

الجمهورية الجزائرية  
الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي  
والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة سعيدة – د. الطاهر مولاي –

Université Saïda – Dr. Tahar Moulay –

Faculté de Mathématiques, de l'Informatique et de Télécommunications



## MEMOIRE

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

**Spécialité** : Systèmes des Télécommunications

**Par** : KADI Farouk  
HASSAD EL Hadj Kamel

---

## Optimisation d'Antennes Patch Appliquées aux Réseaux 5G

---

Soutenu, le 19/06/ 2022, devant le jury composé de :

|                        |     |              |
|------------------------|-----|--------------|
| M. DAMOU Mehdi         | MCA | Président    |
| M. BOUDKHIL Abdelhakim | MCA | Rapporteur   |
| Mme. BELHADJ Salima    | MCB | Examinatrice |

2024 / 2025

---

# **CHAPITRE I**

## **Réseaux Sans Fil 5G**

## Remerciements

*Avant tout, nous remercions Allah de nous avoir permis d'accomplir ce travail.*

*Alhamdoulilah.*

*Nos sincères remerciements vont à notre encadreur **M. BOUDKHIL A**, pour ses précieux conseils, ses orientations et la qualité de son accompagnement tout au long de ce travail.*

*Nous remercions aussi tous les enseignants du département de Télécommunications pour leur contribution à notre formation.*

*Enfin, un merci particulier à nos familles **Kadi** et **Hassad** pour leur aide morale et matérielle pendant toute la période de préparation.*

## Dédicace

*Je dédie ce modeste travail ;*

*Je dédie ce travail à mes chers parents, en reconnaissance de leur soutien constant, des valeurs qu'ils m'ont transmises, de leur travail acharné et de leurs sacrifices qui ont rendu cette réussite possible.*

*À mon frère et à mes sœurs, je dédie également ce mémoire, pour leur écoute, leur réconfort et leur présence bienveillante dans les moments difficiles.*

*Je dédie enfin ce travail à mes professeurs, pour leur accompagnement, leurs conseils et l'enseignement qu'ils nous ont transmis avec dévouement tout au long de notre parcours.*

***Kadi Farouk***

## Dédicace

*Je dédie ce mémoire avant tout à ma chère maman, dont l'amour inconditionnel, la patience et les sacrifices m'ont porté dans les moments les plus exigeants.*

*À mon père que je n'ai jamais vu dans mes rêves ni dans la vie*

*À mon frère et mes sœurs, pour leur complicité, leur soutien sincère et ces instants de joie partagée.*

*À toute l'honorable famille, en particulier 'Mohammed Amara'*

*À tous mes amis, qui m'ont offert leur écoute, leur encouragement et cette énergie si précieuse*

*Un merci tout particulier à mon ami Farouk qui m'a toujours soutenu et encouragé durant ces années d'études.*

***Hassad El Hadj Kamel***

## Table des matières

|   |     |
|---|-----|
| Remerciements .....                                 | II  |
| Dédicace .....                                      | III |
| Tables des matières .....                           | V   |
| Liste des figures .....                             | VII |
| Liste des tableaux .....                            | IX  |
| Liste des abréviations .....                        | X   |
| Introduction générale .....                         | 2   |
| <b>CHAPITRE I : Réseaux Sans Fil 5G</b>             |     |
| I.1 Introduction .....                              | 5   |
| I.2 Évolution des technologies sans fil .....       | 5   |
| I.3 Définition de la 5G .....                       | 7   |
| I.3.1 Exigences de la technologie 5G .....          | 8   |
| I.3.2 Architecture du réseau 5G .....               | 9   |
| I.4. Techniques de modulation utilisées en 5G ..... | 12  |
| I.5 Autres techniques exploitées dans la 5G .....   | 12  |
| I.6 Avantages de la 5G .....                        | 17  |
| I.7 Inconvénients et défis de la 5G .....           | 18  |
| I.8 Perspectives et opportunités futures .....      | 19  |
| I.9 Conclusion .....                                | 20  |
| <b>CHAPITRE II : Antennes Patch Micro-ruban</b>     |     |
| II.1 Introduction .....                             | 22  |

|  |    |
|--|----|
| II.2 Définition d'une antenne patch micro-ruban .....                    | 22 |
| II.3 Paramètres fondamentaux des antennes .....                          | 23 |
| II.4. Techniques d'alimentation pour une antenne patch micro-ruban ..... | 30 |
| II.5 Types antennes patch micro-ruban .....                              | 34 |
| II.6 Avantages et limitations des antennes patch .....                   | 36 |
| II.7 Conclusion .....  | 37 |
| <b>CHAPITRE III : Simulations et Résultats</b>                           |    |
| III.1 Introduction .....   | 39 |
| III.2 Présentation de l'environnement EM de simulation HFSS .....        | 39 |
| III.3 Paramètres clés de conception d'une antenne patch .....            | 40 |
| III.3.1 Fréquence de résonance ( $f_r$ ) .....                           | 40 |
| III.3.2 Constante diélectrique du substrat ( $\epsilon_r$ ) .....        | 40 |
| III.3.3 Épaisseur du substrat ( $h$ ) .....                              | 41 |
| III.4 Conception de l'antenne patch pour la 5G mobile.....               | 41 |
| II.4.1 Adaptation de l'antenne par encoches.....                         | 42 |
| II.4.2 Résultats de simulation pour l'antenne patch adaptée .....        | 44 |
| III.4.2.1 Coefficient de réflexion .....                                 | 44 |
| III.4.2.2 Rapport d'onde stationnaire (VSWR) .....                       | 45 |
| III.4.2.3 Gain .....   | 45 |
| III.4.2.4 Diagramme de rayonnement .....                                 | 46 |
| III.5 Conception de réseaux d'antennes pour la 5G mobile .....           | 46 |
| III.5.1 Réseau d'antennes à 2 éléments .....                             | 47 |
| III.5.2 Résultats de simulation du réseau d'antennes à 2 éléments .....  | 48 |

|   |    |
|---|----|
| III.5.3 Réseau d'antennes à 4 éléments .....                            | 49 |
| III.5.4 Résultats de simulation du réseau d'antennes à 4 éléments ..... | 50 |
| III.6 Comparaison et validation de résultats .....                      | 52 |
| III.7 Conclusion .....  | 54 |
| Conclusion générale .....   | 55 |
| Références .....  | 57 |

## Listes des figures

### **CHAPITRE I : Réseaux Sans Fil 5G**

|  |    |
|--|----|
| Figure I.1 : Évolution des Technologies Sans Fil de la 1G à la 5G .....                                  | 6  |
| Figure I.2 : Caractéristiques de la Technologie 5G .....   | 8  |
| Figure I.3 : Lien backhaul dans la 5G .....  | 10 |
| Figure I.4 : Communication dispositif à dispositif .....   | 10 |
| Figure I.5 : Distribution des bandes de fréquence selon la 5G .....                                      | 11 |
| Figure I.6 : Techniques utilisées dans le réseau 5G .....  | 13 |
| Figure I.7 : Microcellule dans la 5G .....   | 14 |
| Figure I.8 : La Massive MIMO dans la 5G .....  | 14 |
| Figure I.9 : Optimisation de la couverture du réseau 5G avec les techniques<br>MIMO et Beamforming ..... | 15 |
| Figure I.10 : Technologie Full Duplex .....  | 16 |

### **CHAPITRE II : Antennes Patch Micro-ruban**

|   |    |
|---|----|
| Figure II.1 : Structure de base d'une antenne patch .....   | 23 |
| Figure II.2 : Exemple de diagramme de rayonnement .....   | 24 |
| Figure II.3 : Diagramme de rayonnement normalisé dans le plan E, en dB ....   | 25 |
| Figure II.4 : Diagramme de rayonnement normalisé dans le plan H, en dB ...  | 25 |
| Figure II.5 : Diagramme de rayonnement normalisé dans le plan E et H<br>en coordonnées polaires, en fonction de $u$ , en dB. .... | 26 |
| Figure II.6 : Gain en fonction de directivité pour une antenne .....  | 27 |
| Figure II.7 : Bande passante pour une antenne .....   | 29 |
| Figure II.8 : Patch avec une alimentation par ligne micro ruban .....   | 31 |

|  |    |
|--|----|
| Figure II.9 : Alimentation par ligne micro ruban .....   | 31 |
| Figure II.10 : Alimentation par une sonde coaxiale .....   | 32 |
| Figure II.11 : Méthode d'alimentation par couplage de proximité .....  | 32 |
| Figure II.12 : Méthode d'alimentation par couplage d'ouverture .....   | 34 |
| Figure II.13 : Différentes types d'antennes patch .....  | 34 |
| <b>CHAPITRE III : Simulations et Résultats</b>   |    |
| Figure III-1 : Interface ANSYS-HFSS. ....  | 40 |
| Figure III-2 : Dimensions de l'antenne patch rectangulaire .....   | 41 |
| Figure III-3 : Antenne patch proposée avec encoches .....  | 43 |
| Figure III-4 : Antenne patch développée en HFSS, (a) Vue de dessus,<br>(b) Vue de profile .....  | 44 |
| Figure III-5 : Courbe du coefficient de réflexion $S_{11}$ .....   | 44 |
| Figure III-6 : Rapport d'onde stationnaire (VSWR) .....  | 45 |
| Figure III-7 : Courbe du gain .....  | 46 |
| Figure III-8 : Diagramme de rayonnement, (a) polaire, (b) en 3D .....  | 46 |
| Figure III-9 : Structure de réseau d'antenne à 2 éléments .....  | 47 |
| Figure III-10 : Réponse électromagnétique pour le réseau d'antennes à deux<br>éléments, (a) coefficient de réflexion, (b) rapport d'onde stationnaire,<br>(c) gain et (d) diagramme de rayonnement polaire et en 3D .....      | 49 |
| Figure III-11 : Structure du réseau d'antenne de 4 éléments. ....  | 50 |
| Figure III-12 : Réponse électromagnétique pour le réseau d'antennes à<br>quatre éléments, (a) coefficient de réflexion, (b) rapport d'onde stationnaire,<br>(c) gain et (d) diagramme de rayonnement polaire et en 3D<br>..... | 52 |

## Liste des tableaux

### **CHAPITRE III : Simulations et Résultats**

|   |    |
|---|----|
| Tableau III-1 : Equations de calculs des paramètres de l'antenne patch<br>rectangulaire ..... | 42 |
| Tableau III-2 : Les valeurs des paramètres d'antenne .....                                    | 43 |
| Tableau III-3 : Paramètres du réseau d'antennes patch à 2 éléments .....                      | 47 |
| Tableau III-4 : Paramètres du réseau d'antennes patch à 2 éléments .....                      | 50 |
| Tableau III-5 : Comparaison et validation de résultats obtenus .....                          | 53 |

## Liste des abréviations

**3D** : Tree Dimensional (Trois dimensions)

**AMPS** : Advanced Mobile Phone System (Système de téléphonie Mobile Avancé)

**BDMA** : Beam Division Multiple Access (Accès Multiple par Répartition en Faisceau)

**BS** : Base Station (Station de Base)

**CDMA2000** : Code Division Multiple Access 2000 (Accès Multiple par Répartition en Code 2000)

**D2D** : Device-to-Device (Appareil à Appareil)

**dB** : Decibel (Décibel)

**EDGE** : Enhanced Data rates for GSM Evolution (Débits de Données Améliorés pour GSM Evolution)

**FA** : Facteur d'antenne (Antenna factor)

**FBMC** : Filter Bank Multi-Carrier (Banque de Filtres Multi-Porteuses)

**FDD** : Frequency Division Duplex (Duplexage par Répartition en Fréquence)

**HFSS** : High Frequency Structure Simulator (Simulateur de Structure Haute Fréquence)

**IA** : Intelligence Artificielle (Artificial Intelligence)

**IoT** : Internet of Things (Internet des Objets)

**IP** : Internet Protocol (Protocole Internet)

**GSM** : Global System for Mobile Communications (Système Mondial de Communications Mobiles)

**GPRS** : General Packet Radio Service (Service Général de Radiocommunication par Paquets)

**LTE** : Long Term Evolution (Evolution à Long Terme)

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

**MMIC** : Circuit Intégré Monolithique à Micro-ondes (Circuit Intégré Monolithique à Micro-ondes)

**NMT** : Nordic Mobile Telephone (Téléphone Mobile Nordique)

**QoS** : Quality of Service (Qualité de Service)

**RA** : Réalité Augmentée (Augmented Reality)

**RV** : Réalité Virtuelle (Augmented Reality)

**ROS** : Rapport d'Ondes Stationnaires (Standing Wave Ratio)

**TACS** : Total Access Communication System (Système de Communication à Accès Total)

**TDD** : Time Division Duplex (Duplex à Répartition dans le Temps)

**UMTS** : Universal Mobile Telecommunications System (Système Universel de Télécommunications Mobiles)

**VSWR** : Voltage Standing Wave Ratio (Rapport d'Onde Stationnaire en Tension)

**WCDMA** : Wideband Code Division Multiple Access (Accès Multiple par Répartition en Code à Large Bande)

**WiMAX** : Worldwide Interoperability for Microwave Access (Interopérabilité Mondiale pour L'accès par Micro-ondes)

---

# **INTRODUCTION GENERALE**

La croissance exponentielle de l'usage d'Internet dans le monde a profondément transformé les modes de communication, entraînant une demande sans précédent en matière de connectivité, de rapidité et de fiabilité. Aujourd'hui, les technologies de communication sans fil doivent faire face à une augmentation continue du nombre d'utilisateurs, ce qui exige des solutions plus performantes et adaptées. Si les réseaux mobiles ont évolué depuis la première génération (1G) jusqu'à la (4G), ces technologies restent aujourd'hui limitées par des contraintes telles que la couverture insuffisante, la qualité de service variable et les pertes de connexion fréquentes.

