

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة سعيدة – د. الطاهر مولاي –

Université Saïda – Dr. Tahar Moulay –
Faculté des Mathématiques, de l'Informatique et des
Télécommunications



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **Diplôme de MASTER en Télécommunications**

Spécialité : Réseaux et Télécommunications

Par : M. MEGHERBI Boubakar Seddik
Et M. BENDJELLOUL Imad Eddine

Etude et Optimisation d'Antennes Micro-ruban pour les Réseaux Locaux Sans Fil en Utilisant la Technique de RNA

Soutenu, le 15/06/ 2026, devant le jury composé de :

M. BOUBAKAR Hichem	MCB	Président
M. BOUDKHIL Abdelhakim	MCA	Rapporteur
Mlle. OUESSAI Asmaa	MCB	Examineur

2025 / 2026

Dédicace

بسم الله الرحمن الرحيم

الصلاة والسلام على نبينا محمد رسول الله صلى الله عليه وسلم

الحمد لله الذي بنعمته تتم الصالحات

شكر كل من والدينا و عائلتنا و أساتذتنا على كل مجهود قدموه لنا

اللهم أرحم والدينا الأحياء منهم والأموات

Remerciements

En tout premier lieu, nous tenons à exprimer notre profonde gratitude envers ALLAH, qui nous a mener à faire ce modeste travail.

Nous adressons nos remerciements les plus sincères à notre rapporteur, Dr. BOUDKHIL A pour avoir dirigé cette étude avec une immense rigueur scientifique. Leurs précieux conseils nous ont guidés tout au long de la réalisation de ce mémoire.

Notre vive gratitude va également aux membres du jury, Dr. BOUBAKAR H et Dr. OUESSAI A qui ont honoré ce travail en acceptant de l'examiner et de l'évaluer. Leurs remarques constructives vont permettre d'enrichir notre travail.

Enfin, nous tenons à remercier chaleureusement l'ensemble des enseignants du Département de Télécommunication, et plus particulièrement Dr. BOUHMIDI R pour son aide précieuse et ses orientations avisées durant notre parcours.

Que tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à l'aboutissement de ce travail trouvent ici l'expression de notre reconnaissance infinie.

Table des Matières

Dédicace.....	I
Remerciements.....	II
Table des Matières.....	III
Liste des Figures.....	VI
Liste des Abréviations.....	VIII
Introduction Générale.....	1

Chapitre 1 : Réseaux Sans Fil

I.1 Histoire des réseaux informatiques	4
I.2 Réseaux sans fil et leurs types.....	5
I.2.1 Besoin des réseaux sans fil et leurs avantages	5
I.2.2 Types de réseaux sans fil.....	5
I.2.2.1 Réseaux personnels sans fil (PAN sans fil)	6
I.2.2.2 Réseau local sans fil (Réseau LAN sans fil)	6
I.2.2.3 Réseau Métropolitain Sans Fil (Réseau MAN Sans Fil).....	7
I.3 Technologie WiFi.....	7
I.3.1 Norme IEEE	8
I.3.2 Norme de sécurité	8
I.3.3 Comment fonctionne un réseau WiFi	8

I.4 Technologie WiMAX.....	9
I.4.1 Évolution de WiMAX.....	10
I.4.2 Objectif WiMAX	10
I.4.3 Avantages de WiMAX.....	11

Chapitre 2: Théorie des Antennes

II.1 Histoire des antennes	13
II.2 Paramètres et performance.....	15
II.2.1 Fréquence de résonance	15
II.2.2 Gain	15
II.2.3 Largeur de bande	18
II.2.4 Impédance	18
II.2.5 Modèle de rayonnement.....	19
II.2.6 Impédance caractéristique.....	19
II.2.7 Coefficient d'atténuation.....	20
II.2.8 Impédance d'entrée.....	21
II.2.9 Fréquence de travail	22
II.3 Types d'antennes	22
II.3.1 Antennes filaires	22
II.3.2 Antennes à ouverture	23
II.3.3 Antennes microbandes	24
II.3.4 Antennes en réseau	25

II.3.5	Antennes Réflectrices	26
II.3.6	Antennes de lentille.....	27

Chapitre 3 : Antennes Micro-ruban

III.1	Introduction	28
III.2	Types d'antennes à patch	29
III.3.	Méthodes d'alimentation	30
III.3.1	Alimentation par ligne microstrip.....	31
III.3.2	Couplage de proximité.....	32
III.3.3	Couplage d'ouverture	33

Chapitre 4 : Réseaux d'Antennes

IV.1	Concepts Fondamentaux	34
IV.1.1	Introduction.....	34
IV.1.2	Caractéristiques de l'antenne	36
IV.1.3	Communication sans fil.....	38
IV.1.4	Réseaux d'antennes.....	39
IV.1.5	Traitement spatial avec des réseaux d'antennes	40
IV.1.6	Aliasage	42
IV.1.7	Tableau à deux éléments	43
IV.1.8	Tableau Linéaire.....	44
IV.1.9	Tableau Circulaire	44

Chapitre 5 : Conception d'Antennes Micro-ruban RLSF à Base des RNA

V.1 Introduction.....	45
V.2 Modélisation RNA pour la conception d'antennes micro-ruban	47
V.2.1 Importance des RNA dans la conception des antennes.....	47
V.2.2 Topologie et architecture du modèle RNA développé.....	47
V.3 Conception de l'Antenne pour les RLSF sous SSHF	50
V.4 Conception du réseau d'antennes pour les RLSF	53
V.5 Validation des résultats par comparaison à la littérature	56
Conclusion Générale	57

Bibliographie

Liste des Figures

Figure I.1:	Classification des réseaux sans fil.....	6
Figure I.2:	Objectif de WiMAX.....	10
Figure I.1:	Heinrich Rudolf Hertz	14
Figure I.2:	Guglielmo Marconi	14
Figure I.3:	1887 configuration expérimentale de l'appareil de Hertz.....	14
Figure I.4:	Configurations d'antennes filaires	23
Figure I.5:	Configurations d'antennes à ouverture	24
Figure I.6:	Antennes microstrip (patch) rectangulaires et circulaires	25
Figure I.7:	Configurations typiques de fils, d'ouvertures et d'ensembles de microbandes.....	26
Figure I.8:	Configurations typiques de réflecteurs	27
Figure I.9:	Configurations typiques d'antennes à lentille	28
Figure II.1:	Formes des antennes à patch les plus courantes	30
Figure II.2:	Alimentation par ligne micro-ruban.....	32
Figure II.3:	Méthode d'alimentation par couplage de proximité.....	33
Figure II.4:	Méthode d'alimentation par couplage d'ouverture	34
Figure IV.1:	(a) Modèles d'élévation et (b) modèles azimutaux pour un dipôle court	37
Figure IV.2:	Géométrie d'antenne arbitraire	40
Figure IV.3:	Traitement spatial des signaux d'antenne en réseau.....	41
Figure IV.4:	Magnitude du facteur de réseau pour N=5 éléments.....	43
Figure IV.5:	Magnitude (dB) pour réseau d'antenne en 2D	45

Figure IV.6: Tableau à deux éléments	46
Figure IV.7: Réseau linéaire uniforme de n éléments.....	48
Figure IV.8: Tableau circulaire	49
Figure V.1 : Architecture du RNA développé.....	48
Figure V.2 : Structure d'un modèle de RNA à neurone unique	48
Figure V.3 : Comparaison entre le coefficient de réflexion prédit et simulé	49
Figure V.4 : Antenne micro-ruban conçue sous SSHF	50
Figure V.5 : S_{11} de l'antenne micro-ruban conçue	51
Figure V.6 : TOS de l'antenne micro-ruban conçue.....	52
Figure V.7 : Diagramme de rayonnement et gain de l'antenne conçue	52
Figure V.8 : Réseaux d'antenne linéaire à deux éléments.....	58
Figure V.9 : S_{11} , Rayonnement, TOS du réseau d'antennes linéaire.....	59

Liste des Tableaux

Tableau V.1: Comparaisons de la réponse EM des antennes conçues.....	56
---	----

Liste des Abréviations

AES : Advanced Encryption Standard (Standard de Chiffrement Avancé)

AP : Access Point (Point d'Accès Sans Fil)

ARPANET : Advanced Research Projects Agency Network

DGS : Defected Ground Structure (Défaut de Structure de Masse)

EAM : Erreur Absolue Moyenne

EAP : Extensible Authentication Protocol (Protocole d'Authentification Extensible)

EQM : Erreur Quadratique Moyenne

FEM : Finite Element Method (Méthode des Éléments Finis)

GPS : Global Positioning System

IEEE : Institute of Electrical and Electronics Engineers

IPTV : Internet Protocol Television

IrDA : Infrared Data Association

LMDS : Local Multipoint Distribution Service (Service de distribution multipoint locale)

LOS : Line of Sight (Ligne de Vue Directe)

MIMO : Multiple Input Multiple Output (Entrées Multiples, Sorties Multiples)

MMDS : Multichannel Multipoint Distribution Service (Service de Distribution Multipoint Multi-canal)

NLOS : Non-Line of Sight (Ligne de Vue Non Directe)

OFDM : Orthogonal Frequency Division Multiplexing (Multiplexage par Répartition en fréquences Orthogonales)

PDA : Personal Digital Assistant (Assistant Numérique Personnel)

QoS : Quality of Service (Qualité de Service)

ReLU : Rectified Linear Unit (Unité Linéaire Rectifiée)

RLSF : Réseaux Locaux Sans Fil

RNA : Réseaux de Neurones Artificiels

SOFDMA : Scalable Orthogonal Frequency Division Multiple Access (Accès Multiple par Répartition en Fréquences Orthogonales Evolutif)

SSHF : Simulateur de Structures à Hautes Fréquences

TOS : Taux d'Ondes Stationnaires

UHF : Ultra High Frequency (Fréquences Ultra Hautes)

VPN : Virtual Private Network (Réseau Privé Virtuel)

WEP : Wired Equivalent Privacy

Wi-Fi : Wireless Fidelity

Wi-MAX : Worldwide Interoperability for Microwave Access

WLAN : Wireless Local Area Network (Réseau Local Sans Fil)

WMAN : Wireless Metropolitan Area Network (Réseau Métropolitain Sans Fil)

WPAN : Wireless Personal Area Network (Réseau Personnel Sans Fil)

WPA / WPA2 : Wi-Fi Protected Access

WWAN : Wireless Wide Area Network (Réseau Étendu Sans Fil)

Générale

Introduction

Une antenne est un dispositif qui sert à transmettre ou à recevoir des ondes électromagnétiques. Elle transforme les courants électriques en ondes électromagnétiques (antenne émettrice) et inversement (antenne réceptrice). En d'autres termes, l'antenne est la structure de transition entre l'espace libre et un dispositif de guidage. Ce dispositif de guidage ou ligne de transmission peut être une ligne coaxiale ou un tube creux (guide d'ondes), et il est utilisé pour transporter l'énergie électromagnétique de la source émettrice à l'antenne, ou de l'antenne au récepteur. Dans le premier cas, nous avons une antenne émettrice et dans le second, une antenne réceptrice. Pour certaines applications, les antennes à élément unique ne peuvent pas répondre aux exigences de gain ou de motif de rayonnement. Combiner plusieurs éléments d'antenne uniques dans un réseau peut être une solution possible. [1]

Les antennes peuvent être combinées avec des types similaires ou d'autres types d'antennes pour former une antenne en réseau. Les antennes dans le réseau sont appelées éléments d'antenne ou éléments de réseau, ou simplement éléments. L'ensemble de tous les éléments est désigné comme antenne en réseau, réseau d'antennes ou simplement réseau. En général, des éléments similaires sont placés à intervalles réguliers sur une ligne (antenne en réseau linéaire) ou dans un plan (antenne en réseau planaire). En formant un réseau, un faisceau de rayonnement peut être créé avec une largeur de faisceau réduite. En contrôlant électroniquement les différences de phase entre les éléments, nous pouvons diriger électroniquement le faisceau dans différentes directions sans avoir à faire pivoter physiquement l'antenne. Cette possibilité de direction ou de balayage électronique du faisceau rend les antennes en réseau (phased) particulièrement intéressantes. [2]

Les antennes à patch micro-ruban sont très utilisées grâce à leurs avantages tels que leur structure plane, leur faible encombrement, leur facilité de fabrication et leur rapport coût-efficacité. Les caractéristiques de performance de l'antenne à patch micro-ruban simple peuvent être encore améliorées en utilisant un réseau d'antennes à patch micro-ruban. Les performances et les avantages des antennes patch micro-ruban, comme leur légèreté, leur faible profil et leur coût réduit, en font le choix idéal

pour les ingénieurs des systèmes de communication. Elles peuvent s'intégrer aux circuits micro-ondes, ce qui les rend très adaptées à des applications telles que les appareils cellulaires, les applications WLAN, les systèmes de navigation et bien d'autres. [3]

Dans ce contexte, cette étude vise à développer des structures d'antenne patch à haute performance pour des applications Wi-Fi, Wi-MAX, Sattelitaires, etc, en utilisant un le Simulateur de Structure à Hautes Fréquences (SSHF) basée sur un modèle développé par les Réseaux de Neurones Artificiels. Elle est divisée en cinq chapitres comme suit : Le premier chapitre présente l'histoire des réseaux informatiques, en particulier ceux sans fil. Le deuxième chapitre affiche les paramètres des antennes, les fondamentaux et leurs types. Le troisième chapitre est consacré à la description des antennes micro-ruban ou antennes patch et des méthodes d'alimentation. Le quatrième chapitre démontre les principes fondamentaux des réseaux d'antennes, et le dernier chapitre est consacré à la partie simulation dans laquelle des structures d'antenne micro-ruban à haute performance sont conçue pour des applications sans fil différentes.

TPartie théorique

Chapitre I : Réseaux Sans Fil

Chapitre II : Théorie des Antennes

Chapitre II : Antennes Micro-ruban

Chapitre IV : Réseaux d'antennes

Chapitre I

Réseaux Sans Fil

I.1 Historique des réseaux informatiques

Un réseau informatique est un ensemble d'ordinateurs qui utilisent un ensemble de protocoles de communication communs via des interconnexions numériques pour partager des ressources situées sur ou fournies par les nœuds du réseau. Les interconnexions entre les nœuds sont formées à partir d'un large éventail de technologies de réseau de télécommunications, basées sur des méthodes câblées, optiques et sans fil à radiofréquence, qui peuvent être organisées dans une variété de topologies de réseau.

De nos jours, les réseaux informatiques sont très importants car la technologie de l'information augmente rapidement dans le monde entier. Le réseau et la communication des données sont des facteurs essentiels pour faire progresser la technologie de l'information dans le monde, car l'avancement de la technologie est sur le système, y compris les gadgets.

Le réseautage informatique tel que nous le connaissons aujourd'hui peut être dit avoir commencé avec le développement de l'Arpanet à la fin des années 1960 et au début des années 1970. Avant cette époque, il existait des "réseaux" de fournisseurs d'ordinateurs conçus principalement pour connecter des terminaux et des stations d'entrée de travail à distance à un mainframe. Mais la notion de mise en réseau entre ordinateurs se considérant comme des pairs égaux pour réaliser le "partage de ressources" était fondamentale pour la conception de l'ARPANET. L'autre point fort du travail de l'Arpanet était sa dépendance à la technique alors novatrice du commutateur de paquets pour partager efficacement les ressources de communication parmi des utilisateurs "bursty", au lieu du commutateur de message ou de circuit plus traditionnel.

I.2 Réseaux sans fil et leurs types

Les réseaux sans fil sont des réseaux informatiques qui utilisent des ondes électromagnétiques au lieu de câbles pour transmettre des signaux à travers les différentes parties du réseau. Les réseaux sans fil qui fonctionnent sur d'autres réseaux sans fil utilisent souvent les réseaux de couche inférieure pour assurer la sécurité et le cryptage. Les réseaux sans fil autonomes offrent soit leurs propres fonctionnalités de sécurité et de cryptage, soit s'appuient sur des VPN (réseaux privés virtuels) pour fournir ces fonctionnalités. Dans de nombreux cas, plusieurs couches de sécurité et de cryptage peuvent être souhaitables.

I.2.1 Besoin des réseaux sans fil et leurs avantages

Les réseaux sans fil font partie des domaines technologiques qui connaissent la croissance la plus rapide dans le secteur des télécommunications. L'adoption généralisée et la popularité des systèmes de communication sans fil sont dues à leurs nombreux avantages par rapport aux systèmes filaires. Le besoin de réseaux sans fil est né des avantages de la mobilité et des économies de coûts. Les coûts sont réduits car le câblage nécessaire est très limité, voire pas du tout requis. Le temps nécessaire pour déployer de tels réseaux est considérablement inférieur à celui des réseaux filaires. Une solution sans fil est parfaitement adaptée aux endroits où le câblage est interdit ou où il est difficile d'installer des fils, comme dans les bâtiments historiques ou dans les zones proches des rivières.

I.2.2 Types de réseaux sans fil

Les réseaux sans fil se classifient de différentes manières. Certains réseaux sans fil sont fixes, ce qui signifie que les antennes ne bougent pas souvent. D'autres réseaux sans fil sont mobiles, ce qui veut dire que l'antenne peut se déplacer en permanence. Les principaux types sont classés dans les passages suivants, en fonction de leurs portées et de la technologie utilisée.

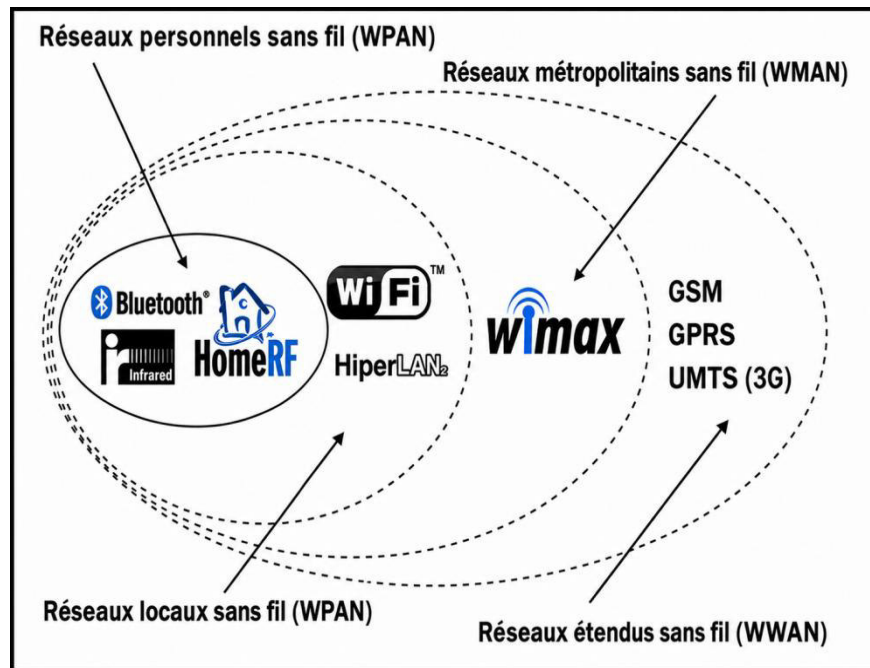


Figure I.1: Classification des réseaux sans fil

I.2.2.1 Réseaux personnels sans fil (PAN sans fil)

Dans un réseau personnel sans fil, les appareils sont reliés entre eux dans un petit espace comme une pièce. Le protocole Bluetooth est un exemple de technologie radio utilisée sur de courtes distances, généralement de quelques mètres. Par exemple, le Bluetooth est utilisé pour connecter sans fil un casque à un PC ou un ordinateur portable. L'Association des Données Infrarouges (IrDA) définit des normes de protocole pour le transfert de données utilisant des rayons infrarouges dans les réseaux personnels sans fil.

