I.5 Relation entre fréquence et longueur d'onde

La longueur d'onde d'un signal électromagnétique est inversement proportionnelle à la fréquence [26], [12].

Cette relation fondamentale est donnée par :

$$\lambda = \frac{c}{f} \qquad \textit{I. 1}$$

Où :

c = 3 × 10^8 m/s (vitesse de la lumière dans le vide),

f est la fréquence en Hz,

λ est la longueur d'onde en mètres.

Cette relation montre que l'augmentation de la fréquence entraîne une diminution de la longueur d'onde. Par conséquent, les antennes opérant à des fréquences élevées présentent généralement des dimensions plus réduites que celles fonctionnant à basses fréquences [1].

En pratique, la longueur physique d'une antenne correspond souvent à une fraction de la longueur d'onde, telles que λ/2 ou λ/4, notamment dans le cas des antennes dipôles et monopôles [1], [4].

I.6 Généralité sur les antennes

I.6.1 Types d'antennes

Les antennes peuvent être classées selon plusieurs critères, notamment leur structure, leur principe de rayonnement ainsi que leur domaine d'application [1], [3]. Cette classification permet de mieux comprendre les caractéristiques et les performances de chaque type d'antenne en fonction des exigences des systèmes de communication.

On distingue principalement :

- Les antennes filaires, telles que les dipôles et les monopôles ;
- Les antennes à ouverture, comme les antennes cornets ;
- Les antennes imprimées (microstrip) ;
- Les antennes réseau (arrays), largement utilisées dans les systèmes modernes de communication.

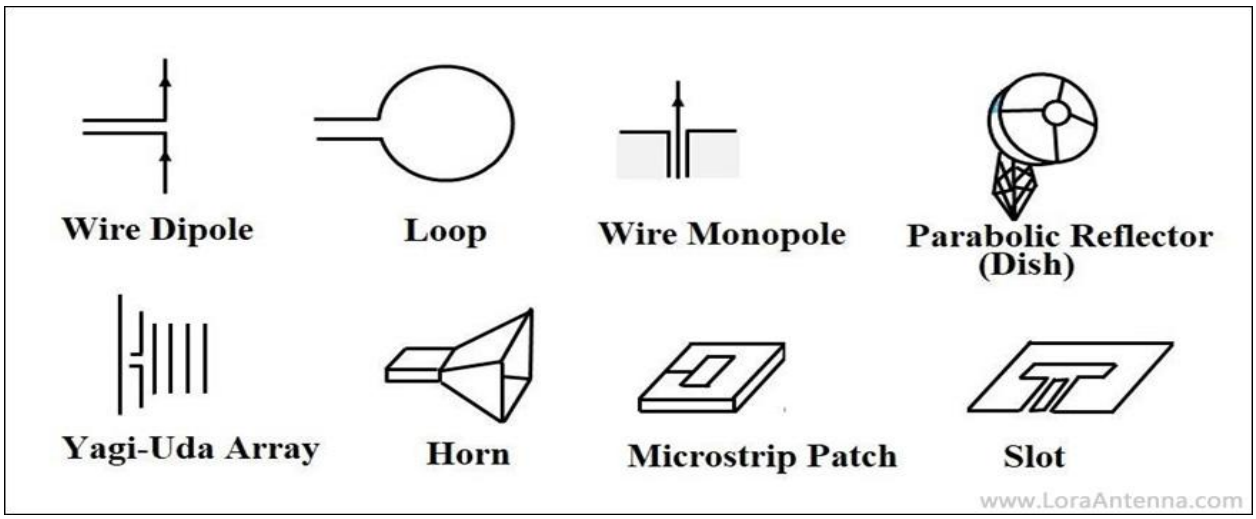


Figure I. 4: *Différents types d'antennes [3], [4], [5]*

I.6.2 Antennes filaires

I.6.2.a Dipôle :

L'antenne dipôle est l'une des structures les plus fondamentales en électromagnétisme. elle est largement utilisée dans les applications VHF et UHF. Elle est constituée de deux conducteurs métalliques alignés et alimentés en leur centre, avec une longueur totale généralement proche de la demi-longueur d'onde (λ/2) [1], [4].

Cette antenne présente un diagramme de rayonnement quasi omnidirectionnel dans le plan perpendiculaire à son axe, ce qui la rend particulièrement adaptée aux systèmes nécessitant une couverture uniforme [1].

En ajustant ses dimensions en fonction de la longueur d'onde, le dipôle peut être utilisé dans différentes bandes de fréquences [4], [27]. Dans certaines configurations spécifiques, il peut également fonctionner dans les bandes micro-ondes, notamment dans la bande Ku (12–18 GHz), bien que son utilisation principale reste dans les bandes VHF et UHF [10], [11].

Caractéristiques :

- Rayonnement quasi omnidirectionnel dans le plan horizontal
- Structure simple et facile à réaliser
- Bonne adaptation à différentes fréquences
- Faible coût de fabrication

Applications :

- Systèmes de communication radio (VHF / UHF)
- Communications satellitaires expérimentales
- Liaisons de communication à courte et moyenne distance
- Applications RF dans les domaines académiques et de recherche [24], [11].



Figure I. 5: *Une antenne dipôle (horizontal, en V inversé et vertical) [1], [4]*



Figure I. 6: *Antenne Dipôle VHF [1], [27]*

I.6.2.b Monopôle :

L'antenne monopôle est une structure équivalente à un demi-dipôle placé au-dessus d'un plan de masse conducteur, qui joue le rôle de réflecteur et améliore les performances de rayonnement. Sa longueur est généralement proche du quart de la longueur d'onde (λ/4) [1], [4]. Elle est largement utilisée dans les systèmes de communication radiofréquence, notamment pour les applications mobiles, les systèmes embarqués et les communications sans fil à courte et moyenne portée [1], [4].

En ajustant ses dimensions en fonction de la longueur d'onde, l'antenne monopôle peut fonctionner dans différentes bandes de fréquences [4], [27]. Dans certaines configurations spécifiques, elle peut également être adaptée aux bandes micro-ondes, y compris la bande Ku (12–18 GHz), bien que son utilisation principale reste dans les bandes VHF et UHF [10], [11].

Caractéristiques :

- Fonctionnement au-dessus d'un plan de masse
- Structure simple et compacte
- Rayonnement quasi omnidirectionnel
- Facilité d'intégration dans des systèmes de petite taille
- Adaptation possible à différentes bandes de fréquences [4], [27]

Applications :

- Antennes pour systèmes mobiles et sans fil
- Systèmes de télémétrie et de suivi
- Applications GPS et communications RF de base
- Plateformes embarquées (systèmes compacts)
- Applications expérimentales dans différentes bandes de fréquences [24], [11]



Figure I. 7 : *Antenne monopôle [1], [4]*

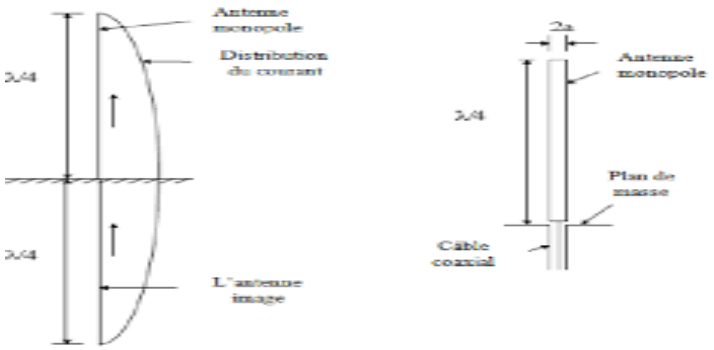


Figure I. 8: *Principe de fonctionnement d'une antenne monopôle [1], [4]*

Elles sont utilisées principalement aux basses et moyennes fréquences et présentent une structure simple [1], [4].

I.6.2.c Antenne Yagi-Uda :

L'antenne Yagi-Uda est une antenne directionnelle composée de plusieurs éléments métalliques parallèles montés sur un boom [4], [28] :

- 1 dipôle alimenté (élément actif)
- 1 réflecteur
- 1 ou plusieurs directeurs [4], [28]

Caractéristiques :

- Très directionnelle
- Gain élevé (environ 7 à 15 dBi selon le nombre de directeurs)

- Fonctionne généralement à VHF et UHF
- Bonne portée
- Structure simple et légère
- Bande passante moyenne [4], [28].

Applications :

- Antennes de télévision terrestre
- Radio amateur
- Communications VHF/UHF
- Liaisons point à point
- Réception longue distance [24], [11].



Figure I. 9: *antenne Yagi-Uda [4], [28]*

I.6.3 Antennes imprimées

I.6.3.a Antenne Patch :

L'antenne patch est une antenne imprimée compacte, largement utilisée dans les applications micro-ondes grâce à sa facilité d'intégration et son faible coût de fabrication [3], [29].

Elle est particulièrement adaptée aux systèmes fonctionnant dans les bandes micro-ondes, notamment la bande Ku (12–18 GHz), utilisée dans les communications satellitaires et certains systèmes radar [3], [29], [11].

Caractéristiques :

- Structure plane et compacte.

- Faible épaisseur et poids réduit.
- Facile à intégrer avec des circuits RF imprimés.
- Fonctionne généralement en bande étroite.
- Adaptée aux fréquences micro-ondes (GHz).
- Polarisation linéaire ou circulaire selon la géométrie.
- Très adaptée aux fréquences micro-ondes comme la bande Ku [3], [29], [11].

Applications :

- Communications satellitaires.
- Systèmes GPS.
- Téléphones mobiles et Wi-Fi.
- Radar et systèmes embarqués.
- Réseaux d'antennes (phased arrays) [3], [29], [11].

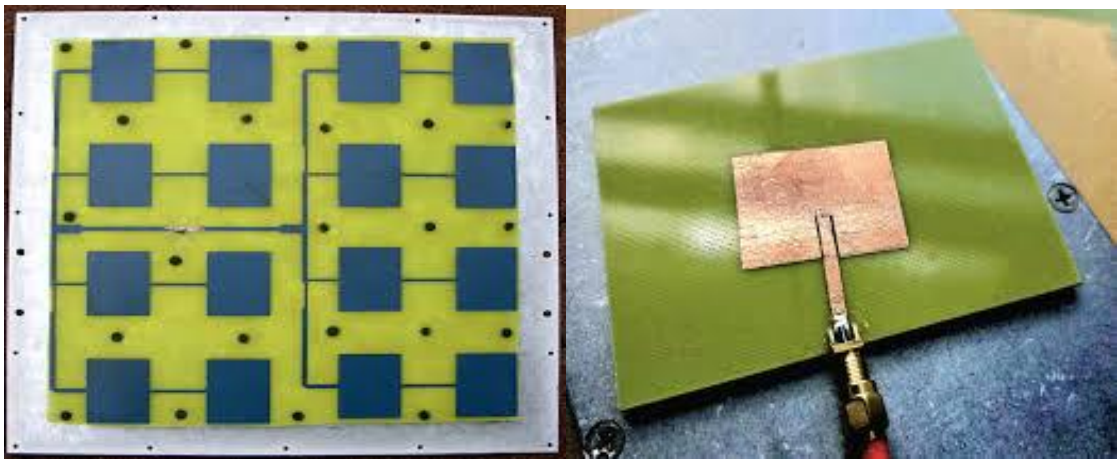


Figure I. 10: *antenne patch [3], [29]*

Ces antennes sont compactes, légères et adaptées aux systèmes intégrés modernes [3], [29].

I.6.4 Antennes à ouverture

I.6.4.1 Antenne à fente (slot) :

L'antenne à fente est une antenne à ouverture constituée d'une fente pratiquée dans une surface conductrice métallique. Contrairement aux antennes filaires qui rayonnent à partir d'un conducteur, l'antenne à fente rayonne à partir d'une ouverture dans un plan métallique [6], [7].
Elle est largement utilisée aux fréquences micro-ondes, notamment dans la bande Ku (12–18 GHz), grâce à sa robustesse mécanique et à sa capacité à supporter des puissances élevées [6], [11].

Caractéristiques :

- Structure métallique robuste
- Bonne adaptation aux fréquences micro-ondes
- Pertes réduites (surtout en structure full-metal)
- Possibilité d'intégration dans des guides d'ondes ou cavités
- Compatible avec les systèmes fonctionnant en bande Ku [6], [7], [11].

Applications :

- Communications satellitaires
- Systèmes radar
- Antennes intégrées dans des guides d'ondes
- Réseaux d'antennes à haute fréquence [6], [7].



Figure I. 11 : **Antenne à fentes rectangulaires [6], [7]**

I.6.4.2 Antenne à guide d'ondes :

L'antenne à guide d'ondes rayonne l'énergie électromagnétique à travers l'ouverture d'un conduit métallique, offrant de bonnes performances à la haute fréquence [6], [7].

Elle est particulièrement utilisée dans les applications micro-ondes, notamment dans la bande Ku, en raison de ses faibles pertes et de sa capacité à transmettre de fortes puissances [6], [7], [11].

Caractéristiques :

- Adaptée aux fréquences micro-ondes élevées
- Faibles pertes par conduction
- Haute capacité de transmission de puissance
- Rayonnement directif
- Structure métallique robuste [6], [7]

Applications :

- Communications satellitaires
- Systèmes radar
- Stations de base micro-ondes
- Liaisons point à point haute fréquence [6], [7], [11].

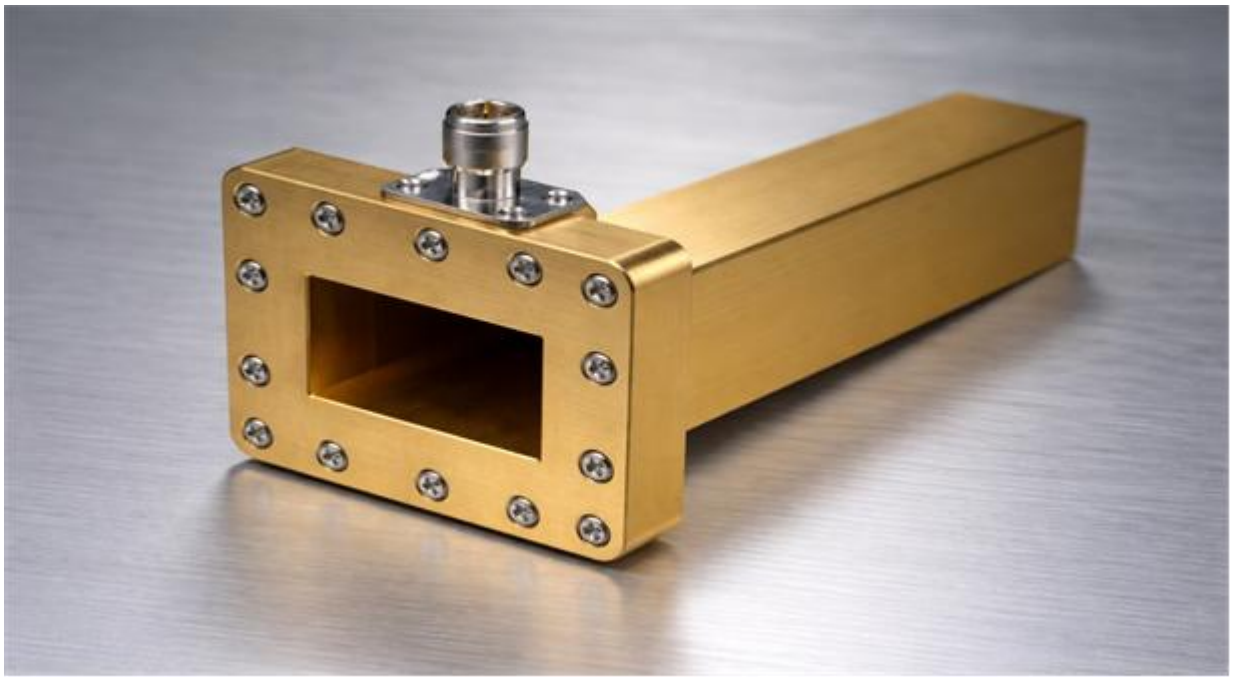


Figure I. 12: *antenne à guide d'ondes [6], [7]*

Elles sont particulièrement adaptées aux fréquences micro-ondes et offrent de bonnes performances en termes de puissance et de robustesse mécanique [6], [7].