Face à ces insuffisances, la cinquième génération de réseaux mobiles (5G) est apparue comme une réponse technologique révolutionnaire. Elle vise à atteindre des débits de données d'au moins 1 Gbit/s pour des milliers d'utilisateurs simultanés, tout en réduisant la latence et en améliorant l'efficacité énergétique. Elle promet également de connecter des millions de dispositifs simultanément, ouvrant la voie à des applications avancées telles que les villes intelligentes, l'Internet des Objets (IoT), la robotique et les véhicules autonomes.

L'introduction de ces bandes de fréquences plus élevées soulève cependant de nouveaux défis, notamment en matière de conception d'antennes. À ces fréquences, les antennes doivent être compactes, efficaces, peu coûteuses et facilement intégrables aux systèmes électroniques. C'est dans ce contexte que les antennes patch micro-ruban prennent toute leur importance. Elles se composent d'un plan de masse, d'un substrat diélectrique et d'un patch conducteur, et

permettent une intégration facile tout en garantissant un faible encombrement et une bonne performance. Depuis leur mise en œuvre pratique à partir des années 1970, elles sont devenues essentielles pour les systèmes sans fil modernes. Ainsi, leur conception optimisée dans le contexte de la 5G représente un enjeu clé dans les futures architectures de communication. La fréquence 17 GHz a été retenue pour sa compatibilité avec les applications à haut débit dans les zones urbaines denses, tout en offrant un compromis acceptable entre portée et largeur de bande.

Dans ce cadre, ce mémoire propose la conception et l'optimisation d'une antenne patch destinée aux applications 5G. Le design étudié introduit plusieurs modifications géométriques sur un patch rectangulaire classique, afin d'améliorer les performances dans la fréquence 17 GHz et de développer d'autres structures plus performantes en forme de réseaux d'antennes à plusieurs éléments. L'analyse et l'optimisation seront réalisées à l'aide des outils HFSS (High Frequency Structure Simulator) pour la simulation électromagnétique efficace.

A la fin, ce travail s'organise autour de trois chapitres : Le premier chapitre présente une revue générale de l'évolution des réseaux mobiles, en mettant l'accent sur l'émergence de la 5G et ses objectifs technologiques. Le deuxième chapitre est consacré aux antennes patch imprimées : leur structures, leurs caractéristiques, ainsi que leurs applications dans les systèmes sans fil modernes. Le troisième chapitre est dédié à la conception, simulation et optimisation d'antennes appliquées aux réseaux 5G, avec présentation et discussion des résultats obtenus. Après, nous concluons ce mémoire par une synthèse des résultats et des perspectives pour de futures améliorations.

---

# **CHAPITRE I**

## **Réseaux Sans Fil 5G**

## **I.1 Introduction**

Au cours des trois dernières décennies, l'évolution incessante des réseaux mobiles a permis d'offrir une multitude croissante de services et une augmentation constante des débits. Selon Ericsson, la généralisation mondiale de ces technologies est à l'origine d'une montée exponentielle du trafic de données mobiles et d'une connectivité de plus en plus répandue [1]. Aujourd'hui, environ 63% de la population mondiale se sert d'Internet, y consacrant presque sept heures par jour en moyenne. Face à cette demande croissante de qualité, fiabilité et de rapidité, la 5G apparaît comme une avancée technologique majeure. Elle vise principalement à optimiser l'efficacité spectrale, réduire la latence et favoriser un accroissement densifié des cellules pour une connectivité plus intelligente et performante [2].

## **I.2 Évolution des technologies sans fil**

Les bases de la communication sans fil contemporaine ont été posées par l'inventeur italien Guglielmo Marconi, qui a réussi à transmettre la lettre « S » du code Morse sur une distance de 3 Km grâce à des ondes électromagnétiques. Cette prouesse a marqué le début d'une révolution technologique qui a considérablement modifié la société. De la radio à la télévision en passant par les téléphones portables et l'Internet sans fil, les communications sans fil ont depuis évolué, impactant chaque aspect de la vie quotidienne [2].

L'évolution des technologies mobiles (figure I.1) est évaluée au fil des générations successives, chacune étant définie par des améliorations du débit de données, de la mobilité, de la couverture et de l'efficacité spectrale. Alors que les technologies 1G et 2G utilisaient principalement la commutation de circuits, les générations ultérieures, allant de la 2,5G à la 5G, dépendent de la commutation de paquets, améliorant ainsi l'efficacité de l'utilisation des ressources du réseau. Cette évolution a conduit à une amélioration significative des débits de données, de la couverture, de la qualité de service (QoS) et de la sécurité pour les

utilisateurs mobiles. Parmi toutes les étapes de cette évolution, la 5G est considérée comme la plus importante (Figure I. 1) [3] :

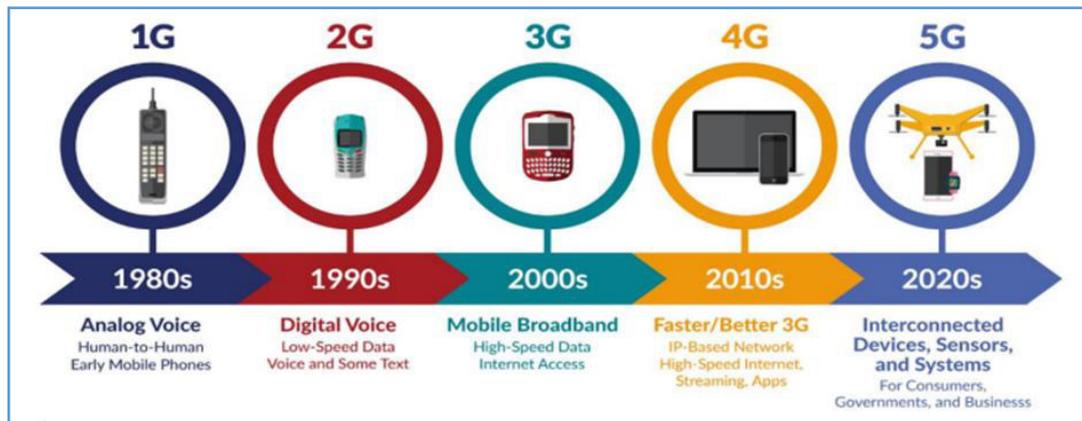


Figure I.1 : Évolution des Technologies Sans Fil de la 1G à la 5G

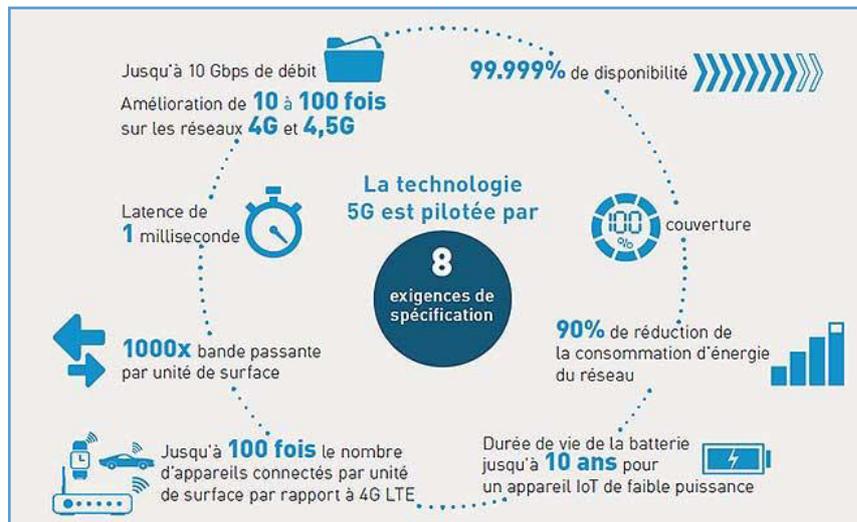
- ❖ **1G, la première génération** : Lancée dans les années 1980, la 1G utilisait des réseaux analogiques, atteignant un débit maximal de 2,4 kbps. Les principaux systèmes de cette génération comprenaient AMPS, NMT et TACS. Cependant, cette époque présentait de nombreuses lacunes, notamment une capacité limitée, une qualité audio médiocre et l'absence de cryptage, ce qui rendait les communications susceptibles d'être interceptées.
- ❖ **2G, le passage au numérique** : La fin des années 1990 a vu le déploiement de la 2G, qui a représenté une avancée significative grâce au lancement des réseaux numériques et du GSM. Cette évolution a permis d'améliorer la qualité des appels et de faciliter l'introduction des SMS. Avec un débit maximal de 64 kbps, ces réseaux fonctionnaient avec une consommation d'énergie plus faible, prolongeant ainsi la durée de vie des batteries des appareils mobiles.
- ❖ **2.5G, la transition vers les données mobiles** : Avec l'introduction du GPRS et de l'EDGE, les réseaux 2.5G ont fusionné la commutation de circuits et de paquets pour améliorer la transmission des données. Cela a permis d'atteindre un débit allant jusqu'à 144 kbps, facilitant ainsi l'accès restreint à Internet et aux e-mails.
- ❖ **3G, le haut débit mobile** : Déployée en 2000, la 3G a permis l'accès au haut débit mobile à des vitesses allant jusqu'à 2 Mbps. Il a soutenu la croissance

de l'Internet mobile et des applications multimédias comme la vidéoconférence. Les principales technologies incluent WCDMA, UMTS et CDMA2000. Cependant, les appareils 3G consommaient beaucoup plus d'énergie que leurs prédécesseurs.

- ❖ **4G, le réseau tout-IP :** La 4G est une architecture entièrement basée sur IP offrant une transmission à haute vitesse à des taux beaucoup plus élevés (jusqu'à 1 Gbps), des services avancés comme le streaming vidéo en haute définition et les jeux en ligne. Les technologies de cette génération, à savoir LTE et WiMAX, offrent une latence réduite et une efficacité spectrale améliorée.
- ❖ **5G, l'ère de l'ultra-connectivité :** Avec une demande de données en constante augmentation, les futures technologies 5G, telles que l'accès multiple par division de faisceau (BDMA) et le multi-porteuse à bande de filtres (FBMC), visent une gestion plus efficace des ressources, une augmentation de la capacité et une réduction de la latence à moins de 1 ms. Les paramètres de la 5G visent à résoudre six défis critiques : un débit de données plus élevé, une grande capacité, une faible latence, une connectivité massive, une réduction des coûts et une amélioration de la qualité de service. L'avènement de la 5G s'est appuyé sur l'évolution de plusieurs normes IEEE, parmi lesquelles 802.11ac, 802.11ad et 802.11af, toutes visant à faciliter l'intégration des nouvelles infrastructures sans fil. Ces développements ouvrent la voie à des applications intelligentes comme les villes intelligentes, l'Internet des objets (IoT) et les véhicules autonomes, redéfinissant ainsi l'avenir des communications numériques.

### **I.3 Définition de la 5G**

La cinquième génération de réseaux mobiles ou 5G (Figure 1. 2) [4] se réfère à la norme de transmission sans fil qui améliore considérablement les débits de transmission, la latence, la capacité du réseau et la densité de connectivité :



**Figure I.2 : Caractéristiques de la Technologie 5G**

Cette technologie fonctionne avec l'aide de gammes de fréquences plus larges, les ondes millimétriques permettent des vitesses théoriques très hautes grâce à leur courte portée qui exige un nombre accru d'infrastructures. En termes techniques, la 5G présente une série d'avancées telles que le MIMO massif (Massive Multiple Input Multiple Output) et le beamforming. En outre, avec le calcul en marge, les capacités de traitement des utilisateurs ne sont plus si possiblement, avec le peu de temps de réponse en baisse plus facilement se servir de l'application en directe comme la télémédecine ou la conduite. La 5G qui peuvent marquer un pas de géant dans la transformation numérique doit se relever défi, notamment en ce qui concerne la cybersécurité, la consommation d'énergie ou le manque d'infrastructure adéquat [5].