I.2.2.2 Réseau Local Sans Fil (Réseau LAN Sans Fil)

Le Réseau Local Sans Fil est la version sans fil des réseaux locaux (LAN). Les données sont transmises entre les ordinateurs grâce à des ondes radio envoyées dans des zones comme de grandes maisons, des bureaux ou des écoles. Les protocoles de LAN sans fil sont normalisés sous la série IEEE 802.11. Le Wi-Fi, qui signifie "fidélité sans fil", est largement utilisé pour connecter des ordinateurs personnels et l'Internet.

La marque technologique WiFi, qui appartient à la WiFi Alliance, est utilisée pour certifier des produits afin d'assurer l'interopérabilité entre les produits utilisant les

normes IEEE 802.11.

I.1.1.1 Réseau Métropolitain Sans Fil (Réseau MAN Sans Fil)

Les Réseaux Métropolitains Sans Fil relient plusieurs Réseaux Locaux Sans Fil entre eux. La norme IEEE 802.16 est utilisée pour les mises en œuvre conformes des MAN sans fil. WiMax, qui signifie Interopérabilité Mondiale pour l'Accès Micro-ondes, est un exemple de cette mise en œuvre. La couverture peut atteindre un rayon de plus de 30 miles autour de la tour WiMax. Le MMDS (Service de Distribution Multicanal Multipoint) est une technologie MAN sans fil à large bande qui utilise une transmission point à multipoint en utilisant des Fréquences Ultra Élevées (UHF). Son rayon peut atteindre jusqu'à 70 miles. Le LMDS (Service de Distribution Multipoint Local) est une autre technologie point à multipoint qui utilise des micro-ondes et atteint une portée plus courte de jusqu'à 5 miles depuis la station de base.

I.2 Technologie WiFi

Le WiFi (Wireless Fidelity) est une expression déposée qui désigne la norme IEEE 802.11x, et c'est une technologie de transmission sans fil à courte portée. Le WiFi est une technologie qui utilise des moyens sans fil pour connecter des ordinateurs personnels, des appareils portables (comme des PDA, des smartphones, etc.) et d'autres terminaux. C'est une marque de technologie de communication de réseau sans fil détenue par la WiFi Alliance. L'objectif est d'améliorer l'interopérabilité entre les produits de réseau sans fil basés sur les normes IEEE802.11. En général, pour établir un réseau sans fil, un point d'accès (AP) et des adaptateurs de réseau sans fil sont les éléments de base nécessaires. De cette manière, il peut utiliser le support sans fil et s'adapter à la structure du réseau câblé existant pour partager les ressources du réseau. En conséquence, le coût de l'installation et la complexité sont bien inférieurs à ceux d'un réseau câblé traditionnel.

L'étude de Banerji et Chowdhury (2013) montre que la zone de couverture d'un AP normal est d'environ 20 mètres à l'intérieur et de 100 mètres à l'extérieur. Il est plus adapté à une utilisation dans des environnements de bureau et à domicile. Le WiFi a été la première technologie sans fil à haute vitesse largement utilisée et

déployée, et il a un large éventail d'applications dans les réseaux à domicile, au bureau, ainsi que dans un nombre croissant de cafés, d'hôtels et d'aéroports.[6]

I.2.1 Norme IEEE

Les réseaux Wi-Fi utilisent des technologies radio pour transmettre et recevoir des données à grande vitesse :

- IEEE 802.11b
- IEEE 802.11a
- IEEE 802.11g
- IEEE 802.11n

I.2.2 Norme de sécurité

- L'accès protégé par Wi-Fi (WPA) est un programme de certification créé par l'alliance Wi-Fi pour sécuriser les réseaux informatiques sans fil.
- S'appuie sur WEP (Privacy Équivalente Filée)
- Le standard de cryptage WPA2 a été ratifié par l'IEEE et est toujours considéré comme sécurisé, depuis 2009.
- Le WPA existe en deux versions, à savoir WPA-802.1x et WPA-PSK.
- L'alliance Wi-Fi a annoncé l'ajout de nouveaux types d'EAP (Protocole d'authentification extensible) à ses programmes de certification pour WPA et WPA2.

I.2.3 Comment fonctionne un réseau Wi-Fi

- Le concept de base est le même que celui des talkies-walkies.
- Un point d'accès Wi-Fi est créé en installant un point d'accès à une connexion Internet.
- Un point d'accès fonctionne comme une station de base.

- Lorsqu'un appareil compatible Wi-Fi rencontre un point d'accès, il peut alors se connecter à ce réseau sans fil.
- Un seul point d'accès peut prendre en charge jusqu'à 30 utilisateurs et peut fonctionner dans une portée de 100 à 150 pieds à l'intérieur et jusqu'à 300 pieds à l'extérieur.
- De nombreux points d'accès peuvent être reliés entre eux par des câbles Ethernet pour former un grand réseau unique.

I.3 Technologie WiMAX

L'Interopérabilité Mondiale pour l'Accès Micro-ondes (WiMax) est un système de communication sans fil qui permet aux ordinateurs et aux stations de travail de se connecter à des réseaux de données à haute vitesse (comme Internet) en utilisant des ondes radio comme moyen de transmission, avec des vitesses de transmission de données pouvant dépasser 120 Mbps pour chaque canal radio. Le système WiMax est défini dans un ensemble de normes industrielles IEEE 802.16 et ses différentes révisions sont utilisées pour des formes particulières d'accès sans fil à large bande fixe et mobile.

WiMax est un système principalement utilisé comme un réseau métropolitain sans fil (WMAN). Les WMAN peuvent offrir un accès à la communication de données à large bande dans toute une zone urbaine ou géographique de la ville. Les WMAN sont utilisés dans le monde entier et leurs applications incluent des services Internet sans fil à large bande pour les consommateurs, lignes interconnectées (lignes louées) et transport des services de télévision numérique (IPTV). Le WiMax sans fil à large bande peut rivaliser avec les connexions DSL, modem câble et large bande optique. Le système 802.16 a été conçu pour un service nomade à emplacement fixe. Le service nomade consiste à fournir des services de communication à plusieurs emplacements. Bien que le service nomade puisse être offert à de nombreux endroits, il nécessite généralement que l'appareil de communication transportable soit fixé à un endroit pendant l'utilisation du service de communication. [7]

I.3.1 Évolution de WiMAX

- 1) **Groupe de travail IEEE 802.16** : En 1988, le groupe de travail IEEE 802.16 a développé une solution WMAN pour les systèmes de large bande sans fil point à point et point à multipoint basés sur la ligne de vue (LOS). La plage de fréquences de l'IEEE 802.16 est de 10 GHz à 66 GHz.
- 2) **IEEE 802.16a** : La norme IEEE 802.16a a été créée en janvier 2003. Elle couvre une plage de fréquences de 2 GHz à 11 GHz et permet une communication NLOS (Non-Ligne de Vue).
- 3) **IEEE 802.16-2004** : Cette norme est destinée aux applications fixes, donc on l'appelle WiMAX fixe ou IEEE 802.16d. Elle prend en charge l'OFDM (Multiplexage par Division de Fréquence Orthogonale) au niveau physique. On l'appelle aussi WiMAX fixe.
- 4) **IEEE 802.16e-2005** : La norme IEEE 802.16e-2005 a été lancée en décembre 2005. Elle offre un soutien pour les services nomades et de mobilité, c'est pourquoi on l'appelle aussi Mobile WiMAX. Elle prend en charge le SOFDM (Accès Multiple par Division de Fréquence Orthogonale Évolutive) dans la couche physique de WiMAX. [8]

I.3.2 Objectif de WiMAX

WiMAX a des objectifs importants comme le montre la Figure (I.1) [9] et qui sont décrits ci-dessous :

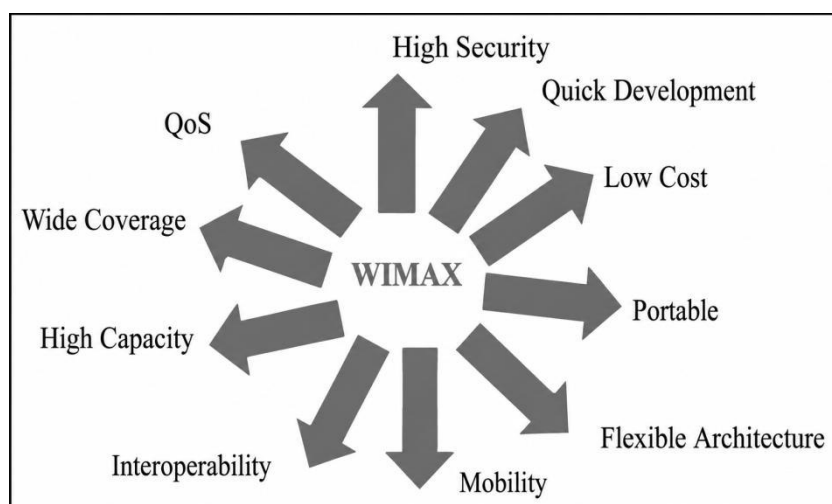


Figure I.2 : Objectif de WiMAX

- 1) **Haute Sécurité:** WiMAX offre une meilleure politique de cryptage car il utilise la norme de cryptage appelée Advanced Encryption Standard (AES). Il assure l'authentification des données importantes.
- 2) **Mobilité :** La norme IEEE 802.16e-2005 utilise la technique de modulation SOFDMA et le MIMO (Multiple Input Multiple Output) dans la couche physique, ce qui lui permet de supporter la mobilité.
- 3) **Qualité de Service:** Cela fait référence aux services tels que les données, la voix et les multimédias perçus par les abonnés.
- 4) **Architecture Flexible :** Il prend en charge une architecture flexible pour la communication point à point et point à multipoint.
- 5) **Interopérabilité :** C'est l'objectif principal de WiMAX. Grâce à l'interopérabilité, les utilisateurs peuvent choisir un module d'abonné avec différents opérateurs.

I.3.3 Avantages de WiMAX

Les avantages de WiMAX incluent l'utilisation d'une technologie standardisée, un déploiement rapide, une efficacité spectrale, une couverture radio pénétrante, une évolutivité, la sécurité, un débit de données élevé, la qualité de service et un bon rapport qualité-prix. WiMAX est une technologie normalisée dans l'industrie. Cela permet à plusieurs fabricants de produire des équipements compatibles, ce qui entraîne généralement des coûts d'équipement plus bas.

WiMAX Les systèmes peuvent être déployés rapidement. Comme chaque site de transmission WiMAX peut couvrir des centaines de kilomètres carrés, il est possible d'installer des services de communication WiMAX à haute vitesse dans une ville ou une région géographique assez grande en quelques semaines ou mois. Les technologies utilisées dans WiMAX lui permettent d'être très efficaces sur le plan spectral. L'efficacité spectrale est une mesure qui caractérise une méthode de modulation et de codage particulière, décrivant combien d'informations peuvent être transférées dans une bande passante donnée. Cela est souvent exprimé en bits par seconde par Hertz. Le système WiMAX utilise des méthodes de modulation et de codage très efficaces pour atteindre une efficacité spectrale supérieure à celle des téléphones mobiles ou

d'autres types de systèmes sans fil.

WiMAX On peut utiliser un mélange de types d'accès robustes. Cela permet aux systèmes WiMAX de fournir une couverture radio dans une grande variété de zones géographiques. Cela permet aux signaux WiMAX de pénétrer à travers et autour des arbres et dans les bâtiments si nécessaire. WiMAX Les systèmes sont évolutifs. Ils peuvent augmenter le nombre d'utilisateurs ou la quantité de services offerts sans nécessiter de changements majeurs dans le matériel ou la technologie utilisée. Le système WiMAX peut être agrandi en ajoutant des canaux radio, des sites de transmission et des systèmes d'antennes intelligentes, ce qui lui confère une évolutivité pratiquement illimitée. Il existe plusieurs processus de sécurité disponibles dans les systèmes WiMAX.

La sécurité est la capacité d'un système ou d'un service à maintenir son bon fonctionnement ou son bien-être sans subir de dommages, de vol ou de compromission de ses ressources par des personnes ou des événements indésirables. Le système WiMAX intègre une couche de sécurité dans son fonctionnement global, permettant une authentification fiable et le chiffrement des données des utilisateurs et du système. Une sécurité élevée permet également d'assurer les revenus et de garantir une forte confidentialité, ce qui peut accroître la confiance des consommateurs. De plus, une sécurité renforcée offre aux opérateurs de systèmes WiMAX la possibilité d'attirer des propriétaires de contenus de grande valeur pour autoriser la distribution de leurs contenus.

Chapitre II

Théorie des Antennes

II.1 Histoire des antennes

Le travail sur les antennes a commencé il y a de nombreuses années. La première expérience d'antenne satisfaisante et bien connue a été réalisée par le physicien allemand Heinrich Rudolf Hertz (1857–1894), comme on le voit dans la Figure (II.1). L'unité de fréquence SI (Système International), le Hertz, porte son nom. En 1887, il a construit un système, comme montré dans la Figure (II.3), pour produire et détecter des ondes radio. L'intention originale de son expérience était de démontrer l'existence de la radiation électromagnétique.

Dans l'émetteur, une source de tension variable était reliée à un dipôle (une paire de fils d'un mètre) avec deux boules conductrices (sphères de capacité) aux extrémités. L'écart entre les boules pouvait être ajusté pour la résonance du circuit ainsi que pour la génération d'étincelles. Lorsque la tension était augmentée à une certaine valeur, une étincelle ou une décharge de rupture se produisait. Le récepteur était une simple boucle avec deux boules conductrices identiques. L'écart entre les boules était soigneusement réglé pour recevoir l'étincelle efficacement. Il a placé l'appareil dans une boîte assombrie afin de voir clairement l'étincelle. Dans son expérience, lorsqu'une étincelle était générée à l'émetteur, il observait également une étincelle au niveau du récepteur presque en même temps. Cela prouvait que l'information de l'emplacement A (l'émetteur) était transmise à l'emplacement B (le récepteur) de manière sans fil – par des ondes électromagnétiques.

Les informations dans l'expérience de Hertz étaient en fait sous forme numérique binaire, en allumant et éteignant l'étincelle. Cela pourrait être considéré comme le tout premier système sans fil numérique, qui se composait de deux des antennes les plus connues : le dipôle et la boucle. Pour cette raison, l'antenne dipôle est aussi appelée antenne Hertz (dipôle).

Alors qu'Heinrich Hertz réalisait ses expériences dans un laboratoire sans vraiment savoir à quoi pourraient servir les ondes radio dans la pratique, Guglielmo Marconi (1874–1937, illustré dans la Figure (II.2), un inventeur italien, a développé et commercialisé la technologie sans fil en introduisant un système de radiotélégraphe, qui a servi de base à la création de nombreuses entreprises affiliées dans le monde entier. Son expérience la plus célèbre a été la transmission transatlantique de Poldhu, au Royaume-Uni, à St Johns, à Terre-Neuve, au Canada, en 1901, utilisant des systèmes non accordés. Il a partagé le prix Nobel de physique de 1909 avec Karl Ferdinand Braun ‘en reconnaissance de leurs contributions au développement de la télégraphie sans fil’. Les antennes monopôles (près d'un quart de longueur d'onde) étaient largement utilisées dans les expériences de Marconi ; ainsi, les antennes monopôles verticales sont également appelées antennes Marconi. [11]

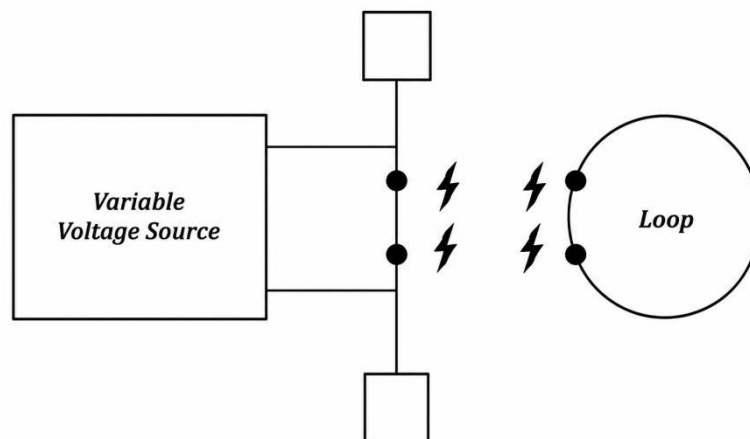


Figure II.3: Configuration expérimentale de l'appareil de Hertz

II.2 Paramètres et performance

II.2.1 Fréquence de résonance

La fréquence résonante et la résonance électrique sont liées à la longueur électrique de l'antenne. La longueur électrique est généralement la longueur physique du fil divisée par le rapport de la vitesse de propagation des ondes dans l'espace libre à la vitesse dans le fil. La longueur électrique de l'antenne est souvent exprimée par la longueur d'onde. Les antennes sont généralement réglées sur une certaine fréquence et sont efficaces dans une bande de fréquence centrée sur cette fréquence résonante.

Mais d'autres paramètres de l'antenne (surtout le diagramme de rayonnement et l'impédance) changent avec la fréquence, donc la fréquence résonante de l'antenne peut seulement être proche de la fréquence centrale de ces paramètres plus importants.

The L'antenne peut résonner à une fréquence qui correspond à la relation entre la longueur de la cible et le numéro de la composante de la longueur d'onde. Certaines antennes sont conçues avec plusieurs fréquences résonnantes, tandis que d'autres sont relativement efficaces sur une large bande de fréquence. L'antenne à large bande la plus courante est une antenne log-périodique, mais son gain est beaucoup plus faible que celui d'une antenne à bande étroite.

II.2.2 Gain

Le gain fait référence au logarithme du rapport entre l'intensité du motif de radiation de l'antenne, qui est le plus fort, et l'intensité de l'antenne de référence. Si l'antenne de référence est une antenne omnidirectionnelle, l'unité de gain est en dBi. Par exemple, le gain de l'antenne dipôle est de 2,14 dBi. Les antennes dipôles sont aussi souvent utilisées comme antennes de référence (c'est parce qu'une antenne de référence omnidirectionnelle parfaite ne peut pas être fabriquée). Dans ce cas, le gain de l'antenne est exprimé en dBd.

Le gain d'antenne est un phénomène passif. L'antenne n'augmente pas l'excitation, mais elle la redistribue seulement pour émettre plus d'énergie dans une direction précise par rapport à une antenne omnidirectionnelle. Si le gain de l'antenne est positif dans certaines directions, son gain dans d'autres directions sera négatif en raison de la conservation de l'énergie de l'antenne. Par conséquent, le gain que l'antenne peut atteindre doit être équilibré entre la couverture de l'antenne et son gain. Par exemple, le gain de l'antenne parabolique sur le vaisseau spatial est très élevé, mais la zone de couverture est très étroite, donc elle doit pointer précisément vers la Terre ; tandis que l'antenne de diffusion doit émettre dans toutes les directions, son gain est très faible.

Le gain d'une antenne parabolique est proportionnel à l'ouverture (zone de réflexion), à la précision de la surface de réflexion de l'antenne et à la fréquence de transmission/réception. En général, plus l'ouverture est grande, plus le gain est élevé,

et plus la fréquence est élevée, plus le gain est important, mais l'erreur de précision de la surface à des fréquences plus élevées entraînera une grande diminution du gain.