I.6.5 Antennes réseau (arrays) :

Une antenne réseau est un ensemble d'éléments rayonnants combinés afin d'augmenter le gain et de contrôler la direction du rayonnement [5], [28]

Les réseaux d'antennes sont largement utilisés dans les systèmes fonctionnant en bande Ku [5], [11], car ils permettent d'obtenir une directivité élevée et un meilleur contrôle du faisceau.
Caractéristiques :

- Gain plus élevé qu'un élément unique
- Meilleure directivité
- Possibilité de contrôle du faisceau
- Adaptées aux fréquences micro-ondes [5], [28]

Applications :

- Communications satellitaires

- Systèmes radar
- Stations de base 5G
- Systèmes de poursuite et de détection [5], [11]

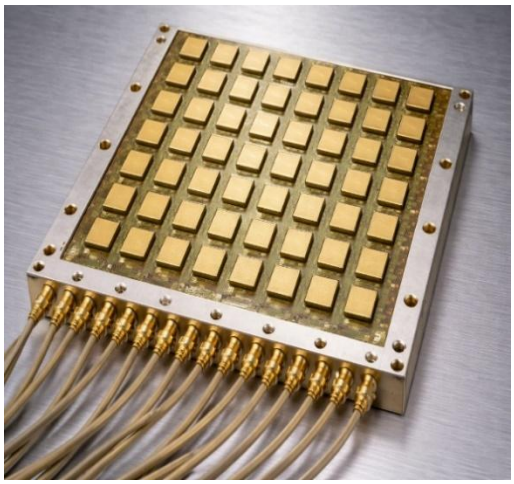


Figure I. 13 : *Antennes réseau (arrays)[5]*



Figure I. 14: *Antenne dipôle array (88-525) MHz[5]*

I.6.6 Antenne parabolique :

L'antenne parabolique est une antenne directionnelle composée d'un réflecteur en forme de parabole et d'une source d'alimentation (feed) placée au foyer [5].

Une antenne réseau est un ensemble d'éléments rayonnants combinés afin d'augmenter le gain et de contrôler Elle est très utilisée dans les applications micro-ondes, notamment dans la bande Ku (12–18 GHz) [5], où elle permet d'obtenir un gain élevé et une grande directivité.

Elle concentre les ondes électromagnétiques en un faisceau très étroit [5].

Caractéristiques :

- Très grande directivité

- Gain très élevé (20 à 50 dBi selon le diamètre)
- Fonctionne surtout en micro-ondes (GHz)
- Faisceau très étroit (petit angle d'ouverture)
- Haute précision de pointage
- Polarisation dépend du type d'alimentation [5].

Applications :

- Communications satellitaires (TV satellite, VSAT)
- Radar
- Liaisons micro-ondes point à point
- Radioastronomie
- Stations terrestres spatiales [5].



Figure I. 15: *Antenne Parabolique [5]*

I.6.7 Antenne hélicoïdale :

L'antenne hélicoïdale est une antenne constituée d'un fil conducteur en forme de spirale (hélice) enroulé autour d'un support cylindrique, généralement au-dessus d'un plan de masse [4].

En mode axial, elle peut fonctionner dans les bandes VHF, UHF et certaines applications micro-ondes comme la bande Ku, notamment dans les communications satellitaires [4], [11].Elle peut fonctionner en deux modes :

1. Mode normal

- Petite hélice (dimensions $\ll \lambda$)
- Rayonnement similaire à un dipôle
- Utilisée pour basses fréquences [4].

2. Mode axial (le plus utilisé)

- Circonférence ≈ λ (condition pour le mode axial)
- Rayonnement dans l'axe de l'hélice
- Polarisation circulaire [4].

Caractéristiques (mode axial) :

- Directionnelle
- Polarisation circulaire (droite ou gauche)
- Gain moyen à élever (environ 8 à 15 dBi) [4]
- Fonctionne généralement dans les bandes VHF, UHF et micro-ondes
- Large bande passante
- Construction simple [4]

Applications :

- Communications satellitaires
- Télécommunications spatiales
- GPS
- Liaisons radio VHF/UHF
- Systèmes de télémétrie [4], [24]

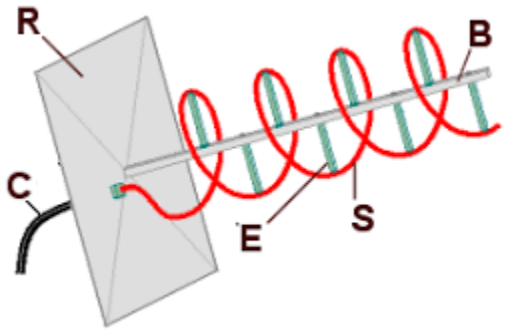


***Figure I. 16** : Antenne hélice axiale [4]*



***Figure I. 17 :** Antenne Hélicoïdale [4]*

I.6.8 Antenne Cadre (Loop) :

L'antenne cadre (ou loop) est une antenne constituée d'un conducteur en forme de boucle fermée (circulaire, carrée ou rectangulaire) [4].

Elle peut être de petite taille (petite boucle) ou de grande taille (boucle résonante).

Types d'antenne loop :

1. Petite boucle (Small loop)

- Dimensions $\ll \lambda$
- Fonctionne comme un dipôle magnétique
- Faible rendement [4]

2. Boucle résonante (Full-wave loop)

- Périmètre $\approx \lambda$
- Meilleur rendement
- Peut être directive [4]

Caractéristiques :

- Rayonnement principalement magnétique
- Peut être directive (selon taille)
- Gain faible à moyen
- Utilisée surtout en basses et moyennes fréquences (LF, MF, HF)
- La polarisation dépend de l'orientation
- Faible sensibilité au bruit électrique (avantage important) [4]

Applications :

- Radio AM (réception)
- Radio amateur (HF)
- Systèmes RFID
- Récepteurs portables
- Mesures de champ magnétique [4], [24]



Figure I. 18: *Antenne Cadre (Loop) [4]*

I.7 Caractéristiques principales des antennes

Caractéristique	Description
Gain	Indique la capacité de l'antenne à concentrer l'énergie dans une direction donnée.
Directivité	Mesure la concentration du rayonnement dans une direction spécifique.
Bande passante	Intervalle de fréquences dans lequel l'antenne fonctionne efficacement.
Polarisation	Orientation du champ électrique (linéaire, circulaire ou elliptique).
Impédance	Correspondance entre l'antenne et la ligne de transmission afin de minimiser les pertes.
Diagramme de rayonnement	Représentation graphique de la distribution de l'énergie rayonnée par l'antenne.
Caractéristique	Description

Tableau I. 2: *Paramètres principaux caractérisant les performances d'une antenne [1], [5], [8]*

I.7.1 Coefficient de réflexion (S11)

Le paramètre S11 représente le niveau de puissance réfléchie à l'entrée de l'antenne lorsque l'adaptation d'impédance entre l'antenne et la ligne de transmission n'est pas parfaite. Une adaptation satisfaisante est généralement obtenue lorsque :

$$S11 < -10dB \qquad \textbf{I. 2}$$

Ce qui correspond à une transmission de plus de 90 % de la puissance incidente vers l'antenne [1], [2].

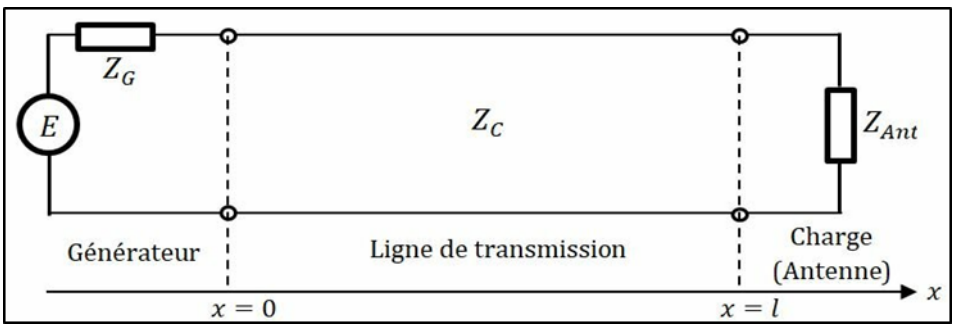


Figure I. 19: *Schéma équivalent d'une antenne avec ligne de transmission [2]*

I.7.2 Impédance d'entrée :

L'impédance d'entrée d'une antenne Zin est définie comme le rapport entre la tension et le courant au point d'alimentation :

$$Z_{in} = R + jX \qquad \textbf{I. 3}$$

Où :

R : représente la résistance (résistance de rayonnement et pertes),

X : représente la réactance (inductive ou capacitive).

Une adaptation optimale est obtenue lorsque l'impédance d'entrée de l'antenne est égale à l'impédance caractéristique de la ligne de transmission (généralement 50 Ω en RF). Une mauvaise adaptation entraîne des réflexions de puissance et réduit l'efficacité globale du système [1], [2].

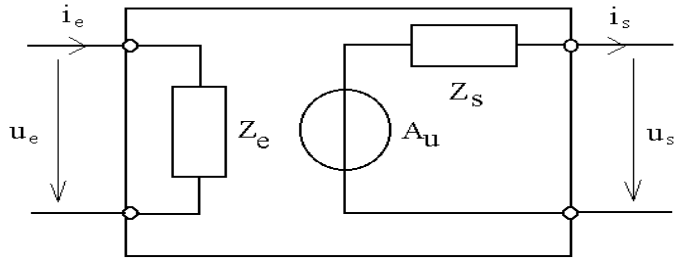


Figure I. 20: *Impédance d'entrée et de sortie d'un élément [1]*

I.7.3 VSWR (Voltage Standing Wave Ratio)

Le VSWR (Voltage Standing Wave Ratio) constitue un paramètre essentiel, directement lié au coefficient de réflexion. Il permet d'évaluer la qualité de l'adaptation d'impédance entre les différentes parties d'un système de transmission [1], [2]

En cas de désadaptation, une fraction de l'onde incidente est réfléchie vers la source, et la superposition des ondes incidente et réfléchie engendre la formation d'ondes stationnaires le long de la ligne.

Lorsqu'une discontinuité d'impédance est présente, la puissance fournie par le générateur 1 n'est pas entièrement transmise à la charge. Une partie de cette puissance, notée $P2$, est alors réfléchie en direction de la source. En pratique, un VSWR inférieur à 2 est généralement considéré comme acceptable et garantit un transfert de puissance satisfaisant [2].

Le VSWR est défini par la relation suivante :

$$VSWR = \frac{P_1 + P_2}{P_1 - P_2} \qquad \textbf{I. 4}$$

Le VSWR permet de quantifier le niveau d'ondes stationnaires présentes sur la ligne de transmission. Il est directement relié au coefficient de réflexion :

$$VSWR = \frac{1 + |S_{11}|}{1 - |S_{11}|} \qquad \textbf{I. 5}$$

Un VSWR égal à 1 correspond à une absence totale de réflexion de puissance, traduisant ainsi une adaptation parfaite entre la ligne de transmission et l'antenne [1], [2].

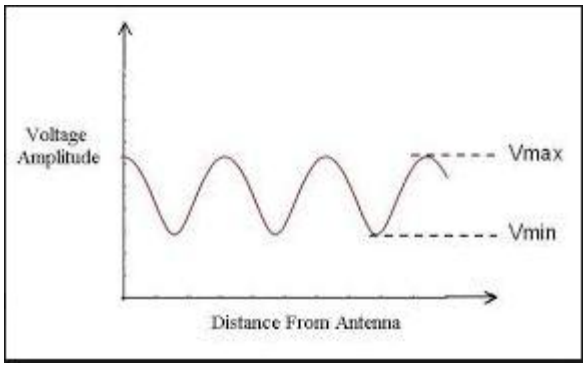


Figure I. 21: *Relation entre l'onde stationnaire de tension et le VSWR [2]*

I.7.4 Gain

Le gain caractérise la capacité de l'antenne à concentrer l'énergie rayonnée dans une direction donnée. Il est exprimé en dBi (gain par rapport à une antenne isotrope idéale). Le gain dépend de la directivité et de l'efficacité de l'antenne [1], [5].

$$G = \frac{4\pi p(\theta_0 \emptyset_0)}{P_{in}} \qquad \textit{I. 6}$$

Pin : puissance totale d'entrée

I.7.5 Bande passante

La bande passante correspond à la plage de fréquences pour laquelle l'antenne satisfait un critère donné, généralement : S11<−10 dB.

Elle dépend :

- De la géométrie de l'antenne
- Du type d'alimentation
- Des matériaux utilisés

Une bande passante large permet une meilleure flexibilité d'utilisation dans les systèmes modernes [2], [3].

I.7.6 Polarisation

La polarisation d'une antenne décrite l'orientation du champ électrique de l'onde électromagnétique rayonnée dans l'espace. Elle constitue un paramètre important dans l'analyse et la conception des systèmes de communication, car elle influence la qualité de la transmission et la compatibilité entre l'antenne émettrice et l'antenne réceptrice [1], [8].

On distingue généralement trois formes principales de polarisation :

- La polarisation linéaire : le champ électrique conserve une direction fixe (verticale ou horizontale)
- La polarisation circulaire : le champ électrique tourne autour de la direction de propagation avec une amplitude constante.
- La polarisation elliptique : Cas général où le champ électrique décrit une ellipse.