### I.3.1 Exigences de la technologie 5G

Les exigences des réseaux 5G [6] peuvent être principalement résumées par les nouveaux critères suivants (figure I. 2) :

- ❖ Le système 5G est conçu pour offrir des débits de données supérieurs à ceux de la 4G afin de répondre à la demande d'applications gourmandes en données, comme le streaming vidéo. Le débit de données offert par la 5G peut dépasser 10 Gbit/s selon les conditions particulières, comme l'extérieur,

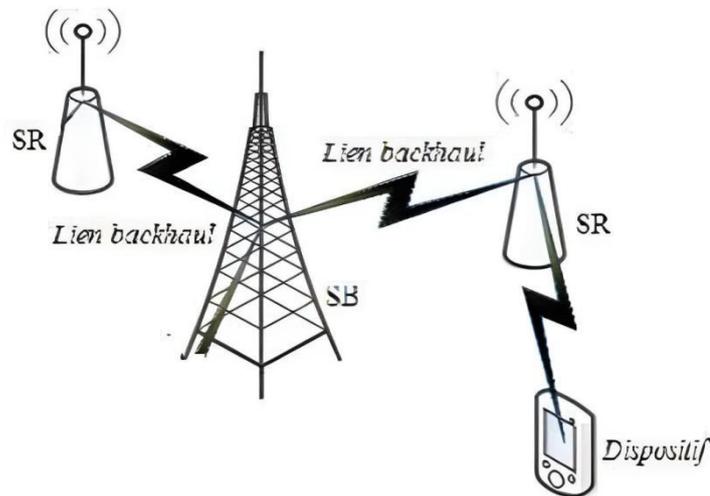
l'intérieur et les environnements denses. Des débits de données de l'ordre de plusieurs centaines de Mbit/s devraient être atteignables en milieu périurbain et urbain.

- ❖ La 5G doit garantir une latence très faible pour les applications nécessitant une réactivité en temps réel pour les véhicules autonomes et les systèmes de contrôle industriel. Elle doit également offrir une capacité élevée pour prendre en charge des milliards d'appareils connectés à l'Internet des Objets (IoT). La couverture de la 5G doit largement dépasser celle de la 4G pour desservir davantage d'utilisateurs mobiles dans les zones rurales et reculées. La qualité de service de la 5G doit également être garantie aux utilisateurs mobiles, grâce à une gestion efficace de la bande passante pour permettre un accès rapide aux données critiques.
- ❖ Des mécanismes de sécurité renforcés sont attendus de la 5G pour protéger les données des utilisateurs et contrer les attaques (sécurité de réseaux). La 5G doit pouvoir aussi interagir avec les technologies existantes telles que les réseaux 4G, les réseaux filaires et le Wi-Fi pour offrir une expérience utilisateur fluide (Interopérabilité). Les réseaux à faible consommation d'énergie sont devenus un moyen de réduire les coûts d'exploitation, d'améliorer les performances et de favoriser le déploiement dans les régions éloignées. A la fin, les exigences de la technologie 5G sont d'apporter aux utilisateurs une connectivité mobile plus performante, sécurisée et fiable, tout en renforçant sa capacité à desservir des milliards de dispositifs connectés via l'Internet des Objets (IoT). Cela a conduit à l'émergence de nouveaux domaines d'utilisation des réseaux mobiles liés à la 5G.

### **I.3.2 Architecture du réseau 5G**

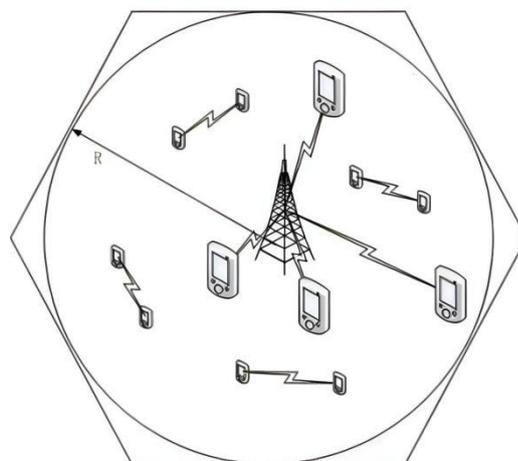
Les réseaux cellulaires modernes utilisent une architecture hétérogène appelée HetNets, composée de stations de base de grande taille et de petites cellules comme les femtocellules. Pour la 5G, une nouvelle intégration d'accès appelée « backhaul » est introduite pour prolonger la communication entre la station de base et les abonnés via des relais (Figures I. 3 et I. 4) [7]. Les solutions

de backhaul fonctionnent typiquement en ligne de vue directe en utilisant des fréquences plus élevées. Dans le futur, le backhaul sans fil devra être capable de couvrir des conditions de non ligne de vue pour soutenir les déploiements denses de faible puissance.



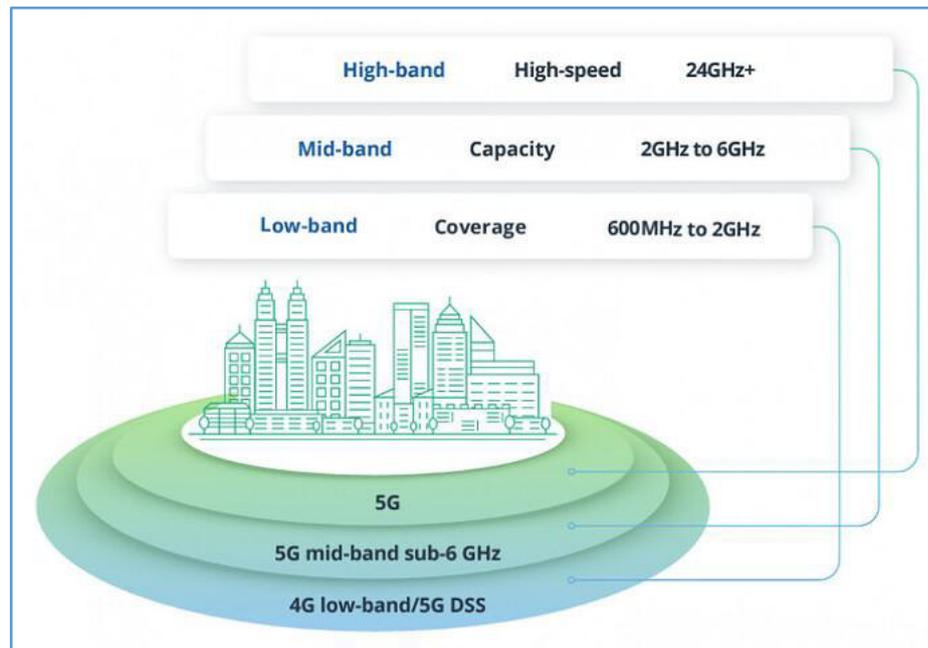
**Figure I.3 : Lien backhaul dans la 5G**

La communication directe entre dispositifs (D2D) est une extension de LTE et une fonctionnalité clé du réseau 5G pour étendre la couverture et décharger le trafic. Elle doit être intégrée dans la solution globale d'accès sans fil plutôt que comme une solution autonome. Pour éviter les interférences, elle doit être sous le contrôle du réseau, en particulier dans le spectre autorisé [8].



**Figure I.4 : Communication dispositif à dispositif**

L'architecture de réseau 5G doit être capable de prendre en charge un large spectre de bandes, des plus basses aux plus hautes, afin de répondre aux exigences de diverses applications nécessitant le transfert de grandes quantités de données sur de vastes étendues.



**Figure I.5 : Distribution des bandes de fréquence selon la 5G**

En effet, trois assortiments de bandes de fréquences pour les réseaux 5G sont déposés (Figure I. 5) [9] :

- 1) La 5G à largeur de bande traite les fréquences les plus élevées entre 24 et 100 GHz. D'une précision, ces fréquences sont coincées à 24 GHz et bloquées par des objets augmentant le besoin en infrastructure - cellulaire - pour un déploiement suffisant de couverture.
- 2) La bande intermédiaire 5G opère en [2 – 6] GHz comprenant une région supplémentaire en capacité pour la zone urbaine et péri-urbaine. Cela donne une bande passante à la région intermédiaire allant jusqu'à plusieurs centaines de Mbps.
- 3) Également appelé vieillissante, la bande basse 5G utilise la fréquence en dessous de 2 GHz permettant un déploiement sur une plus large ceinture,

au rendement de la 4G LTE et 5G sur équipements actuels disponibles sur le marché.

Il est important de noter que 5G a une portée bien à l'entour et moins qu'une trajectoire directe et circulaire des réseaux sans fil, engendrant une nécessité pour les antennes à proximité. Encourant un surcoût à la limite d'atténuation - obstruction à bloquer ou diminuer le signal sans fil.

#### **I.4. Techniques de modulation utilisées en 5G**

La 5G utilise différentes techniques de modulation pour améliorer le débit et l'efficacité spectrale tout en maintenant une qualité de service et une fiabilité élevée [10] :

- 1) **Modulation de phase en quadrature (QPSK)** : Cette technique modifie la phase du signal porteur pour transmettre des données numériques. Elle est robuste et adaptée aux conditions de transmission difficiles.
- 2) **Modulation d'amplitude en quadrature (QAM)** : Cette technique combine des variations d'amplitude et de phase pour transmettre davantage d'informations par symbole. En 5G, des variantes comme 16-QAM, 64-QAM ou 256-QAM sont utilisées selon les conditions du canal.

#### **I.5 Autres techniques exploitées dans la 5G**

Afin de saisir l'impact de la 5G sur les télécommunications, il est essentiel d'analyser les technologies sous-jacentes qui la caractérisent. La 5G se distingue des normes précédentes par l'intégration de multiples technologies clés (Figure I. 6) [11] :

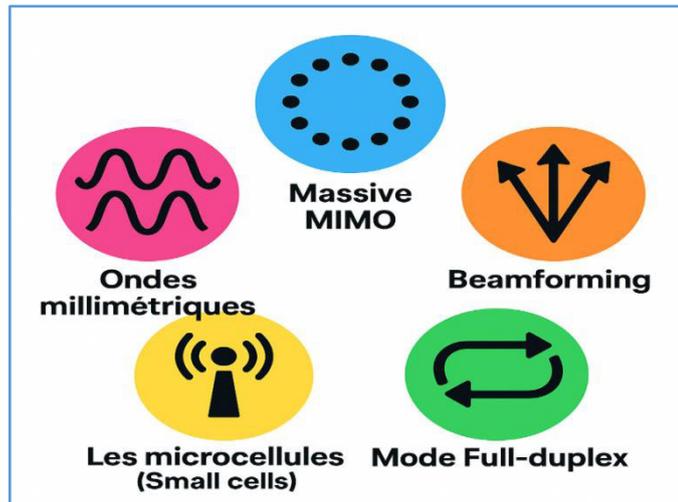


Figure I.6 : Techniques utilisées dans le réseau 5G

- ❖ **Ondes millimétriques** : La bande d'ondes millimétriques [12] est définie comme la partie du spectre électromagnétique s'étendant de 30 à 300 GHz, avec une gamme correspondante de longueurs d'onde de 10 à 1 mm. Historiquement, les fréquences des ondes millimétriques ont été principalement utilisées dans des applications de défense et de radioastronomie, en raison principalement du coût élevé et de la disponibilité limitée des dispositifs électroniques à ces fréquences. Avec l'avènement de la 5G, ces bandes sont désormais exploitées pour offrir des débits extrêmement élevés sur de courtes distances. Elles permettent notamment de répondre aux besoins croissants en capacité dans les environnements urbains denses et les applications à très haut débit.
- ❖ **Microcellules** : Les microcellules sont une technologie prometteuse pour les réseaux 4G et 5G, en raison de la mise en œuvre d'un grand nombre de stations de base qui, non seulement couvrent des zones géographiques, mais aussi des espaces intérieurs comme les gares ou les centres commerciaux. Grâce à ces microcellules, la couverture et les capacités des réseaux sont, de plus en plus, en mesure de faire face à la hausse du trafic de données mobiles à besoins d'augmentation d'antennes supplémentaires. Cela réduit le rapport utilisateurs à antenne, permettant ainsi de fournir des débits plus élevés, ainsi qu'une meilleure qualité de service. Dans la 5G, elles font face à la réponse à

la problématique du réseau de plus en plus densifié à de très fortes contraintes d'efficacité spectrale ou encore le débit par unité de surface au sol (Figure I. 7) [13].