L'ouverture et les motifs de radiation sont étroitement liés au gain. L'ouverture fait référence à la forme de la section transversale du faisceau dans la direction du gain le plus élevé, qui est bidimensionnelle (parfois, l'ouverture est exprimée comme le rayon d'un cercle approximatif à la section transversale ou l'angle du cône de faisceau). Le motif de radiation est un graphique tridimensionnel représentant le gain, mais généralement, seules les sections bidimensionnelles horizontales et verticales du motif de radiation sont prises en compte. Le motif de radiation d'une antenne à gain élevé est souvent accompagné de lobes secondaires. Le lobe secondaire fait référence aux faisceaux autres que le lobe principal (le faisceau avec le gain le plus élevé) dans le gain. Lorsque des systèmes tels que des radars doivent déterminer la direction du signal, le lobe secondaire affectera la qualité de l'antenne. Le lobe secondaire réduira également le gain du lobe principal en raison de la distribution de puissance. Le gain fait référence au rapport de la densité de puissance du signal généré par l'antenne réelle et l'élément rayonnant idéal au même point dans l'espace, sous la condition d'une puissance d'entrée égale.

Il décrit quantitativement le degré auquel une antenne concentre la puissance d'entrée et la rayonne. Le gain a évidemment une relation étroite avec le motif de l'antenne. Plus le lobe principal du motif est étroit et plus le lobe latéral est petit, plus le gain est élevé. La signification physique du gain peut être comprise de cette manière :

Un signal d'une certaine taille est généré à un certain point à une certaine distance. Si une source ponctuelle idéale non directionnelle est utilisée comme antenne émettrice, une puissance d'entrée de 100W est nécessaire, et une certaine antenne directionnelle avec un gain de $G = 13 \text{ dB} = 20$ est utilisée comme antenne émettrice. Lors de l'utilisation d'une antenne, la puissance d'entrée n'est que de $100/20 = 5\text{W}$.

En d'autres termes, le gain d'une certaine antenne, en termes d'effet de rayonnement dans sa direction de rayonnement maximale, est le multiple de

l'amplification de la puissance d'entrée par rapport à une source ponctuelle idéale sans directionnalité. Le gain de l'oscillateur symétrique à demi-onde est $G=2.15\text{dBi}$. Quatre oscillateurs symétriques à demi-onde sont disposés verticalement le long de la ligne verticale pour former un réseau vertical à quatre éléments, avec un gain d'environ $G=8.15\text{dBi}$ (l'unité dBi indique que l'objet de comparaison est une source ponctuelle idéale avec un rayonnement uniforme dans toutes les directions). Si un oscillateur symétrique à demi-onde est utilisé comme objet de comparaison, l'unité de gain est dBd. Le gain de l'oscillateur symétrique à demi-onde est $G=0\text{dBd}$ (car il est comparé avec lui-même, le rapport est 1, et le logarithme est zéro.) Le gain du réseau quaternion vertical est d'environ $G= [8.15-2.15]\text{dB} = 6\text{dB}$.

II.2.3 Bande passante

La bande passante d'une antenne désigne la plage de fréquences dans laquelle elle fonctionne efficacement, généralement centrée sur sa fréquence de résonance. On peut augmenter la bande passante de l'antenne grâce à plusieurs techniques, comme l'utilisation de fils métalliques plus épais, l'emploi de mailles métalliques pour imiter des fils métalliques plus épais, des éléments d'antenne avec des pointes plus fines (comme dans un cornet d'alimentation), et des composants multi-antenne intégrés qui utilisent l'impédance caractéristique pour choisir l'antenne appropriée. Les petites antennes sont généralement faciles à utiliser, mais elles présentent des limitations inévitables en termes de bande passante, de taille et d'efficacité

On peut augmenter la bande passante de l'antenne grâce à plusieurs techniques, comme l'utilisation de fils métalliques plus épais, l'emploi de mailles métalliques pour imiter des fils métalliques plus épais, des éléments d'antenne avec des pointes plus fines (comme dans un cornet d'alimentation), et des composants multi-antenne intégrés qui utilisent l'impédance caractéristique pour choisir l'antenne appropriée. Les petites antennes sont généralement faciles à utiliser, mais elles présentent des limitations inévitables en termes de bande passante, de taille et d'efficacité.

II.2.4 Impédance

L'impédance est similaire à l'indice de réfraction en optique. Les ondes radio traversant les différentes parties d'un système d'antenne (émetteur-récepteur, ligne

d'alimentation, antenne, espace libre) rencontrent des différences d'impédance. À chaque interface, selon l'adaptation d'impédance, une partie de l'énergie de l'onde électrique est réfléchi vers la source, formant une onde stationnaire sur la ligne d'alimentation. On mesure alors le rapport entre l'énergie maximale et l'énergie minimale de l'onde électrique : c'est le taux d'ondes stationnaires (TOS). Réduire la différence d'impédance (adaptation d'impédance) entre les différentes interfaces diminuera le rapport d'onde stationnaire et maximisera la transmission d'énergie entre les différentes parties du système d'antenne.

L'impédance complexe d'une antenne est liée à la longueur électrique de l'antenne pendant son fonctionnement. En ajustant l'impédance du câble d'alimentation, c'est-à-dire en utilisant le câble comme un convertisseur d'impédance, l'impédance de l'antenne peut être adaptée à celle du câble et de la radio. Il est plus courant d'utiliser des accordeurs d'antenne, des baluns, des convertisseurs d'impédance, des réseaux d'adaptation comprenant des condensateurs et des inducteurs, ou des sections d'adaptation comme l'adaptation gamma.

II.2.5 Modèle de rayonnement

Le gain de l'antenne dipôle à demi-onde (dBi) est un graphique qui montre la force du champ relatif émis ou reçu par l'antenne. Comme l'antenne rayonne dans un espace tridimensionnel, plusieurs figures sont nécessaires pour la décrire.

Si le rayonnement de l'antenne est symétrique par rapport à un certain axe (comme les antennes dipôles, les antennes hélicoïdales et certaines antennes paraboliques), un seul motif est suffisant. Les utilisateurs de différents fournisseurs d'antennes ont des normes et des formats de dessin variés pour ce motif.

II.2.6 Impédance caractéristique

Le rapport entre la tension et le courant sur une ligne de transmission infinie est défini comme l'impédance caractéristique de cette ligne, notée Z_0 .

La formule de calcul de l'impédance caractéristique d'un câble coaxial est.

$$Z_0 = (60/\sqrt{\epsilon_r}) \times \text{Log}(D/d) \quad (2.1)$$

Dans la formule, D représente le diamètre intérieur de la maille en cuivre du conducteur extérieur du câble coaxial ; d est le diamètre extérieur du fil central du câble coaxial ; ϵ_r est la permittivité relative du milieu isolant entre les conducteurs. En général, $Z_0 = 50$ ohms, mais il existe aussi $Z_0 = 75$ ohms.

Il est facile de voir d'après la formule ci-dessus que l'impédance caractéristique du câble est uniquement liée aux diamètres des conducteurs D et d ainsi qu'à la constante diélectrique ϵ_r du milieu entre les conducteurs, sans rapport avec la longueur du câble, la fréquence de fonctionnement ou l'impédance de charge connectée à la terminaison du câble.

II.2.7 Coefficient d'atténuation

La transmission du signal dans le câble d'alimentation, en plus de la perte résistive du conducteur, inclut également la perte diélectrique du matériau isolant. Ces deux types de pertes augmentent avec la longueur du câble d'alimentation et la fréquence de fonctionnement. Par conséquent, il est conseillé de réduire la longueur du câble d'alimentation dans une configuration raisonnable. La magnitude de la perte par unité de longueur est exprimée par le coefficient d'atténuation β , dont l'unité est le dB/m (décibel/mètre), et dans le manuel technique des câbles, l'unité est souvent dB/100 m (décibel/100m).

Supposons que la puissance d'entrée dans le câble d'alimentation soit P_1 et que la puissance de sortie du câble d'une longueur $L(m)$ soit P_2 , la perte de transmission TL et le coefficient d'atténuation est peuvent être exprimés respectivement comme suit :

$$TL = 10 \times \text{Log} (P_1 / P_2) (dB) \quad (2.2)$$

$$\beta = TL / L (dB / m) \quad (2.3)$$

Par exemple, dans le câble à faible consommation NOKIA de 7/8 pouces, le coefficient d'atténuation à 900MHz est $\beta = 4.1$ dB / 100 m, ce qui peut également être écrit comme $\beta = 3$ dB / 73 m, c'est-à-dire que pour les câbles longs de ce type, la

puissance du signal à une fréquence de 900MHz est réduite de moitié tous les 73 m.

Pour les câbles ordinaires non à faible consommation, par exemple, SYV-9-50-1, le coefficient d'atténuation à 900MHz est $\beta = 20.1 \text{ dB} / 100 \text{ m}$, ce qui peut également être écrit comme $\beta = 3\text{dB} / 15 \text{ m}$, c'est-à-dire qu'un signal à une fréquence de 900MHz voit sa puissance réduite de moitié tous les 15 m de ce câble.

II.2.8 Impédance d'entrée

Le rapport entre la tension du signal à la borne d'entrée de l'antenne et le courant du signal est ce qu'on appelle l'impédance d'entrée de l'antenne. L'impédance d'entrée comprend une composante de résistance R_{in} et une composante de réactance X_{in} , c'est-à-dire $Z_{in} = R_{in} + j X_{in}$. La présence de la composante de réactance va diminuer la capacité de l'antenne à extraire la puissance du signal depuis le câble. Par conséquent, cette composante de réactance doit être aussi proche de zéro que possible, ce qui signifie que l'impédance d'entrée de l'antenne devrait être aussi pure que possible. En réalité, même une antenne bien conçue et bien réglée a une petite composante de réactance dans son impédance d'entrée.

L'impédance d'entrée est liée à la structure, à la taille et à la longueur d'onde de fonctionnement de l'antenne. L'oscillateur symétrique à demi-onde est l'antenne de base la plus importante, et son impédance d'entrée est $Z_{in} = 73.1 + j42.5$ (Europe). Lorsque la longueur est réduite de $(3 \sim 5)\%$, la composante de réactance peut être éliminée et l'impédance d'entrée de l'antenne devient une résistance pure. À ce moment-là, l'impédance d'entrée est $Z_{in} = 73.1$ (Euro), (nominale 75 ohms). Il est à noter que, strictement parlant, l'impédance d'entrée d'antenne purement résistive n'est valable que pour une fréquence précise. Au fait, l'impédance d'entrée du vibreur replié en demi-onde est quatre fois celle du vibreur symétrique en demi-onde, c'est-à-dire que $Z_{in} = 280$ (ohm), (nominal 300ohm).

Ce qui est intéressant, c'est que pour n'importe quelle antenne, on peut toujours ajuster l'impédance de l'antenne pour rendre la partie imaginaire de l'impédance d'entrée très petite et la partie réelle assez proche de 50 ohms dans la plage de

fréquence de fonctionnement requise, de sorte que l'impédance d'entrée de l'antenne soit $Z_{in} = R_{in} = 50$ ohms, ce qui est nécessaire pour un bon appariement d'impédance entre l'antenne et le câble.

II.2.9 Fréquence de travail

Peu importe s'il s'agit d'une antenne émettrice ou d'une antenne réceptrice, elles fonctionnent toujours dans une certaine plage de fréquences (bande passante). Il existe deux définitions différentes pour la bande passante de l'antenne :

Une type fait référence à la bande passante de fréquence de travail de l'antenne lorsque le rapport d'onde stationnaire (SWR) est $\leq 1,5$; L'autre est la bande passante dans la plage de réduction de gain de l'antenne de 3 décibels. Dans les systèmes de communication mobile, elle est généralement définie selon la première. Plus précisément, la bande passante de l'antenne est la plage de fréquence de fonctionnement de l'antenne lorsque le rapport d'onde stationnaire (SWR) de l'antenne ne dépasse pas 1,5. En général, il y a des différences dans les performances de l'antenne à différents points de fréquence au sein de la bande passante de fréquence de travail, mais la dégradation des performances causée par cette différence est acceptable.[12]

II.3 Types d'antennes

II.3.1 Antennes filaires

Les antennes filaires sont connues du grand public car on les voit presque partout : sur les voitures, les bâtiments, les navires, les avions, les engins spatiaux, etc. Il existe différentes formes d'antennes filaires, comme le fil droit (dipôle), la boucle et l'hélice, qui sont illustrées dans la Figure (II.4). Les antennes en boucle ne doivent pas forcément être circulaires. Ils peuvent avoir la forme d'un rectangle, d'un carré, d'une ellipse ou de toute autre configuration. La boucle circulaire est la plus courante en raison de sa simplicité de construction.

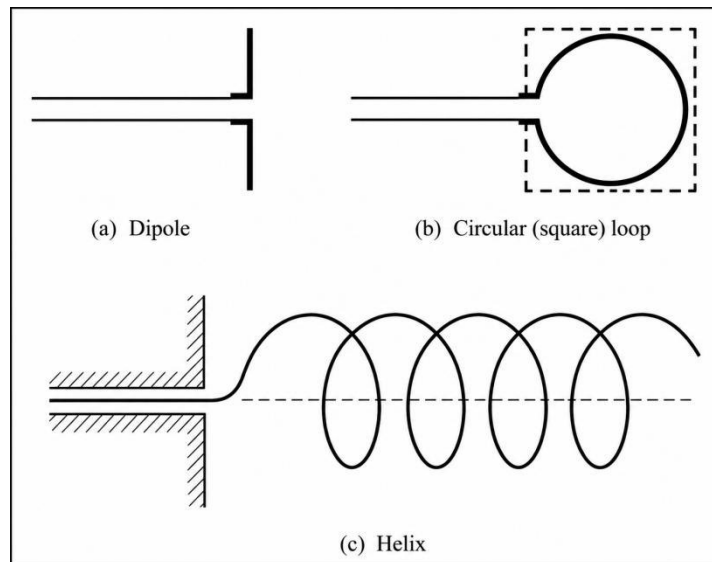


Figure II.4: Configurations d'antennes filaires.

II.3.2 Antennes à ouverture

Les antennes à ouverture sont peut-être plus connues du grand public aujourd'hui qu'auparavant, en raison de la demande croissante pour des formes d'antennes plus sophistiquées et de l'utilisation de fréquences plus élevées. Certaines formes d'antennes à ouverture sont illustrées dans la Figure (II.5). Les antennes de ce type sont très utiles pour les applications aéronautiques et spatiales, car elles peuvent être facilement intégrées à la surface de l'avion ou du vaisseau spatial. De plus, elles peuvent être recouvertes d'un matériau diélectrique pour les protéger des conditions environnementales dangereuses.

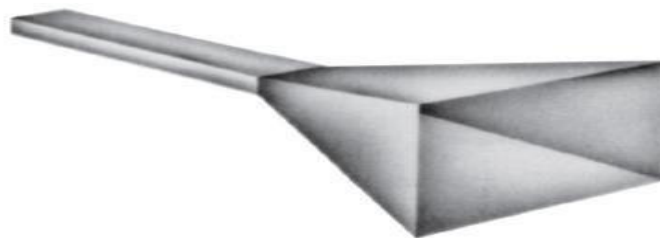


Figure II.5: Configurations d'antennes à ouverture.

II.3.3 Antennes à microbandes

Les antennes micro-ruban sont devenues très populaires dans les années 1970, surtout pour des applications spatiales. Aujourd'hui, elles sont utilisées pour des

applications gouvernementales et commerciales. Ces antennes se composent d'un patch métallique sur un substrat mis à la terre. Le patch métallique peut avoir plusieurs configurations différentes. Cependant, les patches rectangulaires et circulaires, montrés dans la Figure (II.6), sont les plus populaires en raison de leur facilité d'analyse et de fabrication, ainsi que de leurs caractéristiques de rayonnement attrayantes, notamment un faible rayonnement de croisement. Les antennes micro-ruban ont un profil bas, s'adaptent aux surfaces planes et non planes, sont simples et peu coûteuses à fabriquer grâce à la technologie moderne des circuits imprimés, sont mécaniquement robustes lorsqu'elles sont montées sur des surfaces rigides, compatibles avec les conceptions MMIC, et très polyvalentes en termes de fréquence résonante, de polarisation, de motif et d'impédance. Ces antennes peuvent être montées sur la surface d'avions haute performance, de vaisseaux spatiaux, de satellites, de missiles, de voitures, et même d'appareils mobiles.

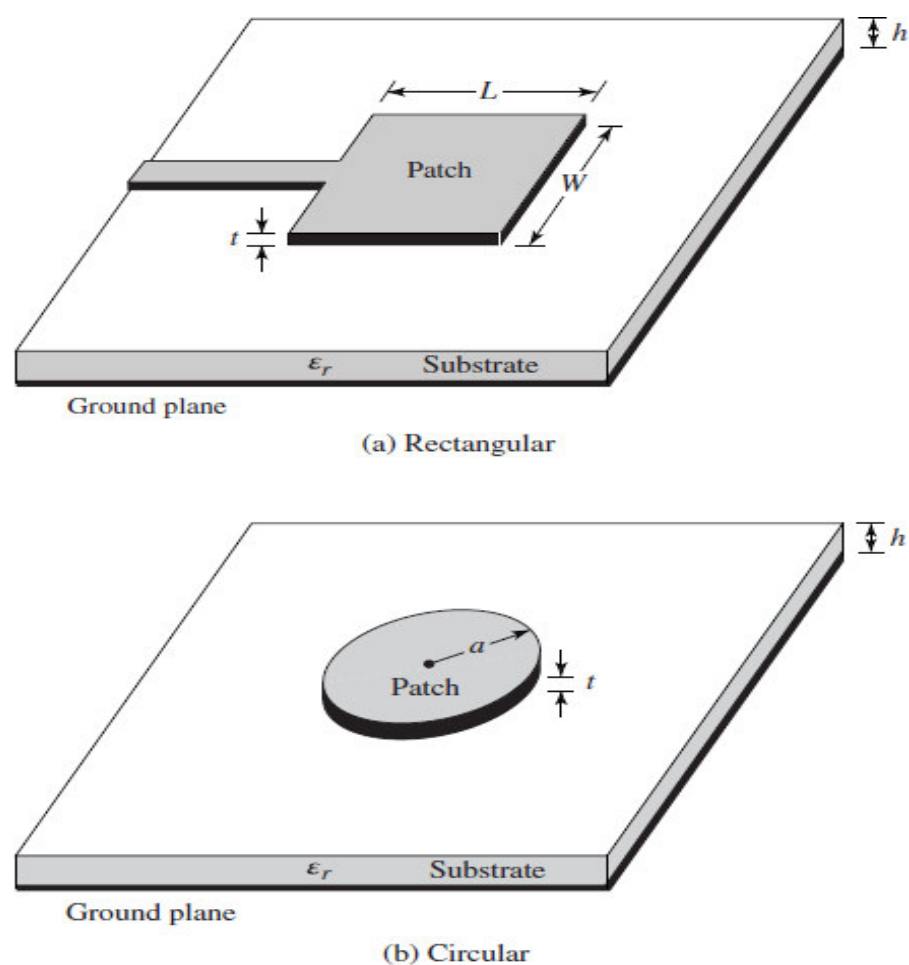


Figure II.6: Antennes micro-ruban rectangulaires et circulaires (patch).