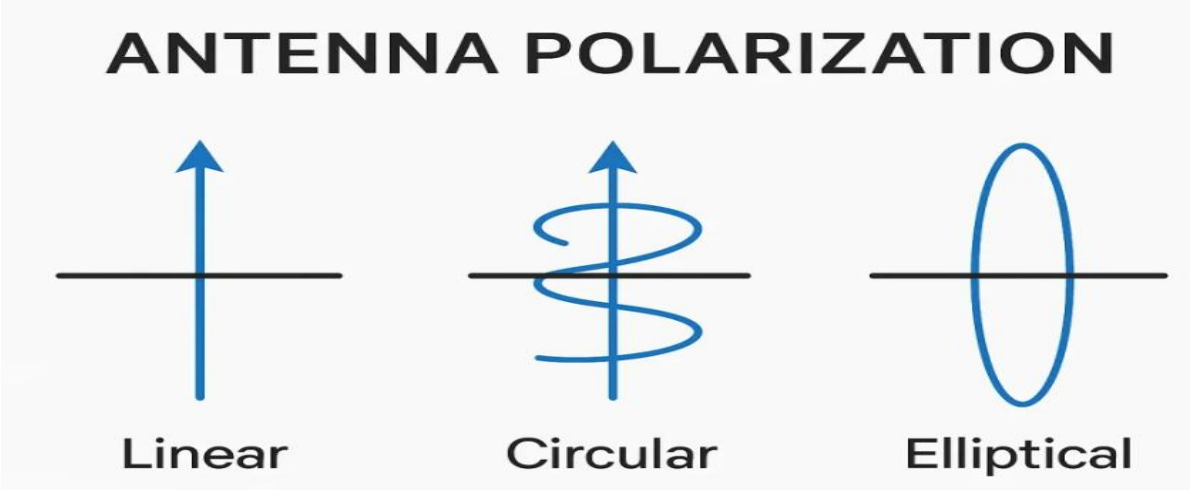


Figure I. 22: *Polarisation des antennes : linéaire, circulaire et elliptique [1]*

Linéaire :

La polarisation est dite linéaire lorsque le vecteur du champ électrique conserve la même direction au cours du temps. Dans ce cas, le champ électrique oscille suivant une seule direction fixe. Selon l'orientation de ce vecteur, la polarisation peut être verticale lorsque le champ électrique est perpendiculaire au plan de l'horizon, ou horizontale lorsqu'il est parallèle à celui-ci. Ce type de polarisation est largement utilisé dans de nombreux systèmes de communication radio.

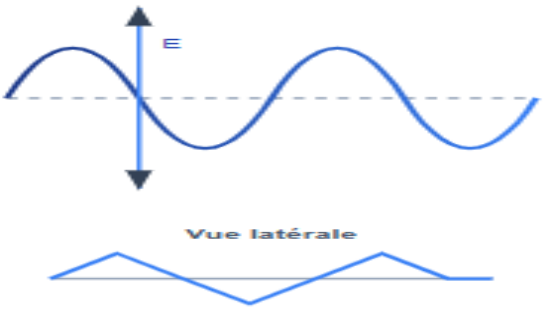


Figure I. 23 : *Polarisation linéaire [1]*

Circulaire :

La polarisation circulaire apparaît lorsque les deux composantes orthogonales du champ électrique ont la même amplitude et un déphasage de 90°. Dans cette configuration, l'extrémité du vecteur champ électrique décrit un cercle dans le plan perpendiculaire à la direction de propagation de l'onde. Selon le sens de rotation du vecteur, on distingue une polarisation circulaire droite ou gauche. Ce mode de polarisation est souvent utilisé dans les communications satellitaires et les systèmes radar, car il permet de limiter les effets liés aux changements d'orientation des antennes et aux réflexions du signal.

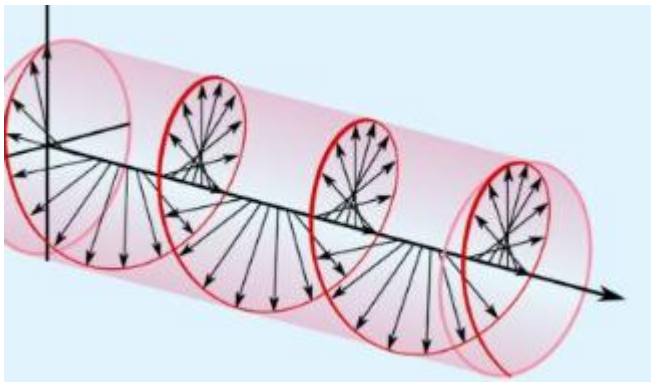


Figure I. 24: *La polarisation circulaire [1]*

Elliptique :

La polarisation elliptique représente le cas le plus général de polarisation. Elle apparaît lorsque les deux composantes orthogonales du champ électrique possèdent des amplitudes différentes et un déphasage quelconque. Dans ce cas, l'extrémité du vecteur du champ électrique décrit une trajectoire elliptique dans le plan de propagation de l'onde.

L'expression générale du champ électrique peut s'écrire sous la forme :

$$E_x = E_{x0}\cos(K_c - W_f) \qquad \textbf{I. 7}$$

Où :

W= $2\pi f$: est la pulsation de l'onde électromagnétique.

k= $2\pi fc$: Le nombre d'onde et φ le déphasage entre les deux composantes

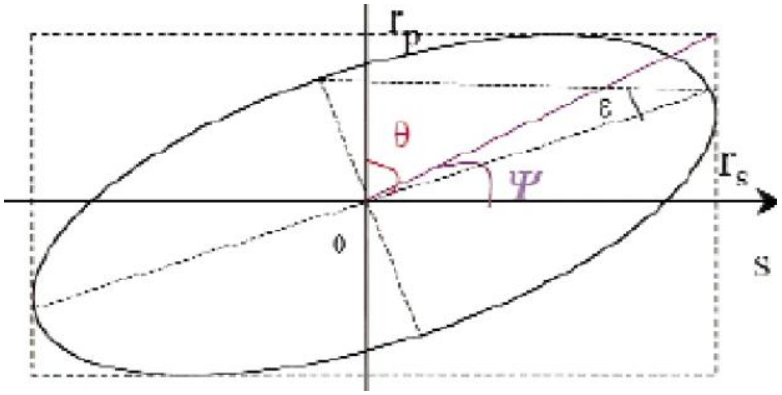


Figure I. 25: *Polarisation elliptique [1]*

La correspondance de polarisation entre antenne émettrice et réceptrice est essentielle pour maximiser le transfert de puissance [1].

I.7.7 Directivité

La directivité d'une antenne caractérise sa capacité à concentrer la puissance rayonnée dans une direction particulière. Une antenne fortement directive focalise l'énergie électromagnétique dans un faisceau étroit appelé lobe principal, tandis que les lobes secondaires représentent les rayonnements de moindre intensité dans d'autres directions. Le diagramme de rayonnement peut être représenté en coordonnées polaires ou cartésiennes afin d'analyser la distribution spatiale de la puissance rayonnée par l'antenne. Cette représentation permet d'évaluer les performances de l'antenne en termes de directivité et de concentration de l'énergie dans la direction souhaitée [1].

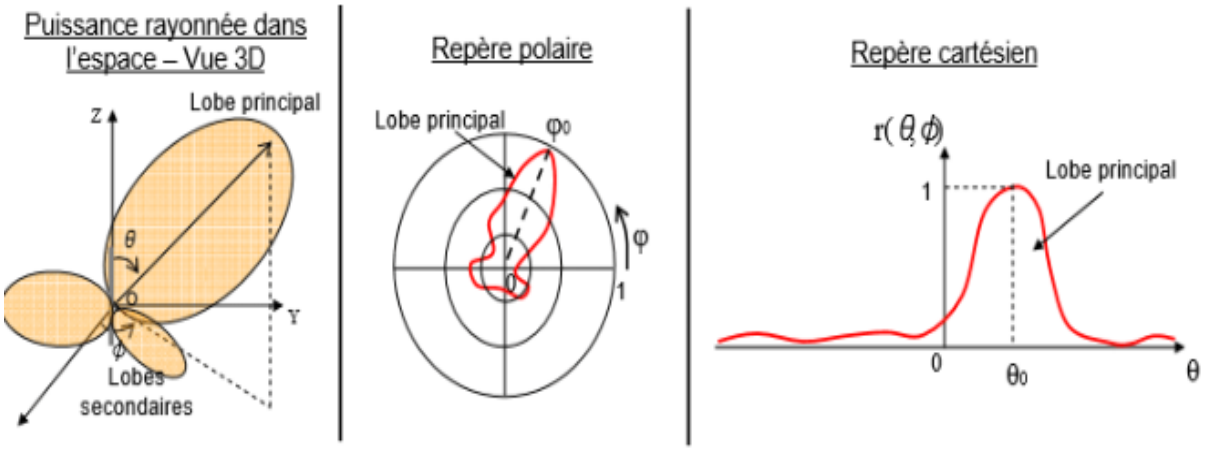


Figure I. 26: *Directivité d'une antenne [1]*

I.7.8 Diagramme de rayonnement

Le diagramme de rayonnement d'une antenne décrit la répartition de la puissance électromagnétique rayonnée dans l'espace. Il permet d'analyser la manière dont l'énergie est distribuée selon différentes directions autour de l'antenne. Ce diagramme peut être représenté

sous forme de coordonnées polaires ou cartésiennes afin de mieux visualiser les caractéristiques de rayonnement.

Il met généralement en évidence plusieurs paramètres importants, notamment le lobe principal, qui correspond à la direction où le rayonnement est maximal, ainsi que les lobes secondaires, qui représentent des rayonnements indésirables dans d'autres directions. On distingue également l'angle d'ouverture à −3 dB (HPBW), qui indique la largeur angulaire du lobe principal, et le rapport avant/arrière (Front-to-Back Ratio), qui exprime le rapport entre la puissance rayonnée dans la direction principale et celle émise dans la direction opposée.
L'analyse du diagramme de rayonnement est essentielle pour évaluer la directivité et la capacité de focalisation d'une antenne, en particulier dans les systèmes nécessitant un pointage précis [1]

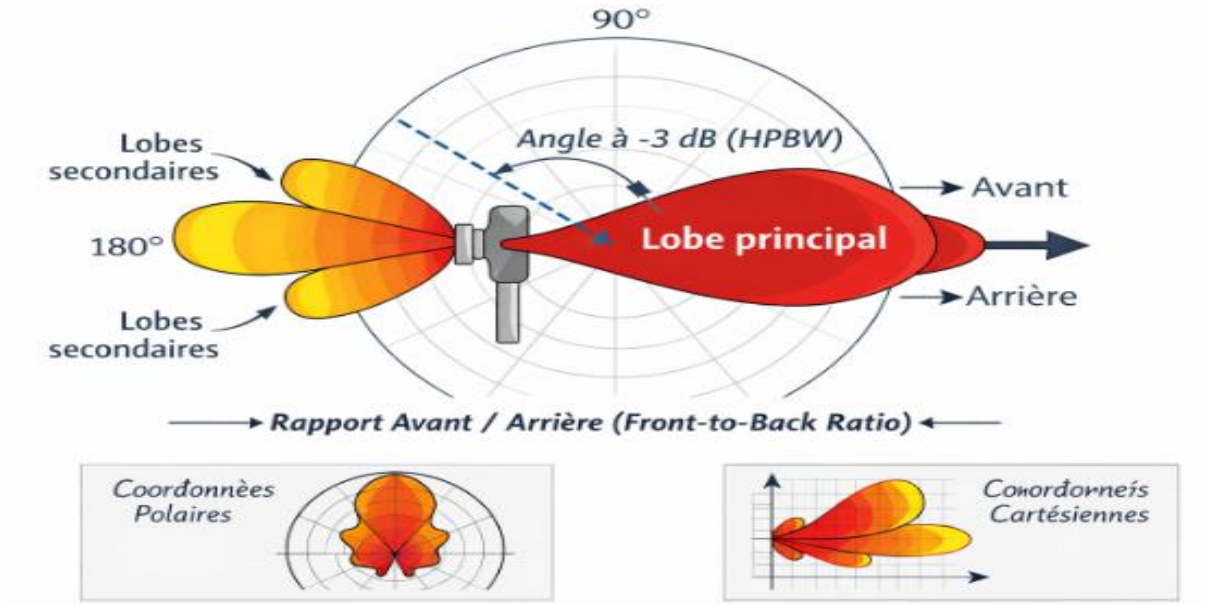


Figure I. 27: *Diagramme de rayonnement d'une antenne [1]*

I.8 Conclusion

Les notions fondamentales présentées dans ce chapitre ont permis d'introduire les principes généraux des antennes RF, notamment leur fonctionnement électromagnétique, la relation entre fréquence et longueur d'onde, ainsi que les principaux paramètres caractérisant leurs performances tels que le gain, la bande passante, la polarisation et l'adaptation d'impédance.

L'étude des différents types d'antennes a également mis en évidence la diversité des structures existantes et leurs domaines d'application respectifs.
Ces bases théoriques constituent un socle indispensable pour aborder l'étude détaillée d'une structure spécifique. Dans le chapitre suivant, une attention particulière sera portée à l'antenne à fente, en analysant son principe de fonctionnement, son dimensionnement ainsi que ses performances en bande Ku [3], [29].

Chapitre II

Les Antennes à Fente

II.1 Introduction :

Les antennes à fente constituent une catégorie importante d'antennes utilisées dans les systèmes de communication micro-ondes. Elles sont formées par une ouverture réalisée dans une surface métallique conductrice et rayonnent à partir de cette fente. Grâce à leur robustesse et à leur bon fonctionnement aux hautes fréquences, elles sont largement utilisées dans les systèmes radar, les communications satellitaires et les liaisons micro-ondes.

La bande Ku (12–18 GHz) est particulièrement utilisée dans ces applications en raison de sa capacité à assurer des transmissions à haut débit ainsi qu'une bonne directivité.

Dans ce chapitre, une étude théorique des antennes à fente en bande Ku est présentée. Les principes de fonctionnement, la structure générale ainsi que les principaux paramètres de performance seront étudiées afin de mieux comprendre les caractéristiques de ce type d'antenne avant la phase de conception et de simulation [8], [9].

Les relations fondamentales liées au dimensionnement et à l'optimisation de l'antenne, telles que la fréquence de résonance, la bande passante, le coefficient de réflexion et le diagramme de rayonnement, seront également présentées**.**

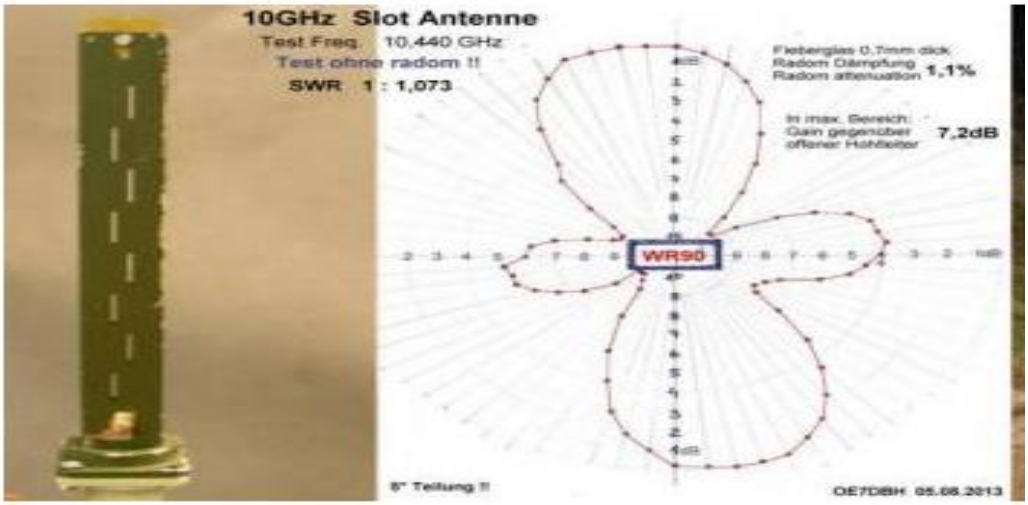


Figure II. 1: *Antenne à fente (Slot Antenna) [8]*

II.2 Principe de fonctionnement d'une antenne à fente :

Une antenne à fente est constituée d'une ouverture étroite réalisée dans une surface conductrice métallique appelée plan de masse. Lorsqu'elle est excitée par une source électromagnétique, cette fente agit comme un élément rayonnant capable d'émettre ou de recevoir des ondes électromagnétiques.