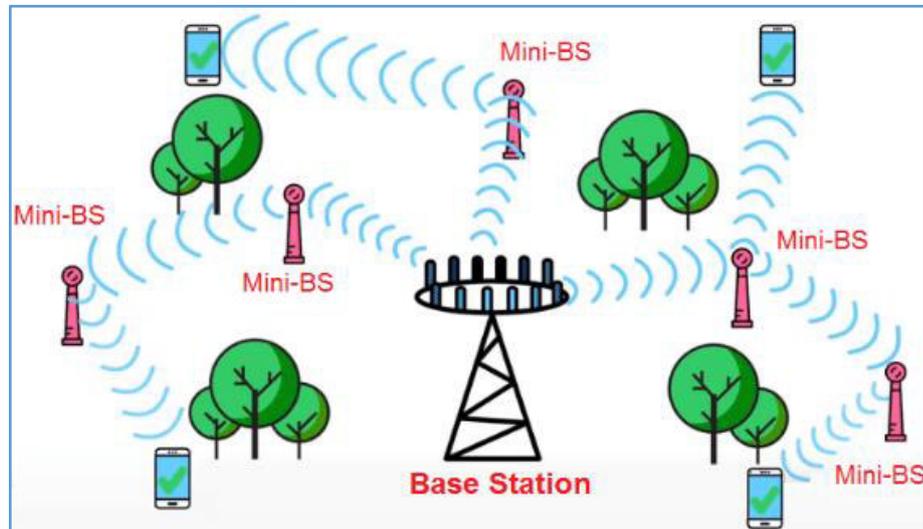


Figure I.7 : Microcellule dans la 5G

- ❖ **Massive MIMO (Multiple Inputs - Multiple Outputs) :** La technologie MIMO (Multiple-Input Multiple Output) repose sur l'utilisation de plusieurs antennes intelligentes pour transmettre simultanément plusieurs flux de données dans les systèmes de communication sans fil. Elle a suscité d'énormes intérêts de recherche ces dernières années. Chaque station de base (BS) utilise plusieurs antennes pour desservir des dizaines d'utilisateurs dans chaque cellule simultanément (Figure I. 8) [14].

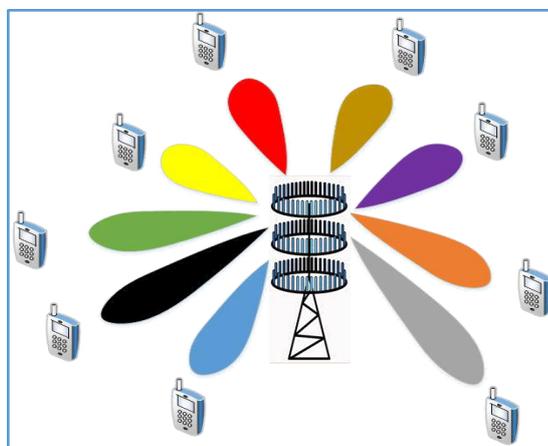
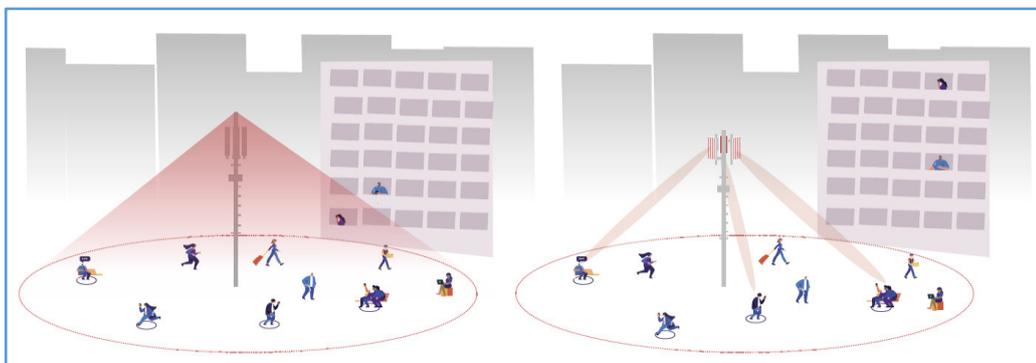


Figure I.8 : La Massive MIMO dans la 5G

La Massive MIMO peut offrir les avantages suivants : Augmenter la capacité du système de 10 fois ou plus et simultanément améliorer l'efficacité énergétique à l'ordre de 100 fois. Des composants peu coûteux et de faible puissance peuvent être réalisés dans le système MIMO massive. Réduction significative de la latence sur l'interface air.

- ❖ **Beamforming (filtrage spatial) :** Le beamforming est reconnu comme une technique de formation de faisceaux qui, au sein des réseaux sans fil, génère des faisceaux étroits vers lesquels l'énergie peut être dirigée sur des terminaux spécifiques, augmentant ainsi l'efficacité d'utilisation. On applique la discrétisation de l'onde à un capteur afin qu'il focalise l'énergie qu'il émet à l'aide de canaux radio sur un canal qui est finement réglé vers sa détection. En changeant respectivement la phase et l'amplitude des signaux émis, il est possible d'obtenir une somme constructive au niveau d'un récepteur tel qu'un smartphone ou tout autre terminal. Par la même logique de raisonnement, pour le beamforming en réception, cela permet de capter l'énergie provenant précisément d'un émetteur déterminé (Figure I. 9) [15].

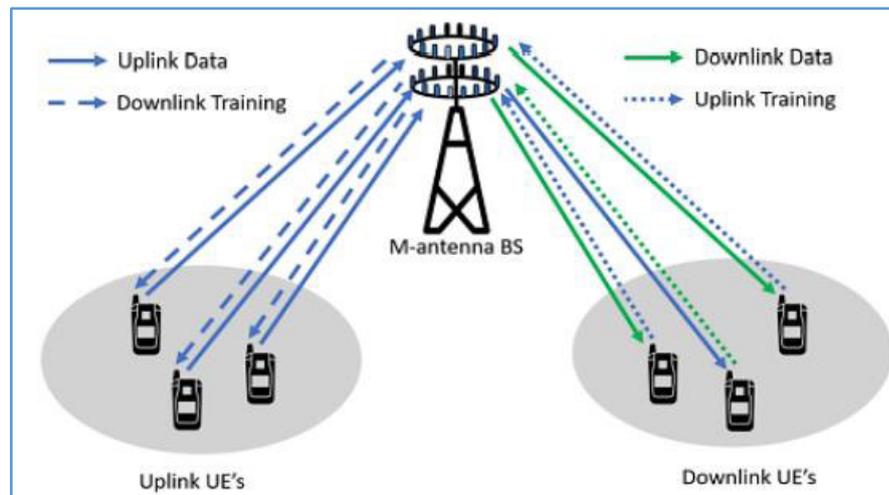


**Figure I.9 : Optimisation de la couverture du réseau 5G avec les techniques MIMO et Beamforming**

Dans les systèmes massifs MIMO, la station de base peut utiliser plusieurs chemins pour transmettre des informations à l'utilisateur, et le beamforming prend en charge le contrôle du mouvement des paquets et la synchronisation concernant le temps d'arrivée pour plusieurs utilisateurs envoyant des données simultanément. À cause du fait que les ondes millimétriques sont

barrées par les obstacles et qu'elles ne se propagent pas à grande distance à cause de leur courte longueur d'onde, le beamforming aide à gérer l'envoi de faisceaux ciblés aux utilisateurs. Le beamforming permet aussi à un utilisateur de recevoir un signal fort sans interférence avec d'autres utilisateurs et elle aide à augmenter l'efficacité spectrale, et pour les ondes millimétriques, il aide à augmenter le débit de données.

- ❖ **Mode Full-duplex** : En général, la transmission et la réception sans fil se font sur des bandes de fréquences différentes pour éviter les interférences. Ainsi, tout système bidirectionnel doit séparer le canal montant et le canal descendant en utilisant soit le domaine temporel TDD, soit le domaine fréquentiel FDD pour obtenir des signaux orthogonaux sans interférences.



**Figure I.10 : Technologie Full Duplex**

Le full duplex (Figure I. 10) [16] désigne la transmission et la réception simultanées sur la même bande de fréquences et au même moment, ce mode permet la transmission et la réception simultanées des données au niveau de la station de base, comme illustré dans la figure I.11. Les réseaux 5G opéreront pour le full duplex pour la transmission des signaux, ce qui pourrait potentiellement doubler la capacité du réseau. Cependant, l'un des inconvénients de la technologie full-duplex est qu'elle accroît les interférences du signal avec des échos. Toutefois, ces derniers peuvent être facilement éliminés grâce aux techniques d'égalisation au niveau du récepteur. Le

duplexage complet est destiné à permettre la transmission et la réception simultanées d'informations à la même fréquence, au même moment et au même endroit.

## **I.6 Avantages de la 5G**

- 1) **Débits accrus** : La technologie 5G permet d'atteindre des vitesses de transmission pouvant s'élever jusqu'à 10 Gbps [17], représentant ainsi une amélioration d'un facteur cent par rapport à la 4G. Cette évolution transforme de manière significative de nombreux secteurs, en particulier ceux requérant une bande passante élevée, tels que la réalité virtuelle (RV) et la réalité augmentée (RA). Par exemple, dans le cadre de l'industrie 4.0 où la connectivité est essentielle pour automatiser et surveiller les équipements, la 5G offre une meilleure gestion en temps réel des chaînes de production. Cette progression favorise l'efficacité du travail, diminue les dépenses opérationnelles et perfectionne la maintenance prédictive des équipements.
- 2) **Latence réduite** : L'une des caractéristiques du 5G est une latence minimale [17] pouvant atteindre une milliseconde. C'est un facteur de succès critique pour plusieurs utilisations ou une très faible latence est vitale comme la télémédecine, la conduite autonome et les réseaux d'énergie intelligente. Par exemple, des opérations chirurgicales effectuées par des machines à distance avec une latence de 2 millisecondes. Cela permet de traiter des maladies rares loin des villes, grâce à la télémédecine.
- 3) **Connectivité massive** : Avec la 5G, il peut être possible de connecter près d'un million d'appareils par à peine plus d'un kilomètre carré [17]. Ceci est évidemment crucial pour faire avancer l'Internet des objets ou IoT. Tel qu'appliqué à une ville intelligente, par exemple, ces milliers ou millions de capteurs pourraient alerter les autorités de la circulation d'un embouteillage, les informer des rues que les camions doivent éviter et de

nombreux autres scénarios concrets. La durabilité urbaine deviendrait beaucoup plus exécutable.

- 4) **Efficacité énergétique améliorée** : Cependant, à l'inverse de la 5G qui requiert une infrastructure plus dense, son utilisation implique des technologies telles que le massive MIMO et le beamforming, conçues pour une efficace transmission des données et à la fois, une réduction de consommation énergétique [17]. Cette dernière est d'ailleurs un axemajeur de l'objectif de la transition énergétique, tandis que la 5G est déjà dans une globalisation.

### **I.7 Inconvénients et défis de la 5G**

- 1) **Densification des infrastructures** : Cependant, comme décrit ci-dessus, les fréquences millimétriques qui sous-tendent la 5G n'ont qu'une portée limitée [18], ce qui signifie que de grandes quantités d'antennes et de stations de base doivent être construites. Cela entraîne des coûts substantiels, et les préoccupations concernant l'impact visuel et environnemental de ces réseaux posent des problèmes spécifiques. Dans les villes densément peuplées, l'opposition aux structures de 5G locales et aux plans d'urbanisme préjudiciables est courante, de sorte que l'installation de ces réseaux doit être minutieusement planifiée pour minimiser les impacts.
- 2) **Consommation énergétique accrue** : Cependant, même si la 5G est meilleure en termes de consommation d'énergie nécessaire pour transmettre un bit donné [18], les volumes croissants des appareils connectés et données échangées pourraient augmenter la consommation énergétique totale. Les centres de données sont responsables du traitement de ces flux d'informations et pourraient aggraver le problème, ce qui entraîne encore plus de difficultés en ce qui concerne la gestion appropriée de l'utilisation de l'énergie.
- 3) **Sécurité, confidentialité et impact environnemental** : Les risques de cybersécurité augmentent alors la 5G se déploie et les objets connectés se

multiplient [18]. Les dangers incluent le piratage des IoT, le vol d'informations confidentielles, et les attaques de service refusés. Ceci nécessitera des protocoles de sécurité améliorés et une surveillance étroite. L'escalade planétaire de la 5G implique une hausse concomitante des déchets électroniques, en particulier des smartphones dont la période d'utilisation de cinq ans ne semble jauger à la hauteur de la nouvelle technologie. En plus de la raréfaction des produits, la fabrication des outils de 5G nécessite l'utilisation de métaux rares et à ce titre soulève une problématique écologique et économique. La solution possible est le recyclage maximal des composants électroniques et la recherche sur des énergies propres, par exemple l'alimentation des tours à l'énergie solaire.

