

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 de Saïda – Dr. Moulay Tahar –
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 : Mlle. GOUNI Samia

M. RADJAA Wassim Cheikh

Conception Electromagnétique Optimisée d'Antennes Patch Duel et Multi-bande sous SSHF pour les Technologies de Communication Sans Fil

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

| | | |
|------------------------|---------|---------------|
| M. BOUBAKAR Hichem | MCB | Président |
| M. BOUDKHIL Abdelhakim | MCA | Rapporteur |
| M. GOUNI Slimane | Docteur | Co-rapporteur |
| Mme. BELHADJ Salima | MCB | Examineur |

2025 / 2026

Remerciements

*Avant tout, nous remercions **ALLAH** de nous avoir donné la force et la patience nécessaires pour mener à bien ce modeste travail.*

*Nous exprimons notre profonde gratitude et nos plus sincères remerciements à nos Rapporteurs **Dr. BOUDKHIL Abdelhakim** et **Dr. GOUNI Slimane**, pour avoir dirigé ce travail avec une rigueur scientifique. Leurs précieux conseils et disponibilité ont guidés tout au long de la réalisation de ce projet.*

*Nous tenons à exprimer notre vive gratitude aux membres de jury **Dr BOUBAKAR Hichem** et **Dr. BELHADJ Salima** qui ont accepté d'examiner et d'évaluer ce travail, apportant ainsi une valeur ajoutée à notre recherche par ses critiques constructives.*

*Enfin, nous adressons nos remerciements les plus sincères à l'ensemble des enseignants du Département de Télécommunication, précisément **Dr. Bouhmidj Rachid** pour son aide et orientation durant la réalisation de ce projet.*

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

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à mon très cher père Mohamed, pour son soutien indéfectible, ses sacrifices et ses précieux conseils.

À ma très chère mère Karima, symbole d'amour, de tendresse et de patience.

*À toute ma famille et à toutes les personnes qui m'ont soutenue durant mon parcours**Samia***

Je dédie ce modeste travail à ma tendre mère dont l'amour, la douceur et la patience ont illuminé mon chemin.

*À ma famille entière et à tous ceux qui ont été à mes côtés tout au long de mon cursus**Wassim***

Table des Matières

Remerciements

Dédicace

Tables des Matières

Liste des Figures

Liste des Tableaux

Liste des Abréviations

Introduction Générale

Chapitre 1 : Systèmes de Communications Sans Fil

1.1 Introduction

1.2 Généralités sur les Systèmes de Communications Sans Fil

1.3 Structure d'une Chaîne de Communication Sans Fil

1.3.1 Source d'Information

1.3.2 Émetteur

1.3.3 Antenne d'Emission/de Réception

1.3.4 Canal de Propagation

1.3.5 Récepteur

1.4 Ondes Electromagnétiques

1.5 Types de Réseaux de Communication Sans Fil

1.5.1 Réseaux Cellulaires

1.5.2 Réseaux Sans Fil

1.5.3 Réseaux Satellitaires et Systèmes Radar

1.5.4 Réseaux Sans Fil Spécialisés

1.6 Bandes de Fréquences

1.6.1 Bande L

1.6.2 Bande S

1.6.3 Bande C

1.6.4 Bande X

1.6.5 Bandes Ku et Ka

1.7 Défis de Communication Sans Fil

Chapitre 2 : Antennes Patches, Principe et Applications

2.1 Introduction

2.2 Généralités sur les Antennes

2.2.1 Évolution Historique des Antennes

2.2.2 Mécanismes d'Emission et de Réception

2.3 Paramètres Caractéristiques d'une Antenne

2.3.1 Fréquence et Longueur d'Onde

2.3.2 Impédance d'Entrée

2.3.3 Coefficient de Réflexion

2.3.4 Diagramme de Rayonnement

2.3.5 Directivité

2.3.6 Gain

2.3.7 Polarisation

2.3.8 Bande passante

2.4 Antennes Patches

2.4.1 Description Technologique

2.4.2 Mécanisme Physique de Rayonnement

2.4.3 Techniques d'Alimentation

2.5 Avantages, Limitations et Domaines d'Application

2.5.1 Balance Technologique

2.5.2 Domaines d'Application et Usages Modernes

2.6 Perspectives pour les Antennes Patch

Chapitre 3 : Conception Optimisée d'Antennes Patches Multi-Bande sous SSFH

3.1 Introduction

3.2 Description de l'Environnement de Conception - SSFH

3.3 Conception Optimisée d'Antennes Patches Duel-Bande sous SSFH

3.4 Conception Optimisée de l'Antenne Patch Multi-Bande sous SSFH

3.5 Comparaison des Résultats de Simulation

3.6 Validation Expérimentale de l'Antenne Patch Duel-Bande

3.7 Perspectives : Vers les Systèmes MIMO et Multi-bandes

Conclusion Générale

Références Bibliographiques

Liste des Figures

- ❖ **Figure 1-1** : Schéma Fonctionnel d'un Système de Communication Sans Fil
- ❖ **Figure 1-2** : Ondes Electromagnétiques et Phénomènes Physiques
- ❖ **Figure 1-3** : Evolution des Réseaux Cellulaires (1G – 5G)
- ❖ **Figure 1-4** : Réseaux Sans Fil – Types et Applications
- ❖ **Figure 1-5** : Réseaux Satellitaires et Systèmes Radar
- ❖ **Figure 1-6** : Réseaux Sans Fil Spécialisés
- ❖ **Figure 1-7** : Bandes de Fréquences Micro-Ondes (IEEE Standards)
- ❖ **Figure 1-8** : Défis des Systèmes de Communication Sans Fil
- ❖ **Figure 2-1** : Evolution Historique des Antennes Patches
- ❖ **Figure 2-2** : Synoptique Structurel d'une Chaîne de Transmission et Rôle d'Interface de l'Antenne
- ❖ **Figure 2-3** : Diagramme de Rayonnement, (a) Présentation Graphique en 3D de la Puissance Rayonnée, (b) Coupe de la Puissance Rayonnée en 2D
- ❖ **Figure 2-4** : Gain d'une Antenne Patch
- ❖ **Figure 2-5** : Types de Polarisation
- ❖ **Figure 2-6** : Antenne Patch Alimentée par une Ligne Micro-ruban
- ❖ **Figure 2-7** : Différentes formes du patch
- ❖ **Figure 2-8** : Distribution de Charge du Champ dans l'Antenne Patch
- ❖ **Figure 2-9** : Configuration du Champ Electrique du Radiateur
- ❖ **Figure 2-10** : Alimentation par Ligne Micro-Ruban
- ❖ **Figure 2-11** : Alimentation par Câble Coaxial
- ❖ **Figure 2-12** : Alimentation par Fente

- ❖ **Figure 2-13** : Alimentation par **couplage de proximité**
- ❖ **Figure 3-1** : Interface SHFF
- ❖ **Figure 3-2** : Capacités de Calcul Haute Performance de SSHF
- ❖ **Figure 3-3** : Antenne Patch Duel-Bande Optimisée Sous SSHF
- ❖ **Figure 3-4** : Coefficient de Réflexion de l'Antenne Patch Duel-Bande Optimisée Sous SSHF
- ❖ **Figure 3-5** : ROS, Gain et Rayonnement de l'Antenne Patch Duel-Bande Optimisée Sous SSHF
- ❖ **Figure 3-6** : Antenne Patch Multi-Bande Optimisée Sous SSHF
- ❖ **Figure 3-7** : Coefficient de Réflexion de l'Antenne Patch Multi-Bande Optimisée Sous SSHF
- ❖ **Figure 3-8** : ROS, Gain, Rayonnement et Distribution du Courant de l'Antenne Patch Multi-Bande Optimisée Sous SSHF
- ❖ **Figure 3-9** : Equipement Expérimentale pour Réalisation de l'Antenne Patch Duel-Bande
- ❖ **Figure 3-10** : Circuit Réalisé d'Antenne Patch Duel-Bande Optimisée Sous SSHF
- ❖ **Figure 3-11** : Vers les Systèmes MIMO et Multi-bandes

Liste des Tableaux

- ❖ **Tableau 2-1** : Comparaison des Propriétés des Méthodes d'Alimentation
- ❖ **Tableau 3-1** : Étapes et Paramètres de Conception Initiaux
- ❖ **Tableau 3-2** : Comparaison des Résultats de Simulation

Liste des Abréviations

- ❖ **2D / 3D** : Bidimensionnelle / Tridimensionnelle
- ❖ **4G / 5G / 6G** : Quatrième / Cinquième / Sixième génération de réseaux mobiles
- ❖ **AM / FM** : Modulation d'amplitude / Modulation de fréquence
- ❖ **CHP** : Calcul Haute Performance
- ❖ **CIMM** : Circuits Intégrés Micro-ondes Multicouches
- ❖ **DGS** : Defected Ground Structure
- ❖ **DMS** : Defected Microstrip Structure
- ❖ **EM** : Electromagnétique
- ❖ **FBW** : Fractional Bandwidth (Bande passante relative)
- ❖ **FEM** : Finite Element Method (Méthode des éléments finis)
- ❖ **GPS** : Global Positioning System (Système de positionnement global)
- ❖ **HD** : Haute Définition
- ❖ **HPBW** : Half-Power Beamwidth (Ouverture à mi-puissance)
- ❖ **IEEE** : Institute of Electrical and Electronics Engineers
- ❖ **IoT** : Internet of Things (Internet des Objets)
- ❖ **LoRaWAN** : Long Range Wide Area Network
- ❖ **MIMO** : Multiple-Input Multiple-Output
- ❖ **NFC** : Near Field Communication
- ❖ **PCB** : Printed Circuit Board (Circuits imprimés)
- ❖ **PSK / QAM** : Phase Shift Keying / Quadrature Amplitude Modulation
- ❖ **RF** : Radiofréquence

- ❖ **ROS / VSWR** : Rapport d'Onde Stationnaire / Voltage Standing Wave Ratio
- ❖ **SNR** : Signal to Noise Ratio (Rapport signal sur bruit)
- ❖ **SOL** : Short, Open, Load
- ❖ **SSHF / HFSS** : Simulateur de Structures à Hautes Fréquences / High Frequency Structure Simulator
- ❖ **TCAS** : Traffic Collision Avoidance System
- ❖ **TOS** : Taux d'Onde Stationnaire
- ❖ **ULB** : Ultra Large Bande
- ❖ **VNA** : Vector Network Analyzer (Analyseur de réseaux vectoriel)
- ❖ **WBAN** : Wireless Body Area Networks (Réseaux de capteurs corporels)
- ❖ **Wi-Fi** : Wireless Fidelity
- ❖ **WiMAX** : Worldwide Interoperability for Microwave Access

INTRODUCTION GÉNÉRALE

L'évolution rapide des technologies de communication sans fil a profondément transformé les modes d'échange d'informations dans les réseaux et de Télécommunications. La croissance continue du nombre d'utilisateurs et de services nécessite des dispositifs de transmission toujours plus performants, compacts et capables de fonctionner sur plusieurs bandes de fréquences. Dans ce contexte, les antennes jouent un rôle fondamental en assurant la conversion efficace des signaux électriques en ondes électromagnétiques et inversement [1].

Parmi les différentes structures d'antennes, les antennes patch, également appelées antennes patchs ou micro-ruban, se distinguent par leur faible coût de fabrication, leur profil réduit, leur légèreté et leur facilité d'intégration dans les équipements modernes. Cependant, les systèmes de communication actuels exigent souvent un fonctionnement multi-bande afin de supporter simultanément plusieurs standards tels que le Wi-Fi, le Bluetooth, la 4G, la 5G ou encore diverses applications industrielles et scientifiques. Cette exigence conduit à la conception d'antennes patch multi-bandes capables de couvrir plusieurs plages fréquentielles tout en maintenant des performances électromagnétiques satisfaisantes [2].

La conception et l'optimisation de telles antennes nécessitent l'utilisation d'outils de simulation électromagnétique avancés permettant de prédire avec précision leurs caractéristiques de rayonnement, leur adaptation d'impédance, leur gain et leur efficacité. Les logiciels de simulation basés sur les méthodes numériques offrent aujourd'hui un environnement performant pour analyser et améliorer les structures avant leur réalisation pratique. L'environnement SSHF (Simulateur de Structures à Hautes Fréquences, en Anglais High Frequency Structure Simulator, HFSS) constitue ainsi un outil adapté pour l'étude et

l'optimisation des antennes patch multi-bandes destinées aux applications de communication sans fil.

L'objectif principal de ce travail est de concevoir et d'optimiser une antenne patch dual et multi-bande répondant aux exigences des systèmes modernes de communication sans fil à travers une étude théorique et une validation par simulation électromagnétique. Cette démarche vise à obtenir une structure compacte présentant une bonne adaptation sur plusieurs bandes de fréquences et des performances de rayonnement adéquates. Afin d'atteindre cet objectif, ce mémoire est organisé en trois chapitres :

- Le premier chapitre présente les principes fondamentaux des systèmes de communications sans fil. Il aborde essentiellement les notions de propagation des ondes électromagnétiques, les différentes architectures de réseaux sans fil ainsi que les principales bandes de fréquences utilisées dans les technologies modernes.
- Le deuxième chapitre est consacré aux antennes patch multi-bandes. Les caractéristiques générales des antennes micro-ruban, leurs paramètres de performance, les techniques de miniaturisation et les méthodes permettant d'obtenir un fonctionnement multi-bande y sont détaillées.
- Le troisième chapitre porte sur la conception, la simulation et l'optimisation de l'antenne proposée sous SSHF. Les différentes étapes de modélisation sont présentées, suivies de l'analyse des résultats obtenus en termes de coefficient de réflexion, diagramme de rayonnement, gain et bandes de fonctionnement. Une discussion des performances de l'antenne conclut ce chapitre.

À travers l'analyse théorique des antennes micro-ruban et l'optimisation de leurs caractéristiques électromagnétiques par simulation numérique, cette étude participe à l'amélioration des solutions d'antennes destinées aux applications modernes telles que les réseaux Wi-Fi, IoT ainsi que les télécommunications d'entreprise. L'intérêt de cette contribution réside notamment dans la recherche d'un compromis optimal entre la miniaturisation de l'antenne, l'élargissement des bandes de fonctionnement, l'amélioration du gain et le maintien d'une bonne adaptation d'impédance. Par ailleurs, l'intégration de techniques d'optimisation avancées basées sur l'intelligence artificielle, les algorithmes génétiques ou les méthodes d'apprentissage automatique représente une voie prometteuse pour automatiser le processus de conception et réduire le temps nécessaire à l'obtention de solutions optimales [3].

CHAPITRE 1

Systemes de Communications Sans Fil

1.1 Introduction

Les systèmes de communications sans fil [4] occupent aujourd'hui une place essentielle dans les technologies modernes de l'information et des télécommunications. Ils permettent la transmission de données, de la voix et des services multimédias sans recourir à des supports physiques tels que les câbles ou les fibres optiques. Grâce à l'utilisation des ondes électromagnétiques comme moyen de propagation, ces systèmes offrent une grande flexibilité d'accès, une mobilité accrue des utilisateurs et une couverture adaptée à une large variété d'applications.

L'évolution des communications sans fil a connu une croissance spectaculaire au cours des dernières décennies. Depuis les premiers systèmes radio jusqu'aux réseaux mobiles de cinquième génération (5G), les progrès technologiques ont permis d'augmenter considérablement les débits de transmission, d'améliorer la qualité de service et de répondre à une demande toujours croissante en connectivité. Aujourd'hui, les communications sans fil sont présentes dans de nombreux domaines tels que la téléphonie mobile, les réseaux Wi-Fi ou Wi-MAX, les communications satellitaires, les systèmes radar, les réseaux de capteurs sans fil, les objets connectés (IoT) ainsi que les applications industrielles et militaires.

Le principe fondamental d'un système de communication sans fil repose sur la transmission d'informations entre un émetteur et un récepteur à travers un canal de propagation constitué par l'espace libre ou un environnement de transmission donné. Cette transmission est réalisée grâce à des antennes qui assurent la conversion des signaux électriques en ondes électromagnétiques et inversement. Les performances du système dépendent fortement des caractéristiques du canal de propagation, des techniques de modulation utilisées, de la gestion du spectre radioélectrique ainsi que de la qualité des antennes employées [2].

Dans ce chapitre, nous présenterons les principes fondamentaux des systèmes de communications sans fil. Nous aborderons successivement les principaux éléments constituant une chaîne de communication sans fil, les notions de base relatives à la propagation des ondes électromagnétiques, les différents types de réseaux ainsi que les bandes de fréquences utilisées dans les applications modernes suivies des défis de systèmes de communication sans fil. Cette étude fournira les bases théoriques nécessaires à la compréhension des exigences auxquelles doivent répondre les antennes patch multi-bandes développées dans la suite de ce mémoire.

1.2 Généralités sur les Systèmes de Communications Sans Fil

Un système de communication sans fil est un ensemble de dispositifs électroniques et de protocoles permettant l'échange d'informations entre un émetteur et un récepteur sans nécessiter de liaison physique directe telle que les câbles ou les fibres optiques. Dans ce type de système, l'information est convertie en un signal électrique, puis transformée en ondes électromagnétiques capables de se propager dans différents milieux, notamment l'espace libre, l'atmosphère terrestre ou des environnements complexes comme les zones urbaines ou industrielles. Ces ondes transportent les données sur de courtes ou longues distances en fonction de la fréquence utilisée, de la puissance d'émission et des conditions de propagation. En général, les communications sans fil présentent plusieurs avantages majeurs qui expliquent leur large adoption [4-5] :

- Elles offrent une mobilité totale des utilisateurs.
- Elles permettent une installation rapide des réseaux.
- Elles réduisent les coûts liés au câblage.
- Elles facilitent l'accès aux zones difficiles ou isolées.
- Elles offrent une grande flexibilité d'extension des infrastructures.

Malgré leurs avantages, ces systèmes présentent certaines limitations importantes :

- La présence d'interférences provenant d'autres systèmes.
- L'atténuation du signal lors de la propagation.
- La saturation progressive du spectre fréquentiel.
- Les problèmes de sécurité et de confidentialité.
- La sensibilité aux obstacles et aux conditions environnementales.

Les communications sans fil sont confrontées à des problèmes de sécurité et de confidentialité, car les ondes électromagnétiques se propagent dans l'espace et peuvent être interceptées plus facilement que dans les systèmes filaires, nécessitant ainsi l'utilisation de techniques de cryptage et de sécurisation des données. Ces systèmes sont sensibles aux obstacles physiques et aux conditions environnementales, tels que les bâtiments, la végétation, la pluie ou les variations atmosphériques, qui peuvent provoquer des réflexions, diffractions et atténuations du signal, affectant ainsi la qualité globale de la transmission [5].

1.3 Structure d'une Chaîne de Communication Sans Fil

Une chaîne de communication sans fil est constituée de plusieurs blocs fonctionnels assurant la transmission de l'information de la source jusqu'au destinataire [6].

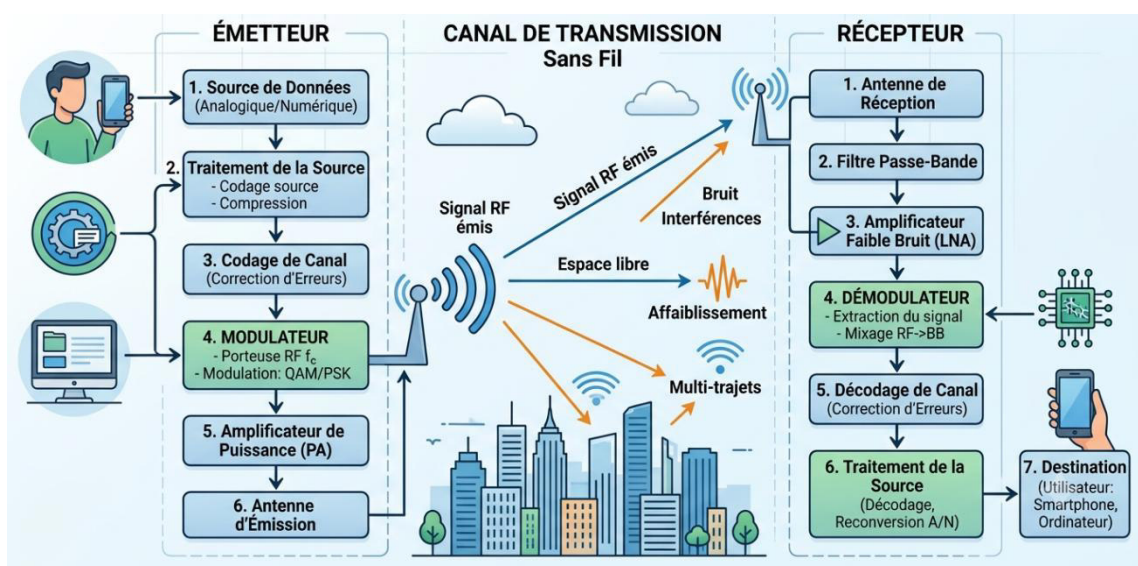


Figure 1-1 : Schéma Fonctionnel d'un Système de Communication Sans Fil

1.3.1 Source d'Information

La source d'information [7] constitue le point de départ de toute chaîne de communication. Elle représente l'élément qui génère le message initial destiné à être transmis vers un ou plusieurs récepteurs à travers un système de communication sans fil. Ce message peut prendre différentes formes selon la nature de l'application et le type de service considéré. La source joue donc un rôle fondamental, car elle définit la quantité, la nature et la structure des données à transmettre. Dans les systèmes modernes de télécommunications, la source d'information peut produire plusieurs catégories de données, chacune ayant des caractéristiques spécifiques en termes de débit, de bande passante et de traitement. L'information mise en jeu peut prendre la forme de [8] :

❖ **Signaux vocaux** : Les signaux vocaux correspondent à la parole humaine captée par un microphone ou un système d'enregistrement. Ils constituent l'un des types de données les plus anciens et les plus utilisés dans les systèmes de communication, notamment en téléphonie mobile et en radiocommunication. Ces signaux sont de nature analogique à l'origine, mais ils sont généralement numérisés avant transmission afin de faciliter leur traitement et leur codage. Ils nécessitent une bande passante relativement faible par rapport aux autres types de données, mais exigent une bonne qualité de transmission afin de garantir l'intelligibilité de la parole et réduire les distorsions.