Le fonctionnement de l'antenne à fente repose sur le principe de Babinet, selon lequel une fente dans un plan métallique présente un comportement électromagnétique complémentaire à celui d'un dipôle électrique. Sous excitation, la discontinuité introduite par la fente perturbe la distribution des champs électromagnétiques et permet le rayonnement dans l'espace libre.

Lorsque la longueur de la fente est proche d'une demi-longueur d'onde guidée, l'antenne atteint généralement une condition de résonance favorable au rayonnement efficace. Grâce à cette structure simple et robuste, les antennes à fente sont particulièrement adaptées aux fréquences micro-ondes et sont largement utilisées dans les systèmes fonctionnant dans la bande Ku [8], [15], [9].

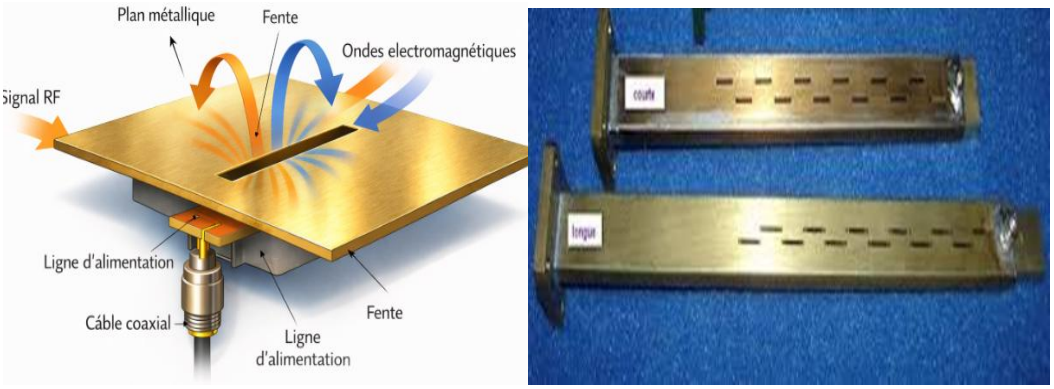


Figure II. 2: *Principe de fonctionnement et exemple d'antenne à fente [8]*

II.3 Structure d'une antenne à fente :

Une antenne à fente est généralement constituée d'une ouverture étroite réalisée dans une surface conductrice métallique appelée plan de masse. Cette structure permet la génération et le rayonnement des ondes électromagnétiques lorsque la fente est excitée par une source d'alimentation appropriée. La géométrie de la fente ainsi que les caractéristiques du plan métallique influencent directement les performances de l'antenne, telles que la fréquence de fonctionnement, le diagramme de rayonnement et la bande passante [8], [9].

La structure d'une antenne à fente comprend généralement plusieurs éléments principaux qui assurent son fonctionnement efficace.

II.3.1 Plan métallique (Ground Plane) :

Le plan métallique constitue la surface conductrice dans laquelle la fente est réalisée. Il joue un rôle essentiel dans le rayonnement de l'antenne en guidant les courants de surface et en influençant la distribution des champs électromagnétiques. Dans la plupart des conceptions, ce plan est réalisé en cuivre ou en aluminium afin d'assurer une bonne conductivité électrique et de réduire les pertes [15], [30].

II.3.1.a La fente (Slot) :

La fente est l'élément rayonnant principal de l'antenne. Elle correspond à une ouverture pratiquée dans le plan métallique, dont les dimensions sont généralement liées à la longueur d'onde de la fréquence de fonctionnement. La forme de la fente peut varier selon les applications, par exemple rectangulaire, circulaire ou annulaire. Le choix de la géométrie influence la bande passante, la polarisation et les caractéristiques de rayonnement de l'antenne [8], [26]

II.3.1.b Ligne d'alimentation :

La ligne d'alimentation permet de fournir l'énergie électromagnétique à la fente afin de produire le rayonnement. Plusieurs techniques d'alimentation peuvent être utilisées, notamment la ligne microstrip, le guide d'ondes ou la ligne coplanaire. Le choix du type d'alimentation dépend des contraintes de conception, de la fréquence de fonctionnement et de l'intégration avec les circuits RF [15], [24].

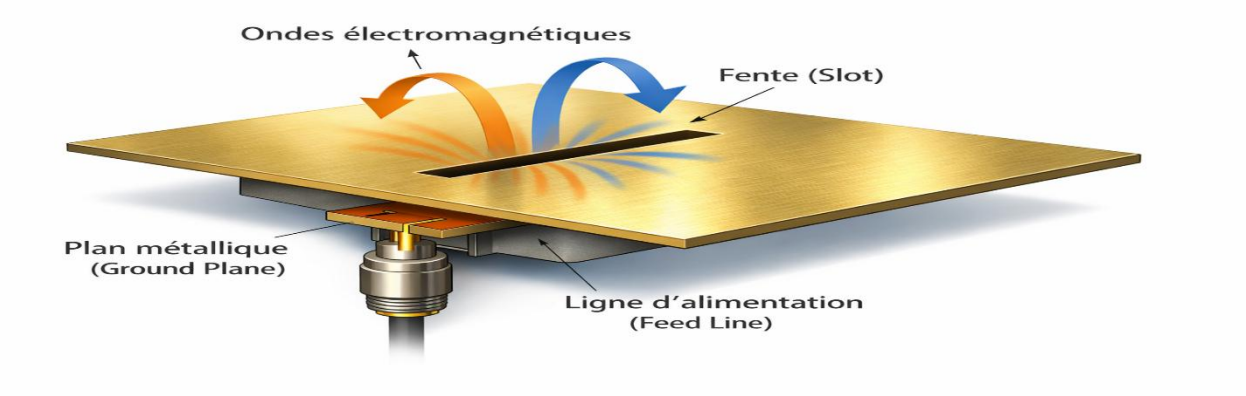


Figure II. 3: *Schéma illustrant le rayonnement d'une antenne à fente [15]*

II.3.1.c Substrat diélectrique :

Le substrat diélectrique est un matériau isolant placé entre le plan conducteur métallique et la ligne d'alimentation de l'antenne à fente. Il joue un rôle important dans le fonctionnement de l'antenne en influençant la propagation des champs électromagnétiques ainsi que les performances globales de rayonnement.

Ses principales caractéristiques sont :

• Hauteur (h) : L'épaisseur du substrat doit être choisie avec soin. Une hauteur trop faible peut réduire l'efficacité de rayonnement et la bande passante de l'antenne, tandis qu'une hauteur plus importante peut améliorer le couplage électromagnétique et élargir la bande passante.

• Permittivité relative (εr) : La permittivité du substrat influence directement la longueur d'onde guidée et la fréquence de résonance de l'antenne. Une valeur élevée de εr permet généralement de réduire les dimensions de l'antenne, tandis qu'une valeur plus faible favorise une meilleure efficacité de rayonnement et une bande passante plus large [8], [24].

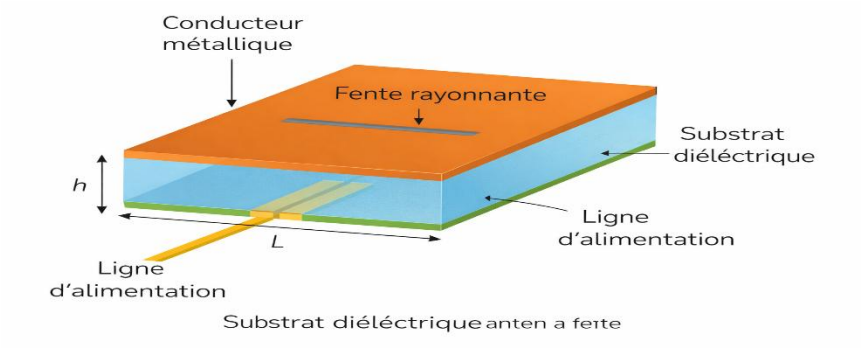


Figure II. 4: *Structure d'une antenne à fente [9]*

Grâce à leur structure simple et robuste, les antennes à fente sont largement utilisées dans les systèmes de communication micro-ondes. Elles offrent une bonne efficacité aux hautes fréquences et peuvent être facilement intégrées dans des structures métalliques ou des guides d'ondes. Elles sont notamment utilisées dans les systèmes radar, les communications satellitaires et les applications fonctionnant dans la bande Ku.

II.4 Principes théoriques des antennes à fente :

II.4.1 Principe de complémentarité (principe de Babinet) :

Le fonctionnement des antennes à fente peut être expliqué à l'aide du principe de Babinet appliqué à l'électromagnétisme. Selon ce principe, une fente pratiquée dans un plan conducteur infini présente un comportement électromagnétique complémentaire à celui d'un dipôle métallique. Dans cette configuration, les rôles du champ électrique et du champ magnétique sont inversés entre les deux structures.

Ainsi, une antenne à fente peut être considérée comme l'élément complémentaire d'un dipôle électrique. Cette propriété permet d'analyser son rayonnement, son impédance d'entrée ainsi que la distribution des champs électromagnétiques autour de l'ouverture [8], [25], [9].

II.4.2 Relation entre la longueur de la fente et la fréquence de résonance :

La fréquence de résonance d'une antenne à fente dépend principalement de sa longueur électrique. En première approximation, la résonance est obtenue lorsque la longueur de la fente est proche d'une demi-longueur d'onde guidée.

$$L \approx \frac{\lambda_g}{2} \qquad \textit{II. 1}$$

Où

L : représente la longueur de la fente

λg : la longueur d'onde guidée dans la structure.

La longueur d'onde guidée est donnée par :

$$\lambda_g = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\varepsilon_{eff}}} \qquad \textit{II. 2}$$

Avec :

$$\lambda_0 = \frac{c}{f_r} \qquad \textit{II. 3}$$

Où

fr : est la fréquence de résonance,

c : la vitesse de la lumière et

εeff : la permittivité effective du substrat

λg : longueur d'onde guidée dans la structure

$\lambda 0$: longueur d'onde dans l'espace libre

C : vitesse de la lumière 3×10^8m/s

On peut ainsi exprimer la fréquence de résonance approximative par :

$$f_r \approx \frac{c}{2L\sqrt{\varepsilon_{eff}}} \qquad \textit{II. 4}$$

Cette relation montre que l'augmentation de la longueur de la fente entraîne une diminution de la fréquence de résonance, tandis qu'une diminution de la longueur provoque un déplacement vers les hautes fréquences [2], [15], [24].

II.4.3 Influence de la largeur de la fente :

La largeur de la fente influence l'adaptation d'impédance, le niveau de couplage électromagnétique ainsi que la bande passante de l'antenne. Une largeur plus importante peut améliorer le couplage entre la ligne d'alimentation et la fente rayonnante, ce qui peut conduire à une amélioration de l'adaptation et à une augmentation de la bande passante.

Dans la plupart des conceptions, la largeur de la fente est choisie comme une fraction de la longueur d'onde guidée :

$$W = (0.05 \sim 0.1)\lambda_g \qquad \textit{II. 5}$$

Où :

W : largeur de la fente

λg : longueur d'onde guidée dans la structure

Cette relation permet de garantir un bon compromis entre l'adaptation d'impédance, la stabilité de la fréquence de résonance et l'efficacité du rayonnement. Cependant, une largeur excessive peut modifier la fréquence de résonance et perturber le diagramme de rayonnement de l'antenne [8], [9], [24].

II.4.4 Influence du substrat diélectrique :

Le substrat diélectrique joue un rôle important dans les performances d'une antenne à fente imprimée. Sa permittivité relative et son épaisseur influencent la propagation des champs électromagnétiques ainsi que la longueur d'onde guidée dans la structure.

Une permittivité relative élevée permet de réduire les dimensions de l'antenne pour une fréquence donnée, tandis qu'une permittivité plus faible favorise généralement une meilleure efficacité de rayonnement et une bande passante plus large. L'épaisseur du substrat peut également influencer les pertes et la stabilité du fonctionnement de l'antenne [2], [3], [24].

II.4.5 Coefficient de réflexion :

$$\Gamma = \frac{Z_{in} - Z_0}{Z_{in} + Z_0} \qquad \textit{II. 6}$$

Zin : impédance d'entrée

Z0 : impédance caractéristique ($\cong 50\Omega$)

II.4.6 Relation entre dimensions et performances de l'antenne :

Les dimensions géométriques de l'antenne à fente influencent directement ses performances électromagnétiques, notamment la fréquence de résonance, l'adaptation d'impédance, la bande passante et le diagramme de rayonnement.

L'adaptation de l'antenne est généralement évaluée à partir du coefficient de réflexion S11. Une antenne est considérée comme correctement adaptée lorsque : $S11 < -10dB$

Le rapport d'ondes stationnaires (VSWR) est relié au coefficient de réflexion par la relation suivante :

$$VSWR = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} \qquad \textit{II. 7}$$

Où

Γ : Représente le coefficient de réflexion à l'entrée de l'antenne.

La bande passante peut être exprimée par :

$$BW = fH - fL \qquad \textit{II. 8}$$

Ou en pourcentage :

$$BW\% = \frac{fH - fL}{fr} 100 \qquad \textit{II. 9}$$

Ces relations montrent que le dimensionnement géométrique constitue une étape essentielle pour obtenir de bonnes performances de l'antenne dans la bande Ku [2], [8], [9].

II.5 Types d'antennes à fente :

Les antennes à fente peuvent être réalisées sous différentes formes géométriques selon l'application et les performances souhaitées. La forme de la fente influence directement plusieurs paramètres de l'antenne, tels que la bande passante, la polarisation, le gain et le diagramme de rayonnement. Parmi les configurations les plus courantes, on distingue notamment la fente rectangulaire, la fente circulaire et la fente annulaire [8], [9].

Plusieurs études ont montré que la géométrie de la fente influence directement les performances de rayonnement et la bande passante de l'antenne [25], [19].

Type de fente	Description	Avantages	Applications
Fente rectangulaire	Géométrie simple et la plus utilisée	Conception facile, bon rendement	Antennes microstrip
Fente circulaire	Forme circulaire	Bonne stabilité de polarisation	Systèmes de communication RF
Fente annulaire	Structure en forme d'anneau	Large bande passante	Applications large bande

Tableau II. 1: *Tableau des types de fentes d'antenne [29], [26], [19]*

II.5.1 Antenne à fente rectangulaire

L'antenne à fente rectangulaire est l'une des structures les plus simples et les plus utilisées. Elle consiste en une ouverture rectangulaire réalisée dans un plan conducteur métallique. Les dimensions de la fente sont généralement liées à la longueur d'onde de la fréquence de fonctionnement.

Ce type d'antenne présente plusieurs avantages, notamment une structure simple, une fabrication facile et une bonne adaptation aux fréquences micro-ondes. Les antennes à fente rectangulaire sont largement utilisées dans les systèmes radar et les communications satellitaires [8], [9].



Figure II. 5: *Antenne à fente rectangulaire [8]*

II.5.2 Antenne à fente circulaire

L'antenne à fente circulaire est caractérisée par une ouverture circulaire pratiquée dans le plan métallique. Cette configuration permet d'obtenir certaines propriétés intéressantes, notamment une meilleure symétrie du rayonnement et, dans certains cas, une polarisation circulaire.

Les antennes à fente circulaire sont souvent utilisées dans les applications nécessitant une distribution uniforme du champ électromagnétique et une directivité adaptée aux systèmes de communication modernes [8].