### **I.7 Perspectives et opportunités futures**

Cependant, la 5G n'est pas juste une évolution en matière de performances. Il est également la clé d'une série d'innovations qui transformeront radicalement les infrastructures numériques et applicatives pour l'industrie [19-22] :

- 1) **Synergie avec l'intelligence artificielle et l'edge-computing** : L'IA associée à l'edge-computing : cette combinaison offre une opportunité pour l'optimisation 5G. La première permettra une gestion dynamique des ressources réseau. Elle automatisera l'allocation du spectre et contribuera à réduire la congestion des données. Le second permet une décentralisation du traitement des données en rapprochant les serveurs des utilisateurs. La latence est réduite et la fiabilité des services s'améliore.
- 2) **Expansion de l'Internet des objets (IoT) et des réseaux autonomes** : L'augmentation du nombre d'objets connectés constitue un défi majeur que la 5G devra relever. La 5G pourra supporter jusqu'à un million de connexions par mille d'entre eux, introduisant ainsi une expansion majeure de l'Internet des objets. L'IoT 5G permettra une agriculture de précision. Reconnue pour autoriser une surveillance en temps réel des cultures et de l'irrigation, cette pratique améliore la productivité agricole globale et réduit la consommation d'eau et d'engrais [20].

- 3) **Secteurs impactés** : La 5G facilitera la hiérarchie des trafics, réseaux d'énergie, et grappe de réseau. Des systèmes de feux de circulation adaptatifs pourront, par exemple, l'IoT 5G permettra des systèmes de feux de circulation adaptatifs qui peuvent changer en temps réel en fonction des données en streaming totalisées par des véhicules sans chauffeur et des caméras de surveillance.
- 4) **Évolution vers la 6G, vers une connectivité ubiquitaire** : Ainsi, même si la 5G n'est toujours pas entièrement déployée, les scientifiques et les hommes d'affaires regardent déjà de plus près la sixième génération. La 6G pourrait combler des données avec un débit supérieur à 1 Tbps, une latence de moins de 1 ms, et s'intégrer davantage avec des technologies comme l'informatique quantique et la communication holographique. La 6G pourrait fonctionner en synergie avec des nanotechnologies capables de capter l'énergie environnante « solaire, thermique ou cinétique » pour alimenter les appareils connectés, réduisant ainsi la surcharge des batteries et simplifiant les algorithmes afin de limiter leur impact.

## **I.8 Conclusion**

La 5G constitue une autre évolution dans le souci d'innovation technologique de communication. En effet, elle répond à la demande de plus de débit, moins de latence et de meilleure connectivité. En plus de cela, elle permet le développement de nouvelles technologies comme les villes intelligentes, la réalité virtuelle et Internet des objets. Cependant, des défis tels que l'infrastructure, la sécurité des réseaux et le contrôle des fréquences doivent encore être résolus. La gestion des réseaux de 5ème génération est encore à ses débuts. Toutefois, il ne fait aucun doute qu'ils permettront aux utilisateurs de modifier leurs méthodes de communication et d'interaction avec l'informatique. Pour ce faire, il est fondamental avoir une approche systématique en matière de gouvernance afin d'assurer une efficacité avec cette nouvelle génération de réseau.

---

## **CHAPITRE II**

### **Antennes Patch Micro-ruban**

## **II.1 Introduction**

Le concept des antennes imprimées a été proposé dès 1953 par Deschamps, mais il n'a été possible de les réaliser efficacement qu'à partir de 1970 (Howell et Muson) grâce à l'arrivée sur le marché de diélectriques à faibles pertes. Depuis cette période jusqu'aujourd'hui, l'antenne imprimée a connu de nombreux perfectionnements et recherches afin d'anéantir ses nombreux inconvénients. Une antenne à éléments rayonnants imprimés, couramment désignée sous le terme "patch antenna", est une MICRORUBAN (anglais : MICROSTRIP) imprimé. De forme rectangulaire. La structure consiste en un plan de masse et un substrat diélectrique avec une ou plusieurs caractéristiques métalliques à sa surface.

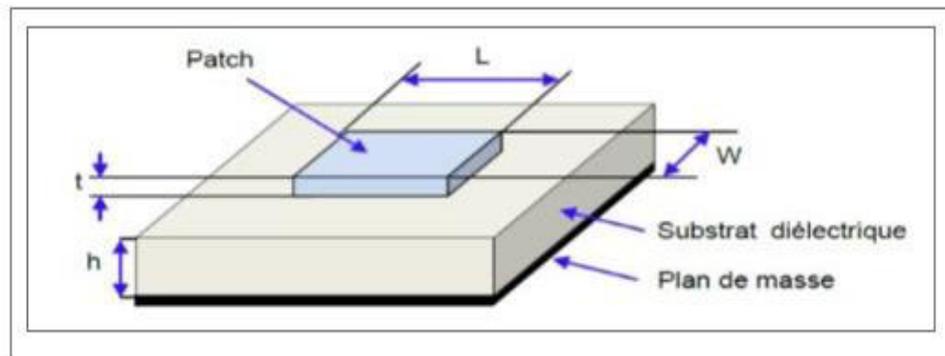
Il faut aussi mentionner leur distribution sur une surface à l'échelle microscopique, ainsi que des critères comme la légèreté et le coût économique. De nouvelles conditions furent atteintes avec l'expansion des moyens de communication, dans les systèmes de communication mobiles. Il ne fait aucun doute que ces antennes sont également très plaisantes car elles sont bon marché et peu encombrantes [23].

## **II.2 Définition d'une antenne patch micro-ruban**

Une antenne patch ou imprimée, également appelée antenne microstrip ou à micro-ruban, est un conducteur imprimé appelé patch, situé à un côté d'un substrat diélectrique, tandis qu'un plan de masse est situé à l'autre face, qui est représenté à la Figure II.1. Pour les raisons décrites ci-dessus, le patch, est fabriqué de matériaux conducteurs tels que le cuivre ou l'or en raison de leur capacité élevée de circulation électrique. C'est une antenne à plan de masse dans laquelle un petit patch carré circulaire ou rectangulaire mince d'un dielectsoudroné ou gravé de façon directe sur le plan de masse du circuit.

Cela peut se manifester de plusieurs façons, mais pour faciliter l'examen de la structure, des formes standards comme le carré, le cercle ou le triangle sont

habituellement employées. Généralement, le patch rayonnant et les lignes d'alimentation sont fabriqués par photogravure sur un substrat diélectrique [24].



**W** : Largeur (Width)

**L** : Longueur (Length)

**H** : Epaisseur du substrat (Height)

**t** : Hauteur du patch (Thickness)

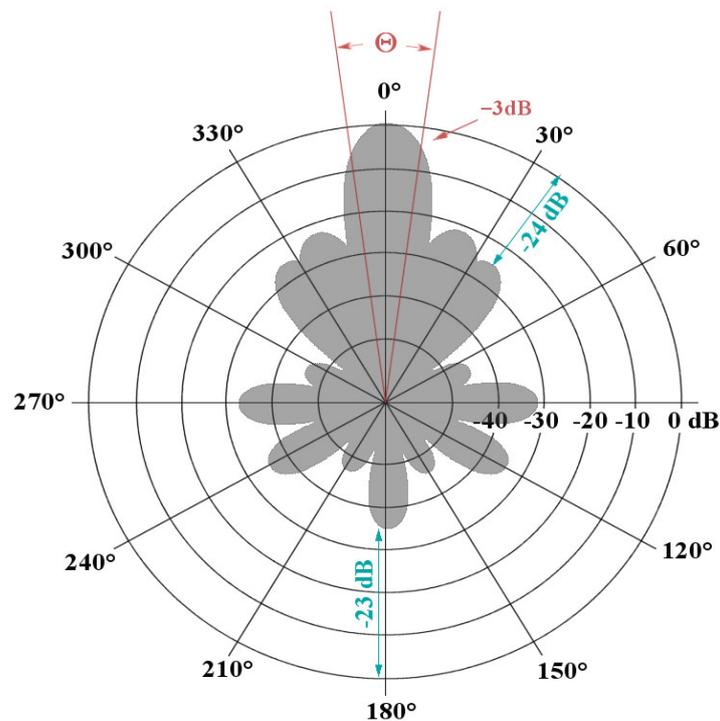
**Figure II.1 : Structure de base d'une antenne patch [25]**

### II.3 Paramètres fondamentaux des antennes

Une antenne comporte toute une liste de caractéristiques. L'optimisation de ces paramètres afin de s'adapter convenablement à l'application est un des aspects les plus essentiels dans la conception de l'antenne. Ces paramètres incluent : un diagramme de rayonnement, la directivité, le gain d'une antenne, le facteur d'antenne, la polarisation d'une onde, l'impédance d'une antenne, la largeur de bande, l'efficacité du rayonnement ainsi que la puissance apparente rayonnée. Cette section examine soigneusement chacun de ces éléments.

- ❖ **Diagramme de rayonnement** : D'autres types de graphiques expriment graphiquement la fonction de l'antenne. L'exemple est un diagramme de rayonnement. L'axe de rayonnement désigne la direction dans laquelle le rayonnement est maximal. La fonction, qui est une dépendance de la caractéristique du rayonnement de l'antenne dans l'espace, caractérise ce processus et son illustration. Cette illustration met en évidence que le

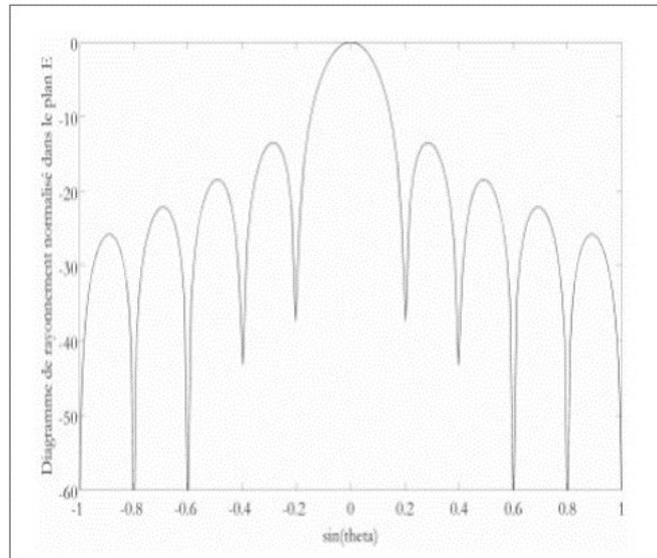
diagramme de rayonnement est destiné à être dessiné dans deux plans orthogonaux l'un à l'autre. Au Sec I. Le plan E à son tour est décrit comme celui de l'axe de l'antenne qui entoure le champ électrique. Le plan H est également défini comme celui qui englobe l'axe de l'antenne entre le champ magnétique. Bien que la plupart des affichages en trois dimensions aient l'avantage de montrer toutes les orientations du rayonnement dans l'espace. D'autres rendent la quantité très difficile à évaluer. Par exemple, l'échelle de cette illustration est logarithmique, ce qui signifie que toutes les régions de l'installation radar sont les détails pour les valeurs basses, tels que les lobes latéraux, sont visibles.



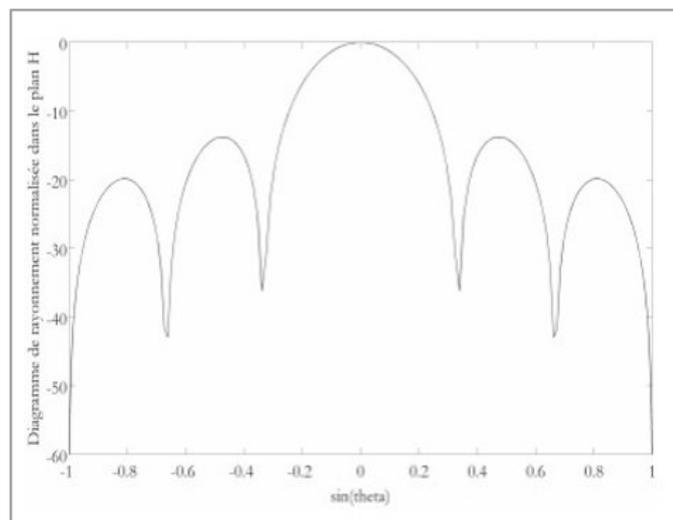
**Figure II.2 : Exemple de diagramme de rayonnement**

Le diagramme de rayonnement, habituellement représenté sur une échelle logarithmique, est exprimé soit en coordonnées polaires, soit en coordonnées rectangulaires, dans les deux plans orthogonaux E et H. Un autre aspect de ce diagramme, parfois désigné comme log-fréquentiel, permet une représentation fine de la directivité des antennes. Le schéma de rayonnement

normalisé dans le plan E est illustré sur la Figure II. 2. Il est présenté en coordonnées rectangulaires sur la Figure II. 3, tandis que le plan H est représenté sur la Figure II. 4. Enfin, la Figure II. 5 illustre les diagrammes dans les deux plans à l'aide de coordonnées polaires [26].