II.3.4 Antennes en réseau

De nombreuses applications nécessitent des caractéristiques de rayonnement qui ne peuvent pas être obtenues par un seul élément. Cependant, il est possible qu'un ensemble d'éléments rayonnants disposés de manière électrique et géométrique (un réseau) puisse donner les caractéristiques de rayonnement souhaitées. L'agencement du réseau peut être tel que le rayonnement des éléments s'additionne pour créer un maximum de rayonnement dans une direction ou plusieurs, un minimum dans d'autres, ou selon d'autres critères souhaités. Des exemples typiques de réseaux sont présentés dans la Figure (II.7). En général, le terme réseau est réservé à un agencement où les radiateurs individuels sont séparés comme montré dans les Figures (II.7 (a–c)). Cependant, le même terme est également utilisé pour décrire un assemblage de radiateurs montés sur une structure continue, illustré dans la Figure (II.7 (d)).

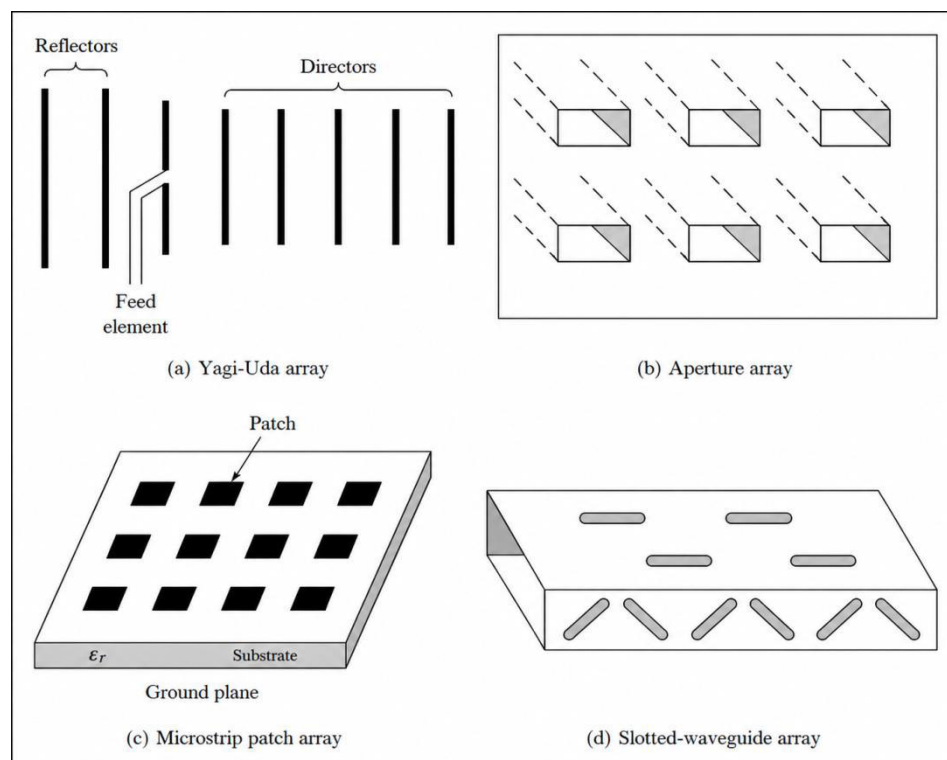


Figure II.7: Configurations typiques de fils, d'ouvertures et d'ensembles de microbandes

II.3.5 Antennes Réflectrices

Le succès de l'exploration de l'espace a conduit à des avancées dans la théorie des

antennes. En raison de la nécessité de communiquer sur de grandes distances, des formes d'antennes sophistiquées ont dû être utilisées pour transmettre et recevoir des signaux devant parcourir des millions de kilomètres. Une forme d'antenne très courante pour ce type d'application est le réflecteur parabolique, illustré dans les Figures (II.8 (a) et (b)). Des antennes de ce type ont été construites avec des diamètres de 305 m ou même plus grands. De telles dimensions sont nécessaires pour atteindre le gain élevé requis pour transmettre ou recevoir des signaux après des millions de kilomètres de voyage. Une autre forme de réflecteur, bien que moins courante que le parabolique, est le réflecteur d'angle, montré dans la Figure (II.8 (c)).

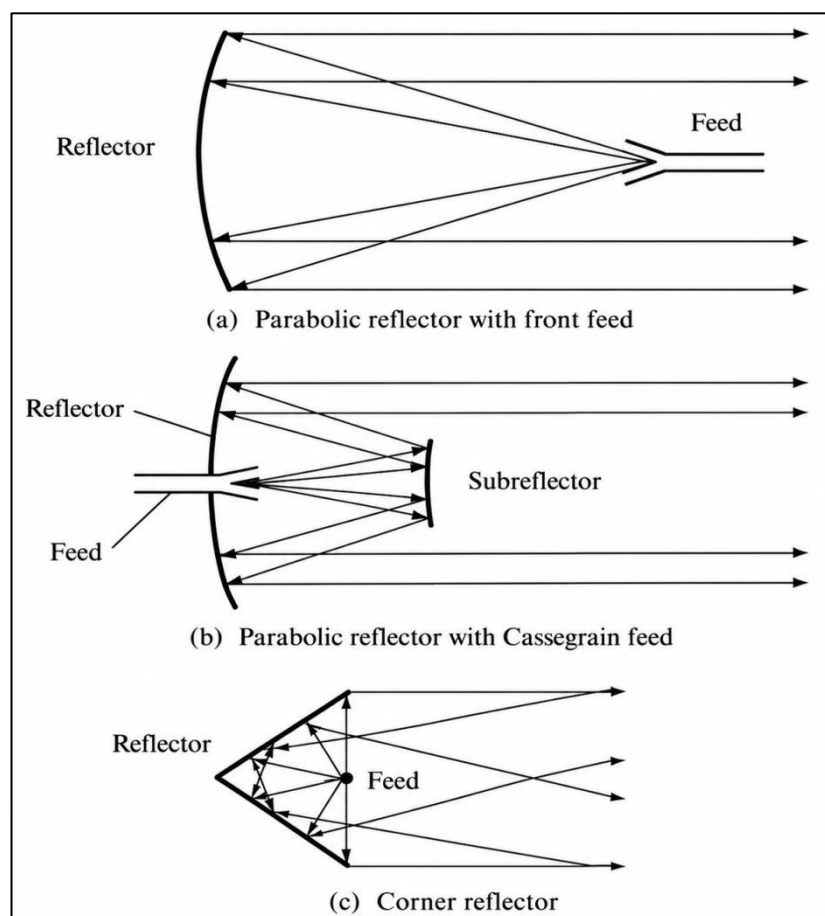


Figure II.8: Configurations typiques de réflecteurs

II.3.6 Antennes de lentille

Les lentilles sont principalement utilisées pour collimater l'énergie divergente incidente afin d'éviter qu'elle ne se propage dans des directions indésirables. En

façonnant correctement la configuration géométrique et en choisissant le matériau approprié des lentilles, elles peuvent transformer diverses formes d'énergie divergente en ondes planes. Elles peuvent être utilisées dans la plupart des mêmes applications que les réflecteurs paraboliques, surtout à des fréquences plus élevées. Leurs dimensions et leur poids deviennent extrêmement grands à des fréquences plus basses. Les antennes à lentilles sont classées selon le matériau dont elles sont fabriquées ou selon leur forme géométrique. Certaines formes sont montrées dans la Figure (II.9).

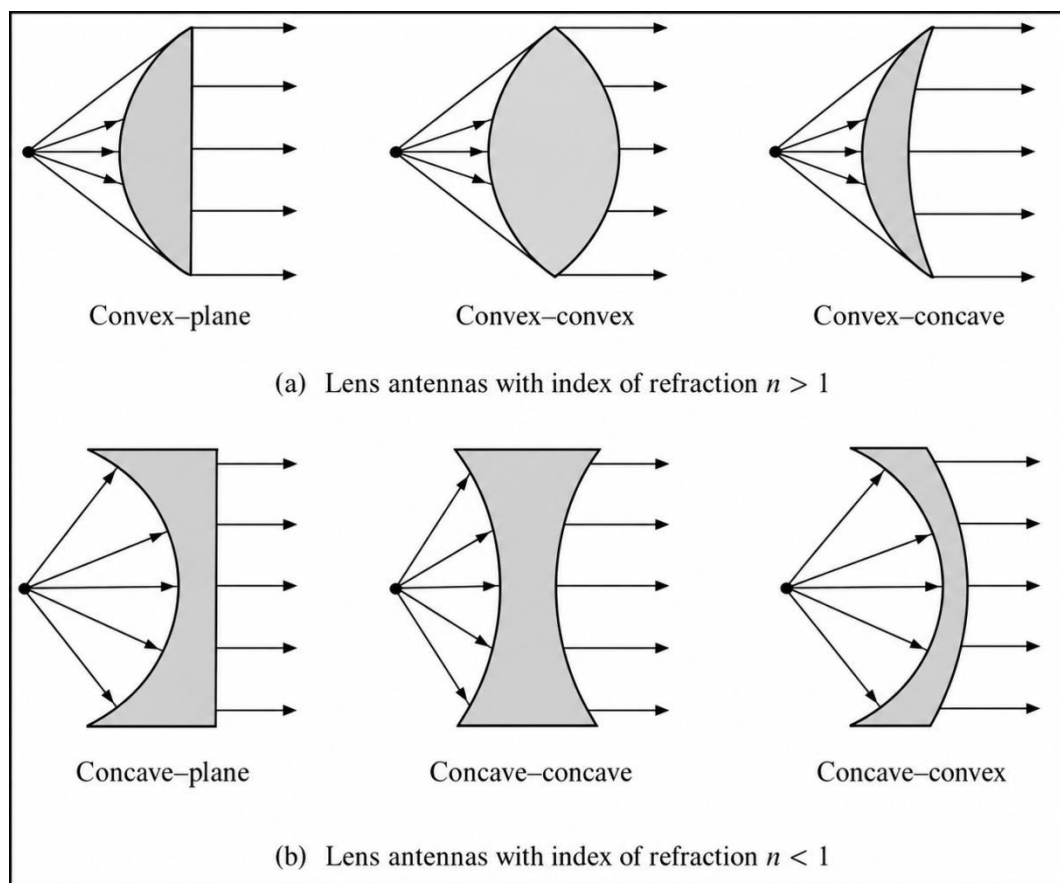


Figure II.9: Configurations typiques d'antennes à lentille

En configurant et en choisissant le bon matériau pour les lentilles, on peut transformer différentes formes d'énergie divergente en ondes planes. Elles peuvent être utilisées dans la plupart des mêmes applications que les réflecteurs paraboliques, surtout à des fréquences plus élevées. Leurs dimensions et leur poids deviennent extrêmement grands à des fréquences plus basses. Les antennes à lentille sont classées selon le matériau dont elles sont faites ou selon leur forme géométrique. Certaines formes sont montrées dans la Figure (II.9). [13]

Chapitre III

Antennes Micro-ruban

III.1 Introduction

L'antenne à patch micro-ruban est un design à une seule couche qui se compose généralement de quatre parties (patch, plan de masse, substrat et partie d'alimentation). L'antenne à patch peut être classée comme une antenne résonante à élément unique. Une fois la fréquence donnée, tout (comme le motif de rayonnement, l'impédance d'entrée, etc.) est fixé. Le patch est une bande métallique rayonnante très fine ($t \ll \lambda_0$, où λ_0 est la longueur d'onde dans le vide) située d'un côté d'un substrat mince non conducteur, le plan de masse étant le même métal situé de l'autre côté du substrat. Le patch métallique est généralement fabriqué en feuille de cuivre mince plaquée avec un métal résistant à la corrosion, tel que l'or, l'étain ou le nickel. De nombreuses formes de patches sont conçues, certaines sont montrées dans la figure (II.1) et la forme la plus populaire est le patch rectangulaire et circulaire.

L'épaisseur de la couche de substrat est de 0,01 à 0,05 de la longueur d'onde dans le vide (λ_0). Elle est principalement utilisée pour fournir un espacement approprié et un support mécanique entre le patch et son plan de masse. Elle est également souvent utilisée avec un matériau à haute constante diélectrique pour charger le patch et réduire sa taille. Le matériau du substrat doit avoir une faible perte d'insertion avec un tangente de perte de moins de 0,005. En général, les matériaux de substrat peuvent être séparés en trois catégories selon la constante diélectrique ϵ_r [13].

- 1) Avoir une constante diélectrique relative ϵ_r dans la plage de 1.0 à 2.0. Ce type de matériau peut être de l'air, de la mousse de polystyrène ou un nid d'abeille diélectrique.
- 2) Avoir ϵ_r dans la plage de 2.0 à 4.0 avec un matériau composé principalement de Teflon renforcé de fibre de verre.
- 3) Avec un ϵ_r entre 4 et 10. Le matériau peut être en céramique, quartz

ou alumine.

Les avantages des antennes micro-ruban sont leur petite taille, leur faible profil et leur légèreté, ce qui leur permet de s'adapter à des surfaces planes et non planes. Elles nécessitent un très petit volume lors du montage. De plus, elles sont simples et peu coûteuses à fabriquer grâce à la technologie moderne des circuits imprimés. Cependant, les antennes à patch présentent des inconvénients. Les principaux inconvénients des antennes micro-ruban sont : une faible efficacité, une bande passante étroite de moins de 5 %, et une faible puissance RF en raison de la petite séparation entre le patch de radiation et le plan de masse (ce qui les rend inadaptées aux applications à haute puissance).

III.2 Types d'antennes à patch

Il existe un grand nombre de formes d'antennes à patch micro-ruban ; elles ont été conçues pour correspondre à des caractéristiques spécifiques. Certains des types courants sont illustrés dans la Figure (III.1). Pour les fréquences des ondes millimétriques, les types les plus courants sont les patches rectangulaires, carrés et circulaires. [14]

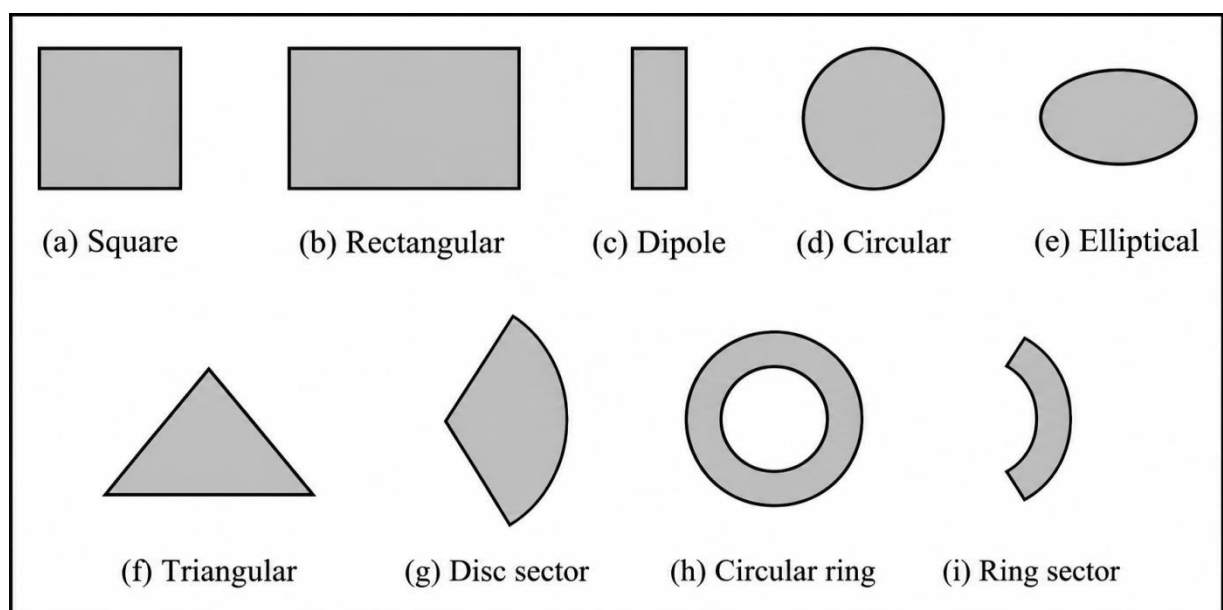


Figure III.1: Formes d'antennes à patch les plus courantes

Il existe de nombreux substrats qui peuvent être utilisés pour la conception d'antennes micro-ruban, et leurs constantes diélectriques se situent généralement dans la plage de $2,2 \leq \epsilon_r \leq 12$. Les substrats les plus souhaitables pour une bonne performance des antennes sont ceux qui sont épais et dont la constante diélectrique est à l'extrémité inférieure de cette plage, car ils offrent une meilleure efficacité, une bande passante plus large, et des champs faiblement liés pour la radiation dans l'espace, mais cela se fait au détriment d'une taille d'élément plus grande. Les substrats fins avec des constantes diélectriques plus élevées sont souhaitables pour les circuits micro-ondes car ils nécessitent des champs étroitement liés pour minimiser la radiation et le couplage indésirables, ce qui conduit à des tailles d'éléments plus petites ; cependant, en raison de leurs pertes plus importantes, ils sont moins efficaces et ont des bandes passantes relativement plus petites. Étant donné que les antennes micro-ruban sont souvent intégrées à d'autres circuits micro-ondes, un compromis doit être trouvé entre une bonne performance de l'antenne et la conception du circuit.

Souvent, les antennes micro-ruban sont également appelées antennes patch. Les éléments rayonnants et les lignes d'alimentation sont généralement photo-gravés sur le substrat diélectrique. Le patch rayonnant peut être carré, rectangulaire, bande fine (dipôle), circulaire, elliptique, triangulaire ou toute autre configuration. Ceux-ci et d'autres sont illustrés dans la Figure (III.1). Les formes carrées, rectangulaires, dipôles (bande) et circulaires sont les plus courantes en raison de la facilité d'analyse et de fabrication, ainsi que de leurs caractéristiques de radiation attrayantes, en particulier la faible radiation de croisement. Les dipôles micro-ruban sont attrayants car ils possèdent intrinsèquement une large bande passante et occupent moins d'espace, ce qui les rend intéressants pour les réseaux.

III.3 Méthodes d'alimentation

Il existe plusieurs façons d'alimenter une antenne micro-ruban. Les méthodes les plus courantes sont : Ligne micro-ruban, couplage de proximité et couplage par ouverture. Comme l'antenne rayonne d'un côté du substrat, il est donc facile de l'alimenter de l'autre côté (le plan de masse), ou du côté de l'élément. La chose la plus

importante à considérer est le transfert maximal de puissance (l'adéquation de la ligne d'alimentation avec l'impédance d'entrée de l'antenne). De nombreux bons designs ont été rejetés à cause de leur mauvaise alimentation. Le concepteur peut créer une antenne avec de bonnes caractéristiques, de bons paramètres de rayonnement et une haute efficacité, mais si l'alimentation est mauvaise, l'efficacité totale peut être réduite à un niveau bas, ce qui fait que tout le système est rejeté.

III.3.1 Alimentation par ligne micro-ruban

Cette méthode d'alimentation est très répandue car elle est simple à concevoir et à analyser, et très facile à fabriquer. Dans ce type, une bande conductrice est reliée directement au bord du patch Micro-ruban comme montré dans la Figure (III.2). Le patch est plus large que la bande conductrice. Ainsi, l'alimentation peut être gravée sur le même substrat pour offrir une structure plane.