Figure II. 6: *Antenne à fente circulaire [8]*

II.5.3 Antenne à fente annulaire

L'antenne à fente annulaire est constituée d'une ouverture en forme d'anneau réalisée dans une surface conductrice. Cette structure offre une grande flexibilité de conception et peut permettre d'obtenir une bande passante plus large selon les dimensions choisies.

Les antennes à fente annulaire sont particulièrement adaptées aux applications micro-ondes et peuvent être utilisées dans les systèmes radar, les communications satellitaires et certaines applications de détection [9].

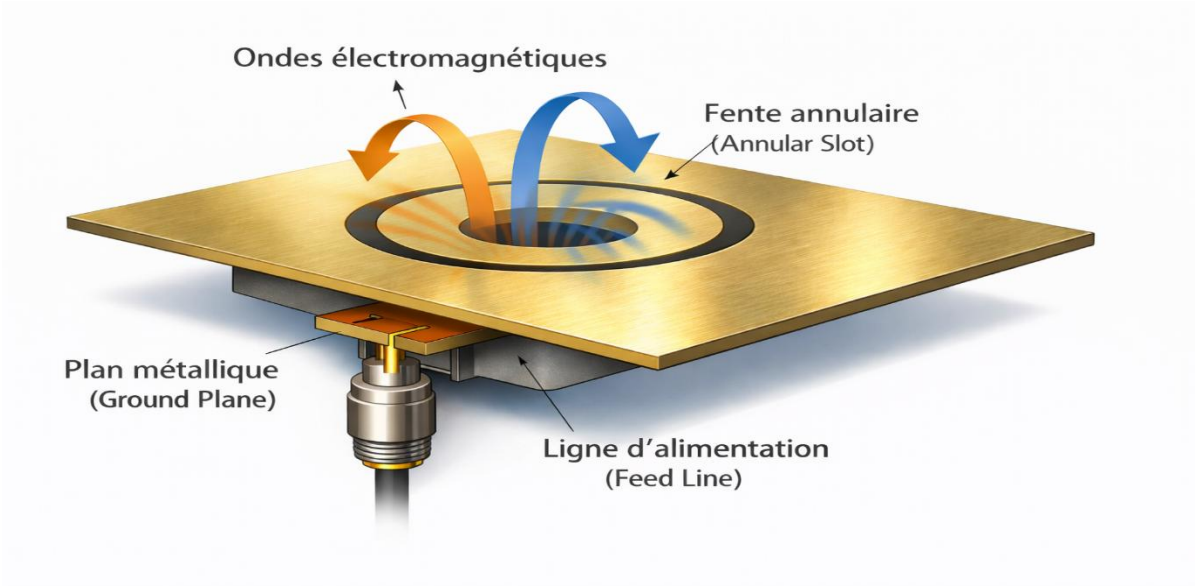


Figure II. 7: : Antenne à fente annulaire [9]

La bande Ku correspond à la gamme de fréquences comprise entre 12 GHz et 18 GHz. Cette bande est largement utilisée dans les communications satellitaires, les systèmes radar et les liaisons micro-ondes en raison de sa capacité à transmettre des données à haut débit et de permettre l'utilisation d'antennes de dimensions relativement réduites [8], [9].

II.6 Paramètres de performance des antennes à fente :

Les paramètres électromagnétiques jouent un rôle essentiel dans l'évaluation des performances des antennes modernes [27].

L'évaluation des performances d'une antenne à fente repose sur plusieurs paramètres fondamentaux qui permettent d'analyser son comportement électromagnétique. Ces paramètres sont utilisés pour caractériser l'efficacité de l'antenne, son adaptation à la ligne de transmission et sa capacité à rayonner l'énergie dans une direction donnée. Parmi les paramètres les plus importants figurent le coefficient de réflexion (S11), le rapport d'ondes stationnaires (VSWR), le gain, le diagramme de rayonnement, la bande passante et la polarisation [8], [15].

II.6.1 Coefficient de réflexion (S11)

Le coefficient de réflexion S11 représente la fraction de la puissance incidente qui est réfléchie à l'entrée de l'antenne en raison d'une mauvaise adaptation d'impédance entre l'antenne et la ligne de transmission.

Une bonne adaptation est généralement obtenue lorsque : $S11 < -10dB$

Dans cette condition, plus de 90 % de la puissance incidente est effectivement transmise vers l'antenne, ce qui garantit un fonctionnement efficace du système de communication [8].

II.6.2 VSWR (Voltage Standing Wave Ratio) :

Le VSWR est un paramètre qui mesure le niveau des ondes stationnaires présentes sur la ligne de transmission. Il est directement lié au coefficient de réflexion et permet d'évaluer la qualité de l'adaptation entre l'antenne et la ligne d'alimentation.

Un VSWR égal à 1 indique une adaptation parfaite, ce qui signifie qu'aucune puissance n'est réfléchie vers la source. En pratique, un VSWR inférieur à 2 est généralement considéré comme acceptable pour assurer un bon fonctionnement de l'antenne [8], [15].

II.6.3 Gain

Le gain d'une antenne représente sa capacité à concentrer l'énergie rayonnée dans une direction donnée par rapport à une antenne isotrope idéale. Il est généralement exprimé en dBi.

$$G = \eta \times D \qquad \textit{II. 10}$$

G : gain

η : efficacité

D : directivité

Un gain élevé permet d'améliorer la portée du système de communication et la qualité du signal transmis ou reçu. Dans les applications micro-ondes et satellitaires, le gain constitue un paramètre essentiel pour garantir une transmission efficace des informations [9].

II.6.4 Diagramme de rayonnement

Le diagramme de rayonnement décrit la distribution spatiale de l'énergie électromagnétique rayonnée par l'antenne dans différentes directions. Il permet d'identifier les directions dans lesquelles l'antenne rayonne le plus efficacement.

Ce diagramme est généralement représenté sous forme de courbes polaires et comprend un lobe principal, correspondant à la direction de rayonnement maximale, ainsi que des lobes secondaires qui représentent des niveaux de rayonnement plus faibles [8], [26].

II.6.5 Bande passante

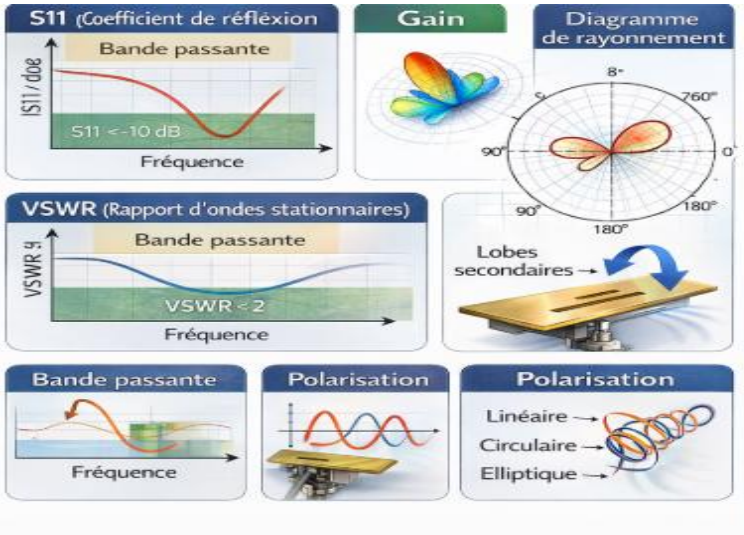
La bande passante d'une antenne correspond à l'intervalle de fréquences dans lequel l'antenne fonctionne correctement tout en respectant certains critères de performance, notamment un coefficient de réflexion inférieur à -10 dB.

Une bande passante plus large permet à l'antenne de fonctionner efficacement sur une plage de fréquences plus étendue, ce qui est particulièrement important dans les systèmes de communication modernes [15].

II.6.6 Polarisation

La polarisation d'une antenne décrite l'orientation du champ électrique de l'onde électromagnétique rayonnée. Selon la configuration de l'antenne, la polarisation peut être linéaire, circulaire ou elliptique.

Le choix du type de polarisation dépend des exigences de l'application, notamment dans les systèmes de communication satellitaire et radar où la compatibilité de polarisation entre l'émetteur et le récepteur est essentielle [8].



Paramètre	Description
S11 (Coefficient de réflexion)	Taux de reflexion de puissance à l'entrée de l'antenne (S11 < −10 dB recommande)
VSWR (Rapport d'odes stationnaires)	Mesure du niveau d'adaptation d'impédance de l'antenne (VSWR < 2 recommande)
Gain	Capacité de l'antenne à concentrer l'énergie dans une direction donnée, exprimè en dBi
Diagramme de rayonnement	Distribution spatiale de l'énergie rayonnée, visualisée sous forme de diagramme polaire
Bande passante	Gamme de fréquences sur laquel l'antenne fonctionne fficemrent, définié par là largeur du signal réfléchi
Polarisation	Orientation du champ electrice de l'onde emise (linéaire, circulaire, elliptique)

Figure II. 8: *Paramètres de performance des antennes à fente [8]*

II.7Applications des antennes à fente en bande Ku :

Les antennes à fente sont largement utilisées dans les systèmes fonctionnant aux fréquences micro-ondes en raison de leur robustesse mécanique et de leur capacité à supporter des puissances élevées. Dans la bande Ku, qui s'étend généralement de 12 à 18 GHz, ces antennes présentent des performances intéressantes pour différentes applications de télécommunications et de détection [8], [9].

Parmi les principales applications des antennes à fente en bande Ku, on peut citer :

II.7.1Les communications satellitaires

La bande Ku est très utilisée dans les systèmes de télévision par satellite et les communications de données à haut débit. Les antennes à fente permettent d'obtenir une bonne directivité et une transmission efficace des signaux entre les stations terrestres et les satellites [9], [12].



Figure II. 9 : *Illustration des communications satellitaires [9]*

II.7.2Les systèmes radar

Dans les applications radar, les antennes à fente sont utilisées pour la détection et la localisation d'objets grâce à leur capacité à fonctionner à des fréquences élevées tout en offrant une bonne précision [8], [30].

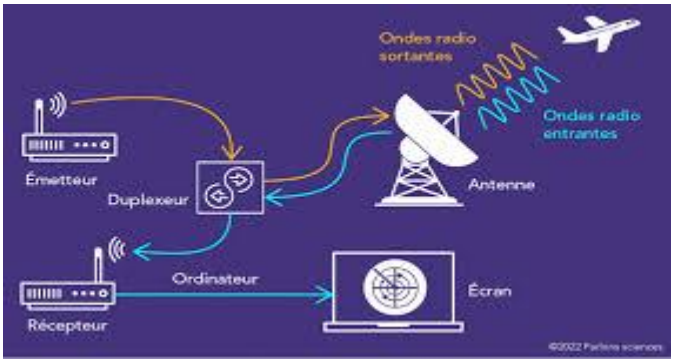


Figure II. 10 : *Illustration les systèmes radar [30]*

II.7.3 Les liaisons micro-ondes

Les systèmes de transmission point à point utilisent souvent des antennes fonctionnant en bande Ku afin d'assurer une communication stable sur de longues distances avec un débit élevé [15], [9].

Grâce à ces caractéristiques, les antennes à fente représentent une solution efficace pour les systèmes modernes de communication et de détection opérant dans les bandes de fréquences micro-ondes.



Figure II. 11: Liaisons micro-ondes point à point [15]

II.8 avantages et limitations des antennes à fente :

Les antennes à fente présentent plusieurs avantages qui les rendent particulièrement adaptées aux applications micro-ondes. Toutefois, elles possèdent également certaines limitations qui doivent être prises en compte lors de la conception.

II.8.1 Avantages

- Robustesse mécanique :

Les antennes à fente sont généralement réalisées dans des structures métalliques solides, ce qui leur confère une grande résistance mécanique.

- Fonctionnement efficace aux fréquences micro-ondes :

Ces antennes sont particulièrement adaptées aux fréquences élevées, notamment dans les bandes micro-ondes telles que la bande Ku.

II.8.2 Inconvénients

- Bande passante limitée :

Certaines configurations d'antennes à fente présentent une bande passante relativement étroite.

- Optimisation nécessaire :

L'obtention de performances optimales nécessite souvent une optimisation précise des dimensions et de la géométrie de la fente.

II.9 Conclusion

Dans ce chapitre, une étude théorique des antennes à fente a été présentée. Les principes de fonctionnement, la structure générale ainsi que les principaux paramètres de performance ont été analysés afin de mieux comprendre les caractéristiques de ce type d'antenne.

Les différentes applications des antennes à fente dans la bande Ku ont également été abordées, mettant en évidence leur importance dans les systèmes modernes de communication et de détection.

Les relations théoriques présentées dans ce chapitre permettent d'établir les dimensions initiales de l'antenne à fente et de mieux comprendre l'influence des paramètres géométriques sur ses performances électromagnétiques.

Dans le chapitre suivant, une attention particulière sera portée à la conception et à la simulation d'une antenne à fente bi-bande à l'aide d'outils de simulation électromagnétique tels que CST ou MATLAB, afin d'évaluer et d'analyser les performances de la structure proposée dans la bande Ku.

Chapitre III

Simulation d'une antenne à fente en bande Ku

III.1 Introduction

Le présent chapitre est dédié à la conception et à la simulation d'une antenne à fente bi-bande opérant dans la bande Ku. L'objectif principal consiste à dimensionner l'antenne à partir des relations théoriques, puis à valider ses performances à l'aide du logiciel CST Microwave Studio [17].

Dans un premier temps, les paramètres fondamentaux de l'antenne sont déterminés, notamment les fréquences de résonance, les longueurs d'onde dans l'air et dans le substrat, ainsi que les dimensions géométriques de la fente. Ces calculs permettent d'obtenir une première estimation du comportement de l'antenne.

Dans un second temps, la structure de l'antenne est modélisée et simulée sous CST afin d'analyser ses performances électromagnétiques, notamment le coefficient de réflexion (S11), le VSWR, le gain et la directivité.

Enfin, une analyse des résultats obtenus est effectuée afin d'évaluer les performances globales de l'antenne et de vérifier sa conformité aux exigences de la bande Ku [10].

III.2 Généralités sur le logiciel CST Microwave Studio

III.2.1 Présentation du logiciel CST Microwave Studio

CST Microwave Studio est un logiciel de simulation électromagnétique largement utilisé dans le domaine des micro-ondes et de la conception d'antennes. Il permet de modéliser, d'analyser et d'optimiser divers dispositifs électromagnétiques en s'appuyant sur des techniques numériques avancées, notamment la méthode des éléments finis (FEM) et la méthode des différences finies dans le domaine temporel (FDTD) [17], [31].

Ce logiciel est particulièrement adapté à l'étude des antennes, puisqu'il offre la possibilité d'évaluer leur comportement sur différentes bandes de fréquence, en particulier la bande Ku. Il permet également d'extraire des paramètres essentiels tels que les paramètres de diffusion (S-paramètres), les champs électromagnétiques ainsi que les caractéristiques de rayonnement [17], [16].

Grâce à sa flexibilité et à sa précision, CST Microwave Studio constitue un outil de référence dans la conception et l'analyse des systèmes électromagnétiques modernes

III.2.2 Méthodes de simulation utilisées

CST Microwave Studio repose sur plusieurs méthodes numériques permettant de résoudre les équations de Maxwell avec une grande précision. Parmi les principales méthodes utilisées, on peut citer

- la méthode des différences finies dans le domaine temporel (FDTD), adaptée à l'analyse large bande [31],
- la méthode des éléments finis (FEM), particulièrement efficace pour les structures complexes [32],
- La méthode des équations intégrales (Intégral Équation), utilisée pour certaines configurations spécifiques [33].