**Figure II.3 : Diagramme de rayonnement normalisé dans le plan E, en dB.**



**Figure II.4 : Diagramme de rayonnement normalisé dans le plan H, en dB.**

Dans les plans E et H, respectivement. La valeur du maximum est de 0 dB, obtenu dans la direction du maximum qui correspond à de l'axe de l'antenne.

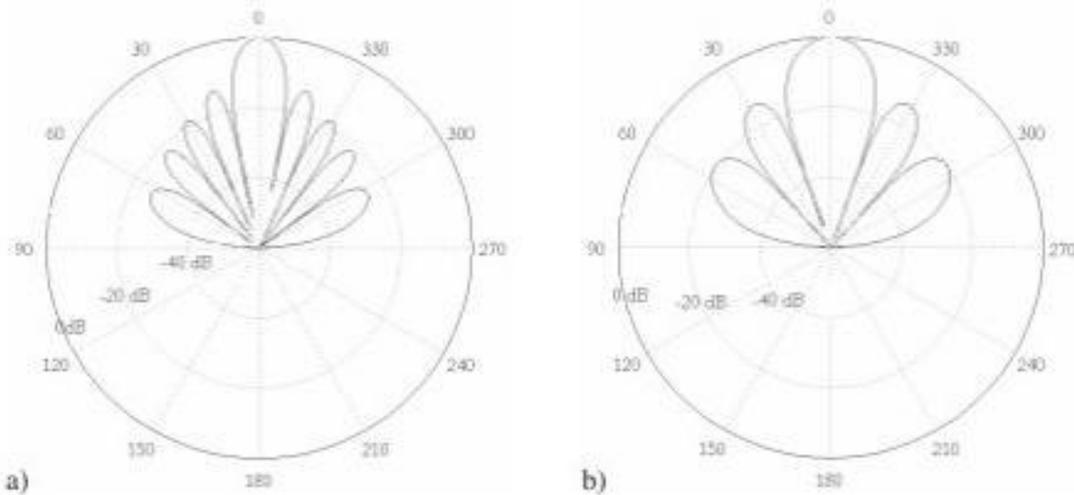


Figure II.5 : Diagramme de rayonnement normalisé dans le plan E et H en coordonnées polaires, en fonction de u, en dB.

❖ **Directivité** : La directivité d’une antenne raconte comment elle concentre son émission dans certaines voies de l’espace. La directivité s’exprime d’une manière bien précise : la division de la quantité de l’énergie de rayonnement dans une voie particulière de l’antenne par la quantité de puissance qui serait radiée par une source isotrope [27] . Cette formule décrit ce qui précède :

$$D(\theta, \varphi) = \frac{P(\theta, \varphi)}{P(\theta, \varphi)_{iso}} = \frac{P(\theta, \varphi)}{(Pr/4\pi)}$$

Avec :

**P(θ)** : La Puissance rayonnée par unité d’angle solide (θ, φ).

**Pr** : est la puissance totale rayonnée.

❖ **Gain** : Le Gain (Figure II. 6) est un étalonnage de l’antenne. L’antenne isotropique est l’antenne étalon dont le gain est de 0 décibel. Pour une direction spécifique, le gain est la puissance rayonnée dans cette direction exprimée en termes de la puissance de l’antenne isotropique [28]. D’autre part :

$$G(\theta, \varphi) = \frac{P(\theta, \varphi)}{(Pa/4\pi)}$$

Avec :

$P(\theta)$  : Puissance rayonnée dans une direction.

$P_a$  : Puissance rayonnée par l'antenne

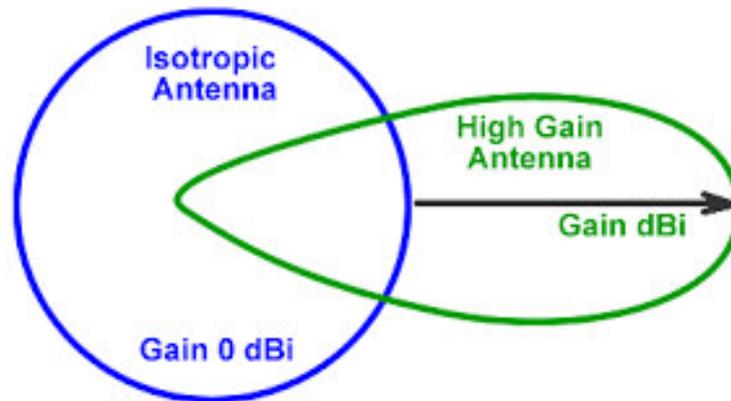


Figure II.6 : Gain en fonction de directivité pour une antenne

- ❖ **Facteur d'antenne** : Le facteur d'antenne FA est utilisé en métrologie. C'est le rapport du champ électrique effectif émis à la tension juste derrière l'antenne. Les exigences du rayonnement sont calculées sur la base de l'amplitude du champ électrique, c'est-à-dire le champ pic. Dans ce module, Nous recourons au champ efficace :

$$E_{eff} = \frac{E}{\sqrt{2}}$$

Considérons le rayonnement provenant sur une antenne de réception. Il est caractérisé par la densité surfacique de puissance  $S_r$ . D'après les définitions précédentes :

$$S_r = \frac{E_{eff}^2}{Z}$$

La puissance reçue  $P_r$  par l'antenne est fonction de la densité surfacique de puissance et de l'aire effective de réception  $A_r$  :

$$P_r = S_r A_r$$

L'aire efficace de réception est liée au gain de l'antenne de réception,  $G_r$ , ainsi qu'à la longueur d'onde  $\lambda$  :

$$A_r = \frac{\lambda^2}{4\pi} G_r$$

Donc

$$P_r = \frac{E_{eff}^2 \lambda^2}{Z} \frac{G_r}{4\pi}$$

De plus, la puissance reçue immédiatement derrière l'antenne permet également de vérifier le lien entre la tension et l'impédance caractéristique  $Z_0$  de la ligne :

$$P_r = \frac{V^2}{Z_0} = \frac{E_{eff}^2 \lambda^2}{Z} = \frac{\lambda^2}{4\pi} G_r$$

En intégrant le coefficient d'antenne  $F_A$ , qui représente le rapport entre le champ électrique efficace reçu et la tension générée aux terminaux de l'antenne :

$$F_A = \frac{E_{eff}}{V}$$

On obtient :

$$F_A = \frac{1}{\lambda} \sqrt{\frac{Z}{Z_0} \frac{4\pi}{G_r}}$$

Cet indice, qui représente le taux de conversion entre le champ reçu et la tension convertie, prend en compte le ratio de l'impédance de l'air à l'impédance de la ligne, l'amplification de l'antenne et la longueur d'onde. Il est utilisé pour comparer différentes antennes à une antenne de référence, en évaluant le facteur d'antenne dans un champ constant.

❖ **Bande passante :** Pour une certaine valeur du rapport d'onde stationnaire  $S$  à l'entrée de l'antenne, la largeur de bande  $\Delta F$  est déterminée par (Figure II. 7) :

$$\frac{\Delta F}{F_{RES}} = \frac{S - 1}{Q\sqrt{S}}$$

$Q$  : étant le facteur de qualité

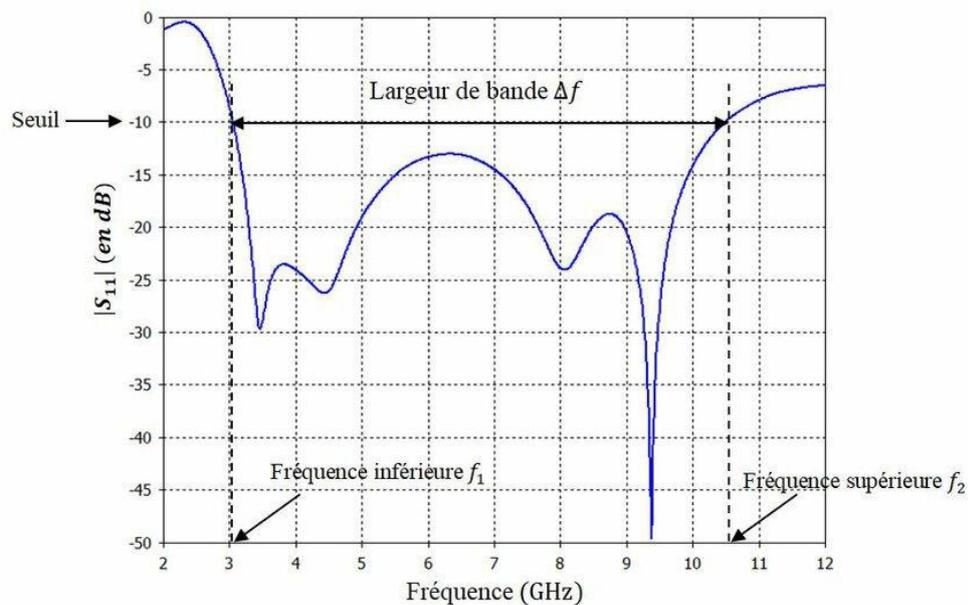


Figure II.7 : Bande passante pour une antenne

❖ **Efficacité de rayonnement :** L'efficacité de rayonnement d'une antenne est une valeur qui tient compte des pertes aux points de connexion et d'assemblage de l'antenne. Ces valeurs peuvent également être compensées par l'efficacité globale exercée, notée  $ec$ , qui elle prend en compte les pertes aux points de connexion et dans la configuration de l'antenne. Les pertes d'antenne qui en découlent est :

- 1) La réflexion de la puissance d'entrée d'antenne à cause de l'inadéquation entre le câble de transmission et l'antenne.
- 2) 2-Les pertes de type  $RI^2$  est le symposium qui englobe la conduction et le diélectrique.

Généralement, l'efficacité totale peut être exprimée comme suit :

$$e_0 = e_r e_c e_d$$

Efficacité de réflexion (soit  $1 - |\tau|^2$ )

Il n'est pas facile de discerner ou d'assumer ces pertes depuis la conduction-diélectrique de celle de conduction. En effet, la plupart du temps, elles sont supposées être connues et en fait estimées de sorte qu'elles puissent être combinées pour déterminer la l'efficacité  $e_{cd}$ . On peut utiliser RL pour décrire la résistance des pertes liées à la conduction-diélectrique. [26]

#### II.4. Techniques d'alimentation pour une antenne patch micro-ruban

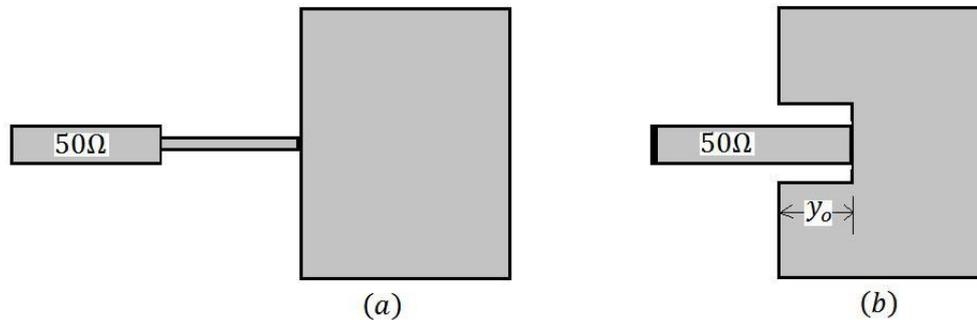
Il existe de nombreuses méthodes pour alimenter une antenne microruban. Les méthodes les plus populaires sont :

- 1) Alimentation par ligne microruban.
- 2) Alimentation par une sonde coaxiale.
- 3) Alimentation par Couplage de proximité.
- 4) Alimentation par Couplage d'ouverture (fente).

Étant donné que l'antenne rayonne d'un côté du substrat, il est généralement aisé de l'alimenter depuis l'autre côté du composant ou de l'autre côté du plan de masse. La considération la plus importante est que la puissance maximale doit être transmise dans la direction de rayonnement préférée. De nombreuses conceptions bien réalisées sont rejetées parce qu'elles ont été sous-alimentées. Les concepteurs peuvent construire des antennes avec de bonnes dimensions et de bons paramètres de rayonnement, ce qui les rend très efficaces, l'efficacité globale sera réduite à un niveau très bas, entraînant le rejet de l'ensemble du système [29].