❖ **Données numériques** : Les données numériques représentent l'ensemble des informations générées directement sous forme binaire par des systèmes informatiques. Il peut s'agir de fichiers, de messages textuels, de données internet ou d'informations échangées entre machines dans un réseau. Ce type de données est aujourd'hui dominant dans les systèmes de communication modernes, notamment avec l'essor d'Internet et des réseaux mobiles. Les données numériques peuvent nécessiter des débits très variables, allant de faibles volumes (messages courts) à des flux très importants (transferts de fichiers, cloud computing, streaming).

❖ **Images fixes ou animées** : Les images, qu'elles soient fixes ou animées (vidéo), représentent une forme de données multimédias très utilisée dans les systèmes de communication actuels. Une image fixe correspond à une matrice de pixels représentant une scène, tandis qu'une image animée (vidéo) est constituée d'une succession rapide d'images permettant de reproduire le mouvement. Ce type de données est particulièrement exigeant en termes de bande passante et de débit de transmission, surtout pour la vidéo haute définition (HD), la 4K ou les applications de visioconférence. Il nécessite également des techniques de compression avancées afin de réduire la quantité d'informations à transmettre sans dégrader significativement la qualité.

❖ **Données issues de capteurs** : Les données issues de capteurs proviennent de dispositifs électroniques capables de mesurer des grandeurs physiques telles que la température, la pression, l'humidité, la vitesse, la position ou encore la luminosité. Ces données sont au cœur des systèmes modernes de l'Internet des Objets (IoT) et des réseaux de capteurs sans fil. Elles sont généralement de faible taille mais transmises de manière très fréquente ou continue. Leur transmission nécessite des systèmes fiables, économes en énergie et capables de fonctionner sur de longues distances ou dans des environnements contraints.

1.3.2 Émetteur

L'émetteur constitue un élément fondamental dans une chaîne de communication sans fil. Son rôle principal est de préparer le signal issu de la source afin de le rendre compatible avec les contraintes du canal de propagation et d'assurer sa transmission efficace vers le récepteur. Pour cela, il met en œuvre une succession d'opérations de traitement du signal visant à améliorer la robustesse, la fiabilité et la qualité de la communication. Dans un système de télécommunications moderne, l'émetteur ne se limite pas à la simple transmission du signal, mais il assure également des fonctions essentielles de [9] :

❖ **Codage de source** : Il consiste à réduire la redondance présente dans les données initiales afin d'optimiser l'utilisation de la bande passante. Cette étape permet de compresser l'information sans perte significative de qualité (ou avec perte contrôlée selon les applications), ce qui améliore l'efficacité de transmission. Par exemple, les signaux vocaux, les images et les vidéos sont généralement soumis à des techniques de compression adaptées afin de diminuer le débit binaire nécessaire tout en conservant une qualité acceptable. Cette étape est essentielle dans les systèmes modernes où les ressources spectrales sont limitées.

❖ **Codage de canal** : C'est une technique visant à améliorer la fiabilité de la transmission en introduisant une redondance contrôlée dans le signal transmis. Cette redondance permet au récepteur de détecter et, dans certains cas, de corriger les erreurs causées par le bruit, les interférences ou les perturbations du canal. Ainsi, même si le signal subit des dégradations durant la propagation, le codage de canal augmente la probabilité de reconstruction correcte de l'information originale. Cette étape est particulièrement importante dans les environnements sans fil où les conditions de propagation sont variables et imprévisibles.

❖ **Modulation** : La modulation est une opération essentielle qui consiste à adapter le signal de base à une onde porteuse de haute fréquence afin de permettre sa transmission efficace à travers le canal radioélectrique. Elle consiste à modifier un ou plusieurs paramètres de la porteuse (amplitude, fréquence ou phase) en fonction du signal d'information. Les techniques de modulation les plus utilisées dans les systèmes modernes incluent la modulation d'amplitude (AM), de fréquence (FM), de phase (PSK) ainsi que les modulations numériques avancées telles que la QAM. La modulation permet également de faciliter l'utilisation de différentes bandes de fréquences et d'améliorer l'efficacité spectrale.

❖ **Amplification** : Elle constitue la dernière étape du traitement au niveau de l'émetteur. Elle consiste à augmenter la puissance du signal modulé afin de lui permettre de parcourir de longues distances tout en conservant une qualité

suffisante à la réception. Cette opération est réalisée à l'aide d'amplificateurs de puissance, qui doivent être conçus de manière à minimiser les distorsions et les pertes énergétiques. Une amplification efficace est essentielle pour garantir une bonne couverture du système de communication et maintenir un niveau de signal adéquat au niveau du récepteur.

1.3.3 Antenne d'Emission/de Réception

L'antenne d'émission et de réception [10-11] constitue un élément essentiel dans toute chaîne de communication sans fil. Elle assure l'interface entre les circuits électroniques du système et le milieu de propagation, en réalisant la conversion entre un signal électrique guidé et une onde électromagnétique rayonnée dans l'espace libre, et inversement. Lors de l'émission, l'antenne transforme l'énergie électrique provenant de l'émetteur en énergie électromagnétique capable de se propager à travers différents environnements. Lors de la réception, elle capte les ondes électromagnétiques présentes dans l'espace et les reconvertit en un signal électrique exploitable par les circuits du récepteur. Les performances de l'antenne ont un impact direct sur la qualité globale du système de communication. En effet, plusieurs paramètres caractéristiques permettent d'évaluer son efficacité, notamment le gain, la directivité, l'adaptation d'impédance, la bande passante ainsi que le diagramme de rayonnement.

Une antenne bien conçue permet d'améliorer la portée du système, de réduire les pertes de signal et d'assurer une meilleure qualité de transmission. Dans les systèmes modernes, et particulièrement dans les applications sans fil telles que les réseaux Wi-Fi, la téléphonie mobile, les communications satellitaires et les systèmes radar, l'antenne doit également répondre à des exigences de miniaturisation et de fonctionnement multi-bande. Cela explique l'intérêt croissant pour les antennes patch, qui offrent une bonne intégration, un faible coût de fabrication et des performances adaptées aux technologies actuelles. Ainsi, l'antenne représente un composant critique dont la conception

influence directement l'efficacité, la fiabilité et la couverture des systèmes de communications sans fil.

1.3.4 Canal de Propagation

Le canal de propagation [12] constitue le milieu physique dans lequel se déplace l'onde électromagnétique entre l'antenne d'émission et l'antenne de réception. Il représente un élément fondamental et souvent complexe dans une chaîne de communication sans fil, car il influence directement la qualité, la fiabilité et la portée du signal transmis. Ce canal peut prendre différentes formes selon l'environnement de transmission. Il peut s'agir de l'espace libre, où la propagation est relativement idéale, ou d'environnements plus complexes tels que les zones urbaines denses, les milieux industriels ou encore les environnements intérieurs. Chaque type de milieu introduit des perturbations spécifiques qui affectent le comportement de l'onde électromagnétique. Au cours de sa propagation, le signal subit plusieurs phénomènes physiques qui dégradent ses performances [13] :

- ❖ **Atténuation du signal** : Elle correspond à la diminution progressive de la puissance du signal au fur et à mesure de sa propagation dans le canal. Elle est principalement liée à la distance entre l'émetteur et le récepteur, ainsi qu'aux caractéristiques du milieu de propagation. Plus la distance augmente, plus la puissance reçue diminue, ce qui peut limiter la portée du système de communication.
- ❖ **Réflexions multiples** : Les réflexions se produisent lorsque l'onde électromagnétique rencontre des obstacles tels que des bâtiments, des murs ou des surfaces métalliques. Une partie de l'onde est alors réfléchi dans différentes directions, ce qui engendre plusieurs trajets possibles entre l'émetteur et le récepteur. Ce phénomène est particulièrement présent en environnement urbain.
- ❖ **Diffraction autour des obstacles** : Elle correspond à la capacité de l'onde à contourner les obstacles ou à se propager derrière ceux-ci. Ce phénomène

permet la réception du signal même en l'absence de ligne de visée directe entre l'émetteur et le récepteur, notamment dans les environnements où les obstacles sont nombreux.

❖ **Diffusion sur surfaces irrégulières :** Elle se produit lorsque l'onde électromagnétique rencontre des surfaces rugueuses ou irrégulières. Dans ce cas, le signal est dispersé dans plusieurs directions, ce qui contribue à la complexité du champ électromagnétique reçu et peut entraîner une diminution de la puissance utile.

❖ **Effets de multi-trajets :** Les effets de multi-trajets apparaissent lorsque le signal atteint le récepteur par plusieurs chemins différents en raison des réflexions, diffractions et diffusions. Ces signaux multiples peuvent interférer entre eux, entraînant des phénomènes de renforcement ou d'annulation du signal, ce qui peut provoquer des variations importantes de la qualité de réception.

1.3.5 Récepteur

Le récepteur constitue l'un des éléments essentiels d'une chaîne de communication sans fil, puisqu'il est chargé de récupérer et de reconstruire l'information initialement envoyée par l'émetteur. Il reçoit les ondes électromagnétiques captées par l'antenne de réception et les transforme en un signal électrique exploitable par les circuits de traitement. Contrairement à l'émetteur, le récepteur doit travailler dans des conditions souvent dégradées, car le signal transmis a subi diverses perturbations au cours de sa propagation dans le canal, telles que l'atténuation, le bruit, les interférences et les effets de multi-trajets. Par conséquent, son rôle principal est non seulement de détecter le signal utile, mais aussi de réduire l'impact de ces dégradations afin de reconstruire l'information avec la meilleure précision possible. Pour assurer cette fonction, le récepteur réalise plusieurs opérations fondamentales qui constituent les étapes inverses de celles de l'émetteur [14] :

- ❖ **Réception et amplification du signal :** À son arrivée, le signal reçu est généralement très faible en puissance. Le récepteur commence donc par une étape d'amplification afin d'augmenter son niveau sans introduire de distorsion significative. Cette opération est cruciale pour permettre un traitement correct du signal dans les étapes suivantes.
- ❖ **Filtrage :** Le filtrage permet de supprimer les composantes indésirables du signal, notamment les bruits et les interférences provenant d'autres sources. Il permet également de sélectionner la bande de fréquence utile correspondant au signal transmis, améliorant ainsi la qualité globale de réception.
- ❖ **Démodulation :** Elle consiste à extraire l'information utile contenue dans la porteuse haute fréquence. Cette étape est indispensable pour retrouver le signal de base initialement envoyé par l'émetteur. Le type de démodulation dépend de la technique de modulation utilisée lors de la transmission (AM, FM, PSK, QAM, etc.).
- ❖ **Décodage :** Après la démodulation, le signal est encore protégé par des techniques de codage de canal. Le décodage permet de détecter et éventuellement corriger les erreurs introduites durant la transmission. Cette étape améliore considérablement la fiabilité du système de communication.
- ❖ **Reconstruction de l'information :** Enfin, le récepteur procède à la reconstruction du message original sous une forme exploitable par l'utilisateur final, qu'il s'agisse d'un signal vocal, de données numériques, d'images ou d'informations issues de capteurs.

1.4 Ondes Electromagnétiques

Les ondes électromagnétiques [15] constituent le support fondamental de toute transmission sans fil. Elles résultent de la propagation simultanée de deux champs intimement liés : un champ électrique et un champ magnétique. Ces deux composantes oscillent de manière perpendiculaire entre elles et également perpendiculairement à la direction de propagation, formant ainsi une onde capable de se déplacer dans l'espace, même dans le vide.

Dans le domaine des télécommunications, plusieurs paramètres permettent de caractériser ces ondes. La fréquence représente le nombre d'oscillations effectuées par seconde et s'exprime en Hertz (Hz). Elle joue un rôle essentiel dans la détermination des bandes de communication et influence directement la capacité de transmission ainsi que la portée du système. La polarisation, quant à elle, décrit l'orientation du champ électrique dans le plan de propagation. Elle peut être linéaire, circulaire ou elliptique, et elle doit être correctement adaptée entre l'émetteur et le récepteur pour assurer une réception optimale du signal.

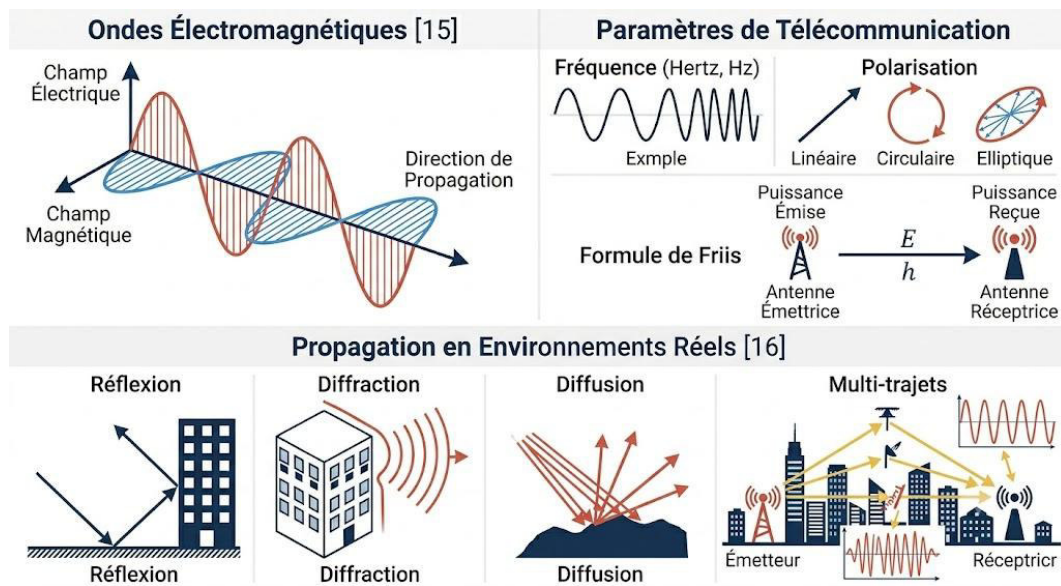


Figure 1-2 : Ondes Electromagnétiques et Phénomènes Physiques

Dans un environnement idéal, c'est-à-dire en absence d'obstacles et d'interférences, les ondes électromagnétiques se propagent librement dans l'espace. Dans ce cas, la puissance du signal reçu peut être estimée à l'aide de la relation de Friis, qui permet de relier la puissance émise à la puissance reçue en fonction de la distance et des caractéristiques des antennes. Lors de leur propagation dans des environnements réels, les ondes électromagnétiques subissent plusieurs phénomènes physiques qui modifient leur comportement et influencent la qualité de la transmission [16] :

- 1) **Réflexion** : Elle se produit lorsque l'onde rencontre une surface ou un obstacle de dimensions importantes par rapport à sa longueur d'onde. Une partie de

l'énergie est alors renvoyée dans une direction différente, ce qui peut créer plusieurs chemins de propagation entre l'émetteur et le récepteur.

- 2) **Diffraction** : Elle correspond à la capacité des ondes à contourner les obstacles présents sur leur trajet. Ce phénomène permet la réception du signal même en l'absence de visibilité directe, notamment dans les environnements urbains ou montagneux.
- 3) **Diffusion** : Elle apparaît lorsque l'onde rencontre des surfaces rugueuses ou irrégulières. L'énergie est alors dispersée dans plusieurs directions, ce qui contribue à la complexité du signal reçu.
- 4) **Multi-trajets** : Ce phénomène se produit lorsque le signal atteint le récepteur par plusieurs chemins différents, en raison des réflexions, diffractions et diffusions. Ces signaux peuvent interférer entre eux, provoquant des variations de puissance et des distorsions du signal reçu.

L'atténuation en espace libre représente la diminution progressive de la puissance du signal en fonction de la distance séparant l'émetteur du récepteur. Elle est également influencée par la fréquence utilisée : plus la fréquence est élevée, plus les pertes sont importantes. Ce phénomène constitue une limitation majeure dans la conception des systèmes de communication sans fil. En conditions réelles, le signal subit également des pertes supplémentaires dues à l'environnement de propagation. Ces pertes sont causées par plusieurs facteurs tels que :

- Les conditions météorologiques (pluie, brouillard, humidité)
- La présence de végétation dense
- Les obstacles naturels ou artificiels
- La nature du terrain

Ces éléments contribuent à l'affaiblissement du signal et peuvent réduire la qualité de la communication. Dans les environnements urbains, la propagation des ondes est particulièrement complexe en raison de la présence de nombreux bâtiments et structures métalliques. Ces obstacles engendrent de multiples

réflexions et diffractions, créant un environnement riche en multi-trajets. Ce phénomène peut entraîner des interférences, des variations rapides de puissance et une dégradation significative de la qualité du signal. Les interférences correspondent à des perturbations externes qui affectent la transmission du signal utile. Elles peuvent provenir de différentes sources telles que :

- D'autres réseaux sans fil fonctionnant sur des fréquences proches
- Des équipements électroniques environnants
- Des signaux parasites ou voisins

Ces interférences peuvent réduire considérablement la qualité de la communication si elles ne sont pas correctement gérées. Le rapport signal sur bruit, connu en anglais sous l'abréviation SNR (Signal to Noise Ratio), est un paramètre fondamental permettant d'évaluer la qualité d'une transmission. Il représente le rapport entre la puissance du signal utile et celle du bruit présent dans le canal. Un SNR élevé indique une bonne qualité de transmission, tandis qu'un SNR faible entraîne des erreurs de réception et une dégradation des performances du système.

1.5 Types de Réseaux de Communication Sans Fil

Les réseaux de communication sans fil regroupent l'ensemble des technologies permettant l'échange d'informations sans support physique comme les câbles. Ils reposent sur la propagation des ondes électromagnétiques dans différents environnements (air, espace, atmosphère), ce qui leur confère une grande flexibilité et une large gamme d'applications. Selon leur portée, leur débit et leur domaine d'utilisation, on distingue plusieurs types de réseaux sans fil, chacun répondant à des besoins spécifiques [17] :

1.5.1 Réseaux Cellulaires

Les réseaux cellulaires constituent l'un des systèmes de communication sans fil les plus utilisés dans le monde. Leur principe repose sur une organisation

géographique en petites zones appelées *cellules*, chacune étant couverte par une station de base. Cette structure permet la réutilisation des fréquences, ce qui augmente considérablement la capacité globale du réseau et optimise l'utilisation du spectre radioélectrique.

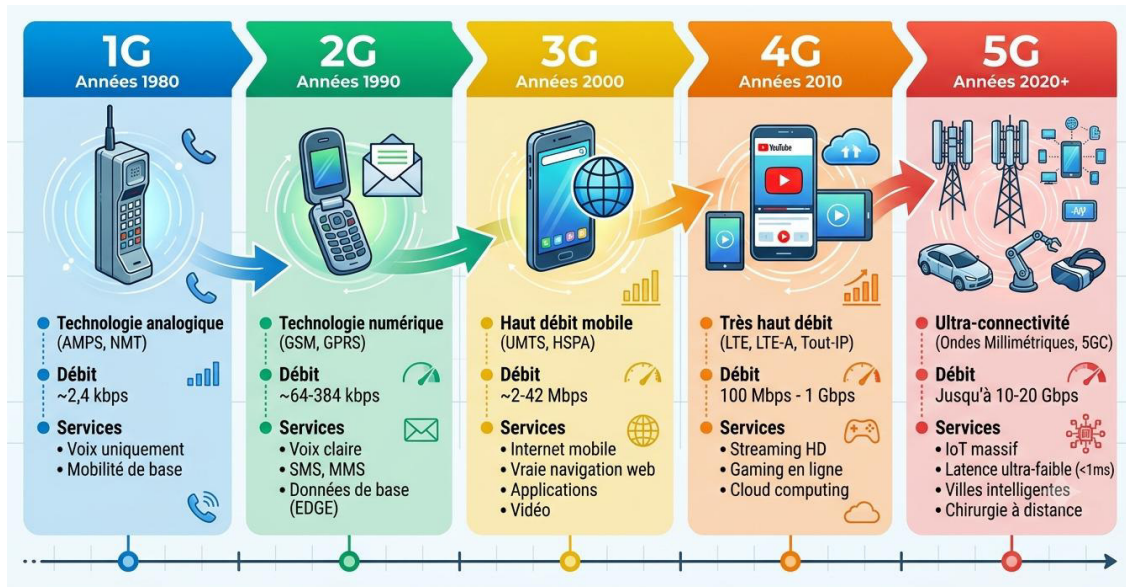


Figure 1-3 : Evolution des Réseaux Cellulaires (1G – 5G)

L'évolution des réseaux cellulaires s'est faite à travers plusieurs générations, chacune apportant des améliorations majeures en termes de performance et de services. La 1G a introduit la téléphonie mobile analogique, principalement dédiée aux appels vocaux avec une qualité limitée et une faible sécurité. La 2G, basée sur la technologie numérique, a permis l'apparition des SMS et une meilleure efficacité spectrale.