III.2.3 Présentation de l'environnement CST Studio Suite

L'environnement CST Studio Suite se caractérise par une interface graphique intuitive facilitant la conception et la simulation des structures électromagnétiques. Il regroupe plusieurs outils permettant de gérer efficacement les différentes étapes du processus de simulation.

- L'interface principale est composée de plusieurs éléments essentiels :
- la zone de modélisation (3D Works pace) : utilisée pour créer et visualiser la structure de l'antenne en trois dimensions,
- L'arborescence du projet (Navigation Tree) : permettant d'organiser les composants du modèle,
- la barre d'outils (Toolbar) : offrant un accès rapide aux fonctions principales,
- le panneau des propriétés (Properties Windows) : utilisé pour modifier les paramètres des objets,
- Le gestionnaire de résultats (Results) : permettant d'afficher et d'analyser les résultats obtenus [16].

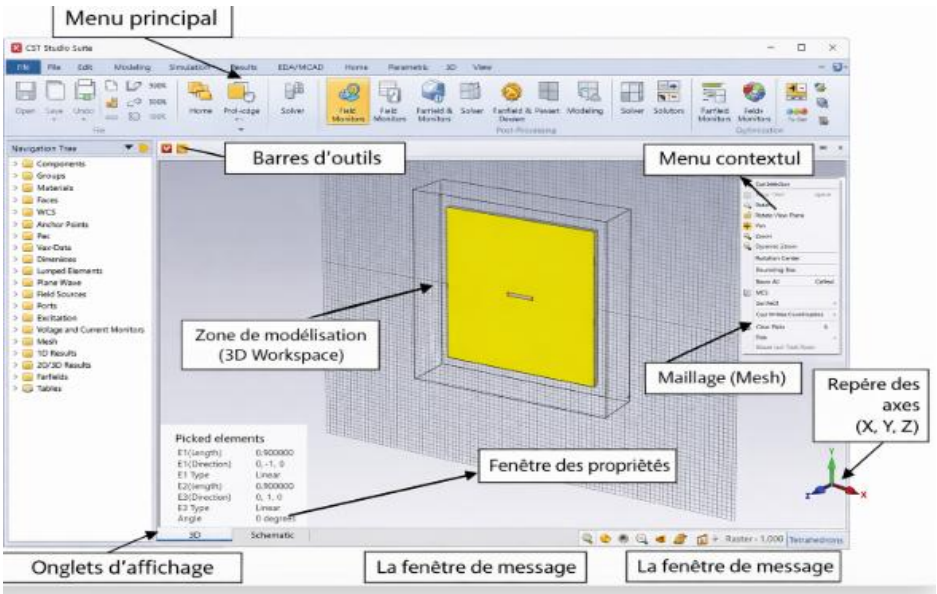


Figure III. 1: *Interface générale du logiciel CST Studio Suite [16]*

Le logiciel permet également de définir les matériaux, les conditions aux limites, les ports d'excitation ainsi que la plage de fréquence. Ces fonctionnalités facilitent la mise en place d'un modèle complet et réaliste de l'antenne étudiée.

Grâce à cet environnement intégré, CST Studio Suite constitue un outil puissant pour la conception, la simulation et l'optimisation des antennes dans différentes applications micro-ondes [13].

III.3 Dimensionnement et calcul de l'antenne

Dans cette partie, nous présentons le dimensionnement initial de l'antenne à fente bi-bande proposée.

Étant donné que l'antenne doit fonctionner dans deux bandes de fréquences situées dans la bande Ku, deux fréquences de résonance ont été considérées afin d'assurer un comportement bi-bande.

III.3.1 Choix des fréquences de résonance

Afin de couvrir efficacement la bande Ku (12–18 GHz), deux fréquences de résonance ont été sélectionnées autour de la fréquence centrale :

fr1=11,6 GHz ; fr2=15,7 GHz

Ce choix permet d'obtenir deux bandes de fonctionnement distinctes tout en restant dans la plage de fréquence visée.

III.3.2 Calcul de la longueur d'onde dans l'air

La longueur d'onde dans l'espace libre est donnée par la relation suivante

$$\lambda 0 = \frac{c}{fr}$$

Où :

c= 3×10 ^ 8 m/s : vitesse de la lumière

fr : fréquence de résonance

Pour : fr1**=11,6 GHz**

$$\lambda 01 = \frac{3 \times 10^8}{11{,}6 \times 10^9} = 25.9mm$$

Pour : **fr2=15,7 GHz**

$$\lambda 02 = \frac{3 \times 10^8}{15{,}7 \times 10^9} = 19.1mm$$

III.3.3 Calcul de la longueur d'onde guidée

Dans une structure imprimée, la propagation des ondes dépend du substrat diélectrique. Ainsi, la longueur d'onde guidée est donnée par :

$$\lambda g = \frac{\lambda 0}{\sqrt{\varepsilon eff}}$$

Dans ce travail, la permittivité effective est approximée à $\varepsilon eff \approx 2{,}2$

Pour **fr1** :

$$\lambda g = \frac{25.9}{\sqrt{2{,}2}} \approx 17.5mm$$

Pour **fr2** :

$$\lambda g = \frac{19.1}{\sqrt{2{,}2}} \approx 12.9mm$$

III.3.4 Calcul des dimensions de la fente

En première approximation, la longueur de la fente est liée à la demi-longueur d'onde guidée

$$L = \frac{\lambda g}{2}$$

Longueur de la fente :

$$L1 = \frac{17{,}5}{2} \approx 8.75mm$$

$$L2 = \frac{12.9}{2} \approx 6.45mm$$

III.3.5 Calcul de la largeur optimale de la fente

La largeur de la fente est généralement choisie comme une fraction de la longueur d'onde guidée afin d'assurer un bon compromis entre adaptation et bande passante :

$$W \approx (0.05 \text{ à } 0.1)\lambda g$$

Pour **fr1 :**

$$W1min = 0{,}05 \times 17{,}5 \approx 0.875mm$$

$$W2max = 0{,}1 \times 17{,}5 \approx 1.75mm$$

Et **fr2 :**

$$W2min = 0{,}05 \times 12{,}9 \approx 0{,}645mm$$

$$W2max \approx 0{,}1 \times 12.9 \approx 1{,}29mm$$

III.3.6 Interprétation des résultats

Les dimensions obtenues à partir des calculs théoriques constituent une première approximation du comportement de l'antenne à fente bi-bande.

Il apparaît clairement que la longueur de la fente dépend inversement de la fréquence de résonance, ce qui conduit à des dimensions plus réduites pour les fréquences élevées, conformément aux principes des antennes micro-ondes [1], [4].

En ce qui concerne la largeur de la fente, elle joue un rôle déterminant dans l'adaptation d'impédance ainsi que dans l'élargissement de la bande passante. Un choix approprié de ce paramètre permet d'assurer un compromis optimal entre les performances de rayonnement et la stabilité du fonctionnement [6], [7].

De plus, l'introduction de deux fréquences de résonance distinctes permet d'obtenir un comportement bi-bande, répondant aux exigences des systèmes de communication opérant dans la bande Ku [10], [11].

Ainsi, ces résultats théoriques servent de base pour la phase de modélisation et d'optimisation sous le logiciel CST Microwave Studio, où les paramètres seront ajustés afin d'améliorer les performances globales de l'antenne [16].

III.4 Résultats de simulation et analyse des performances

III.4.1 Structure de l'antenne

La structure de l'antenne proposée a été conçue et simulée à l'aide du logiciel CST Microwave Studio [16].

Comme illustré dans les Fig. III.2 et III.3, l'antenne proposée repose sur une architecture multicouche formée de deux substrats diélectriques superposés, associés à un plan de masse (GND) ainsi qu'à deux éléments métalliques rayonnants (supérieur et inférieur) responsables du rayonnement électromagnétique. L'alimentation de l'antenne est assurée par une ligne micro-ruban (feed line), connectée à l'élément rayonnant inférieur selon une technique d'inset feed, garantissant une adaptation d'impédance satisfaisante [14].

Dans le but d'optimiser les performances globales, une couche intermédiaire en mousse (foam) est insérée entre les deux substrats. Cette configuration favorise notamment l'élargissement de la bande passante ainsi qu'une amélioration du gain de l'antenne [34], [18].

Par ailleurs, l'intégration d'une cavité entourant la structure rayonnante permet de mieux confiner le champ électromagnétique, ce qui contribue à renforcer la directivité [13].

L'arborescence du projet sous CST, illustrée à la Fig. III.2, met en évidence les différents éléments constituant l'antenne. Parmi ces composants, nous trouvons notamment : Upper_Patch, Lower_Patch, Substrate_upper, Substrate_lower, Feed Line, Foam et Cavity_outer. Cette organisation facilite la manipulation et l'optimisation des paramètres du modèle.

Enfin, les dimensions géométriques de l'antenne, présentées à la Fig. III.3, ont été ajustées de manière à assurer un fonctionnement bi-bande dans la bande Ku.

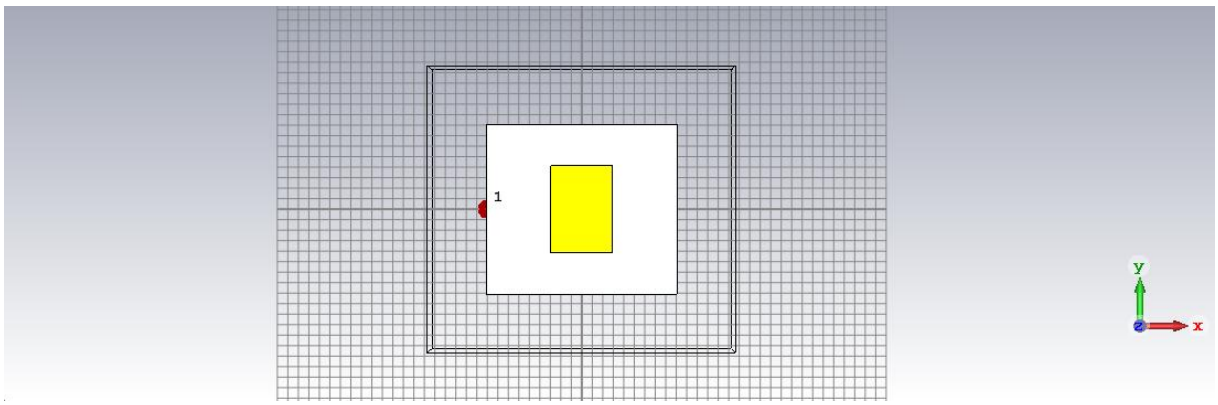


Figure III. 2: *Vue supérieure de l'antenne proposée sous CST [16]*

STRUCTURE DE L'ANTENNE ET COMPOSANTS

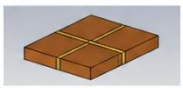
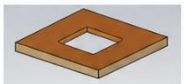
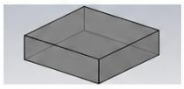
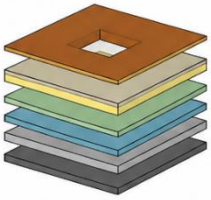
Composant (CST)	Arbre CST (Description)	Liste des briques (Bricks)
1. Feed Line 	component1:Feed Line Define brick Add shape: component1:Line_Hpol	Feed Line
2. Lower_Patch 	component1:Lower_Patch Define brick Subtract shape: component1:Inset_cut Define brick	Lower_Patch
3. Cavity_outer 	component1:Cavity_outer Define brick Subtract shape: component1:Cavity_inner Define brick	Cavity_outer
4. Liste complète des briques 	Cavity_outer : Cavité extérieure Feed Line : Ligne d'alimentation Foam : Mousse diélectrique GND : Plan de masse Lower_Patch : Patch inférieur Substrate_lower : Substrat inférieur Substrate_upper : Substrat supérieur Upper_Patch : Patch supérieur	

Figure III. 3: *Architecture multicouche et composants de l'antenne proposée sous CST Microwave Studio*

III.4.1.a Intégration du filtrage intégral en métal

Afin d'améliorer les performances électromagnétiques de l'antenne proposée, une structure métallique intégrée a été adoptée dans la conception. Cette approche repose sur l'utilisation d'une cavité conductrice et de surfaces métalliques entourant l'élément rayonnant, permettant de contrôler la propagation des champs électromagnétiques dans la structure.

Le filtrage intégral en métal contribue à limiter les rayonnements parasites hors bande et à améliorer la sélectivité fréquentielle de l'antenne dans la bande Ku. De plus, cette configuration favorise un meilleur confinement du champ électromagnétique à l'intérieur de la cavité, ce qui permet de réduire certaines pertes et d'améliorer la directivité du rayonnement.

L'intégration de cette structure métallique dans l'antenne permet également d'obtenir une meilleure stabilité des paramètres électromagnétiques, notamment le coefficient de réflexion (S11) et le VSWR, autour des fréquences de résonance étudiées.

Cette technique est particulièrement intéressante dans les applications micro-ondes et satellitaires, où les structures métalliques offrent une robustesse mécanique élevée ainsi qu'une bonne efficacité électromagnétique.

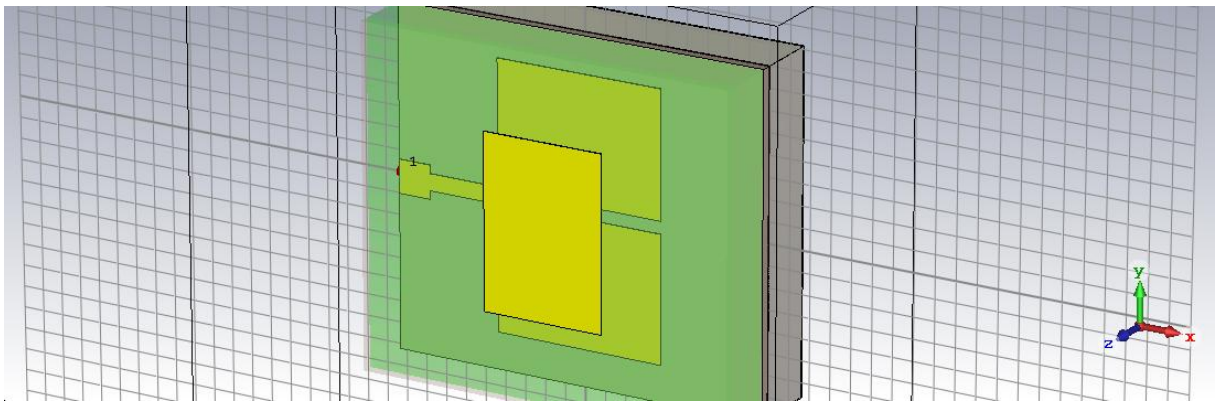


Figure III. 4: *Structure multicouche avec cavité métallique intégrée assurant le filtrage électromagnétique de l'antenne sous CST.*

III.4.2 Paramètres de simulation

Les paramètres géométriques de l'antenne ont été initialement déterminés à partir des formules analytiques présentées précédemment, puis affinés à l'aide du logiciel CST Microwave Studio afin d'optimiser les performances globales [16].