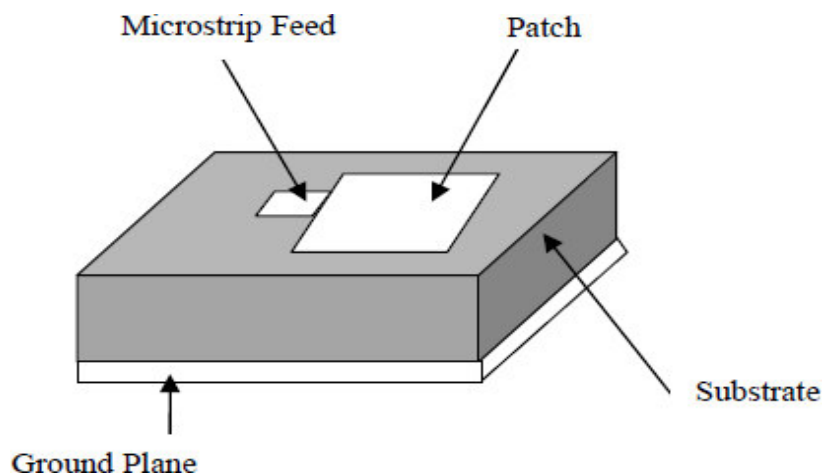


Figure III.2: Alimentation par ligne micro-ruban

Le but de la découpe en retrait dans le patch est d'ajuster l'impédance de la ligne d'alimentation au patch sans avoir besoin d'un élément d'adaptation supplémentaire. Cela peut être réalisé en contrôlant correctement la position du retrait. Donc, c'est un schéma d'alimentation simple, car il facilite la fabrication et la modélisation ainsi que l'adaptation d'impédance. Cependant, à mesure que l'épaisseur du substrat diélectrique utilisé augmente, les ondes de surface et la radiation d'alimentation parasite

augmentent également, ce qui nuit à la bande passante de l'antenne. La radiation d'alimentation entraîne également une radiation croisée non désirée. [15]

III.3.2 Couplage de proximité

Le couplage de proximité utilise deux substrats ϵ_{r1} et ϵ_{r2} . Le patch sera en haut, le plan de masse en bas et une ligne micro-ruban est connectée à la source d'alimentation et se trouve entre les deux substrats comme montré dans la figure (III.3). Ce type est également connu sous le nom de "micro-ruban électromagnétiquement couplé". Le principe de ce mécanisme est que le comportement entre le patch et la ligne de strip feed est capacitif.

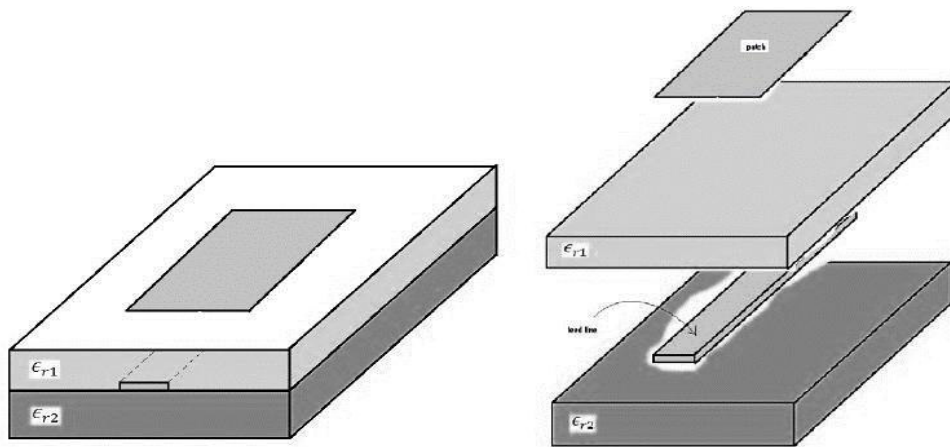


Figure III.3: Méthode d'alimentation par couplage de proximité

L'analyse et la conception d'une telle antenne sont un peu plus compliquées car le concepteur doit prendre en compte l'effet du condensateur de couplage entre la ligne de strip feed et le patch ainsi que le circuit résonant équivalent R-L-C représentant le patch et le calcul des deux substrats. Le condensateur de couplage de cette antenne peut être conçu pour l'adaptation d'impédance de l'antenne.

III.3.3 Couplage d'Aperture

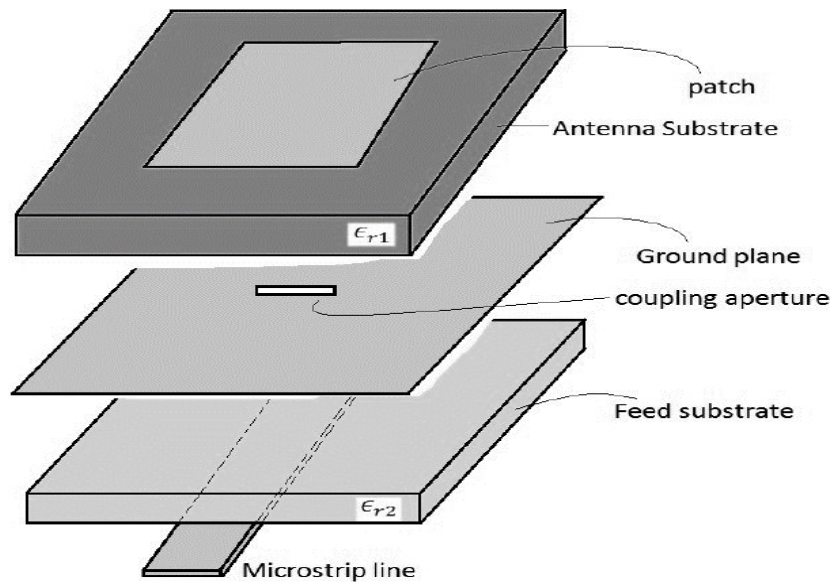


Figure III.4: Méthode d'alimentation par couplage d'ouverture

La figure (III.4) illustre les couches de l'antenne à patch micro-ruban utilisant le mécanisme d'ouverture. Le plan de sol possède une ouverture en forme de cercle ou de rectangle, et sépare deux substrats : le substrat supérieur ϵ_{r1} avec le patch dessus, et le substrat inférieur ϵ_{r2} avec la ligne d'alimentation micro-ruban en dessous. Ce type de couplage offre une bande passante plus large. Une autre caractéristique de ce type est que le rayonnement de la ligne d'alimentation est réduit grâce à l'effet de blindage du plan de sol. Cette fonctionnalité améliore la pureté de polarisation. [16]

Chapitre IV

Réseaux d'antennes

IV.1 Concepts Fondamentaux

Un réseau d'antennes est un ensemble de N antennes séparées spatialement. En gros, un réseau d'antennes est bien meilleur pour recevoir des signaux qu'une seule antenne, ce qui explique leur utilisation répandue dans les applications sans fil. Les réseaux peuvent en pratique avoir aussi peu que $N=2$ éléments, ce qui est courant pour les réseaux de réception sur les tours de téléphonie mobile. En général, la performance d'un réseau s'améliore avec l'ajout d'éléments ; donc, en pratique, les réseaux ont généralement plus d'éléments. Certains réseaux peuvent avoir plusieurs milliers d'éléments. Le réseau a la capacité de filtrer l'environnement électromagnétique dans lequel il fonctionne en fonction de la variation spatiale des signaux présents. Il peut y avoir un signal d'intérêt ou plusieurs, ainsi que du bruit et des signaux d'interférence.

IV.1.1 Caractéristiques de l'antenne

Tout au long de cette dissertation, un système de coordonnées cartésiennes avec des étiquettes d'axes x , y et z sera utilisé, ainsi que des coordonnées sphériques θ (angle polaire variant de 0 à π , mesuré par rapport à l'axe z) et φ (angle azimutal variant de 0 à 2π , mesuré par rapport à l'axe x). Les coordonnées sont illustrées dans la Figure (IV.1). Une antenne physique a un motif de rayonnement qui varie selon la direction. Par réciprocité, le motif de rayonnement est identique à celui de la réception de l'antenne, donc les deux peuvent être discutés de manière interchangeable. Le motif de rayonnement est également une fonction de la fréquence ; cependant, sauf indication contraire, on supposera qu'une seule fréquence est d'intérêt (décrite par la longueur d'onde correspondante λ). Le motif de rayonnement prend différentes formes selon la distance d'observation par rapport à l'antenne – ces régions, par ordre croissant de distance de l'antenne, sont communément appelées la région réactive proche du champ, la région proche du champ rayonnant (Fresnel) et la région lointaine

(Fraunhofer). Pour une antenne de longueur maximale D , la région lointaine se produit lorsque les deux conditions suivantes sont remplies :

$$R > \frac{2D^2}{\lambda} \quad (4.1)$$

$$R \gg \lambda$$

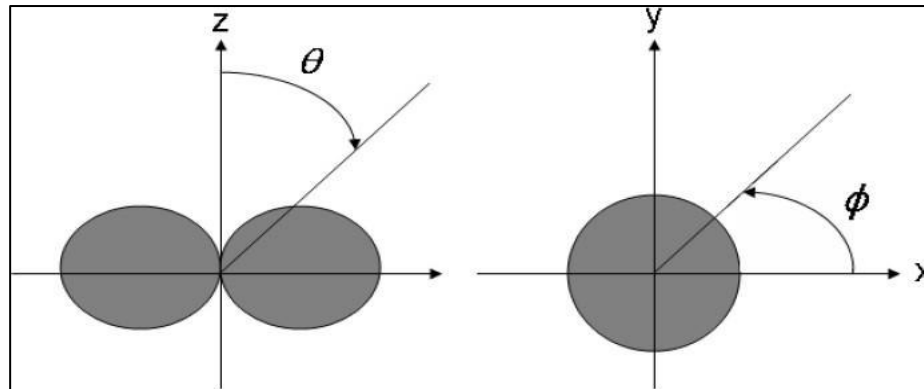
Pour un téléphone cellulaire moderne fonctionnant à 1,9 GHz avec une longueur d'antenne d'environ $D=4$ cm, les deux inégalités sont satisfaites pour $R > 2$ mètres. En pratique, les antennes communiquent dans la région de champ lointain, et cela est supposé tout au long. Le champ radié de zone lointaine d'une antenne sera décrit par la fonction $F(R, \theta, \phi)$. Par exemple, le champ de zone lointaine émis par un dipôle court de longueur L avec un courant uniforme I est donné par [16]:

$$F(R, \theta, \phi) = \frac{jIL\eta_0 e^{-jkR}}{2R} \sin \theta \quad (4.2)$$

Où $j = \sqrt{-1}$, η_0 représente l'impédance de l'espace libre, et $k = 2\pi / \lambda$ est le nombre d'onde. Le motif de champ normalisé sera souvent d'un grand intérêt dans ce travail. Cette fonction, notée $f(\theta, \phi)$, décrit la variation angulaire du motif de réception de l'antenne. Pour le dipôle court, le motif de champ normalisé s'exprime comme

$$f(\theta, \phi) = \sin \theta \quad (4.3)$$

Ce modèle de champ est représenté dans la Figure (IV.1). L'axe horizontal de la Figure (IV.1(a)) peut être l'axe des x ou des y ; en raison de la symétrie, le modèle d'élévation ne changera pas. La directivité (ou directivité maximale) est un paramètre essentiel des antennes qui indique à quel point une antenne est plus directionnelle par rapport à une source de référence, généralement un radiateur isotrope. Une antenne ayant une directivité de 1 (ou 0 dB) serait une source isotrope ; toutes les antennes réelles présentent une directivité supérieure à cela. Plus la directivité est élevée, plus le motif de l'antenne sera pointu ou directionnel.



(a) Modèle d'Élévation

(b) Modèle Azimutal

Figure IV.1 : Dipôle court

Les antennes sont également décrites par leur polarisation. La polarisation d'une antenne correspond à celle de ses champs rayonnés. La polarisation du champ rayonné est la forme que prend le champ électrique à un endroit fixe dans l'espace en fonction du temps. Les polarisation courantes sont la polarisation linéaire, elliptique et circulaire. La polarisation de l'antenne dipôle court est linéaire. Si une antenne essaie de capter un signal d'une onde électromagnétique, elle doit être adaptée à la polarisation de l'onde qui arrive. Si l'onde n'est pas compatible avec l'antenne, une partie ou la totalité de l'énergie ne sera pas détectée par l'antenne. [13]

IV.1.2 Communication sans fil

Le but principal des systèmes d'antenne est la communication ; cependant, ils sont également utilisés pour la détection. Les informations à transmettre ou à recevoir seront représentées par $m(t)$. On supposera que le message $m(t)$ est limité en bande, ce qui signifie que presque toute l'énergie a un contenu de fréquence en dessous de B Hz. Dans les débuts de la radio, $m(t)$ avait les informations codées directement dans l'amplitude ou la fréquence du signal (comme dans la radio AM ou FM). Aujourd'hui, les informations sont principalement encodées sous forme numérique, et $m(t)$ est un train d'un ensemble discret de symboles représentant des 1 et des 0. Les informations sont toujours encodées dans l'amplitude et la phase de ces symboles ; cependant, les amplitudes et les phases prennent maintenant un ensemble discret de valeurs. Dans la forme la plus basique de communication numérique, le décalage de phase binaire

(BPSK), $m(t)$ est soit +1 soit -1 (représentant un 1 ou un 0), de sorte que les informations sont encodées dans la phase. Notez que $m(t)$ peut être complexe, où la partie réelle représente la composante en phase du signal et la partie imaginaire correspond à la composante en quadrature. La communication numérique est utilisée en raison de son taux de données élevé, de sa probabilité d'erreur inférieure à celle de la communication analogique (avec des codes de correction d'erreurs), de sa haute efficacité spectrale et de sa haute efficacité énergétique [18]. Le message $m(t)$ est ensuite modulé jusqu'à la fréquence utilisée par le système d'antenne. Le signal transmis $s(t)$ est donné par

$$s(t) = m(t)e^{j2\pi f_c t} \quad (4.4)$$

Où f_c est la fréquence porteuse (ou centrale) utilisée par le système d'antenne. Il est à noter qu'en général $B \ll f_c$. En général, l'énergie se situe alors dans le spectre de fréquence dans une bande très étroite autour de f_c , de sorte que le signal transmis est considéré comme une onde plane monochromatique. Si le signal est suffisamment large en bande passante pour que l'hypothèse de bande étroite ne puisse pas être appliquée, le signal peut être traité en le filtrant en bandes étroites distinctes et en traitant chacune séparément. Dans le champ lointain, le signal à bande étroite aura les caractéristiques d'une onde plane monochromatique. Supposons que l'onde se déplace dans la direction définie par (θ, ϕ) par rapport à un point de référence (par exemple, une antenne réceptrice).

Le vecteur d'onde $\mathbf{k}$ est défini pour représenter l'ampleur des changements de phase le long des directions x , y et z :

$$\mathbf{k} = (k_x, k_y, k_z) = \frac{2\pi}{\lambda} (\sin \theta \cos \phi, \sin \theta \sin \phi, \cos \theta) \quad (4.5)$$

Les processeurs de signaux numériques qui fonctionnent avec une seule antenne ne peuvent traiter que des signaux en fonction de leur variation dans le temps. Les filtres espace-temps traitent les signaux en tenant compte de leur variation spatiale et temporelle. Pour effectuer un filtrage spatial, il est nécessaire d'avoir un réseau de capteurs. [19]

IV.1.3 Réseaux d'antennes

La configuration de base d'un réseau d'antennes arbitraire est illustrée dans la Figure (IV.2). La position de l'élément d'antenne n^{th} est décrite par le vecteur d_n , où

$$d_n = [x_n \quad y_n \quad z_n] \quad (4.6)$$

L'ensemble des emplacements d'une antenne à N éléments sera décrit par la matrice D de dimension N par 3, où :

$$D = \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ \vdots \\ d_N \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

Lorsque le tableau est linéaire (par exemple, tous les éléments placés le long de l'axe z), la matrice D peut être simplifiée en un vecteur.

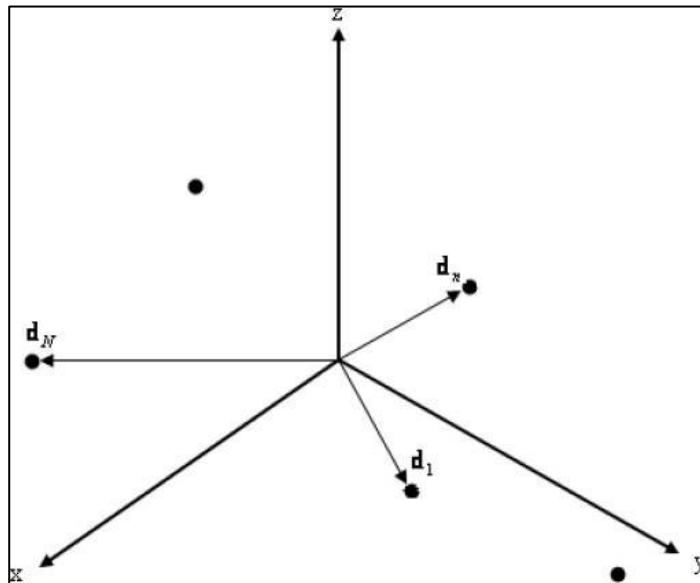


Figure IV.2 : Géométrie d'antenne arbitraire

Soit la sortie de l'antenne n^{th} à un moment donné notée X_n . Ensuite, la sortie de l'antenne n est pondérée (par w_n) et additionnée pour produire la sortie de l'antenne en réseau, Y , comme illustré dans la Figure (IV.3). La sortie du réseau peut être exprimée comme

$$Y = \sum_{n=1}^N w_n X_n \quad (4.8)$$

Définir :

$$X = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \vdots \\ X_N \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

Et :

$$W = \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_N \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

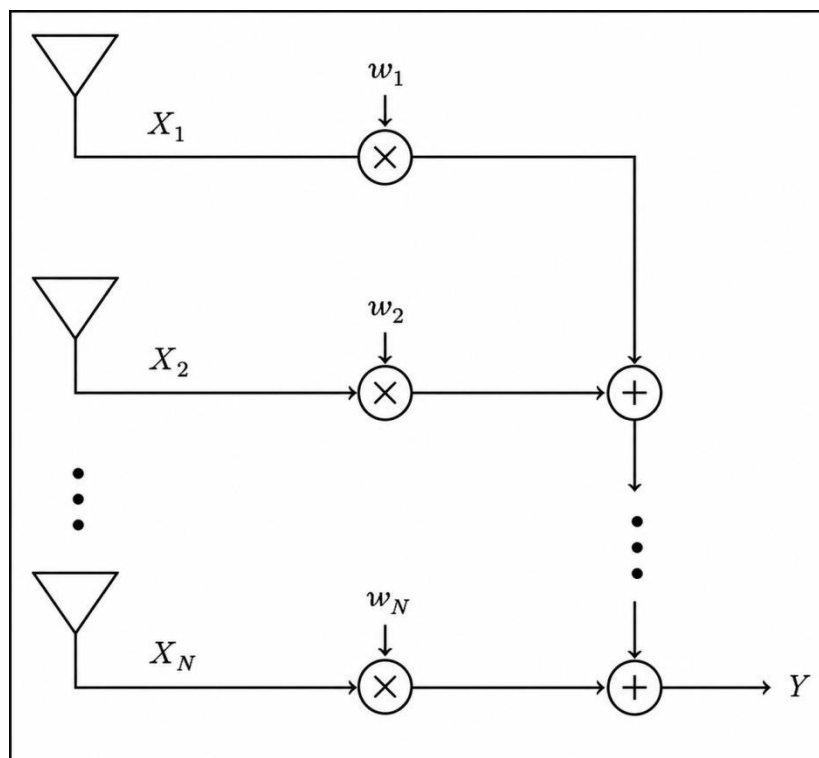


Figure IV.3 : Traitement spatial des signaux d'antenne en réseau

IV.1.4 Traitement spatial avec des réseaux d'antennes

Supposons que le signal transmis, donné par (1.9), arrive sur un réseau d'antennes de N éléments. La forme de champ normalisée pour chaque antenne est décrite comme une fonction du vecteur d'onde ($\mathbf{k}$) et est représentée par $f(\mathbf{k})$. La sortie du réseau est alors :

$$y(t) = \sum_{n=1}^N w_n s(t) e^{-j\mathbf{k} \cdot \mathbf{d}_n} f(\mathbf{k}) \quad (4.11)$$

Si les éléments sont identiques, (1.16) se simplifie en :

$$y(t) = s(t) f(\mathbf{k}) \left(\sum_{n=1}^N w_n e^{-j\mathbf{k} \cdot \mathbf{d}_n} \right) \quad (4.12)$$

La quantité entre parenthèses est appelée le facteur de l'array (AF). Donc, la sortie est proportionnelle au signal transmis, multiplié par le facteur d'élément et le facteur de l'array. Ce calcul est souvent désigné sous le nom de multiplication de motif, et il est valable pour les arrays avec des éléments identiques orientés dans la même direction. Une forme très générale pour le résultat d'un tableau est lorsque G signaux incidents (avec des vecteurs d'onde k_i , $i = 1, 2, \dots, G$) arrivent sur N antennes avec des motifs distincts (définis par $f_i(\mathbf{k})$, $i = 1, 2, \dots, N$). Le facteur du réseau unidimensionnel dépend uniquement de l'angle polaire. Donc, le réseau peut filtrer les signaux selon leur angle polaire θ , mais il ne peut pas faire la différence entre les signaux arrivant selon l'angle azimutal ϕ .