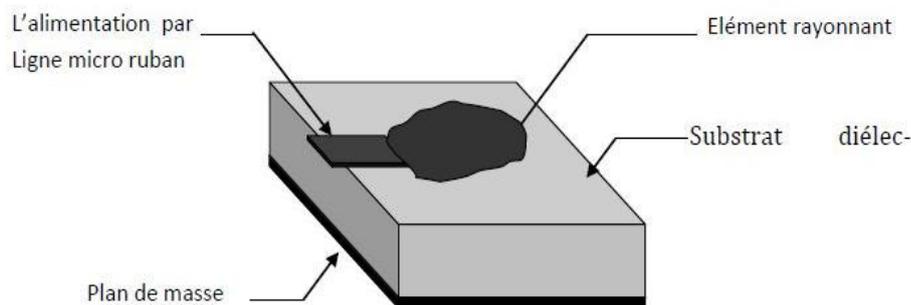
❖ **Alimentation par ligne microruban :** C'est la méthode d'alimentation très utilisée car elle est très simple à concevoir, à analyser, et très facile à

fabriquer. La figure suivante (Figure II. 8) montre un patch avec une ligne microruban d'alimentation de  $50\Omega$ , habituellement autorisée à partir du côté du patch.



**Figure II.8 : Patch avec une alimentation par ligne micro ruban**

Dans cette méthode une ligne micro ruban est connecte directement au bord du patch rayonnant. La longueur de la bande conductrice est plus petite par rapport au patch (Figure II. 9) [30].



**Figure II.9 : Alimentation par ligne micro ruban**

- ❖ **Alimentation par une sonde coaxiale (alimentation coplanaire) :** Le couplage de l'alimentation à l'antenne patch à travers une sonde est un moyen très simple, bon marché et efficace. Si le concepteur ajuste le point d'alimentation à  $50\Omega$ , alors il n'a qu'à utiliser un câble coaxial de  $50\Omega$  avec un connecteur coaxial de type N. Le connecteur coaxial de type N, sont couplées sur le dos de l'antenne microruban et le connecteur central du coaxial passera à travers le substrat et sera joint au patch, comme indiqué sur la Figure II. 10.

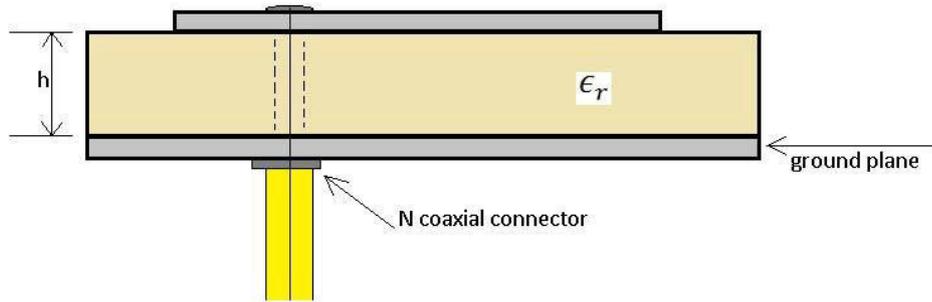


Figure II.10 : Alimentation par une sonde coaxiale

Cette méthode d'alimentation a l'avantage de placer l'alimentation sous l'élément rayonnant sur une ligne non rayonnante, grâce à quoi le rayonnement parasite est réduit de façon significative. N'importe quel endroit dans l'antenne patch peut être alimenté, ce qui le rend facile à fabriquer. Cependant, cette méthode présente des inconvénients en ce qui concerne le diagramme de rayonnement.

❖ **Alimentation par Couplage de proximité** L'alimentation microruban est à couplage de proximité lorsqu'elle utilise deux substrats,  $\epsilon_{r1}$  et  $\epsilon_{r2}$ . Le patch est au-dessus, le plan de masse au-dessous du patch, et le microruban est relié à l'alimentation qui est entre les deux substrats tel qu'illustré dans la Figure II.10.

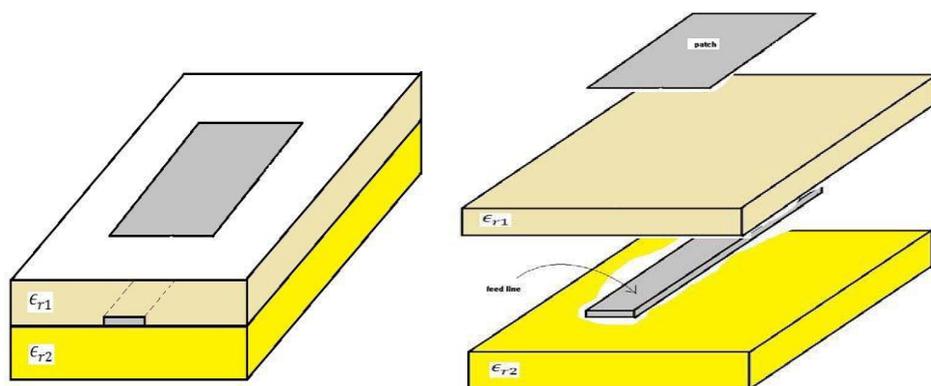


Figure II.10 : Méthode d'alimentation par couplage de proximité

Il est également identifié sous le nom d'alimentation microruban à couplage électromagnétique. Le concept fonctionne sur le comportement capacitif du patch et une bande d'alimentation. La dernière analyse et la conception de cette antenne sont plus complexes que celles évoquées précédemment. Ceci est dû au fait que le concepteur doit tenir compte de la capacité de couplage entre le chargeur de bande et le patch ainsi que du circuit résonant équivalent RL-C symbolisant le patch et les deux substrats, combinaison de  $\epsilon_{r1}$  et  $\epsilon_{r2}$ . Ce condensateur de couplage de l'antenne pourra être conçu pour garantir l'adaptation d'impédance de l'antenne.

Il est expliqué en substance que le principal prestement de cette technique est qu'elle ne convient pas pour l'alimentation facilitant l'élimination du rayonnement parasite et à la bande passante large qui est supérieur à 13 % en raison de l'augmentation totale de l'épaisseur de l'antenne avec une épaisseur fixe. D'un autre côté, il est également expliqué que le principal inconvénient concerne le processus de fabrication qui est complexe en raison de ses deux couches diélectriques qui se traduit par un alignement précédé selon Les dispositifs actifs s'intègrent difficilement [31].

- ❖ **Alimentation par Couplage d'ouverture (fente) :** La Figure II.11 illustre les strates de l'antenne à patch microstrip avec couplage par ouverture. Le plan de masse a une ouverture de forme circulaire ou rectangulaire et divise deux substrats, le supérieur  $\epsilon_{r1}$  qui a un patch et l'inférieur  $\epsilon_{r2}$  qui a une ligne d'alimentation en microruban. Ce type de couplage permet d'obtenir une plus grande bande passante. Une autre caractéristique de ce type est que le rayonnement de la ligne d'alimentation est atténué par l'effet de blindage du plan de masse, augmentant ainsi la pureté de la polarisation [32].

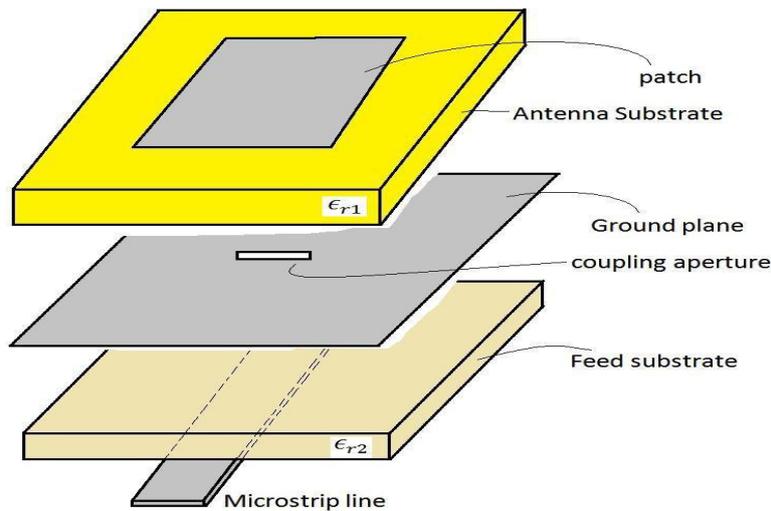


Figure II.11 : Méthode d'alimentation par couplage d'ouverture

### II.5 Types antennes patch micro-ruban

Cependant, une telle antenne peut se présenter sous des configurations différentes. Ainsi, en plus des rectangles, l'antenne patch peut être carrée, ronde ou même en un simple dipôle. Ces formes sont les plus simples en termes d'analyse et de production, ainsi elles sont particulièrement les plus courantes en raison de leur joli diagramme de rayonnement. L'image ci-dessous expose de tels exemplaires (Figure II.12).

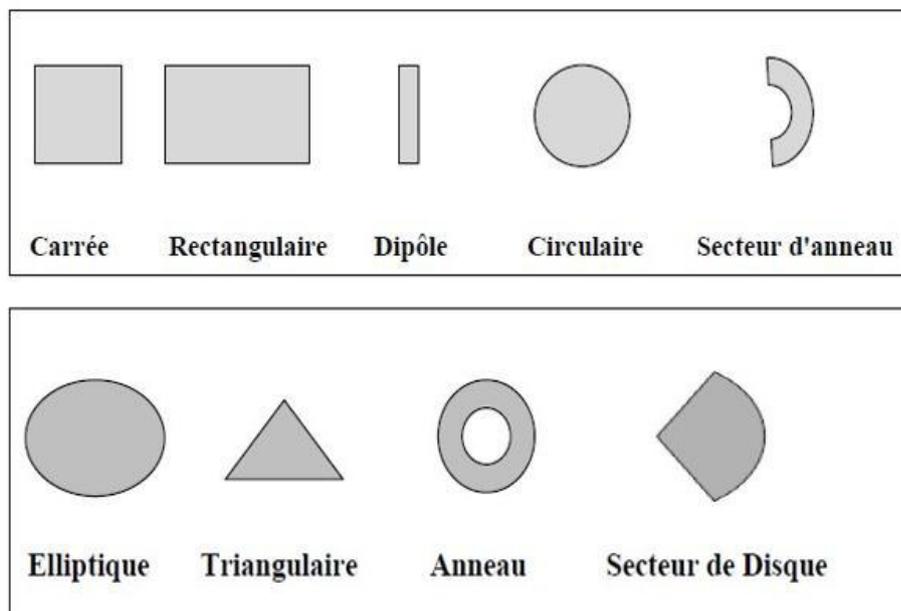


Figure II.12 : Différentes types d'antennes patch

- ❖ **Antenne patch carrée :** Cette antenne présente une surface rayonnante de forme carrée qui garantit une certaine symétrie en ce qui concerne l'angle, l'angle et la longueur globale des côtés, ainsi qu'avec la hauteur. Elle est largement utilisée en raison de sa simplicité de conception et de fabrication. La géométrie symétrique favorise une directivité modérée et une polarisation linéaire, ce qui convient aux applications nécessitant une couverture uniforme.
- ❖ **Antenne patch rectangulaire :** Cette variante est la plus courante en raison de ses dimensions compactes. Elle offre une flexibilité accrue en termes de réglage des paramètres de conception.
- ❖ **Antenne dipôle (Type d'excitation) :** Se basant sur le concept du dipôle classique, l'antenne dipôle est composée de deux bras rayonnants. Elle est aimée pour sa transposition en bande large, qui la rend bien adaptée aux emplois qui exigent une haute couverture de bandes.
- ❖ **Antenne patch circulaire :** Pendant ce faire, pour avoir la surface rayonnante circulaire, qui garantit la polarisation circulaire, propice pour les communications par satellites et pour les systèmes mobiles, il suffit de découper du substrat avec la forme. Du coup, on aura le rayonnement uniforme du plan vers toutes les directions.
- ❖ **Antenne patch elliptique :** Cette configuration utilise une surface rayonnante elliptique, offrant des caractéristiques de rayonnement distinctes. Elle est employée lorsque des motifs de rayonnements spécifiques sont requis pour des applications particulières.
- ❖ **Antenne patch triangulaire :** Moins courante, l'antenne triangulaire est appréciée pour sa capacité à combiner un fonctionnement optimal avec un encombrement réduit. Sa forme unique peut être avantageuse dans des conceptions où l'espace est limité, tout en offrant des performances acceptables.
- ❖ **Antenne à anneau circulaire :** Cette antenne est caractéristique. D'une surface rayonnante en anneau circulaire varie l'antenne caractéristique dans ses propriétés de rayonnement. Il peut être utilisé dans des applications

spéciales où des modèles de rayonnement spéciaux caractéristiques sont nécessaires.

- ❖ **Antenne secteur de disque :** Cette antenne est un disque en forme de surface rayonnante qui a l'habitude de rayonnement à la surface en ligne ou directive.