Avec la 3G, l'accès à Internet mobile est devenu possible, ouvrant la voie aux services multimédias et aux applications en ligne. La 4G a marqué une révolution grâce au haut débit mobile, offrant des vitesses élevées adaptées au streaming, aux réseaux sociaux et aux services cloud. Enfin, la 5G représente une avancée majeure avec une très faible latence, une capacité massive de connexion d'objets (IoT) et des performances adaptées aux applications critiques comme les véhicules autonomes, la réalité augmentée et les villes intelligentes.

1.5.2 Réseaux Sans Fil

Les réseaux sans fil regroupent plusieurs technologies destinées à fournir une connectivité sur de courtes ou moyennes distances. Parmi les plus connues, on trouve le Bluetooth, le Wi-Fi et le WiMAX, chacun ayant un rôle spécifique dans les communications modernes. Le Bluetooth, quant à lui, est conçu pour les communications à très courte portée. Il est principalement utilisé pour connecter des périphériques entre eux, comme les écouteurs sans fil, les claviers, les souris ou encore les objets connectés. Son faible coût énergétique en fait une solution idéale pour les appareils mobiles.

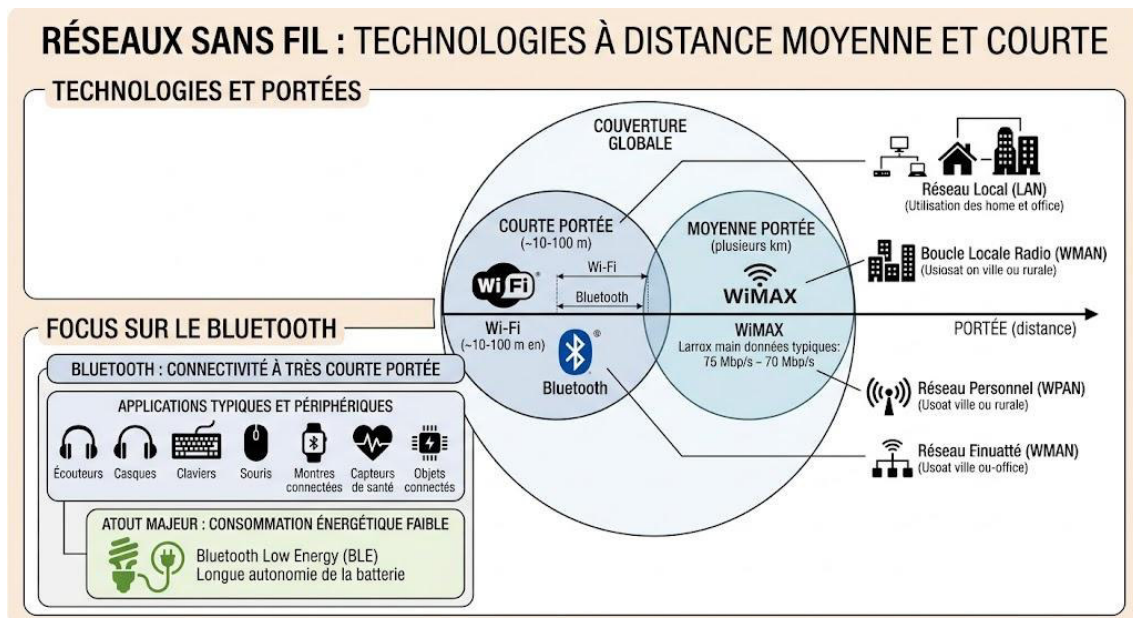


Figure 1-4 : Réseaux Sans Fil – Types et Applications

Le Wi-Fi, basé sur les normes IEEE 802.11, est largement utilisé pour connecter des appareils à Internet dans les environnements domestiques, professionnels et publics. Il fonctionne principalement sur les bandes de fréquence 2,4 GHz, 5 GHz et récemment 6 GHz, offrant différents compromis entre portée et débit. Le Wi-Fi permet des connexions à haut débit, adaptées à la navigation web, au streaming et aux applications en ligne. Le WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) est une technologie de réseau sans fil métropolitain capable de couvrir de plus grandes distances que le

Wi-Fi. Il est souvent utilisé pour fournir un accès Internet haut débit dans les zones rurales ou mal desservies par les infrastructures filaires.

1.5.3 Réseaux Satellitaires et Systèmes Radar

Les réseaux satellitaires jouent un rôle essentiel dans la communication à l'échelle mondiale. Contrairement aux réseaux terrestres, ils utilisent des satellites en orbite autour de la Terre pour transmettre les signaux, ce qui leur permet de couvrir des zones très étendues, y compris les régions isolées ou les océans.

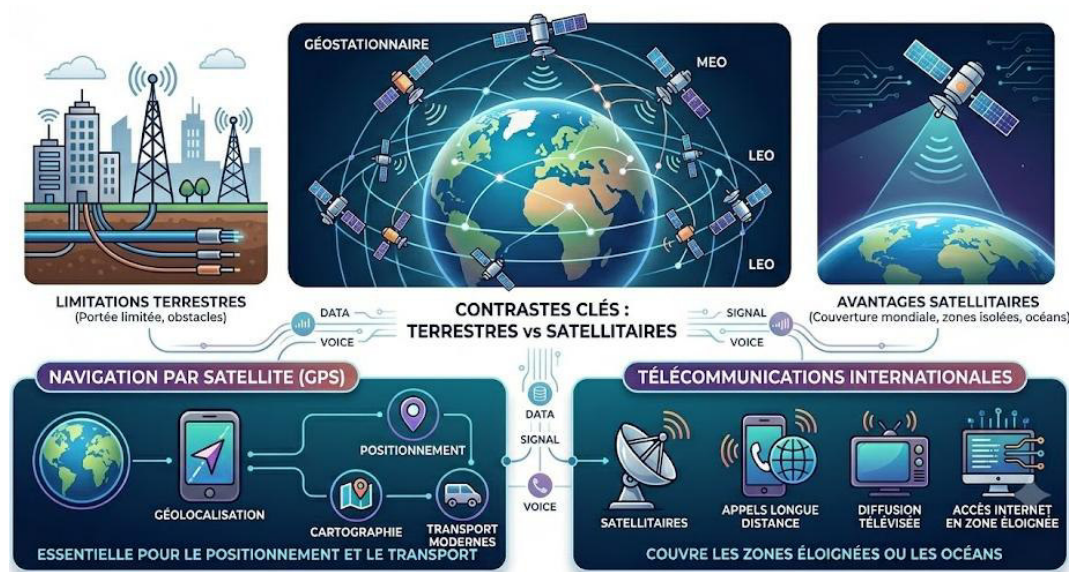


Figure 1-5 : Réseaux Satellitaires et Systèmes Radar

Ces réseaux sont largement utilisés dans plusieurs domaines. Ils permettent la navigation par GPS, essentielle pour le positionnement, la cartographie et les systèmes de transport modernes. Ils assurent également les télécommunications internationales, notamment les appels longue distance, la diffusion télévisée et l'accès Internet dans les zones éloignées. En outre, les satellites sont indispensables pour l'observation terrestre, utilisée dans la météorologie, la surveillance environnementale et la gestion des catastrophes naturelles. Les systèmes radar, quant à eux, utilisent des ondes radio pour détecter et localiser des objets. Ils sont essentiels dans l'aviation, la défense militaire, la météorologie et le contrôle du trafic aérien. Leur capacité à fonctionner dans des conditions

météorologiques difficiles en fait un outil fiable pour la surveillance et la sécurité.

1.5.4 Réseaux Sans Fil Spécialisés

En plus des technologies principales, il existe plusieurs autres types de réseaux sans fil qui répondent à des besoins spécifiques et spécialisés. Parmi eux, on peut citer les réseaux ZigBee, les réseaux LoRaWAN et les technologies de communication NFC. Le ZigBee est une technologie conçue pour les réseaux à faible consommation énergétique et à faible débit. Elle est largement utilisée dans les applications de domotique et les objets connectés, comme les capteurs intelligents et les systèmes d'automatisation domestique.

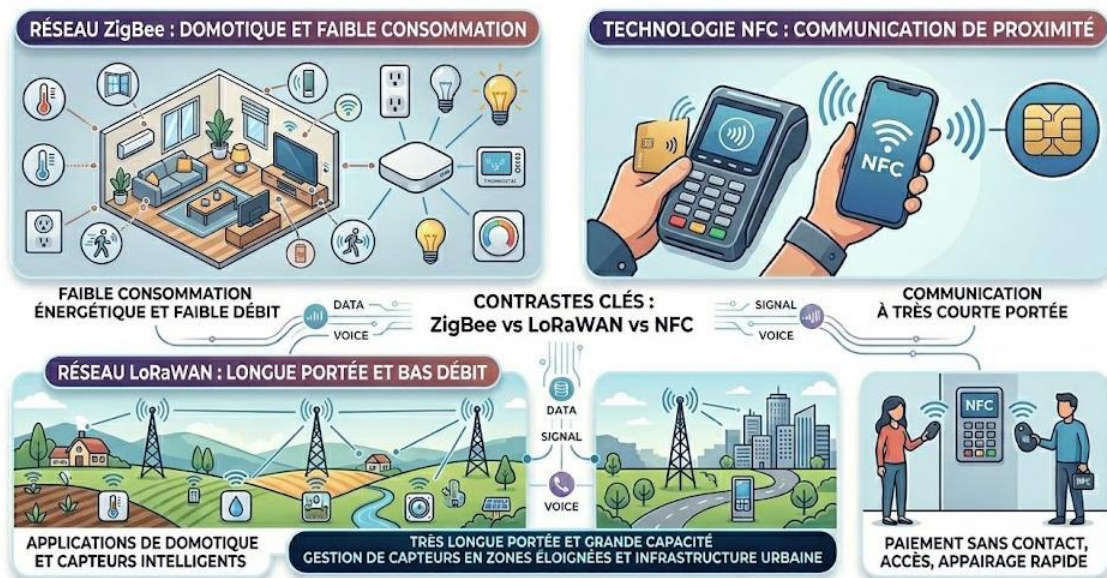


Figure 1-6 : Réseaux Sans Fil Spécialisés

Le LoRaWAN (Long Range Wide Area Network) est une technologie de communication longue portée et basse consommation, particulièrement adaptée à l'Internet des objets (IoT). Elle permet de connecter des capteurs sur plusieurs kilomètres tout en utilisant très peu d'énergie, ce qui la rend idéale pour les villes intelligentes, l'agriculture connectée et la surveillance environnementale. Enfin, la technologie NFC (Near Field Communication) permet des échanges de données à très courte distance, généralement quelques centimètres. Elle est

utilisée dans les paiements sans contact, les cartes d'accès et l'appairage rapide entre appareils. Ces différents types de réseaux sans fil montrent la diversité des solutions disponibles pour répondre aux besoins croissants en connectivité, allant des communications personnelles aux infrastructures globales et aux systèmes intelligents connectés.

1.6 Bandes de Fréquences

Les communications sans fil reposent sur l'utilisation du spectre électromagnétique, qui est divisé en différentes bandes de fréquences. Chaque bande possède des caractéristiques spécifiques en termes de portée, de capacité de transmission, de pénétration des obstacles et de sensibilité aux interférences. Le choix d'une bande de fréquence dépend donc fortement de l'application visée, qu'il s'agisse de communications mobiles, de systèmes satellitaires ou de radars [18-19].

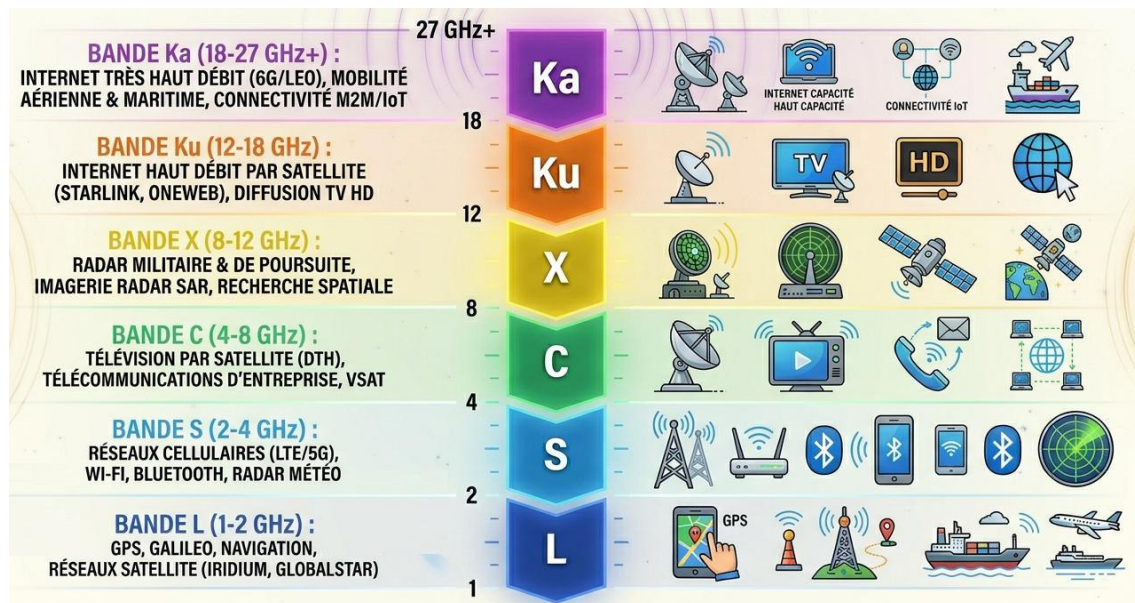


Figure 1-7 : Bandes de Fréquences Micro-Ondes (IEEE Standards)

1.6.1 Bande L

La bande L, située entre 1 et 2 GHz, est particulièrement appréciée pour sa bonne capacité de propagation. Les ondes de cette bande ont une grande longueur

d'onde, ce qui leur permet de traverser certains obstacles naturels comme la végétation ou les nuages avec une atténuation relativement faible. Cette caractéristique la rend très adaptée aux systèmes nécessitant une couverture fiable sur de longues distances. Elle est principalement utilisée dans le système GPS, où elle permet une réception stable des signaux émis par les satellites vers les récepteurs terrestres. On la retrouve également dans certaines communications satellites, notamment pour des applications nécessitant une bonne robustesse plutôt qu'un très haut débit.

1.6.2 Bande S

La bande S couvre une plage de fréquences allant de 2 à 4 GHz. Elle est largement utilisée dans plusieurs technologies de communication sans fil, notamment le Wi-Fi 2.4 GHz, qui constitue l'une des bandes les plus répandues dans les réseaux domestiques et publics. Cette bande est également utilisée dans certains systèmes radar et communications satellites. Elle offre un bon compromis entre portée et débit, mais elle est aussi plus sujette aux interférences, notamment en raison de la forte densité d'appareils utilisant la fréquence 2.4 GHz (Wi-Fi, Bluetooth, appareils domestiques, etc.). Cela peut entraîner des congestions du spectre dans les environnements urbains.

1.6.3 Bande C

La bande C, comprise entre 4 et 8 GHz, est principalement utilisée dans les communications satellitaires. Elle est particulièrement appréciée pour sa stabilité et sa résistance aux conditions climatiques, notamment à la pluie, qui peut fortement atténuer les signaux à plus hautes fréquences. Cette bande est souvent utilisée pour les transmissions télévisées par satellite, les liaisons longue distance et certaines infrastructures de télécommunication. Elle représente un compromis intéressant entre capacité de transmission et fiabilité, ce qui explique son utilisation historique dans les systèmes de communication internationaux.

1.6.4 Bande X

La bande X, située entre 8 et 12 GHz, est principalement dédiée aux systèmes radar. Elle est très utilisée dans les domaines militaires, l'aviation et la météorologie en raison de sa bonne résolution et de sa capacité à détecter des objets avec précision. Grâce à sa fréquence plus élevée, elle permet une meilleure précision de détection et une résolution spatiale plus fine. Toutefois, elle est plus sensible aux conditions atmosphériques que les bandes plus basses, ce qui limite son usage dans certaines applications de communication longue distance.

1.6.5 Bandes Ku et Ka

Les bandes Ku (12–18 GHz) et Ka (26–40 GHz) représentent des fréquences plus élevées utilisées principalement dans les communications satellitaires modernes et les systèmes de transmission à haut débit. La bande Ku est largement utilisée pour la télévision par satellite, les connexions Internet satellitaires et certaines applications de communication mobile. La bande Ka, quant à elle, est encore plus performante en termes de débit et est de plus en plus utilisée dans les systèmes satellitaires à haut débit ainsi que dans les technologies avancées comme la 5G et les réseaux de nouvelle génération.

1.7 Défis de Communication Sans Fil

Les communications sans fil modernes font face à plusieurs défis majeurs liés à l'augmentation rapide du nombre d'utilisateurs, à la diversité des applications et à l'évolution des technologies numériques. L'un des principaux défis est la saturation du spectre radioélectrique. Le nombre croissant d'appareils connectés entraîne une forte demande en bandes de fréquences, ce qui limite les ressources disponibles et augmente les risques d'interférences. Un autre défi important est le besoin de débits de plus en plus élevés, notamment pour les applications comme la vidéo en streaming, la réalité augmentée ou les services

cloud. Cela nécessite des technologies capables de transmettre davantage de données en moins de temps.

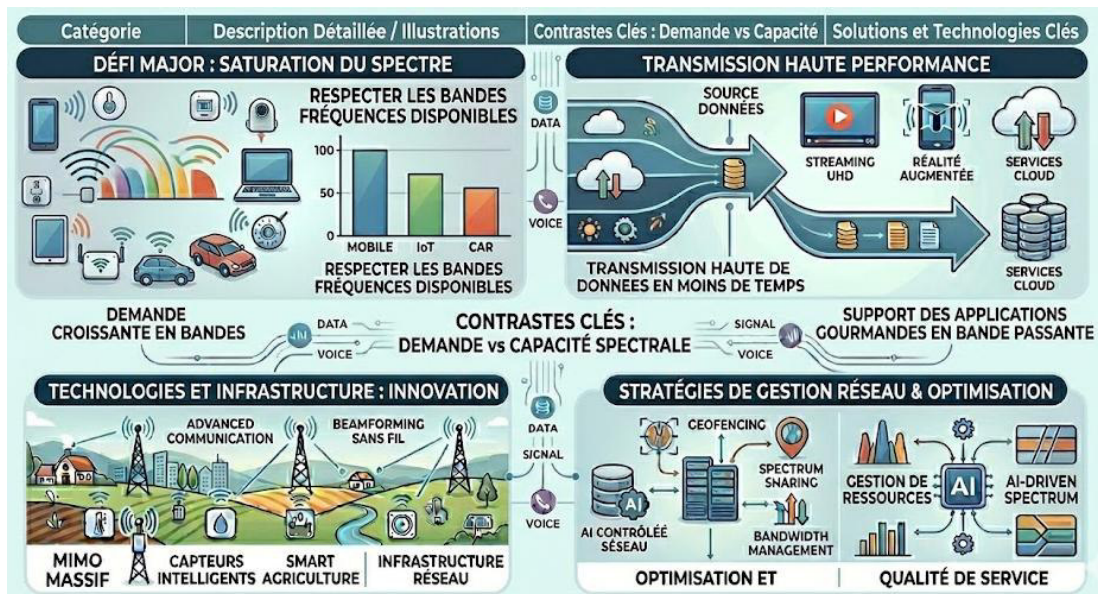


Figure 1-7 : Défis des Systèmes de Communication Sans Fil

La réduction de la consommation énergétique constitue également un enjeu crucial, en particulier pour les objets connectés et les réseaux IoT, où l'autonomie des dispositifs doit être optimisée. La miniaturisation des dispositifs est un autre défi important, car les équipements doivent être de plus en plus compacts tout en conservant des performances élevées. La compatibilité multi-bande représente aussi une contrainte technique, car les systèmes modernes doivent fonctionner sur plusieurs bandes de fréquences afin d'assurer une connectivité globale et continue. Enfin, la réduction des interférences reste un problème central, notamment dans les environnements denses où de nombreux systèmes coexistent. Cela nécessite des techniques avancées de gestion du spectre, de filtrage et de conception d'antennes.