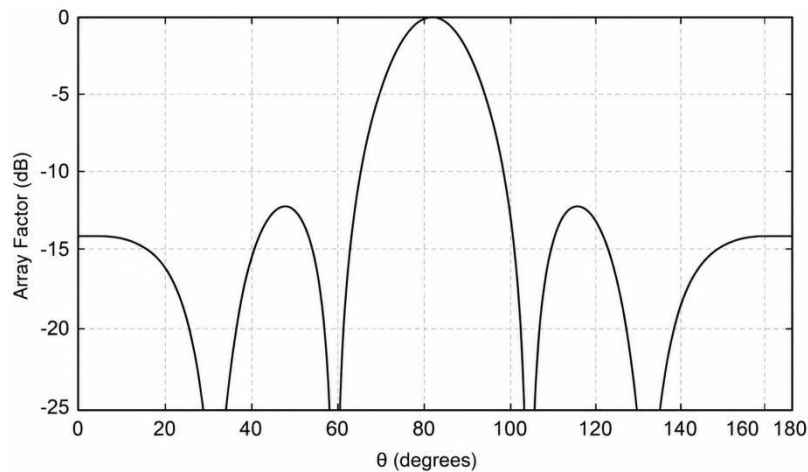


Figure IV.4 : Magnitude du facteur de réseau pour $N=5$ éléments.

L'amplitude du facteur d'antenne est représentée dans la Figure (IV.4) pour un réseau avec $N=5$ éléments, normalisée de sorte que le pic du facteur d'antenne soit égal à l'unité ou 0 dB. L'amplitude du facteur d'antenne indique que le réseau recevra (ou transmettra) l'énergie maximale lorsque $\theta = 90^\circ$. La manipulation des poids permettra d'adapter le facteur d'antenne à un motif souhaité. De plus, la réponse du facteur d'antenne est fortement influencée par la géométrie spécifique (D) utilisée. Le choix des poids est un problème plus simple, car le facteur d'antenne est une fonction linéaire des poids. En revanche, le facteur d'antenne est une fonction beaucoup plus compliquée des positions des éléments ; par conséquent, l'optimisation de la géométrie du réseau est hautement non linéaire et exponentiellement plus difficile.

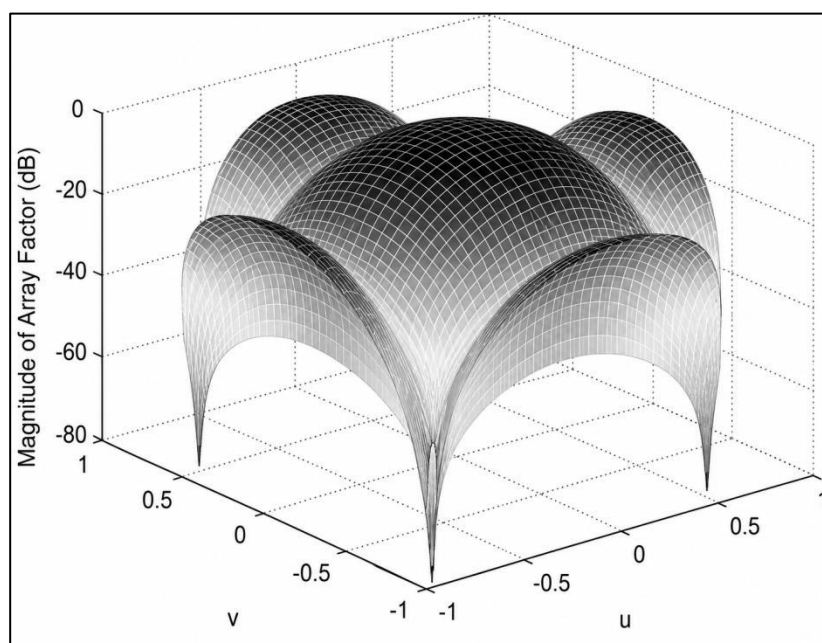


Figure IV.5 : Magnitude (dB) du facteur de réseau d'antenne en 2D

La directivité peut être calculée pour un facteur d'antenne de la même manière que pour une antenne. De plus, les paramètres importants des facteurs de réseau incluent la largeur de faisceau et le niveau des lobes secondaires. La largeur de faisceau est généralement spécifiée comme la largeur de faisceau null-à-null ou la largeur de faisceau à moitié puissance. La largeur de faisceau null-à-null est la distance en degrés entre les premiers nulls autour du faisceau principal. La largeur de faisceau à moitié

puissance est la distance en degrés entre les points à moitié puissance (ou 3 dB en dessous du facteur de réseau) autour du faisceau principal. Le niveau des lobes secondaires est généralement spécifié comme la valeur maximale du facteur de réseau en dehors du faisceau principal. L'amplitude du facteur de l'array est représentée dans la Figure (IV.5). Les lobes secondaires sont à 9,54 dB en dessous du lobe principal (qui est normalisé à 0 dB dans la figure). Les largeurs de faisceau sont plus difficiles à définir lorsque le facteur d'antenne est en deux dimensions. En général, les largeurs de faisceau sont spécifiées dans certains plans (par exemple, les plans d'élévation et d'azimut) et données en demi-puissance ou de nul à nul, comme dans le cas unidimensionnel. Le niveau des lobes secondaires est à nouveau la valeur maximale du facteur d'antenne en dehors du faisceau principal.

IV.1.5 Aliasage

Le vecteur de direction ($\mathbf{v}$) est le vecteur des délais de propagation (ou des changements de phase) à travers un réseau pour un vecteur d'onde donné, $\mathbf{k}$. Il peut être exprimé mathématiquement comme

$$\mathbf{v}(\mathbf{k}) = \begin{bmatrix} e^{-j\mathbf{k} \cdot \mathbf{d}_1} \\ e^{-j\mathbf{k} \cdot \mathbf{d}_2} \\ \vdots \\ e^{-j\mathbf{k} \cdot \mathbf{d}_N} \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

L'aliasing se produit lorsque des signaux se propageant dans des directions distinctes produisent les mêmes vecteurs de direction. Dans ce cas, la réponse de l'antenne aux deux directions sera identique, ce qui empêche l'antenne de distinguer les deux directions. C'est similaire à la version du traitement du signal de l'aliasing, où si la fréquence d'échantillonnage est trop faible dans le temps, alors des fréquences distinctes ne peuvent pas être résolues. Pour les réseaux linéaires uniformément espacés, il existera des ondes planes provenant de directions distinctes avec des vecteurs de direction identiques si l'espacement entre les éléments, Δ , est supérieur à $\lambda/2$. De même, pour les réseaux rectangulaires uniformément espacés avec des éléments dans le plan x-y, il existera des directions distinctes avec des vecteurs de direction identiques si l'espacement des éléments dans les directions x ou y est

supérieur à $\lambda/2$. Lorsque l'aliasing existe, le faisceau principal peut être reproduit ailleurs dans le motif. Ces faisceaux reproduits sont appelés lobes de grille. Pour les réseaux sans structure uniforme, la distance entre les éléments peut être beaucoup plus grande que $\lambda/2$ sans introduire d'aliasing. Dans ce cas, aucun des deux angles d'arrivée distincts ne produira de vecteurs de direction identiques. Cependant, bien que l'aliasing ne se produise techniquement pas, il peut exister des vecteurs de direction très similaires, de sorte que des lobes de grille existent. Déterminer si cela se produit pour un réseau arbitraire est très difficile. En général, si un réseau non uniforme est choisi, le facteur de réseau peut être vérifié pour s'assurer que des lobes de grille ne se produisent pas.

IV.2 Tableau à deux éléments

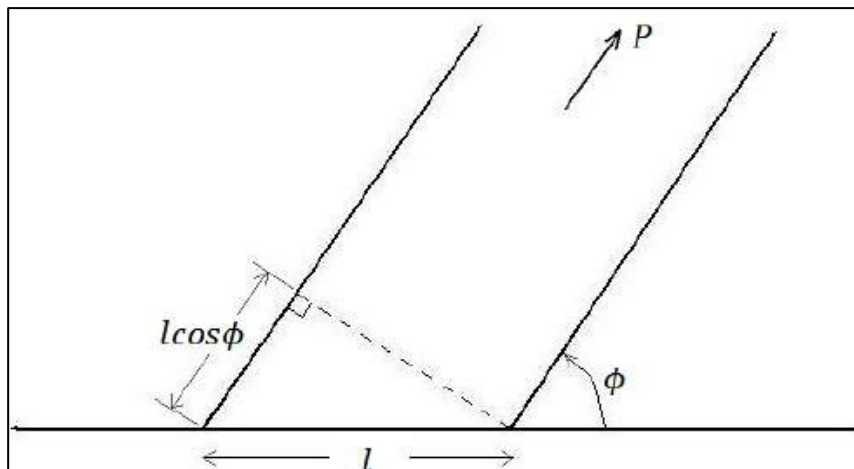


Figure IV.6 : Tableau à deux éléments

Supposons deux éléments d'antenne pour créer un réseau comme dans la Figure (IV.6) ci-dessus. Les deux éléments sont alimentés par des courants I_1 et I_2 . I_1 et I_2 ont la même intensité mais sont déphasés : Le point d'observation se trouve dans le champ lointain, la différence de longueur de chemin est $l \cos \alpha$ où l représente la distance entre les deux éléments. Le champ total au point P est :

$$E = E_1[1 + \exp(j\psi)] \quad (4.14)$$

Où E_1 est le champ en P causé par l'élément 1.

IV.3 Tableau Linéaire

Nous avons étudié un tableau simple composé de deux éléments. Maintenant, si nous ajoutons plus d'éléments à notre tableau de deux éléments, nous construisons un tableau linéaire, Figure (IV.7).

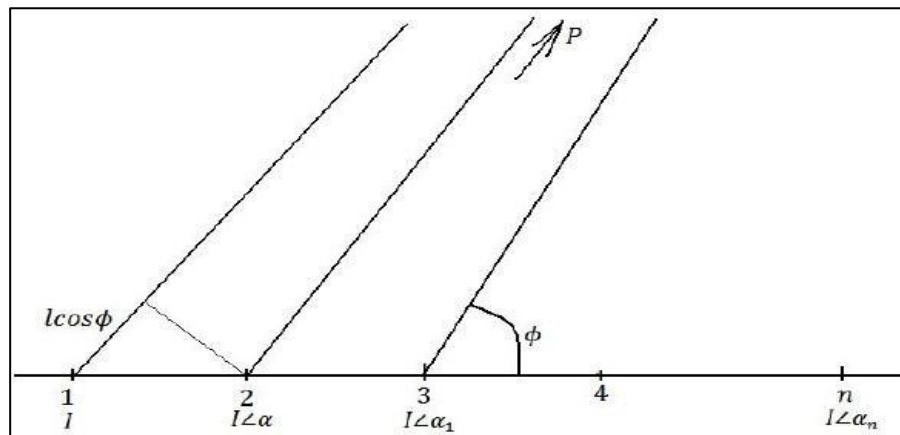


Figure IV.7: Réseau linéaire uniforme de n éléments

Nous pouvons désormais positionner le maximum comme nous le souhaitons en choisissant correctement α [12]. La phase de chaque élément de ce réseau peut être contrôlée par un déphaseur, et l'amplitude des éléments est ajustée par un amplificateur ou un atténuateur. [14]

IV.4 Tableau Circulaire

Le tableau circulaire constitue une configuration largement utilisée dans les réseaux d'antennes phasés. Cette géométrie est également employée dans les systèmes modernes de balises micro-ondes en raison de ses performances directionnelles. Dans cette structure, les éléments rayonnants sont disposés de manière uniforme sur une circonférence donnée. Chaque antenne occupe une position angulaire précise autour du centre du réseau. Cette disposition permet d'obtenir une couverture angulaire plus homogène par rapport aux configurations linéaires. Elle offre aussi une meilleure flexibilité dans le contrôle du diagramme de rayonnement. Le nombre d'éléments constituant le réseau peut varier selon l'application considérée. Une augmentation du nombre d'éléments améliore généralement la directivité et la résolution du faisceau. [20]

S Partie de **Simulation**

Chapter 5 : Conception d'Antennes Micro-ruban RLSF à Base des RNA

Dans cette partie, différentes configurations d'antennes micro-ruban sont développées spécialement pour servir l'application de Wi-Fi et de WiMAX autour de 5GHz. Les structure ont été conçues et analysées à l'aide du logiciel SSHF (Simulateur de Structures à Hautes Fréquences) basée sur la technique de RNA (Réseaux de Neurones Artificiels). Un époxy en verre FR4 avec une permittivité relative de 4,4 et d'épaisseur de 0.8mm et 1.6mm est utilisé comme matériau de substrat pour permettre la réalisation de l'antenne après. L'objectif est d'obtenir une excellente réponse électromagnétique pour ces applications sans fil.

Chapitre V

Conception d'Antennes Micro-ruban RLSF à Base des RNA

V.1 Introduction

Une antenne est un conducteur électrique ou un système de conducteurs, ou une combinaison de systèmes diélectriques et conducteurs, capable de rayonner de l'énergie électromagnétique dans l'espace et de recevoir des radiations électromagnétiques de l'espace. Les antennes sont l'unité de base et la plus importante dans presque toutes les applications sans fil.

Les antennes patch sont largement utilisées dans les systèmes de communication sans fil modernes en raison de leur légèreté, de leur gain élevé, de leur faible profil, de leur coût réduit et de leur facilité de fabrication. Il existe plusieurs substrats que nous pouvons utiliser pour concevoir une antenne micro-ruban. Par exemple, l'alumine, le FR4, le RT-duroid, le Rogers, etc., dont les constantes diélectriques varient entre 2,2 et 12.

Pour obtenir de bonnes performances d'antenne, un substrat avec une faible constante diélectrique est généralement nécessaire afin d'assurer une meilleure efficacité. La méthode de ligne d'alimentation micro-ruban est utilisée pour alimenter l'antenne patch en raison de sa capacité à adapter l'impédance d'entrée. Les antennes micro-ruban sont principalement utilisées dans les systèmes de communication sans fil comme dans les réseaux locaux, mobiles, satellitaires, par radar, GPS, etc.

Dans cette partie de simulation, une antenne micro-ruban en patch rectangulaire est conçue pour une application Wi-Fi à 3,4GHz et Wi-Max à 5.4GHz sous SSHF à base de RNA. Cette méthode de modélisation est une passerelle intuitive pour faciliter l'optimisation à l'aide d'un moteur de résolution de champ avec des solutions adaptatives précises en matière de performances électromagnétiques. Les résultats sont calculés et générés par l'environnement de simulation qui permet également

l'importation de modèles entraînés utilisés pour l'analyse et le développement en termes de la perte de retour, le gain, le rayonnement, la directivité, la distribution de champ, etc. En comparant les résultats obtenus avec ceux des différentes formes qui existent dans la littérature, ils relèvent performants et optimisés.

V.2 Modélisation RNA pour la conception d'antennes micro-ruban

V.2.1 Importance des RNA à la conception des antennes

Les RNA se sont imposés comme des outils puissants dans le domaine de la conception d'antennes, offrant des alternatives efficaces aux approches traditionnelles basées sur la simulation. La conception d'antennes est par nature un problème complexe, non linéaire et multiparamétrique, impliquant un large éventail de variables telles que la géométrie, les matériaux, la réponse en fréquence, la bande passante, le gain et les diagrammes de rayonnement. Les méthodes traditionnelles, comme les simulations électromagnétiques complètes, bien que précises, sont souvent gourmandes en ressources de calcul et chronophages, en particulier lorsque plusieurs itérations de conception sont nécessaires.

Les RNA relèvent ces défis en apprenant les relations complexes entre les paramètres de conception d'entrée et les indicateurs de performance de sortie à partir de données de simulation ou de mesure existantes. Une fois entraîné, le modèle RNA peut prédire les caractéristiques d'une antenne essentiellement la fréquence de résonance en fonction des pertes de retour. Le RNA suggère des paramètres de conception optimaux avec une grande rapidité et précision. Ceci réduit le besoin de simulations répétées et permet également une analyse en temps réel et une exploration intelligente de la conception. Le RNA améliore effectivement le processus de conception de l'antenne en permettant la conception inverse, l'analyse de tolérance et la prédiction des performances dans diverses conditions.

V.2.2 Topologie du Modèle de RNA

L'architecture du RNA [23] s'adapte à la complexité de la structure de l'antenne, en prenant en compte le nombre de couches masquées, les fonctions d'activation et les schémas de connectivité neuronale. Le vecteur d'entrée est défini par $x = [x_1, x_2, x_3, x_4, x_5]$ correspondant aux paramètres géométriques de la structure DGS

(Defected Ground Structure) intégrée à la conception initiale, complétée par la fréquence opérationnelle. Le vecteur de sortie $y = [y_1, y_2]$ capture quant à lui les composantes réelles et imaginaires des paramètres S_{11} . Le modèle intègre cinq couches cachées denses associant les fonctions d'activation non linéaires ReLU (Rectified Linear Unit).