La Fig. III.4 présente l'ensemble des paramètres utilisés dans la modélisation, incluant notamment les dimensions des patchs, les caractéristiques des substrats ainsi que celles de la ligne d'alimentation.

Ces paramètres influencent directement les performances de l'antenne, en particulier la fréquence de résonance, l'adaptation d'impédance et les propriétés de rayonnement. Leur optimisation permet ainsi d'assurer un fonctionnement efficace de l'antenne dans la bande de fréquences ciblée.

Name	Expression	Value
t_cu	= 0.035	0.035
h_sub	= 0.508	0.508
W_inset	= 0.59	0.59
W_line	= 1.57	1.57
L_inset	= 2.5	2.5
h_foam	= 2.55	2.55
L_line	= 5.5	5.5
L2	= 5.78	5.78
H_cav	= 6	6
L1	= 8.08	8.08
W2	= 8.2	8.2
W1	= 12.55	12.55
W_cav	= 16	16
L_cav	= 18	18

Figure III. 5Paramètres géométriques de l'antenne utilisés pour la simulation sous CST [16].

Ces valeurs résultent d'un compromis entre miniaturisation et performances électromagnétiques

III.4.3 Coefficient de réflexion (S11)

Le coefficient de réflexion S11 représente la proportion de puissance réfléchie au niveau du port d'alimentation de l'antenne. Ce paramètre constitue un indicateur clé de la qualité d'adaptation d'impédance entre l'antenne et la ligne de transmission.

La Fig. III.5 illustre l'évolution de S11 en fonction de la fréquence. On distingue clairement deux creux prononcés correspondant aux fréquences de résonance de l'antenne :

$$f1 = 11.64GHz \qquad avec \qquad S11 \approx -33dB$$

$$f1 = 15.7GHz \qquad avec \qquad S11 \approx -30dB$$

Ces niveaux, nettement inférieurs à −10 dB, traduisent une très bonne adaptation d'impédance dans les deux bandes de fonctionnement. Ainsi, l'antenne présente un comportement bi-bande stable dans la bande Ku, ce qui confirme son adéquation pour les applications micro-ondes visées [13], [14].

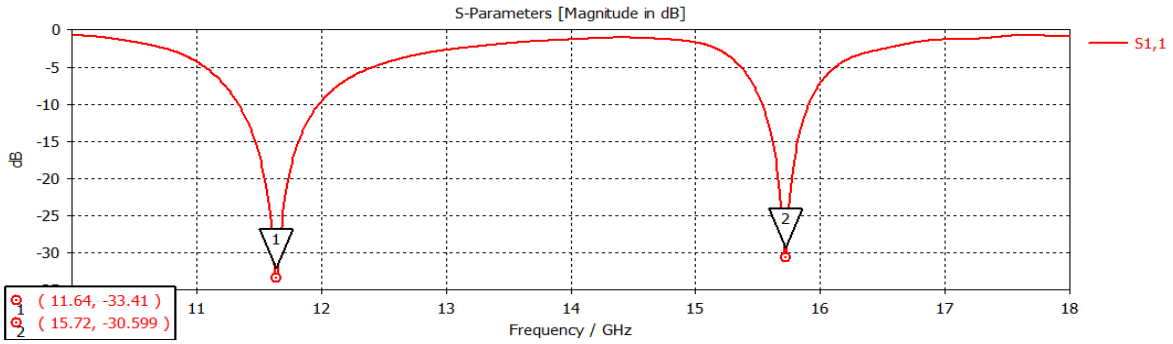


Figure III. 6: *Coefficient de réflexion S11 de l'antenne en fonction de la fréquence sous CST [16].*

III.4.4 VSWR

Le rapport d'ondes stationnaires (VSWR) est un paramètre complémentaire au coefficient de réflexion, permettant d'évaluer l'efficacité du transfert de puissance entre la ligne d'alimentation et l'antenne.

La Fig. III.7 présente la variation du VSWR en fonction de la fréquence. Les valeurs minimales sont observées aux fréquences de résonance :

$$VSWR = 1.04 \qquad pour \qquad f1 \approx 11.64GHz$$

$$VSWR = 1.06 \qquad pour \qquad f2 \approx 15.7GHz$$

Ces résultats, très proches de l'unité et largement inférieurs au seuil critique de 2, indiquent une excellente adaptation d'impédance et des pertes par réflexion négligeables.

Les observations obtenues à partir du VSWR confirment parfaitement celles déduites du paramètre S11, validant ainsi le fonctionnement bi-bande de l'antenne proposée dans la bande Ku [13], [14].

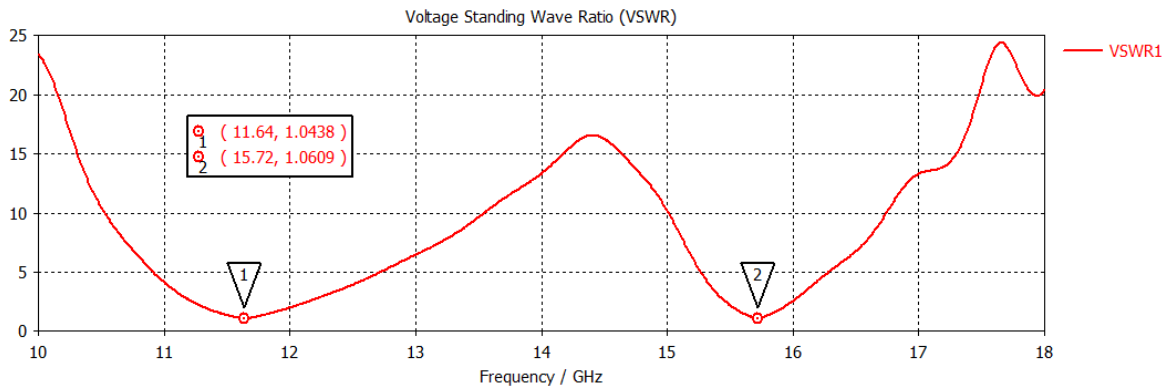


Figure III. 7: *Variation du VSWR en fonction de la fréquence sous CST [16].*

III.4.5 Gain et diagramme de rayonnement

Le gain et la directivité constituent des paramètres essentiels pour caractériser les performances de rayonnement d'une antenne.

La Fig. III.7 et la Fig. III.8 présentent les diagrammes de rayonnement tridimensionnels obtenus sous CST aux deux fréquences de résonance.

À la fréquence f1≈11.64GHz, l'antenne présente un rayonnement quasi-directionnel avec une directivité d'environ 5.3 dBi, indiquant une concentration modérée de l'énergie dans une direction privilégiée.

À la fréquence f2≈15.7GHz, une amélioration notable est observée, avec une directivité atteignant environ 9.5 dBi, traduisant une meilleure focalisation du rayonnement.

Cette évolution s'explique par la distribution du courant sur les patchs ainsi que par l'effet de la cavité, qui contribue à confiner le champ électromagnétique et à réduire les pertes.

Par ailleurs, la proximité entre les valeurs du gain et de la directivité indique un bon rendement de l'antenne, ce qui signifie que les pertes internes restent relativement faibles [13], [34].

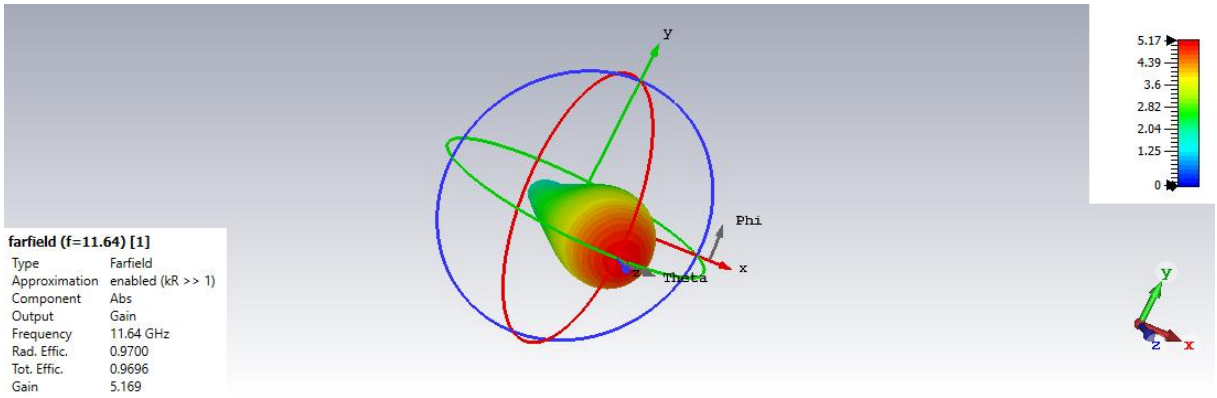


Figure III. 8: *Diagramme de rayonnement 3D de l'antenne à f1 ≈ 11.64 GHz sous CST [16].*

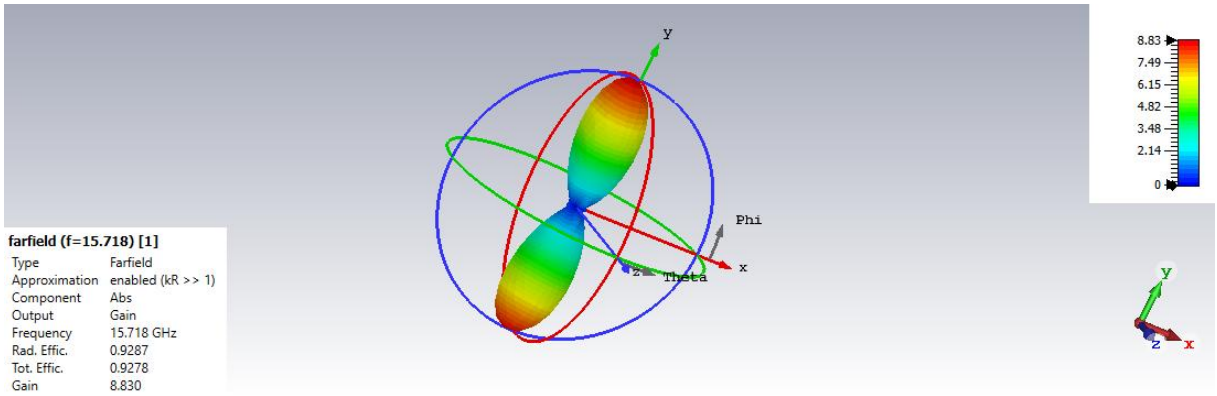


Figure III. 9: *Diagramme de rayonnement 3D de l'antenne à f2 ≈ 15.7 GHz sous CST [16].*

Ces performances rendent l'antenne proposée adaptée aux applications de communication en bande Ku nécessitant à la fois un gain élevé et une bonne directivité.

III.4.6 Directivité

La directivité de l'antenne caractérise sa capacité à concentrer le rayonnement électromagnétique dans une direction privilégiée.

D'après les résultats de simulation obtenus à l'aide du logiciel CST Microwave Studio, l'antenne proposée présente une directivité d'environ 5.33 dBi à la fréquence f1≈11.64 GHz, et atteint environ 9.51 dBi à la fréquence f2≈15.7 GHz.

Les diagrammes de rayonnement correspondants montrent que, à la première fréquence, le rayonnement est relativement large avec un lobe principal peu concentré, traduisant une directivité modérée. En revanche, à la seconde fréquence, le diagramme présente un lobe principal plus étroit et plus intense, indiquant une meilleure focalisation de l'énergie rayonnée.

Cette augmentation de la directivité à haute fréquence s'explique par une meilleure distribution du courant sur les patchs rayonnants ainsi qu'un confinement plus efficace du champ électromagnétique dans la structure, notamment grâce à la présence de la cavité.

Par ailleurs, la proximité entre les valeurs du gain et de la directivité observées précédemment confirme que l'antenne présente un bon rendement, avec des pertes relativement faibles.

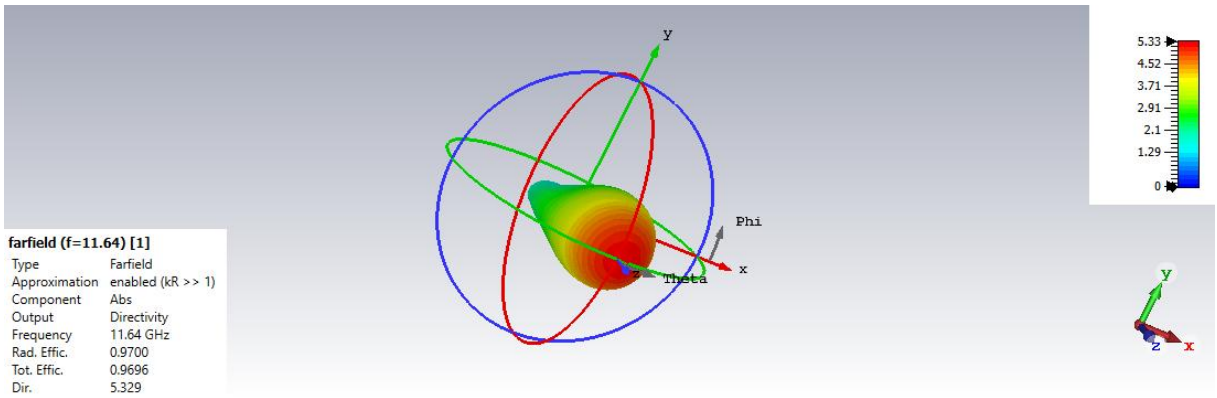


Figure III. 10: *Diagramme de directivité 3D de l'antenne à f1 ≈ 11.64 GHz sous CST [16].*

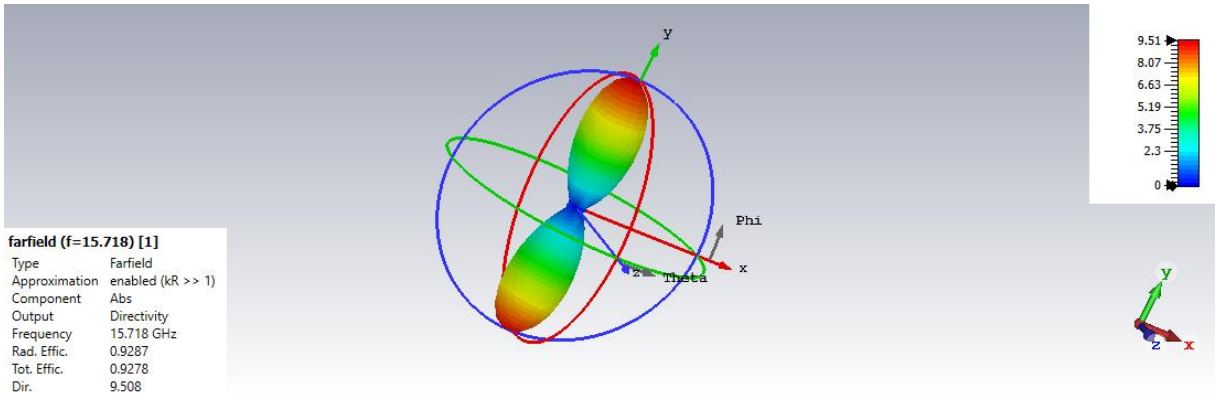


Figure III. 11: *Diagramme de directivité 3D de l'antenne à f2 ≈ 15.7 GHz sous CST [16].*

III.4.7 Impédance d'entrée

L'impédance d'entrée est un paramètre fondamental permettant d'évaluer l'adaptation entre l'antenne et la ligne d'alimentation.