CHAPITRE 2

Antennes Patches, Principe et Applications

2.1 Introduction

Dans l'architecture globale de tous les systèmes de communication sans fil, les antennes s'imposent comme des composants essentiels et critiques pour optimiser les performances globales de la liaison. Elles agissent comme une interface physique indispensable, garantissant le couplage électromagnétique efficace entre les équipements électroniques de traitement du signal et l'environnement extérieur de propagation [15]. Selon les exigences spécifiques de chaque application, les antennes se déclinent sous une multitude de géométries et de technologies. Leurs conceptions varient rigoureusement selon plusieurs critères fondamentaux tels que la taille, la forme, la bande de fréquences opérationnelle, le gain, la directivité ou encore la polarisation, permettant ainsi de s'adapter précisément aux contraintes de leur domaine d'utilisation.

Actuellement, les tendances technologiques et les exigences industrielles mettent fortement l'accent sur la recherche, le développement et la fabrication d'antennes micro-rubans, plus communément appelées antennes patchs. Ces dernières se sont imposées comme une solution incontournable en ingénierie des télécommunications grâce à leur profil compacte, leur faible coût de production et leur facilité d'intégration sur les circuits imprimés. Elles sont d'ores et déjà largement déployées dans une immense variété d'appareils électroniques de notre quotidien, notamment les téléphones portables de nouvelle génération, les ordinateurs portables, les systèmes de positionnement par satellite (GPS), ainsi que dans les technologies de détection radar [16].

L'objectif de ce deuxième chapitre est de poser les fondements théoriques nécessaires à la compréhension de ces composants. Dans un premier temps, nous allons définir les antennes de manière générale et examiner les caractéristiques électriques et concepts fondamentaux qui régissent leur comportement. Par la suite, notre étude se concentrera spécifiquement sur les antennes patchs. Nous analyserons en détail leur configuration géométrique fondamentale, leurs diverses méthodes d'alimentation (par ligne micro-ruban, par sonde coaxiale ou

par couplage), ainsi que leurs modes de rayonnement. Nous mettrons également en lumière leurs avantages notables, leurs limitations physiques intrinsèques, pour enfin discuter de l'étendue de leurs domaines d'utilisation actuels et futurs.

2.2 Généralités sur les Antennes

Une antenne est un dispositif de transition (ou transducteur) entre une onde guidée voyageant dans une ligne de transmission (câble coaxial, guide d'ondes, ligne micro-ruban) et une onde électromagnétique rayonnée se propageant dans l'espace libre (ou inversement). Selon la terminologie standardisée établie par l'IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers), une antenne est formellement définie comme un dispositif conçu pour rayonner ou intercepter des ondes radioélectriques [20].

D'un point de vue physique, elle assure le couplage électromagnétique et l'adaptation d'impédance entre les ondes guidées, issues d'une ligne de transmission connectée à un générateur de puissance, et les ondes planes se propageant en espace libre. En agissant comme un convertisseur et un transformateur d'énergie, cet élément bidirectionnel fluidifie aussi bien l'émission que la réception des ondes électromagnétiques [21]. Selon le théorème de réciprocité, les caractéristiques intrinsèques d'une antenne (gain, diagramme de rayonnement, impédance, polarisation) sont rigoureusement identiques en émission et en réception.

2.2.1 Évolution Historique des Antennes

La recherche de nouvelles topologies rayonnantes était motivée par le besoin crucial de concevoir des structures légères, à profil intégré et à faible coût de fabrication, capables de s'intégrer dans les systèmes de communication sans fil en pleine mutation. C'est en 1953 que le chercheur G. A. Deschamps a formalisé pour la première fois le principe fondamental de l'antenne micro-ruban. Cependant, il a fallu attendre les années 1970 pour voir apparaître les premières réalisations pratiques et industrielles, une transition rendue possible grâce aux

progrès significatifs de la science des matériaux, notamment le développement de substrats diélectriques stables et homogènes, ainsi que la standardisation des techniques de photolithographie [22].



Figure 2-1 : Evolution Historique des Antennes Patches

Aujourd'hui, les antennes se positionnent comme l'une des architectures rayonnantes les plus incontournables des technologies sans fil modernes. Leur compacité, leur capacité à opérer sur des bandes de fréquences multi-bandes et leur aptitude à être directement intégrées sur les circuits intégrés radiofréquences en font des composants clés pour des applications de pointe telles que les systèmes de détection radar, les communications satellitaires, les réseaux mobiles de nouvelle génération (5G/6G) et l'Internet des objets (IoT).

2.2.2 Mécanismes d'Emission et de Réception

En configuration d'émission, l'antenne remplit la fonction d'un transducteur. Son rôle principal consiste à convertir l'énergie électromagnétique guidée, acheminée depuis un générateur hyperfréquence en une onde électromagnétique rayonnée dans le milieu de propagation environnant [23]. À l'inverse, lorsqu'elle opère en réception, l'antenne capte une fraction de l'onde électromagnétique incidente voyageant dans l'espace pour la transposer en un signal électrique induit (courant et tension) guidé vers l'étage de réception.

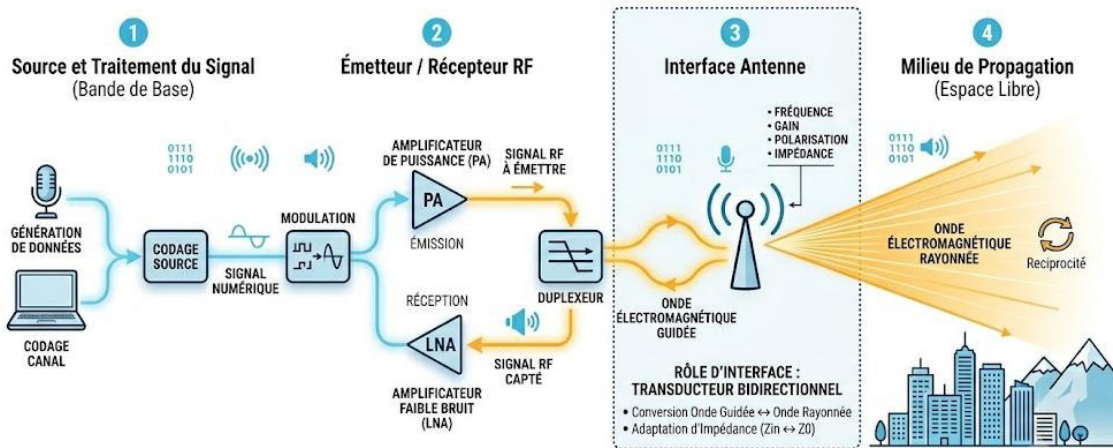


Figure 2-2 : Synoptique Structurel d'une Chaîne de Transmission et Rôle d'Interface de l'Antenne

Il convient de souligner que, dans la grande majorité des applications, les propriétés d'une antenne sont régies par le théorème de réciprocité. Ce principe fondamental implique qu'une même structure physique conserve des propriétés et des paramètres de rayonnement rigoureusement identiques (tels que le gain, le diagramme de rayonnement ou l'impédance), qu'elle soit exploitée en mode émission ou en mode réception.

2.3 Paramètres Caractéristiques d'une Antenne

Afin d'évaluer, de quantifier et de comparer objectivement les performances de diverses topologies d'antennes, il est indispensable de définir un ensemble de paramètres électriques et géométriques fondamentaux. Ces grandeurs normalisées permettent de caractériser précisément le comportement de l'antenne tant sur le plan de son adaptation de puissance que de ses propriétés de rayonnement spatial [7].

2.3.1 Fréquence et Longueur d'Onde

La fréquence opérationnelle f_c (en Hertz, Hz) d'une antenne détermine sa dimension physique. Elle est intimement liée à la vitesse de la lumière dans le vide et à la longueur d'onde par la relation fondamentale :

$$\lambda = c/f \quad (2.1)$$

Pour une antenne patch ou un dipôle classique, la dimension de l'élément rayonnant est généralement de l'ordre de la demi-longueur d'onde.

2.3.2 Impédance d'Entrée

L'impédance d'entrée au niveau des bornes de l'antenne est une grandeur complexe exprimée en Ohms (Ω). Elle se compose d'une partie réelle et d'une partie imaginaire :

$$Z_{in} = R_{in} + jX_{in} \quad (2.2)$$

La résistance d'entrée est elle-même la somme de la résistance de rayonnement (puissance transformée en ondes EM) et de la résistance de pertes (pertes par effet Joule dans les conducteurs et le diélectrique) :

$$R_{in} = R_r + R_l \quad (2.3)$$

Pour maximiser le transfert de puissance entre une ligne de transmission d'impédance caractéristique Z_0 (généralement 50Ω) et l'antenne, il faut que $Z_{in} = Z_0$. Si les impédances diffèrent, une partie de l'énergie est réfléchiée vers la source. Ce phénomène est quantifié par le coefficient de réflexion :

$$\Gamma = \frac{Z_{in} - Z_0}{Z_{in} + Z_0} \quad (2.4)$$

L'adaptation est souvent évaluée par le Taux d'Onde Stationnaire (TOS) ou en Anglais Voltage Stationary Wave Ratio (VSWR), défini par :

$$TOS = \frac{1+|\Gamma|}{1-|\Gamma|} \quad (2.5)$$

Un TOS de 1 indique une adaptation parfaite ($\Gamma = 0$), tandis qu'une valeur inférieure à 2 est généralement tolérée dans les systèmes de télécommunication pratiques.

2.3.3 Coefficient de Réflexion

Afin que le maximum de puissance soit transmis entre différents éléments d'un circuit, il faut que le coefficient de réflexion soit le plus faible possible. Pour cela les différents éléments d'une chaîne d'émission / réception radiofréquence sont conçus pour être adaptés à une impédance caractéristique Z_0 . L'impédance caractéristique peut prendre différentes valeurs en fonction des applications.

Par exemple elle prend une valeur de 75Ω pour des applications grand public comme la réception de la télévision hertzienne ou par satellite. Mais le plus souvent l'impédance caractéristique est fixée à 50Ω dans les milieux professionnels. Ce coefficient met en évidence l'absorption de l'énergie par l'antenne. C'est sur ce paramètre que l'on se base lors de l'optimisation d'une l'antenne. Le coefficient de réflexion peut également s'exprimer en décibel, on parle alors du paramètre S11 qui se définit comme suit :

$$S_{11} = 20 \log(\Gamma) \quad (2.6)$$

2.3.3 Diagramme de Rayonnement

Le diagramme de rayonnement constitue la carte d'identité spatiale d'une antenne.

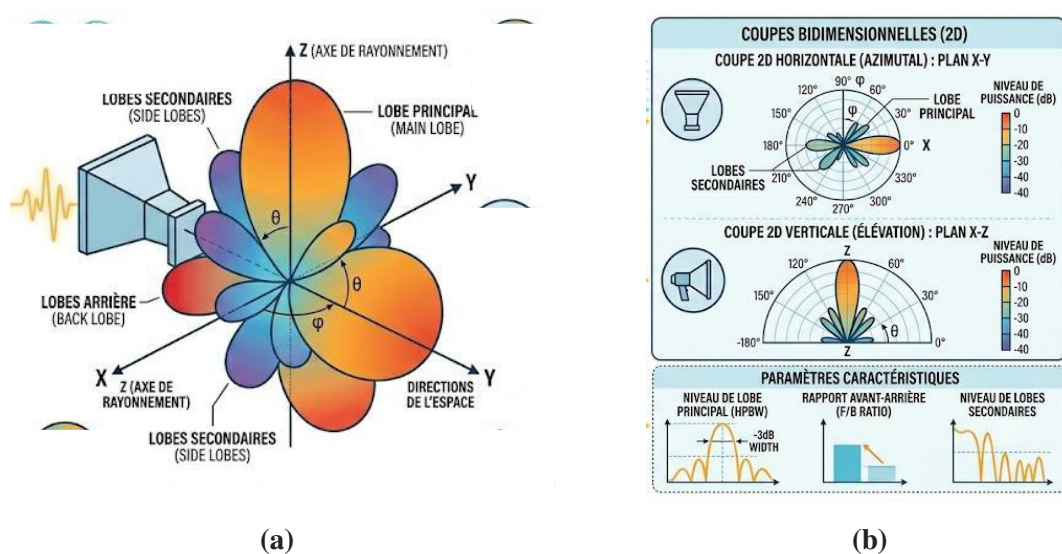


Figure 2-3 : Diagramme de Rayonnement, (a) Présentation Graphique en 3D de la Puissance Rayonnée, (b) Coupe de la Puissance Rayonnée en 2D

Il est défini formellement comme la représentation graphique tridimensionnelle (3D) ou bidimensionnelle (2D) des propriétés de rayonnement de l'antenne, principalement la densité de puissance rayonnée, l'intensité de rayonnement ou l'amplitude du champ électrique en fonction des coordonnées angulaires d'observation (θ , ϕ) dans l'espace lointain (zone de Fraunhofer). En pratique, la distribution de l'énergie dans l'espace n'étant pas uniforme, le diagramme de rayonnement met en évidence une structure géométrique complexe composée de plusieurs régions appelées lobes :

- ❖ **Lobe principal** : Il s'agit de la région qui contient la direction de rayonnement maximal. C'est dans cette zone que l'antenne concentre la majeure partie de son énergie. La largeur de ce lobe, souvent quantifiée par l'ouverture à mi-puissance (HPBW, *Half-Power Beamwidth* à -3dB), définit la directivité de l'antenne.
- ❖ **Lobes secondaires**: Ce sont des lobes de rayonnement parasites qui pointent dans des directions non désirées. En ingénierie des télécommunications, l'objectif est généralement de minimiser leur niveau afin d'éviter le gaspillage d'énergie et de réduire les risques d'interférences avec d'autres systèmes.
- ❖ **Lobe arrière** : Ce lobe est orienté dans la direction diamétralement opposée au lobe principal ($\theta = 180^\circ$) Le rapport entre la puissance rayonnée vers l'avant et celle vers l'arrière est un indicateur crucial de l'efficacité de focalisation de la structure.

Pour des raisons de commodité d'affichage et de quantification mathématique, on privilégie l'extraction de deux coupes bidimensionnelles (2D) orthogonales caractéristiques :

- 1) **Coupe en plan E (Plan Électrique)** : C'est la section du diagramme de rayonnement 3D obtenue dans le plan contenant le vecteur du champ électrique rayonné E ainsi que la direction du rayonnement maximal.

- 2) **Coupe en plan H (Plan Magnétique)** : C'est la section obtenue dans le plan contenant le vecteur du champ magnétique H et la direction du rayonnement maximal, formant un plan orthogonal au plan E.

Ces projections en coordonnées polaires ou cartésiennes permettent d'extraire directement les valeurs numériques clés nécessaires au bilan de liaison, telles que le gain maximal, les angles d'ouverture et l'atténuation des lobes secondaires.

2.3.4 Directivité

La directivité est le rapport entre la densité de puissance rayonnée dans la direction maximale et la densité de puissance qu'aurait une antenne isotrope (qui rayonne uniformément dans toutes les directions) rayonnant la même puissance totale :

$$D = 4\pi \frac{U_{max}}{P_{rad}} \quad (2.7)$$

La directivité est un paramètre fondamental qui quantifie la capacité d'une antenne à focaliser l'énergie électromagnétique dans une ou plusieurs directions privilégiées de l'espace. Contrairement à une source idéale qui distribuerait son énergie de manière parfaitement homogène, une antenne réelle présente des propriétés de rayonnement anisotropes. Une antenne parfaitement isotrope possède une directivité de 1 soit 0dBi. Un dipôle demi-onde ($\lambda/2$) conventionnel, qui sert souvent de référence pratique, possède une directivité maximale de 1,64 soit 2,15 dBi en raison de son diagramme en forme de tore (omnidirectionnel dans un plan). Les antennes patches élémentaires présentent généralement une directivité comprise entre 5 et 9 dBi.

2.3.5 Gain

Contrairement à la directivité, le gain prend en compte les pertes physiques intrinsèques de l'antenne. Il est lié à la directivité par l'efficacité de rayonnement :

$$G = \eta \cdot D \text{ avec } 0 \leq \eta \leq 1 \quad (2.8)$$

$$G = 4\pi \frac{U_{max}}{P_{accepted}} \quad (2.9)$$

Où $P_{accepted}$ est la puissance totale acceptée à l'entrée de l'antenne. Le gain est couramment exprimé en décibels par rapport à une antenne isotrope.

Le gain est l'un des paramètres les plus cruciaux lors de la conception d'un système de radiocommunication et de l'établissement d'un bilan de liaison. Dans un scénario pratique, une partie de la puissance issue du générateur n'est pas acceptée par l'antenne en raison d'un défaut d'adaptation d'impédance à l'accès.

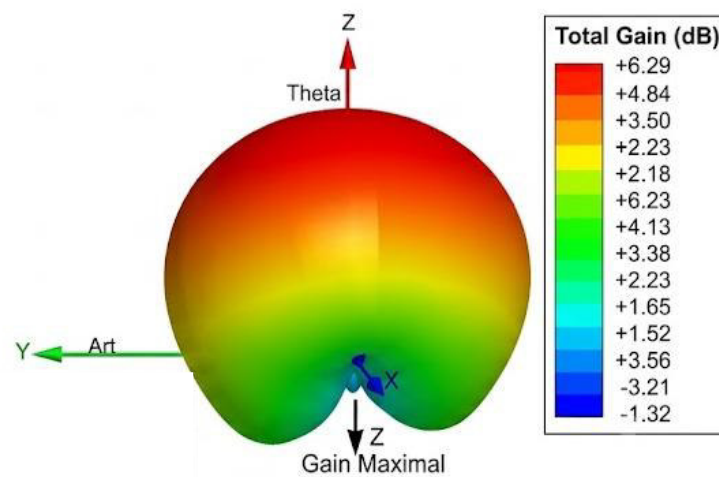


Figure 2-4 : Gain d'une Antenne Patch

On définit alors le gain réalisé, qui prend en compte le coefficient de réflexion à l'entrée de la ligne :

$$G_{réalisé} = 1 - |\Gamma|^2 \quad (2.10)$$

Ce paramètre est le plus fidèle à la réalité des mesures en laboratoire, car il combine à la fois l'efficacité de rayonnement intrinsèque et la qualité de l'adaptation d'impédance de la structure. Pour les antennes patches, l'optimisation du gain passe souvent par le choix de substrats à faibles pertes et par

l'augmentation de l'épaisseur du substrat, dans les limites physiques imposées par l'apparition d'ondes de surface parasites.

2.3.6 Polarisation

La polarisation d'une antenne correspond à l'orientation du vecteur champ électrique de l'onde rayonnée dans le temps, observée dans la direction de propagation maximale. On distingue trois types principaux :

- 1) **Polarisation Linéaire** : Le vecteur oscille le long d'une seule droite (horizontale ou verticale). C'est le cas des antennes dipôles classiques.
- 2) **Polarisation Circulaire** : Le vecteur tourne en décrivant un cercle (droite ou gauche). Très utilisée dans les communications satellitaires (GPS) pour s'affranchir de l'alignement de l'antenne et des effets de la rotation de Faraday dans l'ionosphère.
- 3) **Polarisation Elliptique** : Le cas le plus général où le vecteur décrit une ellipse.

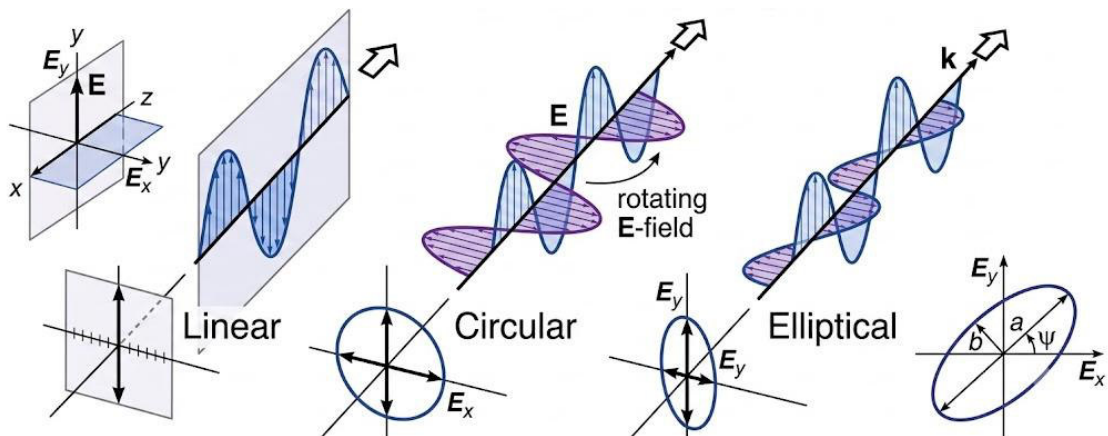


Figure 2-5 : Types de Polarisation

Une mauvaise adaptation de polarisation entre l'antenne émettrice et l'antenne réceptrice entraîne des pertes par désalignement de polarisation, pouvant aller jusqu'à une coupure totale du signal (perte théorique infinie entre une onde polarisée verticalement et une antenne polarisée horizontalement).