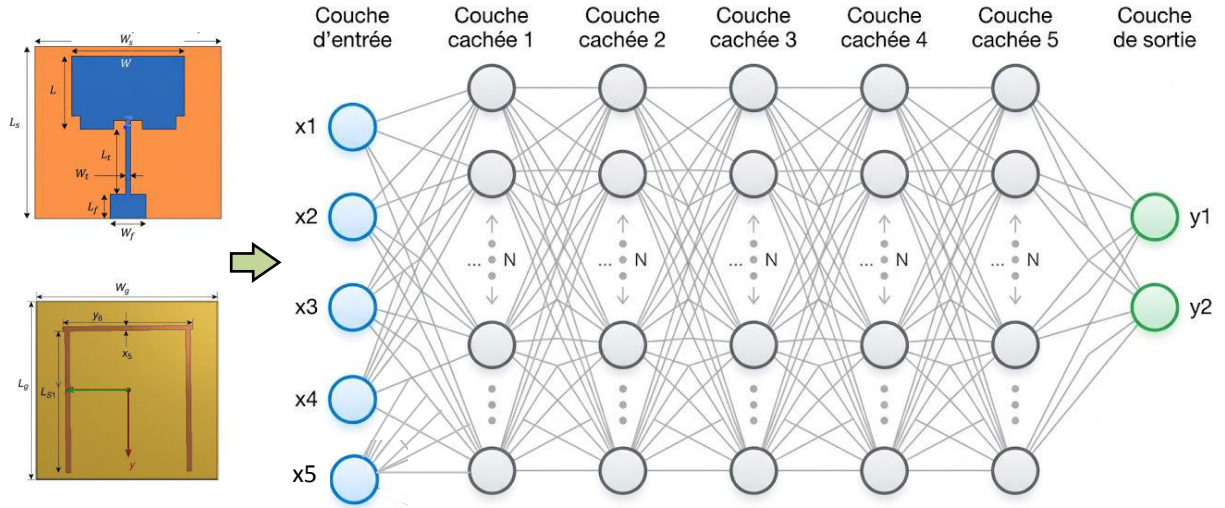


Figure V-1 : Architecture du RNA développé

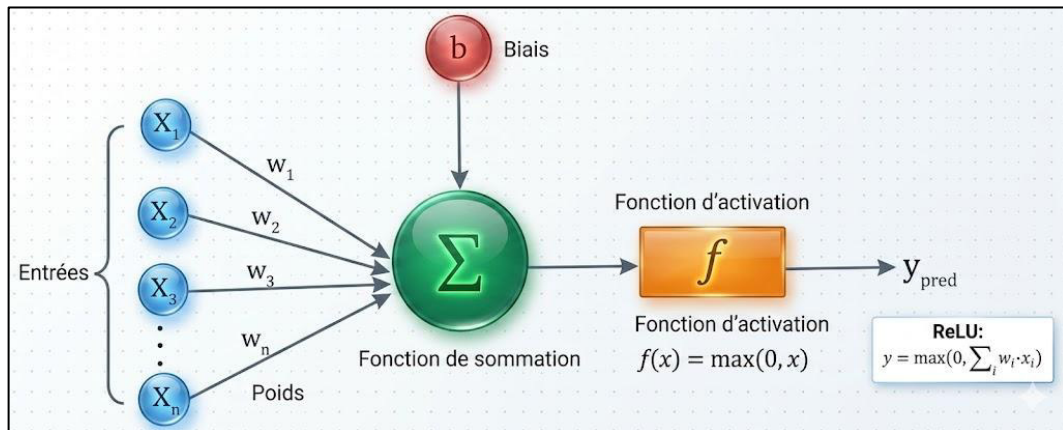


Figure V-2 : Structure d'un modèle de RNA à neurone unique

Au sein de chaque neurone, les valeurs d'entrée subissent une multiplication par des poids synaptiques (w) ajustables, auxquels s'ajoute un terme de biais (b). La fonction d'activation ReLU applique l'opération $\max(0, x)$ afin de conserver les valeurs positives inchangées et d'annuler les valeurs négatives, ce qui introduit la non-linéarité essentielle pour appréhender le comportement de l'antenne. Le processus de rétro-propagation évalue l'erreur via une fonction de coût d'erreur quadratique moyenne

(EQM), puis calcule les gradients par rapport aux poids et biais à l'aide de la règle de dérivation en chaîne, permettant à un optimiseur avancé (Adam) de mettre à jour dynamiquement les paramètres internes du modèle.

Finalement, à l'issue des 100 époques de la boucle d'apprentissage, l'erreur absolue moyenne (EAM) calculée de façon rigoureuse sur l'ensemble de test se stabilise à la valeur infime de 0.05, confirmant formellement l'extrême précision algorithmique du modèle développé. Cette concordance parfaite valide la capacité du réseau à appréhender finement la physique électromagnétique du design d'antenne proposé et confirme sa fiabilité absolue pour remplacer avantageusement des processus de simulation lourds.

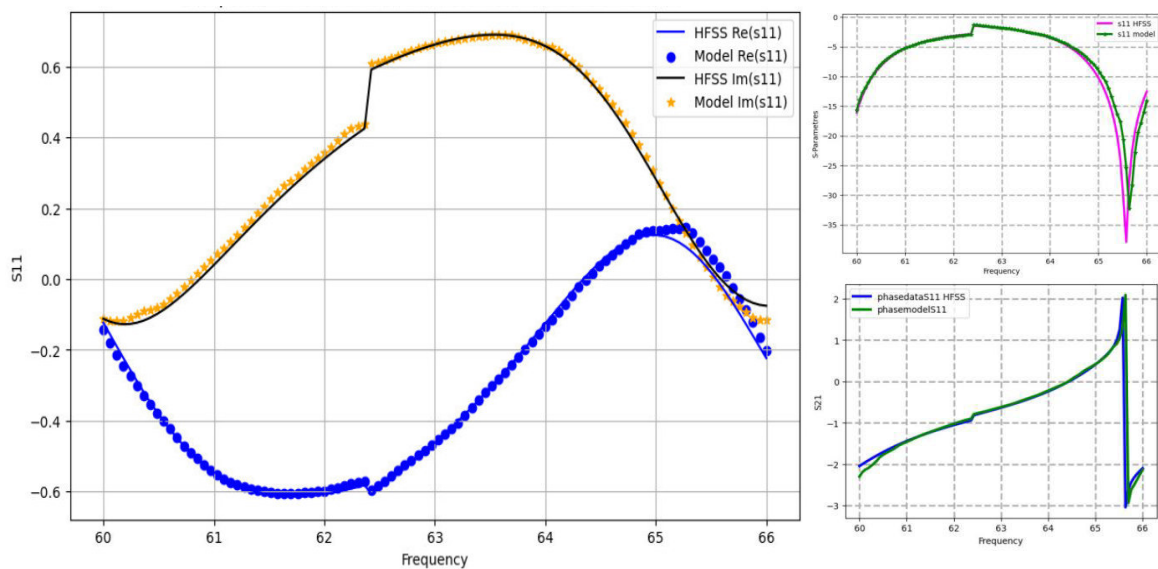


Figure V-3 : Comparaison entre le coefficient de réflexion prédit et simulé

La Figure (3.10) met clairement en évidence la correspondance optimale entre les parties réelles et imaginaires du paramètre du S_{11} issues des simulations SSHF et celles prédites par le modèle de RNA développé. De plus, l'évolution de l'amplitude du paramètre S_{11} en fonction de la fréquence. La superposition étroite entre les valeurs de référence et les prédictions du modèle confirme la haute précision de l'approche neuronale. La phase du paramètre S_{11} prédite par le modèle RNA concorde parfaitement avec les valeurs cibles simulées. Cette validation, effectuée sur le même vecteur de test, démontre la robustesse et la fiabilité du modèle développé pour prédire le comportement du dispositif.

V.3 Conception de l'Antenne pour les RLSF

L'outil de modélisation complémentaire a été encore exploité dans cette étude afin de mener à bien les tâches de simulation par conception prédictive : SSHF, l'environnement de simulation électromagnétique 3D haute fréquence basé sur la méthode des éléments finis (FEM) pour résoudre les équations de Maxwell.

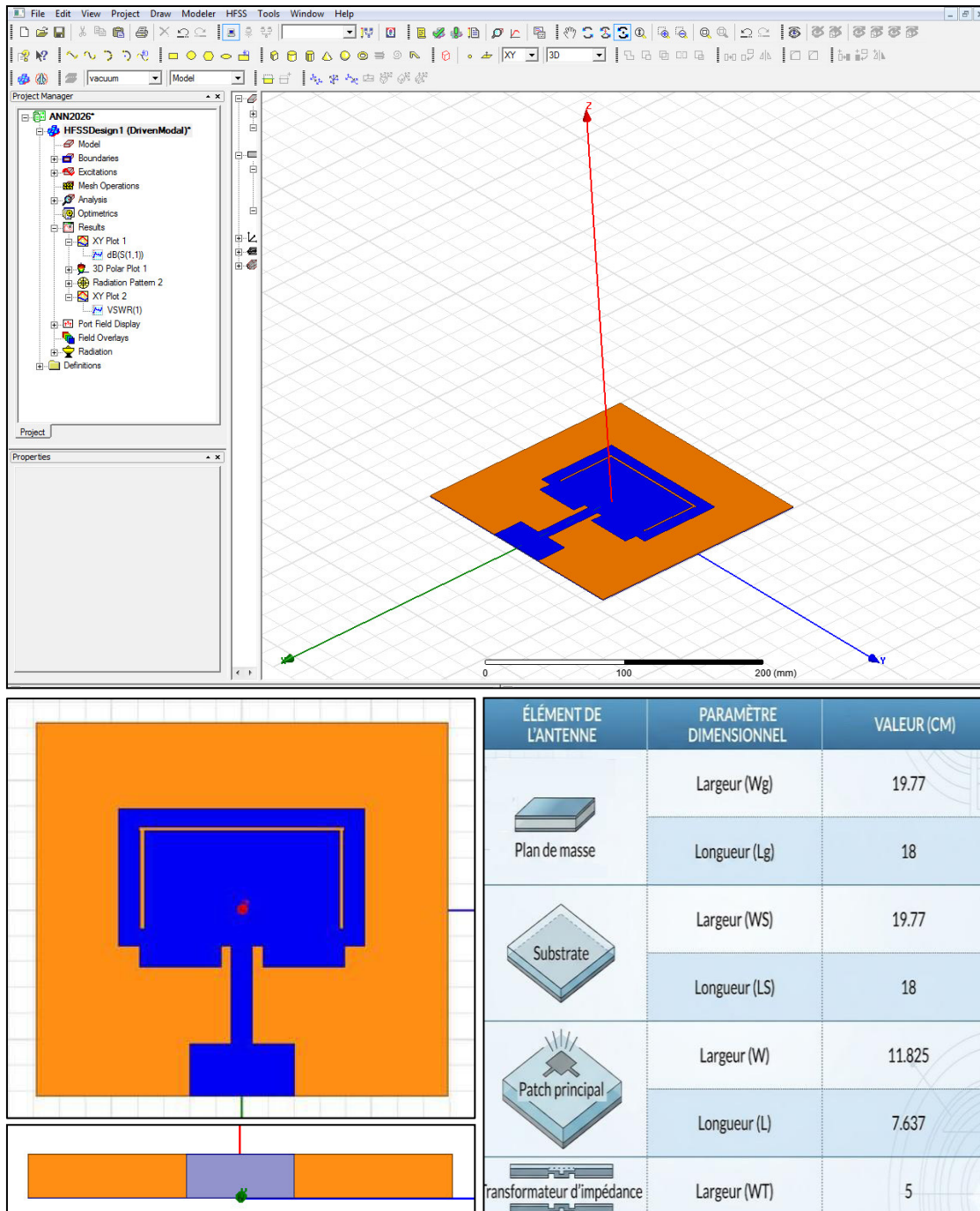


Figure V-4 : Antenne micro-ruban conçue sous SSHF

Il permet une analyse précise des structures complexes en fournissant des résultats

essentiels tels que les paramètres de dispersion, les impédances d'entrée, le taux d'onde stationnaire et la distribution des champs électromagnétiques. SSHF est employé ici pour concevoir la structure géométrique et effectuer les balayages paramétriques pour achever la réponse électromagnétique ciblée. L'antenne micro-ruban RLSF en patch présente une géométrie de forme rectangulaire répondant à un cahier de charges défini par les paramètres suivants :

- ✓ Un substrat diélectrique de type FR4 caractérisé par une permittivité relative $\epsilon_r = 4.4$ et une épaisseur $h = 0.8mm$. Une métallisation du patch rayonnant et du plan de masse réalisée en cuivre.
- ✓ Une ligne d'alimentation micro-ruban directe adaptée à une impédance caractéristique nominale de 50Ω .
- ✓ Une technique d'implémentation de la Structure DMS (Defected Microstrip Structure) est introduite afin d'optimiser significativement les performances électromagnétiques globales de l'antenne. Elle consiste à intégrer une fente (solts) au patch, ce qui modifie localement les caractéristiques de propagation des ondes et atténue les phénomènes parasites nuisibles tels que les ondes de surface, les résonances secondaires et les couplages indésirables.

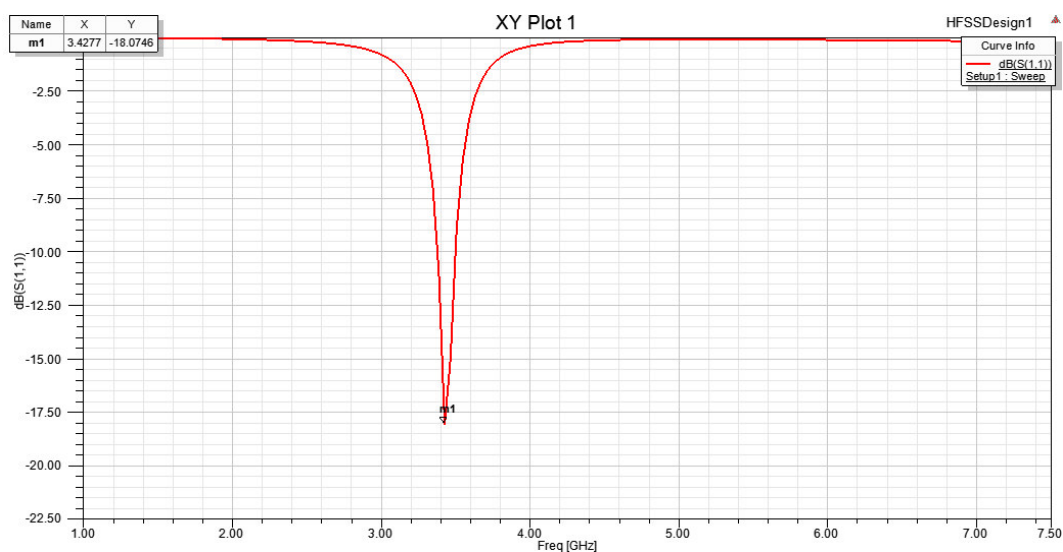


Figure V-5 : S_{11} de l'antenne micro-ruban conçue

Les dimensions géométriques de cette configuration finale permettent à l'antenne

de résonner au domaine des ondes micro-ondes (bande S) destinées aux applications de réseaux locaux sans fil et réseaux cellulaire (5G) en affichant un coefficient de réflexion faible, moins de -18dB associé à un taux d'onde stationnaire optimal de 1.28 à la fréquence de résonance de 3.42GHz.

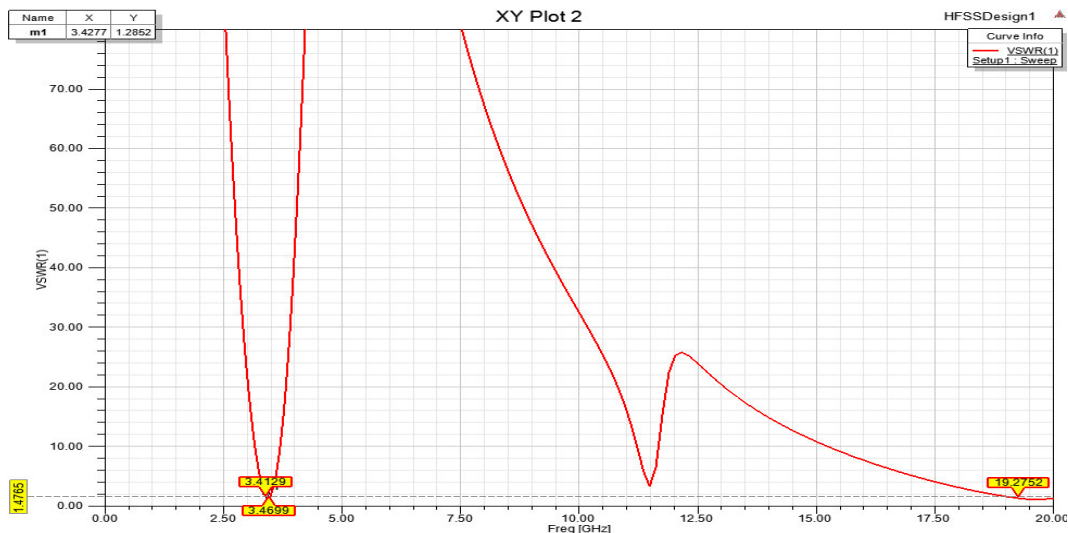


Figure V-6 : TOS de l'antenne micro-ruban conçue

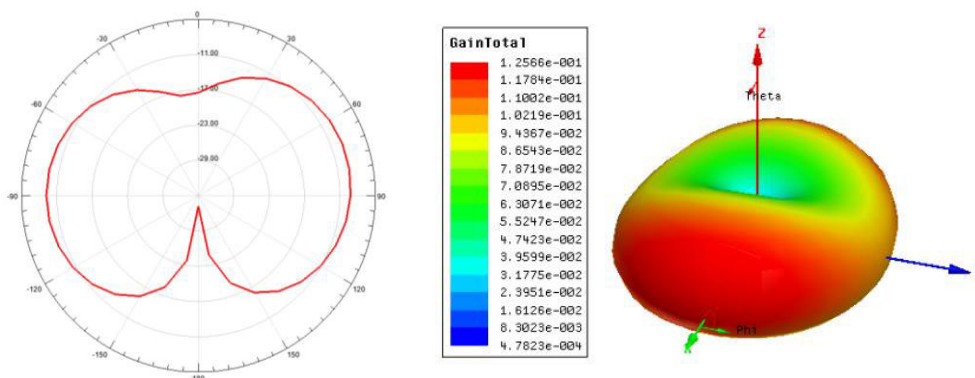


Figure V-7 : Diagramme de rayonnement et gain de l'antenne conçue

Le diagramme de rayonnement du gain total de l'antenne simulé affiche une configuration bidirectionnelle de type dipolaire, avec un rayonnement prédominant dans les directions latérales $\theta=90^\circ$ où le gain maximal atteint environ -11dB. À l'inverse, un niveau de rayonnement minimal (zéro de rayonnement) est clairement visible à l'angle $\theta=180^\circ$, plongeant en dessous de -29dB. Ce comportement est caractéristique de structures d'antenne généralement à fentes. Ici le gain prend une valeur négative en dB et cela signifie simplement qu'elle rayonne dans cette direction

11dB de moins qu'une antenne parfaite imaginaire.

Les antennes passives ne créent pas d'énergie ; elles se contentent de concentrer l'énergie qu'on leur donne dans certaines directions. De plus, l'antenne utilise des matériaux très conducteurs mais qu'elle est posée sur un substrat diélectrique à pertes considérable, le FR4 qui est de bon marché à haute fréquence, l'efficacité s'effondre et le rendement faible fait plonger le gain dans les valeurs négatives.

La représentation tridimensionnelle du rayonnement de l'antenne, dont la forme toroïdale confirme un comportement omnidirectionnel dans le plan horizontal (XY) et un zéro de rayonnement directif selon l'axe vertical (Z). Exprimé ici sur une échelle linéaire, le gain total maximal atteint une valeur de 0,125 (zone rouge) localisée à la périphérie, ce qui concorde avec le faible gain en décibels (environ -9 à -11dB) observé précédemment. Cette topologie symétrique est la signature caractéristique d'une antenne de type dipôle orientée verticalement.