Dans cette étude, l'antenne est conçue pour une impédance caractéristique de 50 Ω. Les résultats obtenus montrent que l'impédance d'entrée aux fréquences de résonance est proche de cette valeur, ce qui garantit une bonne adaptation.

Cette adéquation se traduit également par les faibles valeurs du coefficient de réflexion (S11) et du VSWR, confirmant un transfert efficace de la puissance et des pertes minimales par réflexion.

Ainsi, l'antenne présente une adaptation d'impédance satisfaisante dans les deux bandes de fonctionnement [14].

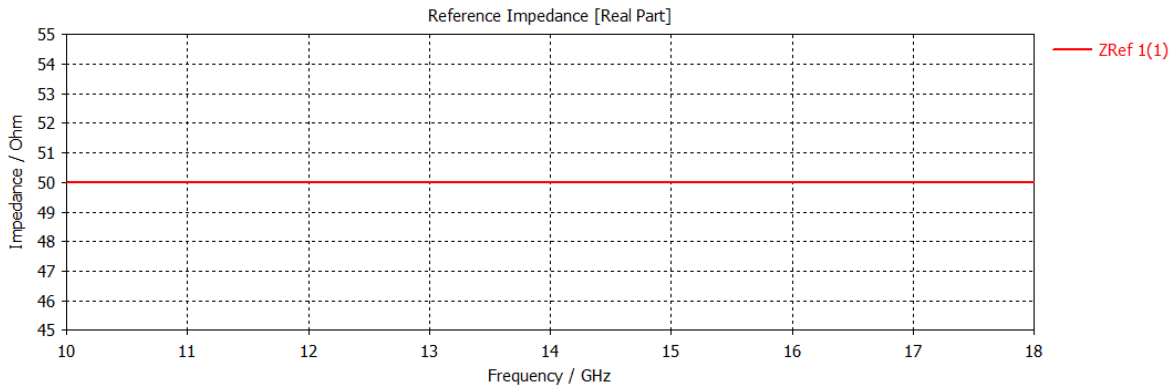


Figure III. 12: *Impédance de référence (50 Ω) utilisée pour l'adaptation de l'antenne.*

III.4.8 Adaptation d'impédance

L'adaptation d'impédance de l'antenne est principalement évaluée à partir des paramètres de réflexion S11 et du rapport d'ondes stationnaires (VSWR), comme illustré dans les Fig. III.5 et Fig. III.6.

Les résultats obtenus montrent que le coefficient de réflexion S11 est inférieur à -10 dB aux fréquences de résonance, tandis que le VSWR reste inférieur à 2, indiquant une bonne adaptation sur les bandes de fonctionnement.

Cette adaptation assure un transfert efficace de la puissance entre la ligne d'alimentation et l'antenne, tout en minimisant les pertes par réflexion. Elle confirme également la pertinence de la technique d'alimentation par inset feed utilisée dans cette conception.

III.4.9 Comparaison des performances avec les travaux existants

Afin d'évaluer les performances de l'antenne proposée, une comparaison avec plusieurs travaux existants dans le domaine des antennes à fente fonctionnant dans la bande Ku est présentée dans le tableau suivant. Cette comparaison porte principalement sur les paramètres les plus importants tels que la fréquence de fonctionnement, le gain, le coefficient de réflexion S11 ainsi que le VSWR.

Référence	Type d'antenne	Fréquences (GHz)	Gain (dBi)	S11 (dB)	VSWR	Commentaire
[41]	Slot waveguide	12.0	5.2	-12	1.8	Structure classique
[20]	Microstrip slot	13.5	6.0	-15	1.6	Bonne adaptation
[36]	Slot microstrip avancée	14.0	6.5	-18	1.5	Performances améliorées
Travail proposé	Slot bi-bande multicouche	11.6 / 15.7	5.3/9.5	-33/-30	1.04/1.06	Structure optimisée avec cavité métallique

Tableau III. 1: *Comparaison des performances des antennes à fente dans la bande Ku*

L'analyse comparative montre que l'antenne proposée présente des performances satisfaisantes par rapport aux travaux existants. Les résultats obtenus indiquent une amélioration du coefficient de réflexion S11 ainsi qu'une meilleure adaptation d'impédance caractérisée par une faible valeur du VSWR. De plus, l'intégration de la structure multicouche métallique avec cavité de filtrage a permis d'améliorer le gain et les performances globales de rayonnement dans la bande Ku.

III.5 Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la conception et à la simulation d'une antenne micro-ruban bi-bande opérant dans la bande Ku, en utilisant le logiciel CST Microwave Studio.

L'étude de la structure a permis de mettre en évidence l'influence des différents éléments constituants, notamment les substrats, les patchs, la couche de mousse ainsi que la cavité, sur les performances globales de l'antenne.

Les résultats de simulation ont montré que l'antenne présente deux fréquences de résonance situées autour de 11.64 GHz et 15.7 GHz, avec des valeurs du coefficient de réflexion S11 largement inférieures à −10 dB, confirmant une excellente adaptation d'impédance.

Les valeurs du VSWR, proches de l'unité, ont également confirmé la qualité du transfert de puissance. Par ailleurs, l'analyse du diagramme de rayonnement a révélé une directivité satisfaisante, atteignant jusqu'à 9.5 dBi, ce qui témoigne d'un bon comportement directionnel.

L'ensemble de ces résultats valide les performances de l'antenne proposée et confirme son aptitude pour des applications dans la bande Ku.

Conclusion Générale

Conclusion générale

Ce mémoire présente une étude approfondie d'une antenne à fente bi-bande fonctionnant dans la bande Ku, destinée aux applications de communication satellitaire et radar. L'objectif principal de ce travail était de concevoir une antenne capable d'assurer un fonctionnement stable sur deux fréquences de résonance tout en garantissant une bonne adaptation d'impédance, une amélioration du gain et une meilleure directivité[1], [2].

Dans un premier temps, une étude théorique a été menée sur les principes fondamentaux des antennes, les paramètres RF ainsi que les antennes à fente et leurs applications dans les systèmes micro-ondes et satellitaires[3], [4]. Cette étude a permis de comprendre les mécanismes de propagation, de rayonnement et d'adaptation d'impédance nécessaires à la conception de l'antenne proposée.

Par la suite, une structure multicouche intégrant deux substrats diélectriques, une couche intermédiaire en mousse et une cavité métallique de filtrage a été conçue et validée par simulation électromagnétique sous CST Microwave Studio[5]. Les performances de l'antenne ont été évaluées à travers l'analyse du coefficient de réflexion S11, du VSWR, du gain, de la directivité et des diagrammes de rayonnement.

Les résultats obtenus montrent une bonne adaptation d'impédance aux fréquences de résonance étudiées, avec des valeurs de S11 inférieures à -10 dB et un VSWR proche de 1. L'intégration de la cavité métallique a permis d'améliorer les performances de rayonnement, d'augmenter la directivité et de mieux concentrer l'énergie rayonnée dans la direction souhaitée. Ces résultats confirment l'intérêt de la structure proposée pour les applications fonctionnant dans la bande Ku[7].

Enfin, plusieurs perspectives peuvent être envisagées afin d'améliorer davantage cette conception. Parmi elles figurent la fabrication et la validation expérimentale de l'antenne, l'optimisation du gain et de la bande passante, l'intégration de structures EBG pour réduire les perturbations électromagnétiques ainsi que le développement de réseaux d'antennes permettant d'augmenter la directivité et d'étendre la couverture[8], [9]. Ces travaux futurs contribueront à améliorer les performances globales de l'antenne et à répondre aux exigences croissantes des systèmes de communication modernes.

RÉFÉRENCES

[1] C. A. Balanis, Antenna Theory: Analysis and Design, 4th ed., Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2016.

[2] D. M. Pozar, Microwave Engineering, 4th ed., Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2012.

[3] R. Garg, P. Bhartia, I. Bahl, and A. Ittipiboon, Microstrip Antenna Design Handbook, Norwood, MA: Artech House, 2001.

[4] J. D. Kraus and R. J. Marhefka, Antennas for All Applications, 3rd ed., New York, NY: McGraw-Hill, 2002.

[5] W. L. Stutzman and G. A. Thiele, Antenna Theory and Design, 3rd ed., Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2012.

[6] R. E. Collin, Foundations for Microwave Engineering, 2nd ed., Piscataway, NJ: IEEE Press / Wiley-IEEE, 2001.

[7] G. Kumar and K. P. Ray, Broadband Microstrip Antennas, Norwood, MA: Artech House, 2003.

[8] J. D. Jackson, Classical Electrodynamics, 3rd ed., Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 1999.

[9] S. Ramo, J. R. Whinnery, and T. Van Duzer, Fields and Waves in Communication Electronics, 3rd ed., Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 1994.

[10] International Telecommunication Union – Radiocommunication Sector (ITU-R), Radio Regulations: Frequency Allocations, Edition 2020, Geneva: ITU, 2020.

[11] T. Pratt, C. Bostian, and J. Allnutt, Satellite Communications, 2nd ed., Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2003.

[12] D. K. Cheng, Field and Wave Electromagnetics, 2nd ed., Reading, MA: Addison-Wesley, 1992.

[13] J. L. Volakis, C.-C. Chen, and K. Fujimoto, Small Antennas: Miniaturization Techniques & Applications, New York, NY: McGraw-Hill, 2010.

[14] H. G. Booker, “Slot Aerials and Their Relation to Complementary Wire Aerials (Babinet’s Principle),” Journal of the Institution of Electrical Engineers – Part IIIA: Radiolocation, vol. 93, no. 4, pp. 620–626, 1946.

[15] R. F. Harrington, Time-Harmonic Electromagnetic Fields, Piscataway, NJ: IEEE Press / Wiley-IEEE, 2001.

[16] Dassault Systèmes SIMULIA, CST Studio Suite 2023 – Electromagnetic Simulation Software, Vélizy-Villacoublay: Dassault Systèmes, 2023.

[17] Dassault Systèmes SIMULIA, CST Studio Suite 2023 – User Manual, Vélizy-Villacoublay: Dassault Systèmes, 2023.

[18] S. O. Zakariyya, B. O. Sadiq, R. A. Alao, A. O. Shoewu, and S. A. Abolarin, “Design of an Improved Microstrip Patch Antenna Operating at 28 GHz for 5G Applications,” International Journal of Advanced Research in Electronics and Communication Engineering (IJARECE), vol. 13, no. 2, pp. 45–52, 2024.

[19] B. Sklar, Digital Communications: Fundamentals and Applications, 2nd ed., Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2001.

[20] K. L. Wong, “Design of Compact Slot Antennas for Wireless Communication Systems,” in Proc. IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, Columbus, OH, USA, 2003, pp. 892–895.

[21] Y. Rahmat-Samii and E. Michielssen, Eds., Electromagnetic Optimization by Genetic Algorithms, Hoboken, NJ: Wiley-IEEE, 2009.

[22] S. Silver, Microwave Antenna Theory and Design, Stevenage, UK: Peter Peregrinus (IEE reprint), 1984.

[23] J. Huang and J. A. Encinar, Reflectarray Antennas, Hoboken, NJ: John Wiley & Sons / IEEE Press, 2008.

[24] T. S. Rappaport, Wireless Communications: Principles and Practice, 2nd ed., Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2002.

[25] A. Ishimaru, Electromagnetic Wave Propagation, Radiation, and Scattering, Piscataway, NJ: IEEE Press, 1997.

[26] F. T. Ulaby, E. Michielssen, and U. Ravaioli, Fundamentals of Applied Electromagnetics, 6th ed., Upper Saddle River, NJ: Pearson / Prentice Hall, 2010.

[27] K. Fujimoto and J. R. James, Eds., Mobile Antenna Systems Handbook, 2nd ed., Norwood, MA: Artech House, 2001.

[28] J. L. Volakis, Ed., Antenna Engineering Handbook, 4th ed., New York, NY: McGraw-Hill, 2007.

[29] K. L. Wong, Compact and Broadband Microstrip Antennas, Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2002.

[30] D. M. Pozar, “Microstrip Antennas,” Proceedings of the IEEE, vol. 80, no. 1, pp. 79–91, Jan. 1992.

[31] A. Taflove and S. C. Hagness, Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method, 3rd ed., Norwood, MA: Artech House, 2005.

[32] J. M. Jin, The Finite Element Method in Electromagnetics, 3rd ed., Hoboken, NJ: Wiley-IEEE Press, 2014.
[33] D. B. Davidson, Computational Electromagnetics for RF and Microwave Engineering, 2nd ed., Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2010.
[34] R. E. Collin, "Slot Antennas," in Antenna Handbook: Theory, Applications and Design, Y. T. Lo and S. W. Lee, Eds., New York, NY: Van Nostrand Reinhold, 1992, ch. 9.
[35] J. Hirokawa and M. Ando, "Single-Layer Feed Waveguide Consisting of Posts for Plane TEM Wave Excitation in Parallel Plates," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 46, no. 5, pp. 625–630, May 2005.
[36] D. Deslandes and K. Wu, "Analysis and Design of Current Probe Transition from Grounded Coplanar to Substrate Integrated Rectangular Waveguides," IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 58, no. 8, pp. 2003–2012, Aug. 2010.
[37] R. S. Elliott, Antenna Theory and Design (revised ed.), Piscataway, NJ: IEEE Press, 2003.
[38] M. I. Skolnik, Ed., Radar Handbook, 3rd ed., New York, NY: McGraw-Hill, 2008.
[39] F. Yang and Y. Rahmat-Samii, Electromagnetic Band Gap Structures in Antenna Engineering, Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2009.
[40] R. J. Mailloux, Phased Array Antenna Handbook, 2nd ed., Norwood, MA: Artech House, 2005.
[41] R. S. Elliott and L. A. Kurtz, "The Design of Small Slot Arrays," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 26, no. 2, pp. 214–219, Mar. 2003.
[42] J. Huang, "Reflectarray Antenna," in Encyclopedia of RF and Microwave Engineering, K. Chang, Ed., Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2005.
[43] A. K. Bhattacharyya, Phased Array Antennas: Floquet Analysis, Synthesis, BFNs and Active Array Systems, Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2006.
[44] R. Mittra, Ed., Computational Electromagnetics: Recent Advances and Engineering Applications, New York, NY: Springer, 2014.
[45] K. S. Yee, "Numerical Solution of Initial Boundary Value Problems Involving Maxwell's Equations in Isotropic Media," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 14, no. 3, pp. 302–307, May 1966.
[46] S. D. Gedney, Introduction to the Finite-Difference Time-Domain (FDTD) Method for Electromagnetics, San Rafael, CA: Morgan & Claypool Publishers, 2011.
[47] R. Garg, "Microstrip Patch Antenna Designs for Wideband Applications," IEEE Antennas and Propagation Magazine, vol. 43, no. 3, pp. 34–40, Jun. 2001.

[48] W. B. Weir, “Automatic Measurement of Complex Dielectric Constant and Permeability at Microwave Frequencies,” Proceedings of the IEEE, vol. 62, no. 1, pp. 33–36, Jan. 1974.
[49] C. A. Balanis, Ed., Modern Antenna Handbook, Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2008.
[50] D. M. Pozar, “A Review of Aperture Coupled Microstrip Antennas: History, Operation, Development, and Applications,” University of Massachusetts at Amherst, Tech. Rep., May 1996.