2.3.7 Bande passante

La bande passante d'une antenne désigne l'intervalle de fréquences à l'intérieur duquel les performances du dispositif satisfont à une norme ou à un critère prédéfini []. Bien que la bande passante puisse être définie par rapport au diagramme de rayonnement ou au gain, elle se réfère le plus souvent au critère d'adaptation impédant. Si f_{min} est la fréquence minimale et f_{Max} la fréquence maximale respectant ce critère, la bande passante absolue s'exprime par :

$$\Delta f = f_{Max} - f_{min} \quad (2.11)$$

Pour évaluer la largeur de bande de manière indépendante de la bande de fréquence de travail, on utilise la largeur de bande relative (bande passante fractionnaire), en Anglais Fractional Bandwidth (FBW) exprimée en pourcentage par rapport à la fréquence centrale de résonance :

$$BFF = \frac{\Delta f}{f_c} \quad (2.12)$$

Les antennes patches conventionnelles présentent typiquement une bande passante relative étroite, de l'ordre de 2% à 5%, d'où la nécessité de recourir à des techniques d'optimisation complexe pour les rendre multi-bandes.

2.4 Antennes Patches

2.4.1 Description Technologique

L'origine théorique des structures d'antennes imprimées remonte aux travaux pionniers de G. A. Deschamps en 1953, qui introduisit le concept d'éléments radiateurs alimentés par des lignes micro-rubans [11]. Cependant, cette technologie est restée en veilleuse pendant près de deux décennies en raison de l'absence de substrats diélectriques stables et de techniques de photolithographie précises. C'est au début des années 1970, poussé par le boom des industries aérospatiales et militaires exigeant des antennes à profil ultra-bas pour les missiles et les avions, que le développement des antennes patches a

connu un essor fulgurant. Depuis lors, elles font continuellement l'objet d'innovations physiques majeures.

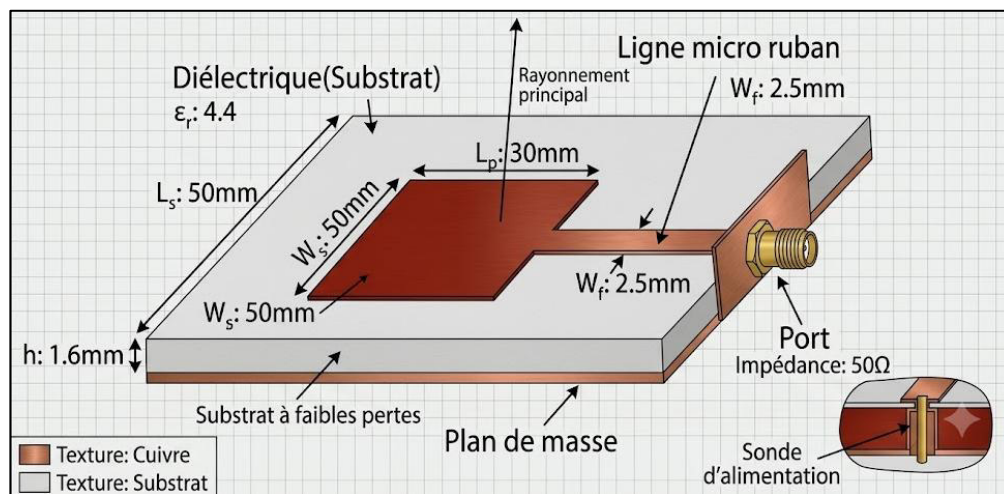


Figure 2-6 : Antenne Patch Alimentée par une Ligne Micro-ruban

Dans sa configuration fondamentale, une antenne patch est un dispositif multicouche à géométrie plane. Elle se compose de trois éléments superposés :

- 1) **Patch (ou élément rayonnant) :** Une fine couche métallique conductrice (généralement du cuivre), caractérisée par une géométrie spécifique de longueur (l) et de largeur (w), gravée sur la face supérieure.
- 2) **Substrat diélectrique :** Une plaquette isolante d'épaisseur constante (h), insérée entre le patch et le plan de masse, définie par sa permittivité diélectrique relative (ϵ_r) et sa tangente de pertes (δ).
- 3) **Plan de masse métallique :** Une couche conductrice continue recouvrant l'intégralité de la face inférieure du substrat, jouant le rôle de réflecteur et de potentiel de référence.

Bien que le patch rectangulaire soit la structure la plus simple à modéliser et la plus répandue, l'élément rayonnant peut adopter de multiples autres formes géométriques : carrée, circulaire, elliptique, triangulaire, ou en anneau [11]. Le choix de la forme géométrique n'est pas purement esthétique ; il est dicté par les exigences de l'application en termes de polarisation (linéaire ou circulaire), de gain, d'encombrement et de modes de résonance électromagnétique excités.

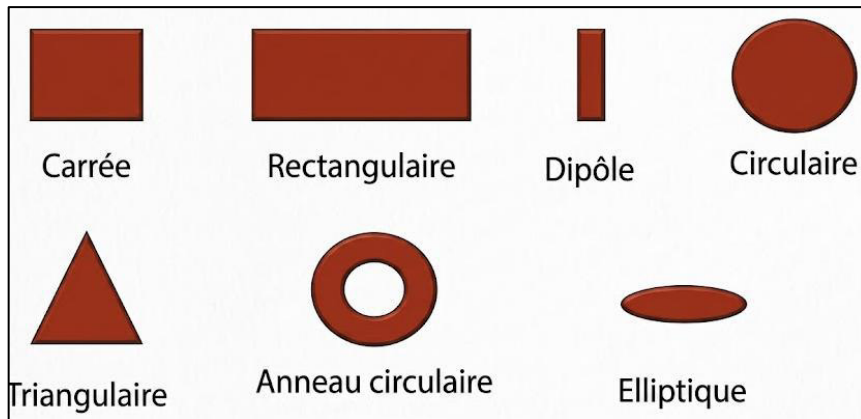


Figure 2-7 : Différentes formes du patch

2.4.2 Mécanisme Physique de Rayonnement

Le mécanisme de rayonnement d'une antenne patch ne provient pas directement de la surface conductrice pleine du métal, mais trouve son origine physique dans le phénomène des champs frangeants, en Anglais fringing fields s'établissant aux discontinuités des bords du patch [25]. Lorsque la structure est excitée par une source RF, une distribution complexe de charges électriques apparaît : des charges positives s'accumulent sur la face inférieure du patch tandis que des charges négatives se concentrent sur le plan de masse en regard.

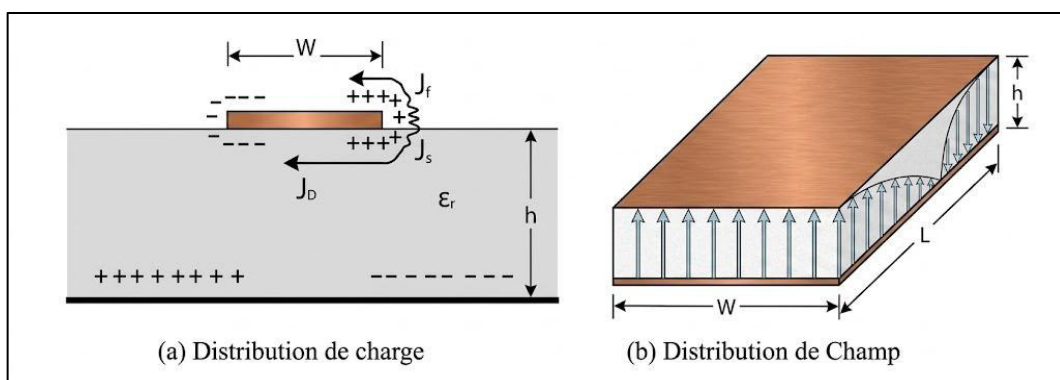


Figure 2-8 : Distribution de Charge du Champ dans l'Antenne Patch

Pour le mode fondamental de résonance d'un patch rectangulaire, le mode TM_{10} , la longueur du patch est sensiblement proche d'une demi-longueur d'onde guidée). À cette fréquence, le champ électrique normal au substrat s'inverse entre les deux bords rayonnants distants. Aux extrémités du patch, le champ ne s'arrête

pas brusquement ; en raison de la troncature du métal, les lignes de champ électrique s'incurvent et débordent vers l'extérieur dans l'espace libre avant de rejoindre le plan de masse. Ces composantes de champ frangeant peuvent être décomposées en une composante normale au plan de masse et une composante tangentielle.

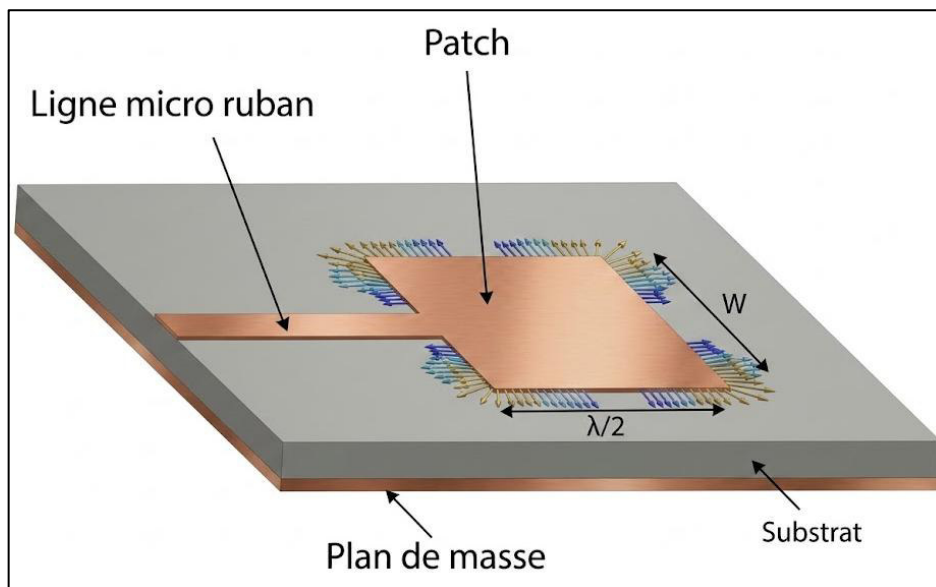


Figure 2-9 : Configuration du Champ Electrique du Radiateur

Les composantes normales sont en opposition de phase aux deux bords et s'annulent mutuellement en champ lointain. En revanche, les composantes tangentielles sont rigoureusement en phase ; elles s'additionnent de manière constructive, faisant agir les deux bords du patch comme deux fentes rayonnantes synchrones distantes. C'est ce mécanisme spécifique qui génère le rayonnement de l'antenne vers le demi-espace supérieur.

Du fait de ce débordement des champs en dehors du diélectrique, le patch apparaît électriquement plus long que sa dimension physique réelle. Pour modéliser ce phénomène en ingénierie, on introduit une permittivité diélectrique effective (ϵ_{eff}) qui tient compte du fait que l'onde voyage en partie dans le substrat et en partie dans l'air et une extension de longueur (Δl) à chaque extrémité. La fréquence de résonance (f_c) pour le mode fondamental s'exprime alors en fonction de la longueur effective par la formule fondamentale :

$$f_r = \frac{c}{2L_{eff} \sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (2.12)$$

Où c représente la vitesse de la lumière dans le vide. La maîtrise de ces paramètres mathématiques est indispensable lors de la phase de conception initiale avant toute optimisation sous SSHF.

2.4.3 Techniques d'Alimentation

Le choix de la technique d'excitation est un jalon structurant dans la conception d'une antenne microbande, car elle affecte directement l'adaptation d'impédance, la pureté de la polarisation, l'apparition de rayonnements parasites et la complexité d'intégration industrielle. Ces techniques se divisent fondamentalement en deux familles : les alimentations par contact direct (galvaniques) et les alimentations sans contact (par couplage électromagnétique).

- 1) Alimentation par ligne micro-ruban :** Cette méthode consiste à connecter directement une ligne de transmission micro-ruban de faible largeur au bord de l'élément rayonnant. La ligne et le patch sont gravés simultanément sur la même couche métallique supérieure, faisant de cette technique la solution la plus simple à fabriquer et à modéliser [25].

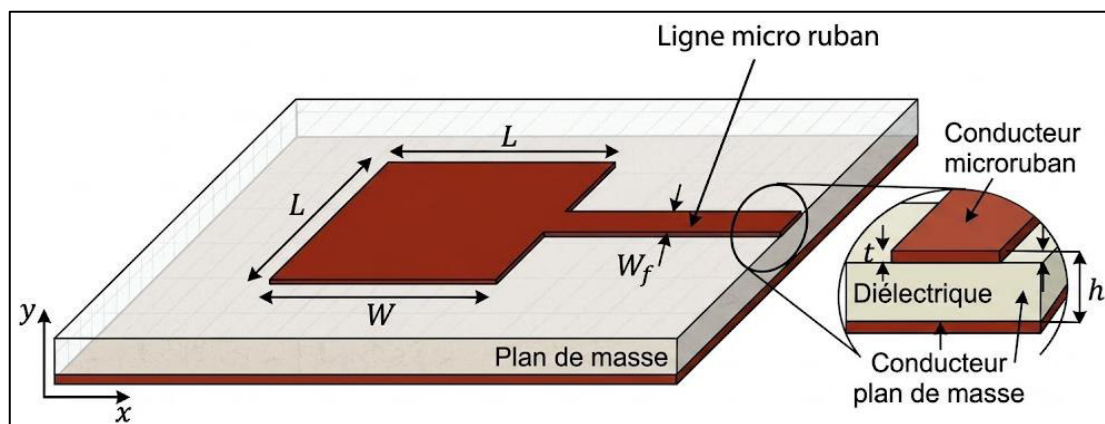


Figure 2-10 : Alimentation par Ligne Micro-Ruban

L'inconvénient majeur réside dans le fait que l'impédance au bord d'un patch résonnant est généralement élevée (plusieurs centaines d'ohms), alors que la ligne possède une impédance standard de 50Ω . Pour réaliser l'adaptation, on pratique généralement une encoche dans le patch pour

amener la ligne au point où l'impédance est exactement de 50Ω . De plus, à de hautes fréquences, la ligne d'alimentation elle-même rayonne de manière parasite, ce qui dégrade la pureté du diagramme de rayonnement.

- 2) **Alimentation par sonde ou câble coaxial :** Dans cette configuration galvanique, le conducteur interne (l'âme) d'un câble coaxial traverse de part en part le plan de masse et le substrat diélectrique pour venir se souder directement sur le patch conducteur supérieur. Le conducteur externe du câble est quant à lui connecté mécaniquement et électriquement au plan de masse. L'avantage crucial de cette méthode est qu'elle offre la liberté de placer le point d'alimentation à n'importe quel endroit à l'intérieur de la surface du patch, permettant ainsi une adaptation d'impédance aisée (le centre du patch étant un court-circuit virtuel à impédance nulle, et le bord à impédance maximale). Elle génère également un rayonnement parasite très faible. Cependant, le perçage des couches rend la fabrication industrielle plus complexe, et l'inductance parasite introduite par la longueur de la broche coaxiale limite fortement la bande passante pour des substrats épais ($h > 0.02\lambda$) [25].

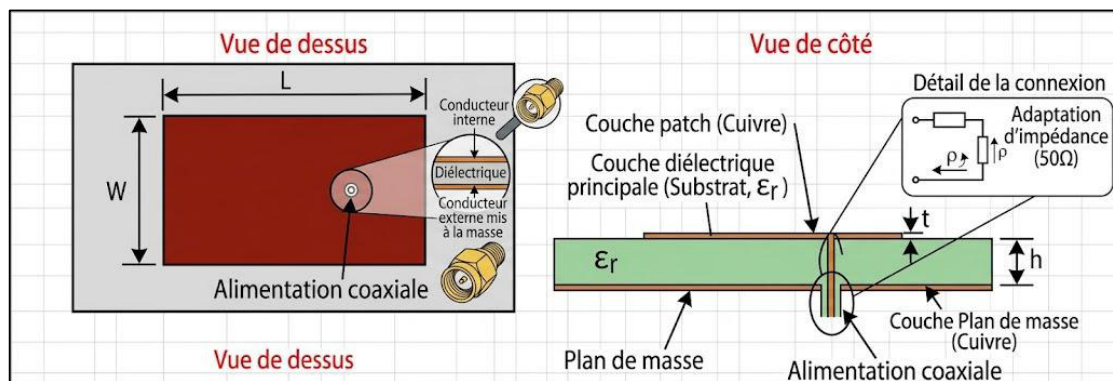


Figure 2-11 : Alimentation par Câble Coaxial

- 3) **Alimentation par fente :** Il s'agit d'une technique multicouche sans contact. Elle utilise deux substrats isolés séparés par un plan de masse intermédiaire. La ligne d'alimentation micro-ruban est gravée sur la face inférieure du substrat du bas, tandis que le patch rayonnant occupe la face supérieure du substrat du haut. Le transfert d'énergie s'effectue par un couplage électromagnétique à travers une fente (ouverture géométrique)

pratiquée judicieusement dans le plan de masse central. Cette topologie permet d'isoler totalement la partie alimentation (parasite) du demi-espace de rayonnement du patch, optimisant le diagramme. La fabrication requiert un alignement micrométrique rigoureux des couches, augmentant les coûts [25].

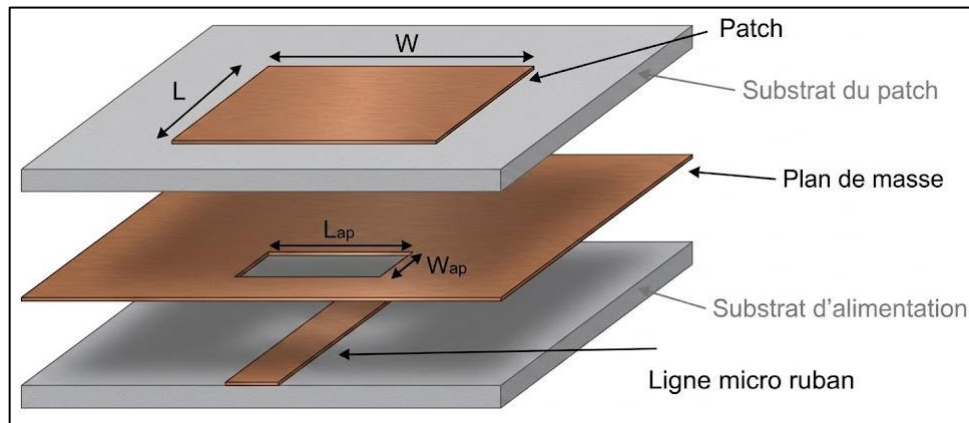


Figure 2-12 : Alimentation par Fente

- 4) **Alimentation par couplage de proximité :** Cette méthode met également en œuvre deux couches de substrat. La ligne d'alimentation est insérée ("sandwichée") directement entre les deux diélectriques, s'arrêtant net sous l'élément patch qui est gravé tout au-dessus. Le plan de masse reste continu tout en bas. L'énergie est transmise au patch par couplage capacitif pur à travers la couche supérieure du diélectrique.

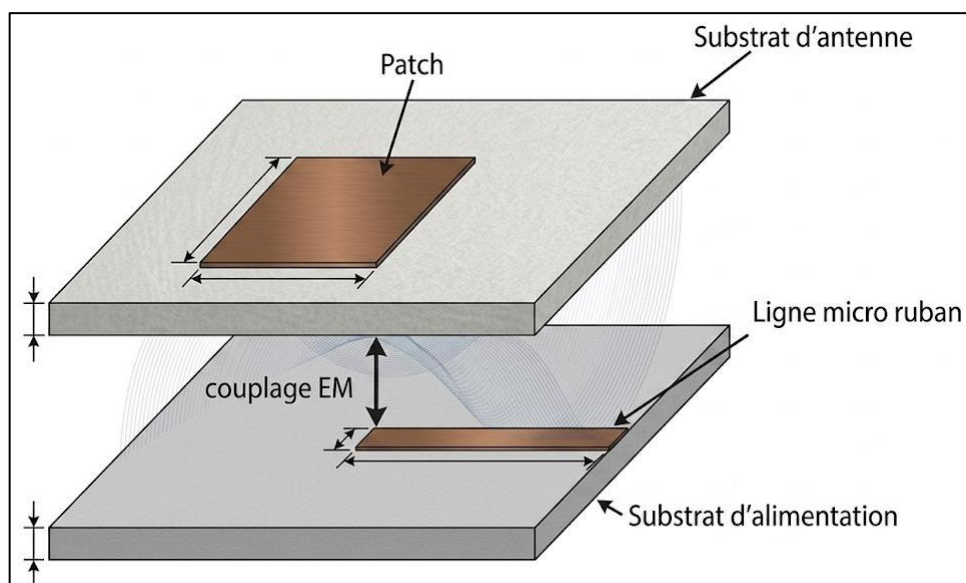


Figure 2-13 : Alimentation par couplage de proximité

Cette technique offre le grand avantage d'éliminer l'inductance de broche et permet d'atteindre les bandes passantes les plus larges (jusqu'à 13%), bien qu'elle souffre des mêmes contraintes de complexité d'alignement tridimensionnel.