V.4 Conception du réseau d'antennes pour les RLSF

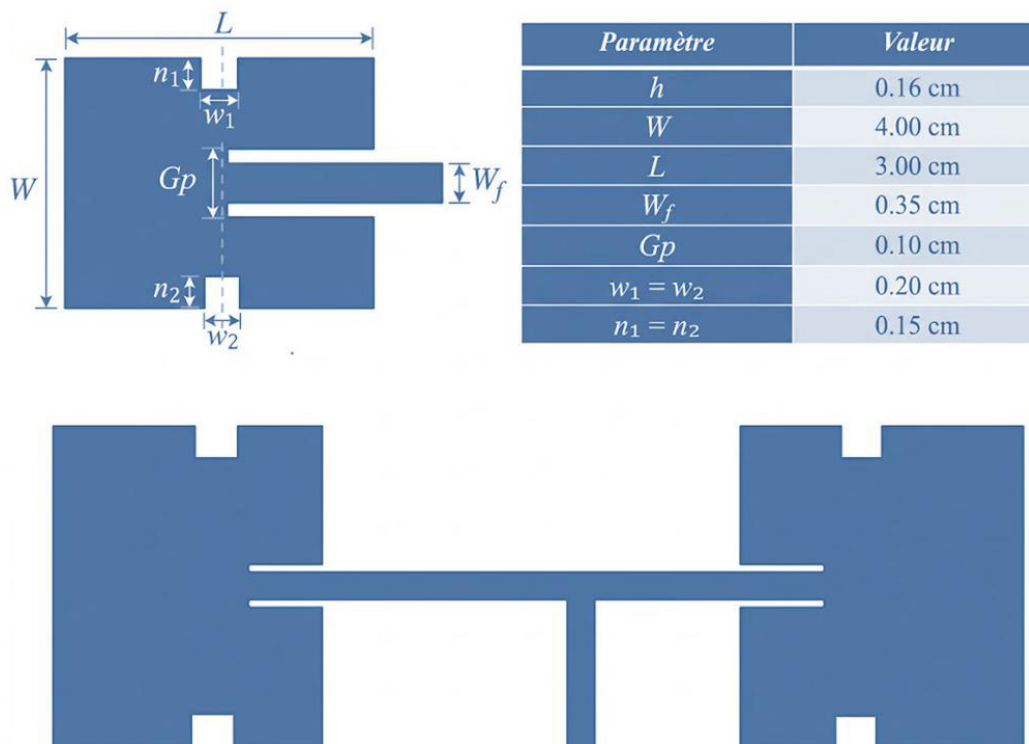


Figure V-8 : Réseaux d'antenne linéaire à deux éléments

Un réseau d'antennes est un ensemble d'antennes connectées et agencées selon

une structure régulière pour former une antenne unique capable de produire des diagrammes de rayonnement impossibles à obtenir avec des antennes individuelles. Il apporte une solution aux problèmes posés par les antennes isolées. Il permet aussi d'améliorer divers paramètres d'antenne telle que la bande passante, la directivité, le gain, la largeur de faisceau et le rendement.

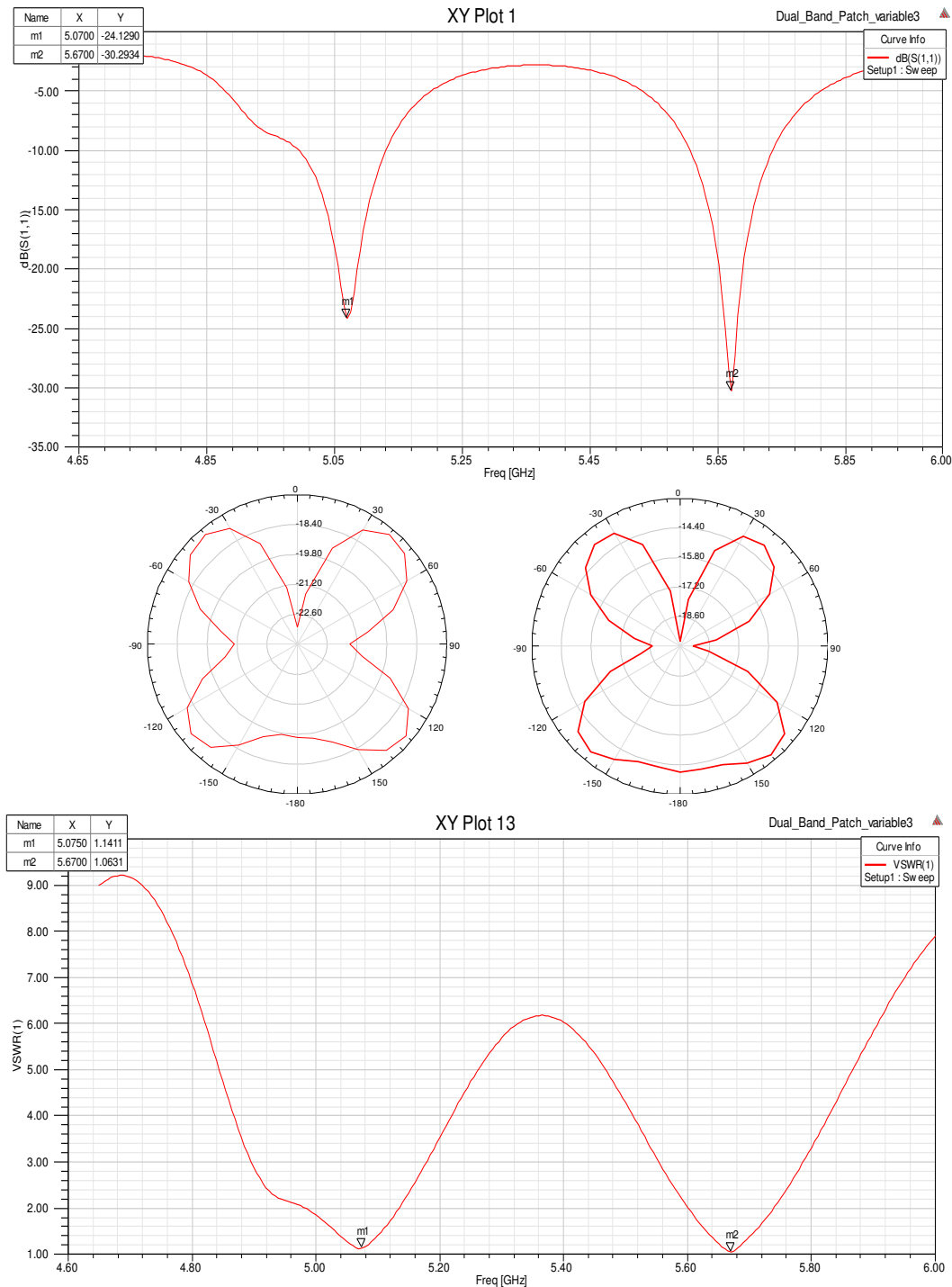


Figure V-9 : S_{11} , Rayonnement, TOS du réseau d'antennes linéaire

Après avoir conçu une antenne micro-ruban en patch rectangulaire performante opérant en RLSF, l'objectif s'étendrait à concevoir un réseau d'antennes patch à excellente réponse électromagnétique composé de deux éléments linéaires [24]. Le réseau d'antennes résonne en duel-bande de fréquences, f_1 et f_2 égale à 5GHz et 5.7GHz respectivement, produisant un faible coefficient de réflexion égale à moins de -24dB et -30dB, respectivement, destiné aux applications de réseaux sans fil à large portée, réseaux satellitaires et aux télécommunications d'entreprise.

Les diagrammes polaires associés révèlent des lobes de rayonnement symétriques, caractéristiques d'un rayonnement bidirectionnel, avec une répartition relativement homogène de l'énergie dans les directions principales. L'ensemble des résultats confirme ainsi le fonctionnement efficace de l'antenne sur deux bandes de fréquences distinctes, avec de bonnes performances d'adaptation et des caractéristiques de rayonnement stables aux fréquences de résonance.

On observe deux minima très prononcés aux fréquences de 5GHz et 5,7GHz, où les valeurs du TOS atteignent respectivement 1.14 et 1.06. Ces valeurs, très proches de l'unité, indiquent une excellente adaptation d'impédance entre l'antenne et la ligne d'alimentation de 50 Ω , ce qui signifie que la quasi-totalité de la puissance incidente est rayonnée et que les pertes par réflexion sont très faibles. Entre ces deux fréquences de résonance, le TOS augmente jusqu'à environ 6, traduisant une mauvaise adaptation hors bande. Les résultats confirment ainsi le comportement duel-bande de l'antenne, avec deux bandes de fonctionnement bien définies et des performances d'adaptation particulièrement satisfaisantes aux fréquences de résonance, ce qui est cohérent avec les faibles valeurs de S_{11} .

Dans une perspective plus large, il serait pertinent d'étendre cette étude à d'autres applications et de développer d'autres conceptions hautes performances en utilisant des techniques et approches précises telles que les techniques fractales. Aujourd'hui, presque tous les appareils électroniques mobiles et domestiques en sont équipés, des téléphones portables passant par les ordinateurs portables. Leur principal atout réside dans leurs dimensions très petites, elles peuvent être installées quasiment partout.

V.5 Validation des résultats par comparaison à la littérature

Afin de valider les performances des structures d'antennes développées dans ce travail, une étude comparative avec d'autres d'ouvrages récents publiés dans la littérature scientifique est faite. Cette comparaison s'appuie sur des critères clés de conception tels que la méthode de modélisation, le type de substrat, les fréquences de résonance, le coefficient de réflexion, et le taux d'onde stationnaire.

Référence	Méthode	Substrat (ϵ_r)	Fréquence (GHz)	S_{11} (dB)	TOS	Applications
Réf [25]	CST / SSHF	FR4 (4.4)	3,50	-15	1,4	Wi-Fi / 5G sub-6GHz
Réf [26]	Algorithme Génétique / DGS	Rogers RT/duroid (2.2)	5,20 / 5,80	-21 / -23	1,19 / 1,15	WLAN / WiMAX
Antenne micro-ruban	RNA / Fentes DMS	FR4 (4.4)	3,4	-18	1,28	RLSF / Wi-Fi / 5G
Réseau d'antennes linéaire	Réseau à 2 Éléments / SSHF	FR4 (4.4)	5 / 5,7	-24 / -30	1,14 / 1,06	Wi-Fi / WiMAX / Sat.

L'efficacité des RNA couplé à une fente de type DMS, contrairement aux méthodes d'optimisation purement empiriques comme la réf [25], a permis d'ajuster précisément la géométrie du patch pour obtenir une résonance à 3,4GHz. Malgré l'utilisation d'un substrat FR4 économique, connu pour présenter des pertes diélectriques plus élevées que les substrats de type Rogers de la Réf [26], l'antenne affiche un excellent coefficient de réflexion de -18dB et un TOS très satisfaisant de 1,2 ce qui garantit une bonne adaptation d'impédance. L'extension de l'étude vers une configuration en réseau linéaire à deux éléments a permis de surmonter la limitation induite par l'antenne individuelle sur FR4. Le réseau dual-bande surpasse significativement les performances d'adaptation de la Réf [26] aux fréquences de résonance de 5GHz et de 5,7GHz. Les valeurs de TOS extrêmement proches de l'unité valident l'efficacité de la distribution d'alimentation et confirment que la quasi-totalité de la puissance incidente est rayonnée avec un minimum de pertes par réflexion.

Cette comparaison confirme le bon compromis entre le coût de fabrication matérielle du FR4, la rapidité d'optimisation numérique via les RNA et l'excellence des performances de rayonnement électromagnétique pour les applications RLSF modernes améliorées par SSHF.

G **Conclusion** **énérale**

Au cours de ce travail, nous avons étudié des structures d'antenne micro-ruban performantes destinées aux applications de réseaux de communications sans fil, en particulier les systèmes fonctionnant à la bande de fréquence Industrielle, Scientifique et Médicale (ISM). Les antennes jouent un rôle essentiel dans les systèmes modernes de télécommunication puisqu'elles assurent la transmission et la réception des ondes électromagnétiques entre l'espace libre et les dispositifs électroniques. L'étude réalisée a montré que les antennes à élément unique présentent certaines limitations en termes de gain, de directivité et de couverture. Afin d'améliorer ces performances, l'utilisation des réseaux d'antennes constitue une solution efficace. En associant plusieurs éléments rayonnants dans une configuration adaptée, il devient possible d'obtenir une meilleure directivité, une largeur de faisceau réduite ainsi qu'un contrôle électronique de l'orientation du rayonnement.

Par ailleurs, les antennes micro-ruban ont été présentées comme une technologie particulièrement intéressante grâce à leurs nombreux avantages tels que la faible épaisseur, le poids réduit, la simplicité de fabrication, le faible coût et la facilité d'intégration dans les circuits micro-ondes. Ces caractéristiques expliquent leur large utilisation dans les systèmes de communication sans fil modernes. Dans ce mémoire, les différentes notions théoriques relatives aux antennes, aux antennes micro-ruban et aux réseaux d'antennes ont été étudiées et analysées. Une attention particulière a été portée aux techniques d'alimentation, aux paramètres fondamentaux des antennes ainsi qu'aux principes de fonctionnement des réseaux phasés.

La partie simulation a permis de concevoir et d'analyser ces structures d'antenne micro-ruban pour des applications de Wi-Fi, Wi-MAX, satellitaires, 5G, ect, à l'aide de l'environnement SSHF basé sur les RNA. Les résultats obtenus ont montré l'efficacité des structure proposées en termes de performances électromagnétiques, notamment au niveau de l'adaptation d'impédance et du diagramme de rayonnement. En perspective, ce travail peut être approfondi par l'optimisation de la géométrie du réseau, l'augmentation du nombre d'éléments rayonnants ou encore l'intégration de techniques avancées de balayage électronique afin d'améliorer davantage les performances des systèmes de communication sans fil de nouvelle génération.

Bibliographie

- [1] Balanis, C. A. (2015). *Antenna theory: analysis and design*. John Wiley & sons.
 - [2] Visser, H. J. (2012). *Antenna theory and applications*. John Wiley & Sons.
 - [3] Zade, P. L., & Choudhary, N. K. (2011). Design and implementation of a broadband equilateral triangular parasitic patch microstrip antenna array for wireless applications. *International Journal of Computer Applications*, 28(7), 36-40.
 - [4] L. Roberts and B. Wessler, "Computer network development to achieve resource sharing," *AFIPS Conf. Proc. (SJCC)*, vol. 36, 1970, pp. 543–549.
 - [5] Nicopolitidis, P., Obaidat, M. S., Papadimitriou, G. I., & Pomportsis, A. S. (2003). *Wireless networks*. John Wiley & Sons Ltd.
 - [6] Song, S., & Issac, B. (2014). Analysis of WiFi and WiMax and wireless network coexistence. *arXiv preprint arXiv:1412.0721*.
 - [7] Harte, L., & Kalaichelvan, K. (2007). WIMAX explained: System fundamentals. *Althos Publishing*.
 - [8] Raza Akabar, Syed Aqeel Raza, Usman Shafique , "Performance Evaluation of WiMAX", dissertation report, March 2009.
 - [9] Westech Communications Inc, "Can WiMAX Address Your Applications?", WiMAX Forum, Oct 2005.
 - [10] <http://wimax-made-simple.blogspot.com/2009/07/advantages-of-wimax.html>
 - [11] Huang, Y., & Boyle, K. (2008). *Antennas: from theory to practice*. John Wiley & Sons.
 - [12] <https://lcantennas.com/antenna-performance-parameters/>
 - [13] Antenna theory: analysis and design / Constantine A. Balanis, third edition, Hoboken, NJ: Wiley, 2005, ISBN 047166782X (hbk.)
 - [14] A. Alsager - Design and Analysis of Microstrip Antennas.
-

- [15] Youssef Rhazi et al. International Journal of Engineering and Technology.
 - [16] Microstrip antenna design handbook/ Ramesh G. Artech house 2001, ISBN 0-89006-513-6
 - [17] F. T. Ulaby, Fundamentals of Applied Electromagnetics. New Jersey: Prentice Hall, 2001.
 - [18] A. Goldsmith, Wireless Communications. New York: Cambridge University Press, 2005.
 - [19] ANTENNA ARRAYS: PERFORMANCE LIMITS AND GEOMETRY OPTIMIZATION by Peter Joseph.
 - [20] Lau, B. K., Manteuffel, D., Arai, H., & Hum, S. V. (2016). Guest editorial theory and applications of characteristic modes. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 64(7), 2590-2594.
 - [21] Journal of Recent Research in Engineering and Technology ISSN (Online): 2349 –2252, ISSN (Print):2349 –2260
 - [22] International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT) ISSN: 2278-0181 Published by, www.ijert.org NCIECC - 2017 Conference Proceedings.
 - [23] Maachou, S et al. Design and Optimisization of a DGS Patch Antenna Using ANN. Faculty of MIT, University of Saida. 2025.
 - [24] Slimani, A et al. Design and Analysis of a Microstrip Patch Antenna Array by Microwave Office. Faculty of Technology, University of Saida. 2021.
 - [25] Hossain, A. R. et El-Raggal, A. Design of High-Performance Dual-Band Unidirectional Microstrip Patch Antenna Array for WLAN and WiMAX Networks. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* / WSU Research Exchange.
 - [26] Kumar, S et al. Radiation Pattern, Surface Current Distribution, and Q-Factor Improvement Technique Using DMS CSPA for Sub-6 GHz Wireless Applications. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 2022.
-

Résumé

Les antennes micro-ruban sont largement utilisées pour les applications de réseaux sans fil nécessitant une bonne directivité telles que les réseaux informatiques locaux. Elles sont composées d'un patch sur le dessus et d'un substrat mis à la terre connaissant des limitations majeures qui présentent un véritable sujet de recherche et d'investigation. À cet égard, cette étude vise à développer une structure d'antennes patch hautement performant pour les applications Wi-Fi et Wi-Max à base des RNA et SSHF.

Mots clés: Antenne Micro-ruban, Réseau d'antennes, Réseaux Sans Fil, Conception EM, SSHF, RNA.

ملخص

تُستخدم هوائيات الميكروستريب على نطاق واسع في تطبيقات الشبكات اللاسلكية التي تتطلب توجيهًا جيدًا، مثل الشبكات المحلية. تتكون هذه الهوائيات من هوائي رقعي في الأعلى وركيزة مؤرصة، إلا أن قيودها الكبيرة تُشكل مجالًا واسعًا للبحث والدراسة. في هذا السياق، تهدف هذه الدراسة إلى تطوير بنية هوائي رقعي عالي الأداء لتطبيقات Wi-Fi و WiMAX بالاعتماد على تقنية RNA و SSHF.

الكلمات المفتاحية : هوائي الميكروستريب، مصفوفة الهوائيات، الشبكات اللاسلكية، تصميم EM، SSHF، RNA.

Abstract

Microstrip antennas are widely used in wireless network applications requiring good directivity, such as local area networks. They consist of a patch antenna on top and a grounded substrate, but their significant limitations present a substantial area of research and investigation. In this regard, this study aims to develop a high-performance patch antenna structure for Wi-Fi and Wi-MAX applications based on RNA and HFSS.

Key words: Microstrip Antenna, Antenna Array, Wireless Networks, EM Design, HFSS, ANN.