Afin de guider le choix technologique lors de la modélisation sous SSHF, le Tableau (2-1) résume et compare les caractéristiques fondamentales de ces quatre configurations d'alimentation.

Tableau 2-1 : Comparaison des Propriétés des Méthodes d'Alimentation

| Caractéristiques | Micro-ruban | Ligne coaxiale | Fente | Proximité |
|--------------------------------|-----------------|---------------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Rayonnement parasite | <i>Plus</i> | <i>Plus</i> | <i>Moins</i> | <i>Minimum</i> |
| Fiabilité | <i>Meilleur</i> | <i>Paivre</i> | <i>Bon</i> | <i>Bon</i> |
| Facilité de fabrication | <i>Facile</i> | <i>Soudure et Forage requis</i> | <i>Alignement requis</i> | <i>Alignement requis</i> |
| Bande passante | <i>2 à 5%</i> | <i>2 à 5%</i> | <i>2 à 5%</i> | <i>13%</i> |

2.5 Avantages, Limitations et Domaines d'Application

2.5.1 Balance Technologique

L'adoption massive des antennes patches au sein de l'industrie des télécommunications s'explique par des atouts structurels uniques : un profil ultra-bas permettant une intégration plane presque invisible, un poids extrêmement réduit, un coût de production très faible via les procédés de gravure de circuits imprimés de masse (PCB), et la capacité remarquable d'imprimer simultanément les réseaux de lignes d'alimentation et les circuits d'adaptation d'impédance sur le même substrat diélectrique. De plus, leur flexibilité géométrique permet de concevoir des structures multi-bandes et à double polarisation. Cependant,

l'ingénieur doit composer avec des limitations physiques sévères : une bande passante intrinsèquement étroite, un gain modéré (généralement compris entre 5 et 8dBi pour un élément isolé), des pertes ohmiques et diélectriques non négligeables à haute fréquence, et une puissance admissible limitée empêchant leur usage dans les systèmes d'émission à forte puissance. L'apparition d'ondes de surface au sein du diélectrique peut également dégrader l'efficacité de rayonnement.

2.5.2 Domaines d'Application et Usages Modernes

Malgré ces contraintes, l'optimisation des structures a ouvert la voie à un déploiement d'envergure dans plusieurs secteurs de pointe [26] :

- ❖ **Communications mobiles et satellitaires** : Intégrées de façon transparente dans les smartphones, les antennes patches permettent de couvrir plusieurs bandes de fréquences cellulaires. En communication par satellite, leur aptitude à générer une polarisation circulaire (via la troncature des coins du patch) est indispensable pour contrer les effets de la rotation de Faraday.
- ❖ **Réseaux sans fil** : Les antennes patches jouent un rôle primordial dans le déploiement des réseaux locaux sans fil, notamment pour les technologies Wi-Fi. En raison de leur profil compact et de leur facilité d'intégration directe sur les circuits imprimés, elles sont massivement utilisées dans les points d'accès domestiques (routeurs), les boîtiers connectés et les terminaux utilisateurs (ordinateurs portables, tablettes). De plus, leur aptitude à être configurées en réseaux d'antennes (arrays) facilite l'implémentation de la technologie MIMO (*Multiple-Input Multiple-Output*).

- ❖ **Systèmes Radars Haute Précision** : La technologie Ultra Large Bande (ULB) exploite les propriétés d'antennes imprimées optimisées pour l'imagerie radar et la détection d'obstacles à haute résolution, bénéficiant de leur compacité et de leur facilité de mise en réseau.
- ❖ **Applications biomédicales et télémédecine** : Dans les réseaux de capteurs corporels (WBAN) et les systèmes de transmission de données chirurgicales en temps réel, la légèreté et le caractère non invasif des patches ULB sont hautement plébiscités.
- ❖ **Systèmes avioniques avancés** : Les instruments de bord, à l'instar du système de prévention des collisions aériennes TCAS II, emploient des configurations hybrides associant des réseaux de patches directifs placés judicieusement sur le fuselage des avions pour assurer une couverture angulaire totale.
- ❖ **Système de positionnement global (GPS)** : Les récepteurs GPS (civils et militaires) embarqués dans les navires, véhicules terrestres ou drones utilisent quasi exclusivement des antennes patches carrées ou circulaires accordées sur les fréquences de résonance [12 – 15] GHz.

2.6 Perspectives pour les Antennes Patch

Le deuxième chapitre a permis d'établir de manière exhaustive le cadre théorique et conceptuel indispensable à la compréhension des antennes micro-rubans. Nous avons passé en revue l'ensemble des paramètres physiques fondamentaux qui gouvernent le rayonnement et les circuits RF, jetant ainsi les bases d'une méthodologie d'analyse rigoureuse. L'étude détaillée de la structure de l'antenne patch a mis en exergue le rôle fondamental du substrat diélectrique et de la géométrie de l'élément rayonnant, dont le mécanisme de rayonnement repose intrinsèquement sur le comportement des champs frangeants.

L'analyse comparative des techniques d'alimentation a mis en évidence le compromis permanent entre la facilité de mise en œuvre industrielle et l'optimisation des performances électriques (notamment la bande passante et la réduction des rayonnements parasites). Il apparaît clairement que les caractéristiques finales d'une antenne imprimée résultent d'une interaction complexe entre sa forme, l'épaisseur et la nature de son substrat, et son mode d'excitation.

La maîtrise de ces interdépendances est le prérequis obligatoire pour aborder la problématique centrale de ce mémoire : la conception optimisée de structures multi-bandes. Ces fondements théoriques étant solidement posés, le chapitre suivant sera consacré à la mise en œuvre pratique de ces concepts à travers la modélisation et la simulation numérique sous l'environnement logiciel SSHF (Simulation Électromagnétique Hautes Fréquences), afin de concevoir et valider des prototypes d'antennes innovants.

CHAPITRE 3

Conception Optimisée d'Antennes Patches Multi-Bande sous SSFH

3.1 Introduction

L'essor croissant des technologies de communication sans fil a engendré une demande importante pour des antennes toujours plus compacts et performants. Parmi les solutions technologiques disponibles, l'antenne patch micro-ruban s'est imposée comme une référence incontournable. Ses avantages intrinsèques notamment sa faible masse, son profil bas, sa facilité de fabrication et son coût de production réduit, en font le candidat idéal pour répondre aux contraintes d'intégration des dispositifs modernes. Face à l'évolution constante des standards de communication, les travaux de recherche actuels se concentrent sur l'optimisation de ses paramètres radioélectriques afin de satisfaire les exigences complexes des réseaux de nouvelle génération [26].

Dans ce contexte, ce travail de recherche porte sur la conception, l'analyse et l'optimisation d'antennes patches double-bande et multi-bandes, dédiées aux applications sans fils en bandes de fréquences de 1 GHz à 7 GHz. L'architecture proposée repose sur un substrat diélectrique FR4 disponible et intègre une structure compacte alimentée par une ligne micro-ruban, garantissant une adaptation d'impédance optimale. L'objectif central est de démontrer l'efficacité de cette configuration pour répondre aux besoins spécifiques des applications différentes telles que l'IoT, Wi-Fi, Wi-Max et les télécommunications d'entreprise [27].

Les résultats obtenus via l'environnement de modélisation SSFH confirment des performances prometteuses de l'antenne, tant en termes de coefficient de réflexion que rapport d'ondes stationnaire et de bande passante ce qui valide la fiabilité de la transmission des signaux, positionnant cette antenne comme une solution efficace pour les objets connectés. Enfin, au-delà des résultats présentés, cette étude ouvre des perspectives stimulantes, notamment à travers le développement futur d'antennes de systèmes MIMO, visant à accroître encore davantage la capacité et la résilience des systèmes de communication sans fil de nouvelle génération.

3.2 Description de l'Environnement de Conception - SSFH

L'Environnement SSFH (Simulateur de Structures à Hautes Fréquences), en Anglais HFSS (High Frequency Structure Simulator) est un outil de simulation électromagnétique (EM) plein-onde à hautes performances [27], dédié à la modélisation tridimensionnelle (3D) de dispositifs passifs de géométrie arbitraire. Intégré dans un environnement de conception et d'optimisation, il combine des modules de simulation, de modélisation solide, de visualisation et d'automatisation, permettant de résoudre des problèmes complexes de manière rapide et rigoureuse.

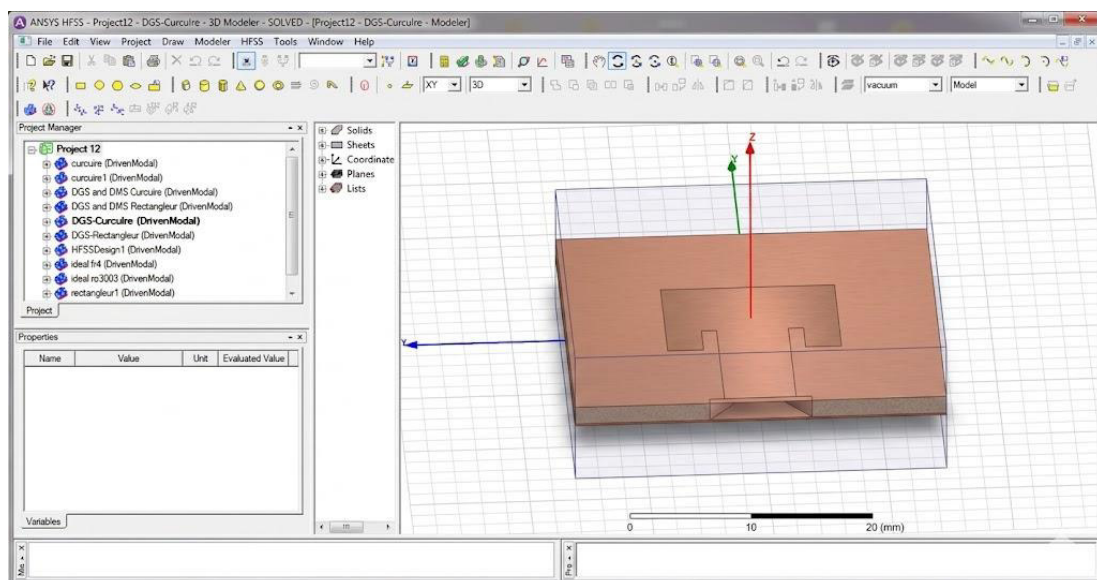


Figure 3-1 : Interface SHFF

Fondé principalement sur la méthode des éléments finis (FEM) associée à un algorithme de maillage adaptatif, SSFH permet d'extraire les paramètres caractéristiques des structures hautes fréquences, tels que la matrice de répartition, les fréquences de résonance ainsi que la distribution des champs électromagnétiques. L'élément de base utilisé pour la discrétisation spatiale est le tétraèdre. Cette approche géométrique permet d'épouser fidèlement les structures 3D complexes et incurvées, réduisant ainsi considérablement le temps de calcul par rapport aux méthodes de discrétisation classiques. Grâce à des décennies de développements conjoints avec le monde industriel, SHFF s'est imposé comme l'outil de référence pour la recherche, le développement et le prototypage virtuel.

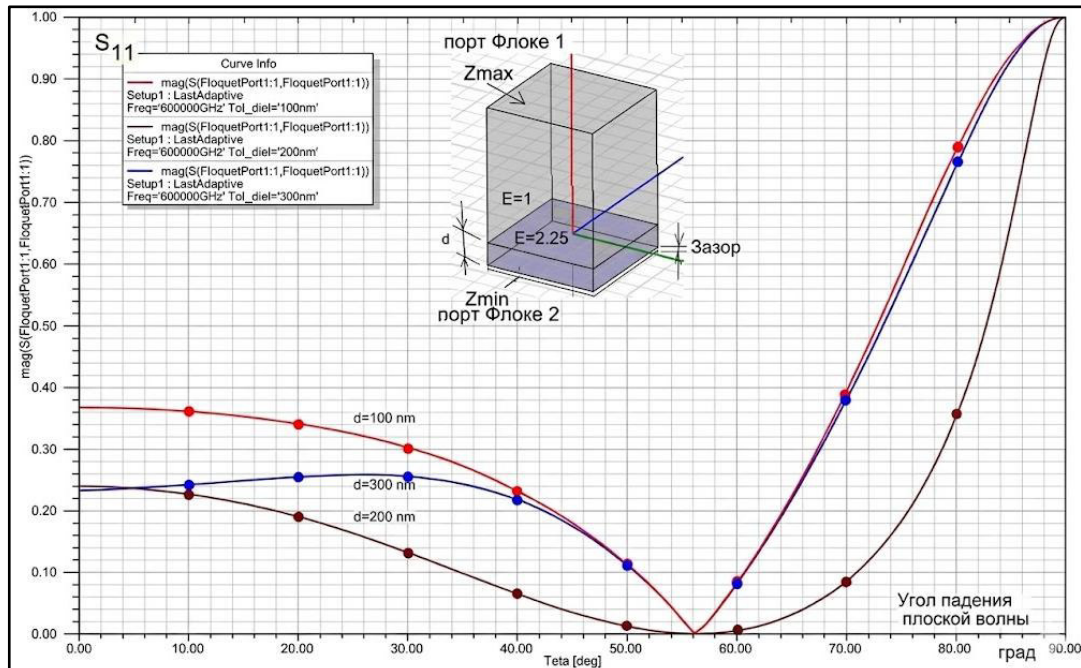


Figure 3.2 : Capacités de Calcul Haute Performance de SSFH

Le maillage adaptatif de SSFH est automatiquement raffiné dans les zones de fortes variations du champ électromagnétique ou de fortes discontinuités géométriques. L'intégration de l'algorithme de maillage tétraédrique garantit la génération de mailles stables, denses et hautement fidèles à la structure réelle. De plus, la résolution des systèmes d'équations s'appuie sur des éléments à ordre mixte et des techniques de décomposition de domaine, ce qui permet d'exploiter pleinement les architectures de calcul haute performance (CHP). Sur le plan de la modélisation, le SHFF facilite l'interopérabilité via des fonctionnalités avancées d'importation et de projection de modèles 2D et 3D. Le spectre d'analyse de SSFH couvre un large éventail d'applications micro-ondes et antennaires. Il permet de caractériser précisément les champs électriques et magnétiques (en régime harmonique et transitoire), les densités de courant, ainsi que les diagrammes de rayonnement en champ proche et en champ lointain. Cette haute précision de calcul fait de SSFH un outil fiable pour le développement de dispositifs complexes incluant des composants actifs et passifs, des circuits intégrés micro-ondes multicouches (CIMM), ainsi que des antennes RF, micro-ondes, millimétriques ou à applications THz.

3.3 Conception Optimisée d'Antennes Patches Duel-Bande sous SSFH

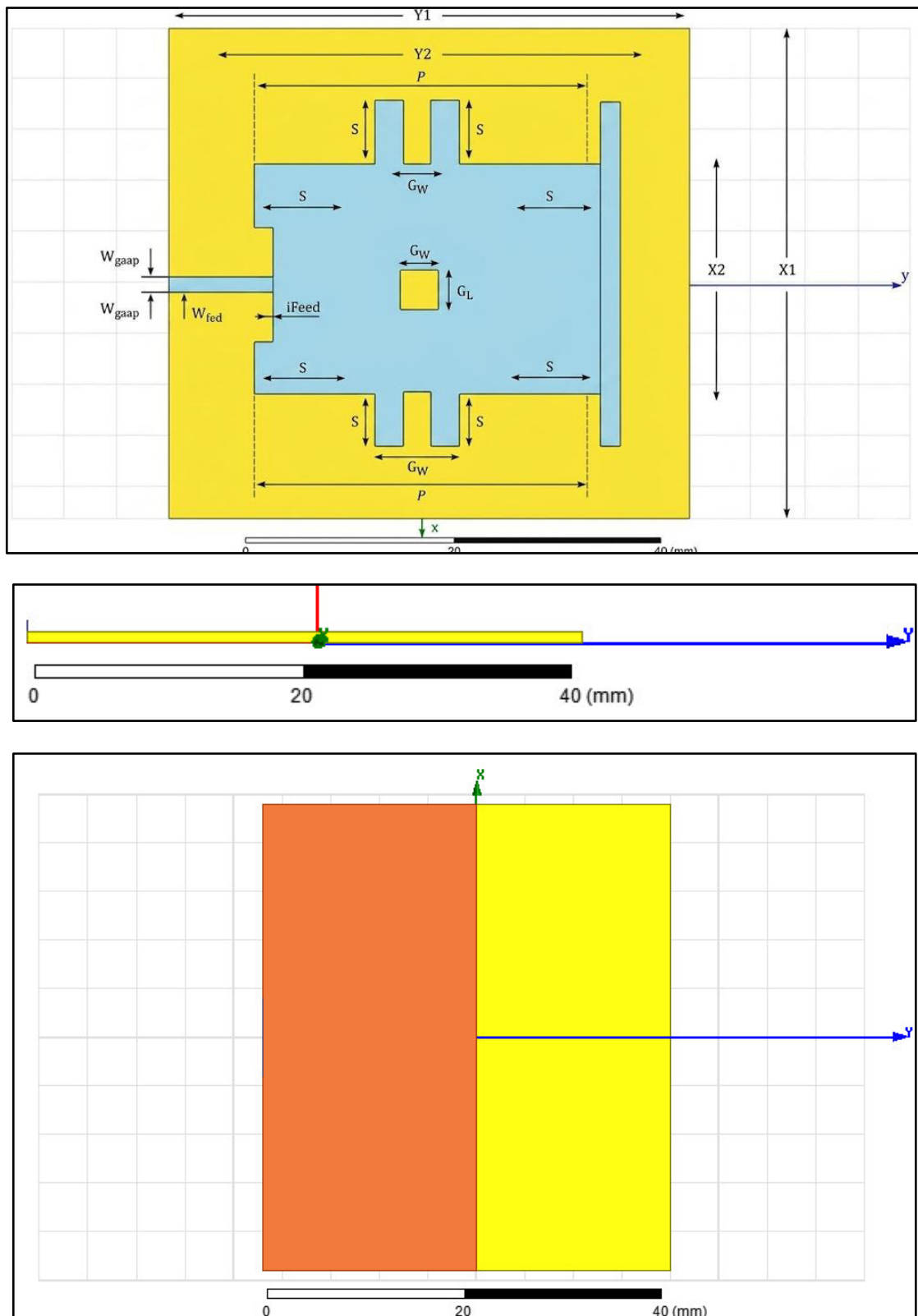


Figure 3-3 : Antenne Patch Duel-Bande Optimisée Sous SSFH

En premier temps, les équations fondamentales sont initialement analysées pour modéliser une première conception d'antenne patch rectangulaire [28] et pour sélectionner le substrat diélectrique le plus approprié indiquées au Tableau (4-1).

Tableau 3-1 : Étapes et Paramètres de Conception Initiaux

| N | Cible | Modele | Description |
|---|-------------------------------------|--|---|
| 1 | Largeur du Patch | $w = \frac{c}{2f_r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}}$ | $c =$ Vitesse de la lumière $\epsilon_r =$ Constante du diélectrique effective |
| 2 | Constante du diélectrique effective | $\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(\frac{1}{\sqrt{1 + \frac{12h}{w}}} \right)$ | / |
| 3 | Longueur du Patch | $L = L_{eff} - 2\Delta L$ $L_{eff} = \frac{c}{2f_r \sqrt{\epsilon_{eff}}}$ | $\Delta L = 0.412h \frac{(\epsilon_{eff} + 0.3) \left(\frac{w}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon_{eff} - 0.258) \left(\frac{w}{h} + 0.8 \right)}$ Calcul de l'extension de la longueur |
| 4 | Excitation | $50 = R_{in} \left(\cos \left(\frac{\pi}{L} y_0 \right) \right)^2$ | $R_{in} =$ l'impédance d'entrée au bord rayonnant principal du patch et $50(\Omega)$ est l'impédance souhaitée. |

La simulation électromagnétique a été conduite en utilisant le solveur « Driven Modal ». Le modèle numérique est constitué d'un substrat en FR4 ($\epsilon_r = 4.4$) d'épaisseur de ($h = 0.8$), surmonté d'un patch rayonnant métallique et reposant sur un plan de masse. Afin de modéliser le comportement de conducteurs parfaits, les surfaces métalliques du patch et du plan de masse ont été affectées d'une condition aux limites « Perfect E », conducteur électrique parfait. Pour assurer une modélisation fidèle de l'espace libre et minimiser les réflexions parasites aux frontières du domaine de calcul, une boîte d'air « Airbox » a été créée autour de l'antenne, laquelle a été définie avec une condition aux limites de frontière absorbante « Radiation Boundary ». L'excitation du système est réalisée par l'intermédiaire d'un port localisé « Lumped Port », positionné à l'entrée de la ligne de transmission pour injecter le signal. Enfin, un balayage en fréquence « Frequency Sweep » a été effectué sur une plage étendue allant de 2 GHz à 7 GHz, permettant ainsi de caractériser précisément l'ensemble des modes de résonance et la bande passante de l'antenne. Finalement, l'étude est arrivée à présenter une conception efficace d'une antenne

patch micro-ruban rectangulaire montrée par la Figure (3-4), optimisée sous SSHF pour résonner à une fréquence de 3 GHz et 5.3 GHz comme le montre la Figure (3-5) afin de répondre aux exigences des systèmes de communications sans fil en mode de fréquences dual-bande, spécialement destinées pour l'application de Wi-Fi et de Wi-Max.

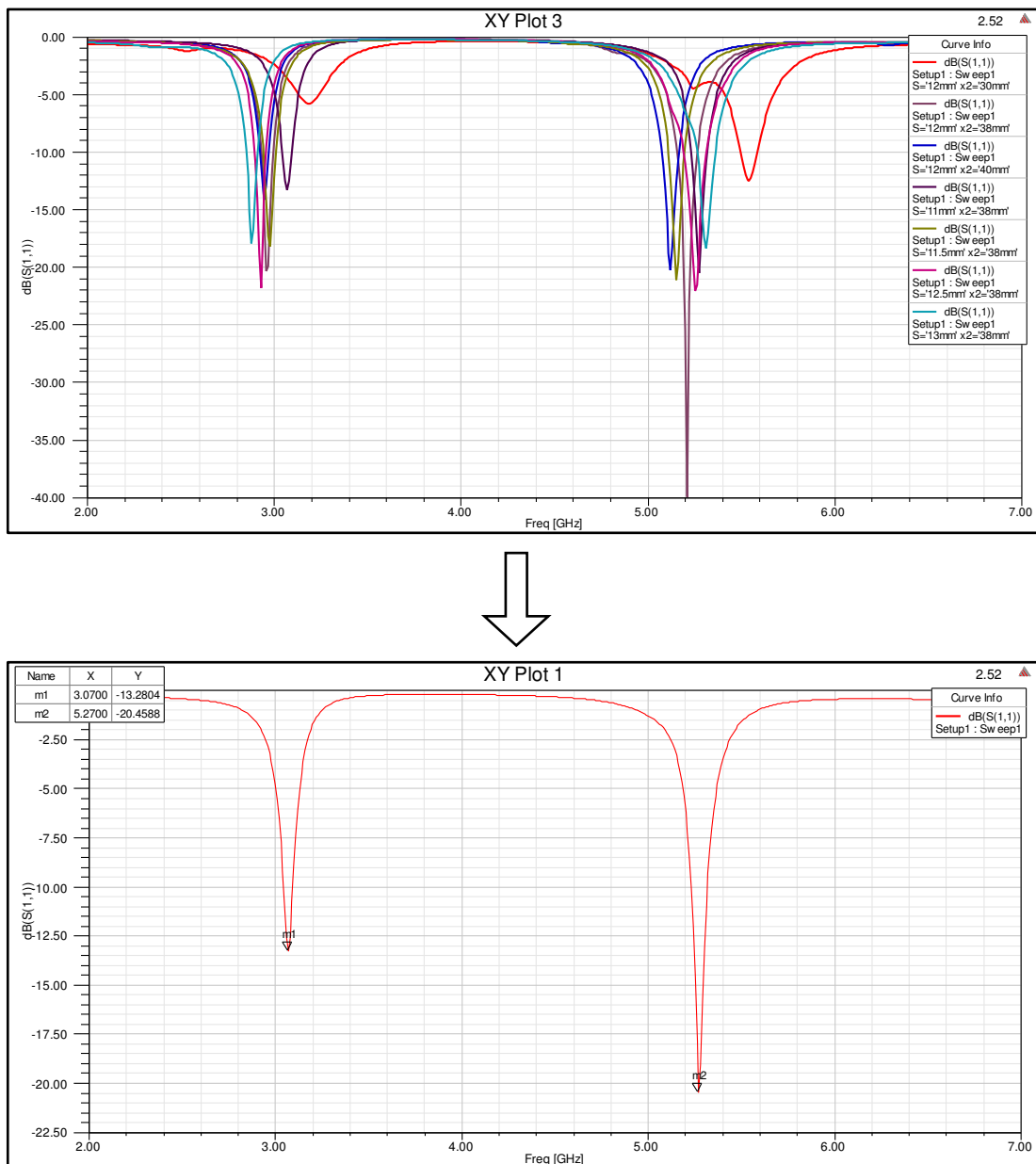


Figure 3-4 : Coefficient de Réflexion de l'Antenne Patch Dual-Bande Optimisée Sous SSHF

L'optimisation des paramètres géométriques de l'antenne contribue de manière significative à l'amélioration de la réponse électromagnétique et permet

d'atteindre un très faible coefficient de réflexion, avec une valeur inférieure à -13dB à -20dB pour les fréquences de résonance. En examinant les autres paramètres de l'antenne, il est observé le Rapport d'ondes Stationnaires (ROS) présente une valeur communément acceptée dans la plupart des applications pratiques des réseaux sans fil surtout pour la deuxième fréquence de résonance où 89% de la puissance est transmis, ce qui est généralement considéré comme un fonctionnement tout à fait satisfaisant.

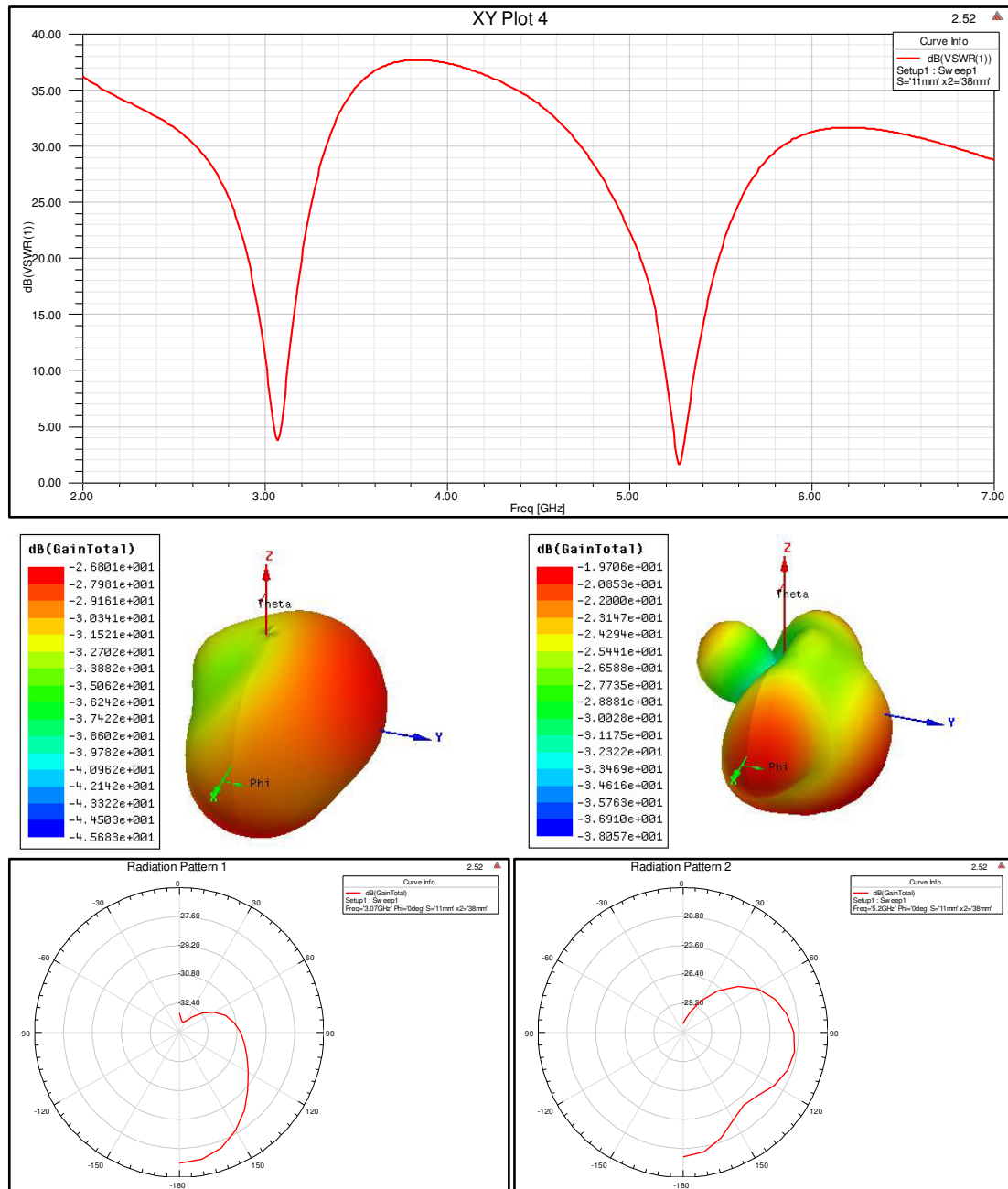


Figure 3-5 : ROS, Gain et Rayonnement de l'Antenne Patch Duel-Bande Optimisée Sous SSFH

Les diagrammes de rayonnement et de gain total restent signe d'une dissipation d'énergie excessive sous forme de pertes plutôt que par rayonnement. Il sera nécessaire par la suite de vérifier la configuration du port d'excitation, de bien ajuster la zone de rayonnement et d'affiner le maillage adaptatif pour stabiliser la solution numérique.

3.4 Conception Optimisée de l'Antenne Patch Multi-Bande sous SSFH

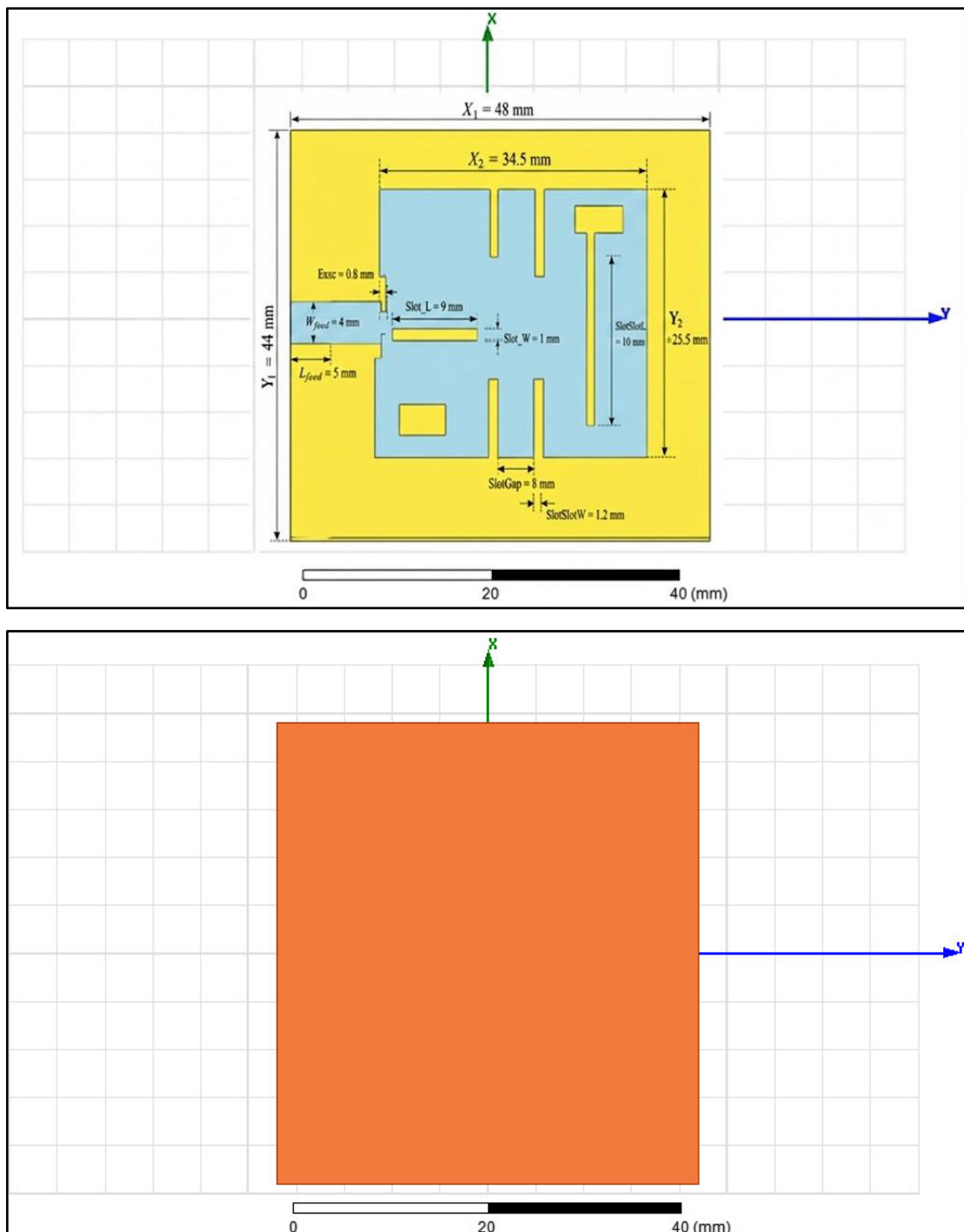


Figure 3-6 : Antenne Patch Multi-Bande Optimisée Sous SSFH

La Figure (3-10) illustre la nouvelle structure géométrique de l'antenne patch multi-bande conçue sous SSHF. Les dimensions du patch, de la ligne d'alimentation et des fentes ont été rigoureusement optimisées pour répondre aux exigences des applications sans fil notamment les standards ZigBee, Bluetooth, Wi-Fi et Wi-Max. L'analyse du coefficient de réflexion révèle trois bandes de résonance distinctes, deux bandes principales à 2,46 GHz et 5,53 GHz inférieures à -15dB, ainsi qu'une résonance plus marquée à 7,7 GHz avec une valeur inférieure à -18dB. La réponse électromagnétique confirme une adaptation d'impédance satisfaisante. Cette performance est corroborée par l'analyse du rapport d'onde stationnaire, dont les valeurs proches de l'unité aux fréquences de résonance, mais de 1.56 témoignent d'une transmission optimale de l'énergie et d'une faible réflexion de puissance, garantissant le transfert de plus de 90% de la puissance ce qui peut être traduit à une bonne stabilité du design optimisé pour les systèmes de communications sans fil. L'observation du diagramme de rayonnement de l'antenne permet de caractériser le comportement directionnel de l'antenne dans l'espace. Bien que les valeurs de gain restent modérées, la structure compacte, le fonctionnement multi-bande de l'antenne et la distribution du courant sur la surface efficace la rendent particulièrement adaptée aux réseaux sans fil surtout ceux à courte portée, comme aux déploiements de l'IoT, l'application de GPS et la télécommunication d'entreprise.

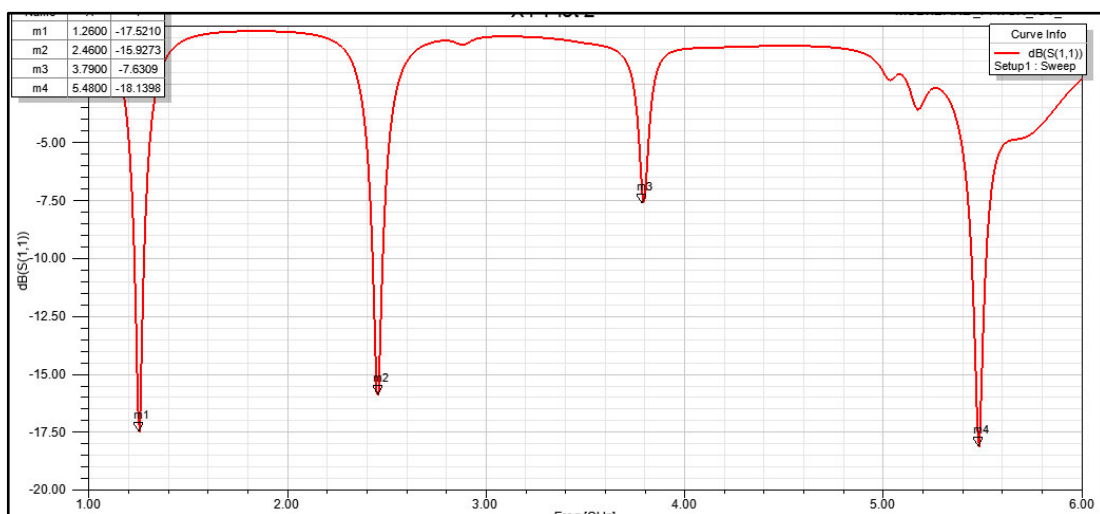


Figure 3-7 : Coefficient de Réflexion de l'Antenne Patch Multi-Bande Optimisée Sous SSHF

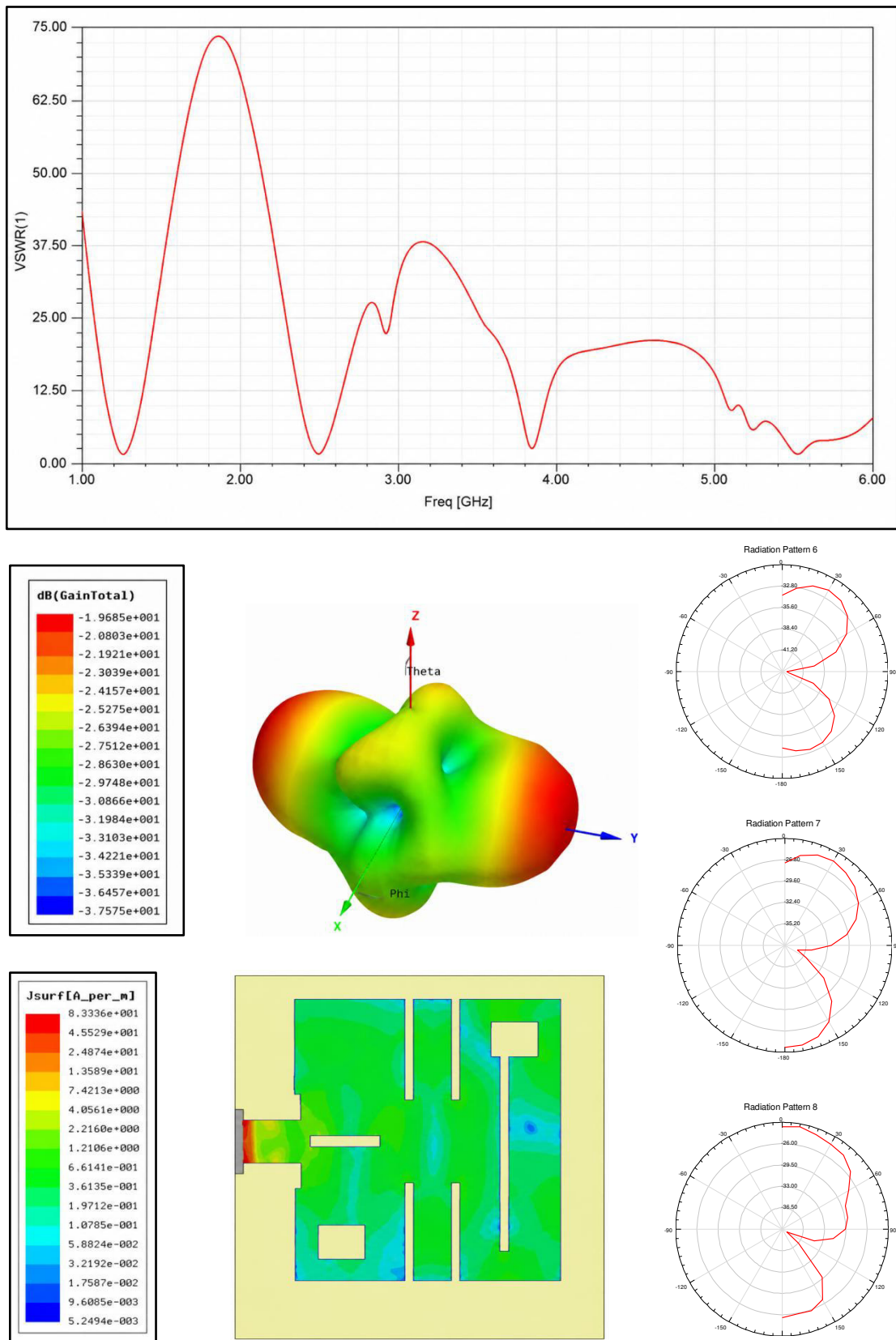


Figure 3-8 : ROS, Gain, Rayonnement et Distribution du Courant de l'Antenne Patch Multi-Bande Optimisée Sous SSFH

3.5 Comparaison des Résultats de Simulation

Cette comparaison a permis d'évaluer les différentes conceptions d'antennes répertoriées dans la littérature afin de situer les performances des designs développés. L'analyse des données du Tableau (3-2) montre que l'antenne multi-bande proposée se distingue par sa capacité à couvrir trois bandes de fréquences distinctes (1,2 GHz, 2,4 GHz et 5,4 GHz) avec un coefficient de réflexion faible de -18dB et un rapport d'onde stationnaire satisfaisant de 1,5.

Cette polyvalence fréquentielle s'avère particulièrement avantageuse par rapport à l'antenne double-bande (3,1 GHz et 5,4GHz), offrant ainsi une solution acceptable pour la mutualisation des ressources radioélectriques dans les réseaux sans fil à courte portée. De plus, bien que les structures de la littérature opérant en ondes millimétriques comme le modèle de 30GHz et 56GHz affichent un ROS très proche de l'idéal de 1,2, la conception multi-bande maintient un excellent compromis entre compacité globale et polyvalence multi-standards.

Tableau 3-2 : Comparaison des Résultats de Simulation

| Design | Fréquences (GHz) | S ₁₁ (dB) | ROS | Applications |
|--|------------------|----------------------|-----|-----------------------------------|
| Antenne Duel-bande 0.8x4.2x4.2 cm ³ | 3.1 / 5.4 | -20 | 1.8 | Réseaux sans fil à courte portée, |
| Antenne Multi-bande 0.8x4.4x4.8 cm ³ | 1.2 / 2.4 / 5.4 | -18 | 1.5 | IoT, GPS, Télé-entreprise |
| [31] 1.6x4.2x4.5 mm ³ | 30 / 56 | -22 | 1.2 | 5G |
| [32] 1.5x9x9 cm ³ | 0.7 / 1.2 / 2 | -20 | 1.2 | Application GPR |

Effectivement, pour consolider ces résultats prometteurs, il demeure essentiel d'approfondir l'étude des structures optimisées en y intégrant des interconnexions plus avancées de type DGS (Defected Ground Structure) et/ou DMS (Defected Microstrip Structure). Ces techniques de gravure permettront

d'optimiser encore davantage l'adaptation d'impédance pour abaisser le S_{11} en dessous de -20dB tout en maximisant la pureté du diagramme de rayonnement et la valeur du gain dans les directions utiles.

3.6 Validation Expérimentale de l'Antenne Patch Duel-Bande

La réalisation pratique de l'antenne patch optimisée au Laboratoire Pédagogique du Département « Antennes et Canaux de Transmission » est une étape cruciale qui transforme la conception développée par SSHF en un composant physique en utilisant l'imprimante LFPK comme outil principal pour le transfert du motif conducteur sur le cuivre. Pour faire réussir la fabrication de l'antenne on disposera des éléments suivants :

- ❖ **Substrat diélectrique** : Plaque de cuivre double face du FR4 d'épaisseur ($h = 1,6 \text{ mm}$) et de constante diélectrique ($\epsilon_r = 4.4$) qui correspond exactement à ce qui était simulé par SSHF.
- ❖ **Analyseur de réseaux vectoriel** : Essentiel pour la phase de test, capable de couvrir jusqu'à 20 GHz, ce qui est largement suffisant pour la bande de fréquences ciblées de 2 à 7 GHz.
- ❖ **Solution chimique de gravure** : Perchlorure de fer (FeCl_3) ou persulfate de sodium pour éliminer le cuivre non protégé.
- ❖ **Connecteur SMA** : Pour assurer la liaison entre l'antenne et le câble du VNA, un câble mâle type N mâle à 7/16 DIN utilisant le coaxial PE-FF430 pour connecter l'antenne à l'analyseur.

La démarche suit un processus standard de photolithographie ou de transfert direct qui commence par la préparation du motif à travers l'exportation du dessin de l'antenne depuis SSHF vers un format compatible à l'imprimante PFLK. Après, l'impression et le transfert du motif du circuit conducteur sur la face supérieure du substrat cuivré. Cette étape doit être très précise pour garantir que les dimensions de l'antenne (W, l, \dots) respectent strictement le modèle.

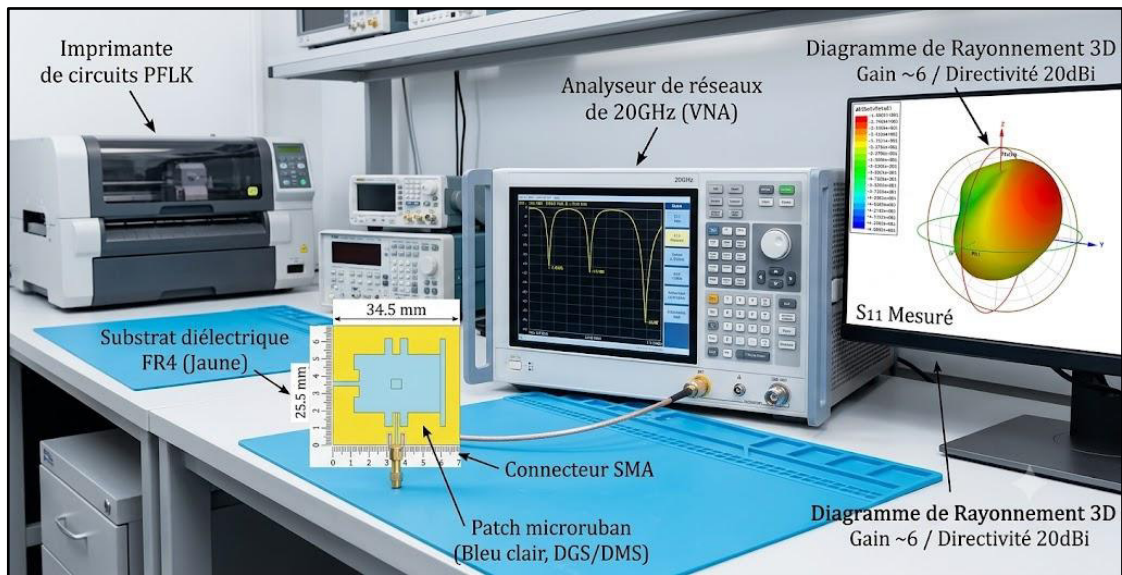


Figure 3-9 : Equipement Expérimentale pour Réalisation de l'Antenne Patch Dual-Bande

La gravure chimique en plongeant la plaque dans le bain de perchlorure de fer. Ensuite, La solution va dissoudre le cuivre exposé, laissant apparaître le motif protégé par l'encre de l'imprimante. Le nettoyage est nécessaire une fois la gravure terminée en utilisant un solvant adapté pour enlever l'encre de protection. En fin, percer l'emplacement du connecteur SMA pour le souder correctement sur la ligne d'alimentation (W_{feed}). La soudure propre est indispensable pour éviter d'ajouter une inductance parasite qui fausserait les mesures sur le VNA. La mesure de la réponse électromagnétique en terme de coefficient de réflexion (S_{11}) de l'antenne après avoir effectué une calibration préalable du VNA (SOL : Short, Open, Load) au bout des câbles de mesure. Enfin, un circuit d'antenne dual-bande optimisé est tiré avec succès montrant une réponse électromagnétique meilleure en termes de faibles pertes mesurées par l'analyseur de réseaux pour la bande de fréquences servant les réseaux sans fil.



Figure 3-10 : Circuit Réalisé d'Antenne Patch Dual-Bande Optimisée Sous SSFH

3.7 Perspectives : Vers les Systèmes MIMO et Multi-bandes

A partir des résultats obtenus avec ces antennes patches compactes double et multi-bande, plusieurs pistes d'évolution ouvrent des perspectives prometteuses pour améliorer la capacité et la résilience des systèmes de communication sans fil. Une première orientation stratégique consiste à faire évoluer la structure vers une antenne plus légère avec l'intégration de fentes supplémentaires ou l'utilisation de structures DGS (Defected Ground Structure) pour permettre couvrir des bandes de fréquences additionnelles telles que celles de la 5G et 6G, offrant ainsi une flexibilité accrue pour les environnements IoT multi-standards.

Parallèlement, le passage vers une technologie MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) constitue une avancée majeure pour les communications modernes. En concevant des réseaux d'antennes basés sur notre élément rayonnant optimisé, il devient possible d'exploiter la diversité spatiale pour augmenter considérablement le débit binaire et réduire les interférences multi-trajets. Ces axes de recherche visant à accroître le spectre fréquentiel exploitable et à multiplier les canaux de transmission, seront indispensables pour répondre aux exigences de latence et de débit des réseaux intelligents. Ces travaux futurs serviront de socle au développement de systèmes d'antennes plus robustes, capables de soutenir l'expansion exponentielle des écosystèmes connectés.

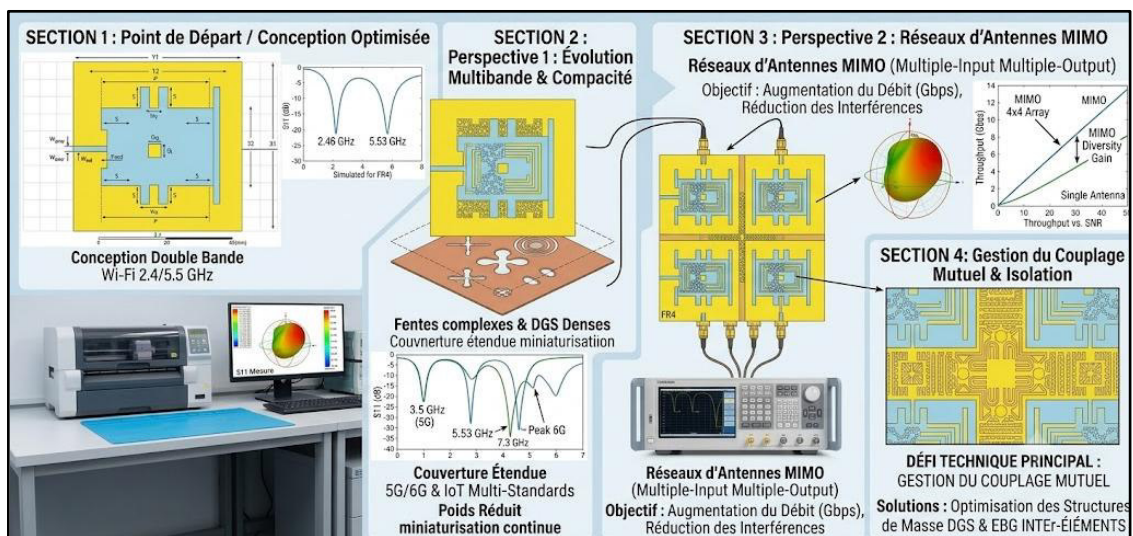


Figure 3-11 : Vers les Systèmes MIMO et Multi-bandes

CONCLUSION GÉNÉRALE

Au terme de ce travail, il apparaît que les antennes patch multi-bandes constituent une solution particulièrement adaptée aux exigences croissantes des systèmes modernes de communication sans fil. L'évolution constante des technologies de télécommunication et la multiplication des standards de transmission imposent le développement de structures rayonnantes capables d'assurer des performances élevées tout en conservant des dimensions réduites et une intégration aisée dans les équipements électroniques actuels.

Dans ce mémoire, une étude approfondie des antennes patches duel et multi-bande pour systèmes de communication sans fil a permis de mettre en évidence les principes fondamentaux régissant leur fonctionnement ainsi que les principaux paramètres influençant leurs performances. Une attention particulière a été portée aux techniques de conception sous SSHF permettant l'obtention d'un comportement multi-bande, répondant ainsi aux besoins des applications contemporaines telles que les réseaux Wi-Fi et Wi-Max, les applications IoT et de télécommunications d'entreprise.

La phase d'optimisation réalisée sous l'environnement SSHF a constitué une étape essentielle dans la validation de la conception proposée. L'analyse des différents paramètres électromagnétiques, notamment le coefficient de réflexion, les fréquences de résonance, le gain et les diagrammes de rayonnement, a permis d'évaluer les performances des antennes proposées et de vérifier son aptitude à fonctionner efficacement sur plusieurs bandes de fréquences. Les résultats obtenus montrent l'intérêt de l'approche adoptée pour atteindre un compromis satisfaisant entre miniaturisation, adaptation d'impédance, couverture fréquentielle et performances de rayonnement.

Cette étude confirme également l'importance des outils de simulation électromagnétique dans le processus de conception des antennes modernes. Ces

outils permettent non seulement de réduire les coûts et les délais de développement, mais aussi d'optimiser les caractéristiques de l'antenne avant sa réalisation pratique. L'utilisation de SSHF s'est ainsi révélée particulièrement efficace pour l'analyse et l'amélioration des performances de la structure proposée.

Plusieurs perspectives de recherche peuvent être envisagées. Une première étape consisterait à réaliser expérimentalement l'antenne conçue afin de comparer les performances mesurées aux résultats de simulation. Des travaux futurs pourraient également porter sur l'utilisation d'autres géométries de patch et de masse en forme de DGS et DMS, de structures fractales ou de méta-matériaux afin d'améliorer davantage la miniaturisation et les performances multi-bandes. Par ailleurs, l'intégration de méthodes d'optimisation intelligentes basées sur l'intelligence artificielle, les algorithmes génétiques ou l'apprentissage automatique représente une voie particulièrement prometteuse pour automatiser et accélérer le processus de conception.

Enfin, avec l'émergence des réseaux de nouvelle génération, des systèmes IoT à grande échelle, des communications satellitaires avancées et des futures technologies 6G, les antennes patch multi-bandes continueront de jouer un rôle majeur dans le développement des infrastructures de communication du futur. Ce travail constitue ainsi une contribution à l'étude et à l'optimisation de ces dispositifs, tout en ouvrant des perspectives intéressantes pour de futures recherches dans le domaine des antennes et des télécommunications sans fil.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] A. Goldsmith, *Wireless Communications*. Cambridge, U.K.: Cambridge University Press, 2005.
- [2] T. S. Rappaport, *Wireless Communications: Principles and Practice*, 2nd ed. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice Hall, 2002.
- [3] W. Stallings, *Wireless Communications and Networks*, 2nd ed. Upper Saddle River, NJ, USA: Pearson, 2017.
- [4] S. Haykin, *Communication Systems*, 4th ed. New York, NY, USA: Wiley, 2001.
- [5] J. G. Proakis and M. Salehi, *Digital Communications*, 5th ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2008.
- [6] B. P. Lathi and Z. Ding, *Modern Digital and Analog Communication Systems*, 4th ed. New York, NY, USA: Oxford University Press, 2009.
- [7] B. Sklar, *Digital Communications: Fundamentals and Applications*, 2nd ed. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice Hall, 2001.
- [8] C. A. Balanis, *Antenna Theory: Analysis and Design*, 4th ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2016.
- [9] J. D. Kraus, *Antennas*, 2nd ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2002.
- [10] W. C. Jakes, *Microwave Mobile Communications*. New York, NY, USA: Wiley, 1974.
- [11] F. T. Ulaby and U. Ravaioli, *Fundamentals of Applied Electromagnetics*, 7th ed. Boston, MA, USA: Pearson, 2015.
- [12] D. M. Pozar, *Microwave Engineering*, 4th ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2011.
- [13] J. G. Andrews et al., "What Will 5G Be?," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 32, no. 6, pp. 1065-1082, Jun. 2014.

- [14] Cisco Systems, "Networking Fundamentals Documentation," Cisco Systems, 2023.
- [15] Q. Zhang et al., "6G Wireless Networks: Vision and Challenges," *IEEE Network*, vol. 34, no. 3, pp. xx-xx, 2020.
- [16] J. D. Kraus, *Electromagnetics*, 4th ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2000.
- [17] M. I. Skolnik, *Radar Handbook*, 3rd ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2008.
- [18] G. Maral and M. Bousquet, *Satellite Communications Systems*, 5th ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2009.
- [19] ITU-R, *Frequency Band Allocation Handbook*. Geneva, Switzerland: International Telecommunication Union, 2024.
- [20] ITU-R, *Radio Regulations*. Geneva, Switzerland: International Telecommunication Union, 2025.
- [21] IEEE Standards Association, *IEEE Standard for Definitions of Terms for Antennas*, IEEE Std 145-2013, 2014.
- [22] G. A. S. Bazán, *Étude et développement d'antennes patches adaptées aux terminaux mobiles*. Sarrebruck, Germany: Éditions Universitaires Européennes, 2010.
- [23] O. Picon, J. Palacin, J.-M. Ribéro, and R. Staraj, *Antennes : Théorie, conception et applications*. Paris, France: Dunod, 2009.
- [24] R. T. Ogan, "Avionics Systems and Integrated Antennas for Aircraft Safety," *Aerospace Engineering Journal*, vol. 34, no. 3, pp. 112-125, 2014.
- [25] K. Pradeep, "Comprehensive Analysis of Feeding Techniques in Printed Circuit Antennas," *International Journal of RF and Microwave Engineering*, vol. 8, no. 1, pp. 14-22, 2005.
- [26] N. Seladji, F. Z. Marouf, L. Merad, S.-M. Meriah, F.-T. Bendimerad, M. Bousahla, and N. Benahmed, "Conception d'antennes micro-rubans ultra large

bande (ULB) pour applications radars à haute résolution," *Revue des Sciences Appliquées*, vol. 7, no. 4, pp. 210-218, 2013.

[27] Ansys Inc., "Ansys HFSS," [Online]. Available: <https://www.ansys.com/products/electronics/ansys-hfss>. [Accessed: Jun. 2026].

[28] K. Zaoui, *Planar Antennas for Wireless Local Area Networks by Python Scripting*. Saïda, Algeria: University of Saïda–Dr. Moulay Tahar, 2024.

[30] A. Behlouli, "Antenne patch double bande avec la structure à bande interdite électromagnétique (BIE) pour l'application 5G," *Mémoire de Master*, Faculté des Sciences et Technologies, Université de Bordj Bou Arréridj, Bordj Bou Arréridj, Algeria, 2019.

[31] C. Fadhel and I. Redjel, "Conception et réalisation d'une antenne multi-bande pour des applications GPR," *Mémoire de Master*, Université 8 Mai 1945 Guelma, Guelma, Algeria, 2021.

Résumé : Ce mémoire porte sur la conception et l'optimisation d'une antenne patch multi-bande destinée aux applications de communication sans fil. Une étude théorique des systèmes de communications sans fil et des antennes patches a été réalisée afin de comprendre leurs principes de fonctionnement et leurs caractéristiques essentielles. La conception de l'antenne a été effectuée à l'aide du logiciel SSHF, permettant l'analyse de ses performances électromagnétiques. Les résultats obtenus ont été évalués à travers le coefficient de réflexion, les fréquences de résonance, le gain et les diagrammes de rayonnement. L'antenne proposée présente des performances satisfaisantes sur plusieurs bandes de fréquences, répondant ainsi aux exigences des applications modernes telles que le Wi-Fi/Wi-MAX, IoT et les télécommunications d'entreprise. Cette étude met en évidence l'importance des outils de simulation dans l'optimisation des antennes multi-bande compacte.

Mots-clés : Antenne patch, Antenne Multi-bande, SSHF, Réponse Electromagnétique, Optimisation, Communications Sans Fil, Coefficient de Réflexion, Gain, Diagramme de Rayonnement.

المخلص : يتناول هذا العمل تصميم وتحسين هوائي رقعة متعدد النطاقات مخصص لتطبيقات الاتصالات اللاسلكية. تم إجراء دراسة نظرية لأنظمة الاتصالات اللاسلكية وهوائيات الميكروستريب لفهم مبادئ عملها وخصائصها الأساسية. كما تم تصميم الهوائي ومحاكاته باستخدام برنامج HFSS لتحليل أدائه الكهرومغناطيسي. وقد تم تقييم النتائج من خلال دراسة معامل الانعكاس وترددات الرنين والكسب وأنماط الإشعاع. أظهرت النتائج أن الهوائي المقترح يحقق أداءً جيداً على عدة نطاقات ترددية، مما يجعله مناسباً لتطبيقات حديثة مثل شبكات الواي فاي والاتصالات وأنظمة الرادار. وتبرز هذه الدراسة أهمية المحاكاة الكهرومغناطيسية في تطوير وتحسين الهوائيات المدمجة.

الكلمات المفتاحية : هوائي الرقعة، هوائي متعدد النطاقات، SSHF، المحاكاة الكهرومغناطيسية، الاتصالات اللاسلكية، الكسب، معامل الانعكاس، مخطط الإشعاع.

Abstract : This dissertation focuses on the design and optimization of a multiband patch antenna for wireless communication applications. A theoretical study of wireless communication systems and microstrip antennas was carried out to understand their operating principles and main characteristics. The antenna was designed and simulated using HFSS software to evaluate its electromagnetic performance. The obtained results were analyzed through reflection coefficient, resonant frequencies, gain, and radiation patterns. The proposed antenna exhibits satisfactory performance over multiple frequency bands, making it suitable for modern applications such as Wi-Fi, IoT and internship telecommunications, and radar systems. This work highlights the importance of electromagnetic simulation tools in the optimization of compact multi-band antennas.

Keywords: Patch antenna, Multiband antenna, HFSS, Electromagnetic Response, Wireless Communications, Return Loss, Ga in, Radiation Pattern.