## II.6 Avantages et limitations des antennes patch

Les antennes patches possèdent plusieurs avantages et peuvent être utilisées dans une vaste gamme de fréquences de 100 MHz à 100 GHz. Cependant, les principaux avantages des antennes patches de bandes sont : coût de production faible, légère et petit volume, l'interconnexion peut être effectuée pour augmenter la directivité et pour un balayage de l'espace par électronique.

Autres avantages des antennes patches de bandes : adaptabilité aux circuits hybrides et MMIC, les réseaux d'alimentation et d'adaptation peuvent être construits en même temps que l'antenne. Le contrôle de la polarisation de l'onde électromagnétique linéaire ou circulaire par le biais de la modification de la géométrie et de l'excitation de l'élément rayonnant.

Malgré le fait que les avantages aient été mentionnés précédemment, il existe encore des opposants à ces antennes. Elle a un nombre de contraintes d'utilisation :

- 1) Une bande passante de 1 à 5 % par rapport à la fréquence.
- 2) Un léger gain, approximativement 5 dB.
- 3) Les émissions sont limitées à une demi-planété de l'espace.
- 4) Seules les faibles puissances sont prises en charge.
- 5) Une grande perte de rayonnement en raison des ondes de surface.
- 6) Obtenir une pureté de polarisation est difficile.

## **II.7 Conclusion**

En conclusion, les antennes patch représentent une avancée importante dans le domaine des communications sans fil grâce à leur conception compacte, économique et facilement intégrable. Malgré certaines limites comme une faible bande passante ou un gain modéré, leurs nombreux avantages en font une solution idéale pour de nombreuses applications, notamment dans les systèmes modernes de télécommunication. Leur évolution continue et les recherches en cours laissent entrevoir des améliorations prometteuses pour répondre aux besoins croissants en performance et en miniaturisation.

---

## **CHAPITRE III**

### **Simulations et Résultats**

### **III.1 Introduction**

Dans ce chapitre, nous allons concevoir et simuler un réseau d'antennes patch pour les applications 5G millimétriques. L'antenne est conçue pour fonctionner à une fréquence de 17 GHz, et les simulations sont réalisées avec le logiciel HFSS.

Nous présenterons les résultats obtenus, notamment le coefficient de réflexion ( $S_{11}$ ), le taux d'ondes stationnaires (VSWR), le gain et le diagramme de rayonnement. Enfin, une conclusion résumera les performances de l'antenne proposée.

### **III.2 Présentation de l'environnement EM de simulation HFSS**

HFSS (High Frequency Structure Simulator) est un logiciel de simulation électromagnétique utilisé pour analyser le comportement des structures à haute fréquence, comme les antennes. Il permet d'étudier différents paramètres tels que les paramètres S, les fréquences de résonance, ainsi que la distribution des champs électromagnétiques.

Un projet HFSS contient un ou plusieurs modèles (designs). Chaque modèle comprend la géométrie de la structure, les conditions aux limites, les matériaux utilisés, ainsi que les résultats de simulation. Tous ces éléments sont accessibles depuis la fenêtre Project Manager.

La création d'une structure en 3D se fait facilement grâce aux outils de dessin intégrés. Il est aussi possible de définir des paramètres variables, ce qui permet d'optimiser la conception automatiquement. HFSS offre également des résultats directement exploitables, comme les courbes de  $S_{11}$ , VSWR (ROS) et l'impédance en fonction de la fréquence.

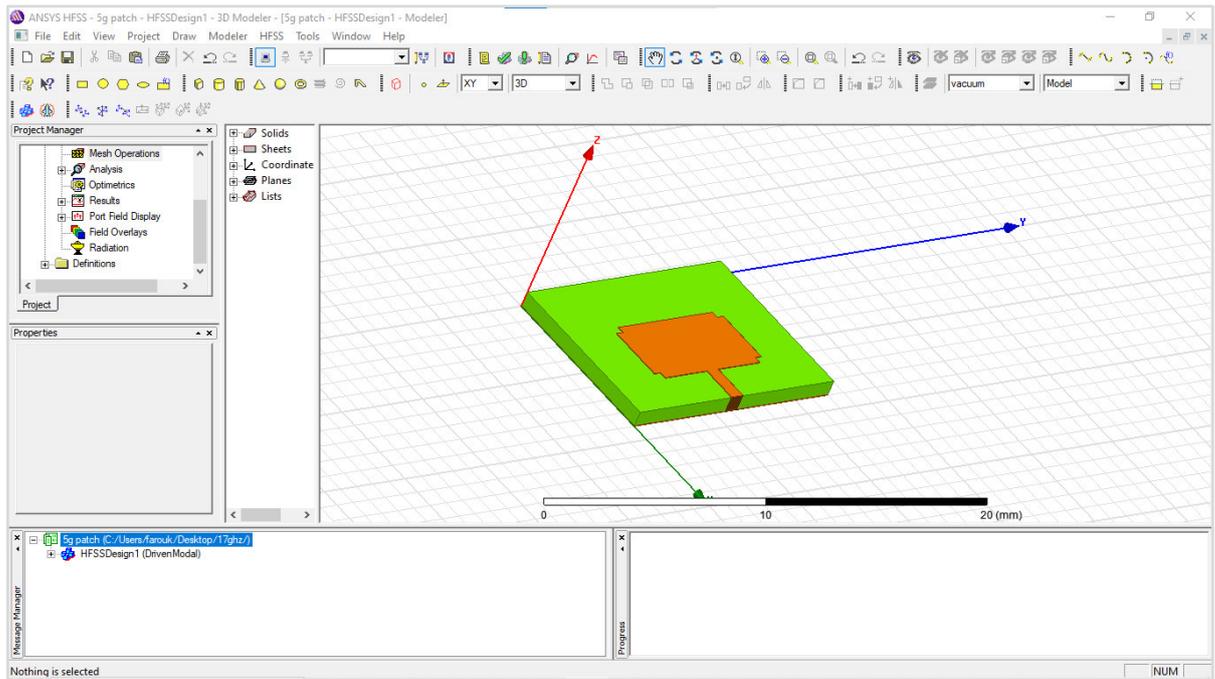


Figure III-1 : Interface ANSYS-HFSS

### III.3 Paramètres clés de conception d’une antenne patch

La conception d’une antenne patch rectangulaire repose principalement sur trois paramètres essentiels :

#### III.3.1 Fréquence de résonance ( $f_r$ )

La fréquence de résonance correspond à la fréquence à laquelle l’antenne est conçue pour rayonner de manière optimale. Nous avons choisi une fréquence centrale de 17 GHz, qui se situe dans la bande millimétrique et est adaptée aux applications 5G à haut débit et faible latence. Cette bande est utilisée pour des communications à courte portée avec des débits élevés.

#### III.3.2 Constante diélectrique du substrat ( $\epsilon_r$ )

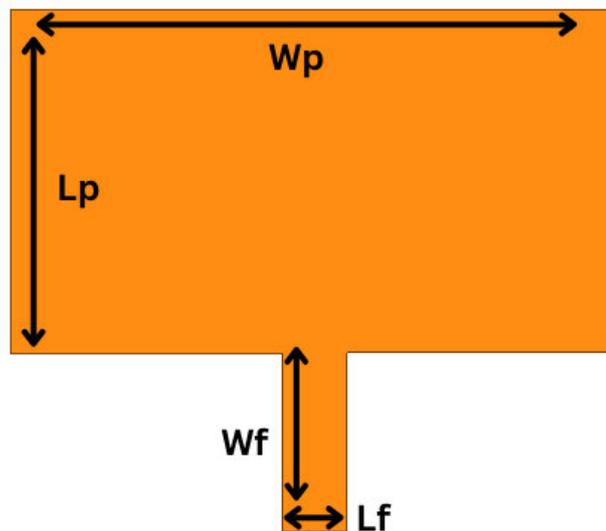
La constante diélectrique du substrat influence directement la taille de l’antenne. Une permittivité plus élevée permet de réduire les dimensions physiques de l’antenne. Nous avons utilisé le matériau FR4 (époxy), avec une permittivité relative  $\epsilon_r = 4,3$ , en raison de sa disponibilité, de son faible coût et de sa compatibilité avec les technologies de fabrication standard, bien qu’il présente des pertes plus importantes à haute fréquence.

### III.3.3 Épaisseur du substrat (h)

L'épaisseur du substrat affecte les performances de rayonnement. Un substrat trop mince peut limiter le rayonnement, tandis qu'un substrat trop épais peut augmenter les pertes et le couplage indésirable. Pour notre conception, nous avons choisi une épaisseur de 0,8 mm, ce qui représente un bon compromis entre compacité, efficacité du rayonnement et fabricabilité à 17 GHz.

### III.4 Conception d'antenne patch pour la 5G mobile

Dans ce qui suit, nous allons nous concentrer sur une étude paramétrique d'une antenne patch rectangulaire alimentée par une ligne micro-ruban [33]. Les dimensions à utiliser sont illustrées dans la Figure III-2 suivante :



$L_p$  : longueur du patch

$W_p$  : largeur du patch

$L_f$  : longueur de la ligne d'alimentation

$W_f$  : largeur de la ligne d'alimentation

$L_g$  : longueur du plan de masse

$W_g$  : largeur du plan de masse

**Figure III-2 : Dimensions de l'antenne patch rectangulaire**

Ces dimensions sont calculées à l'aide d'expressions théoriques basées sur la fréquence de résonance, la permittivité du substrat ( $\epsilon_r$ ), et son épaisseur (h). La

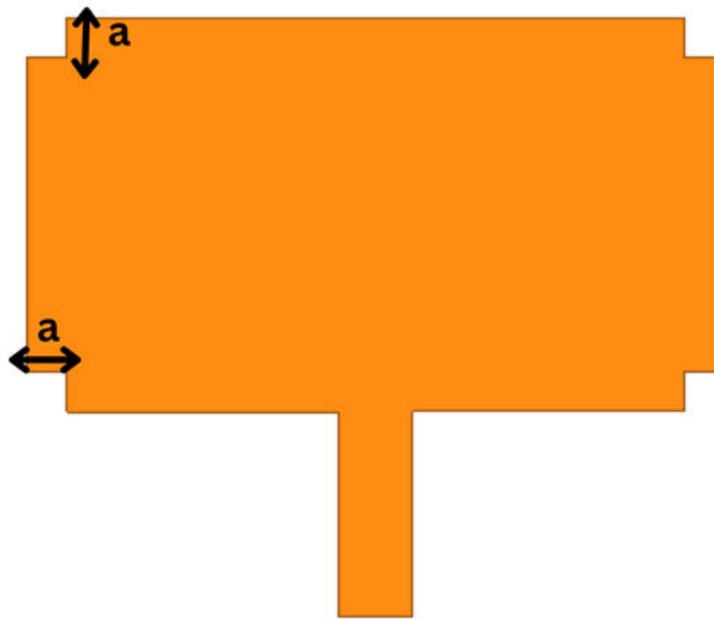
Figure (III-2) présente la structure d'une antenne patch rectangulaire simple. Les équations utilisées pour le dimensionnement sont résumées dans le Tableau III-1.

**Tableau III-1 : Paramètres dimensionnels de l'antenne patch conçue**

| Paramètre   | Équation  | Valeur (mm) |
|---|---|-------------|
| Largeur du patch ( $W_p$ )                            | $W_p = \frac{c}{2fr} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}}$   | 6.618       |
| Constante diélectrique effective ( $\epsilon_{eff}$ ) | $\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[1 + 12 \frac{h}{w}\right]^{-\frac{1}{2}}$   | Sans unité  |
| Longueur du patch ( $L_p$ )                           | $L_p = \frac{c}{2fr\sqrt{\epsilon_{eff}}} - 2\Delta L$  | 3.765       |
| Extension de longueur ( $\Delta L$ )                  | $\frac{\Delta L}{h} = \frac{0.412 (\epsilon_{eff} + 0.3) \left(\frac{w}{h} + 0.264\right)}{(\epsilon_{eff} - 0.258) \left(\frac{w}{h} + 0.8\right)}$            |             |
| Longueur ligne ( $L_f$ )                              | $L = \frac{\lambda}{2} = \frac{c}{2fr\sqrt{\epsilon_{eff}}}$  | 1.962       |
| Largeur ligne ( $W_f$ )                               | $W = \frac{8e^A}{e^{2A} - 2} \times h,$<br>avec $A = \frac{Z_c \sqrt{2(\epsilon_r + 1)}}{120} + \frac{1}{2} \left(\frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1}\right)$ | 0.7         |

### II.4.1 Adaptation de l'antenne patch par encoches

Pour améliorer l'adaptation d'impédance de notre antenne, nous insérons des encoches carrées sur le patch. Cette modification permet d'ajuster plus finement la fréquence de résonance et d'améliorer le coefficient de réflexion. La structure modifiée avec encoches est illustrée à la Figure III-3.



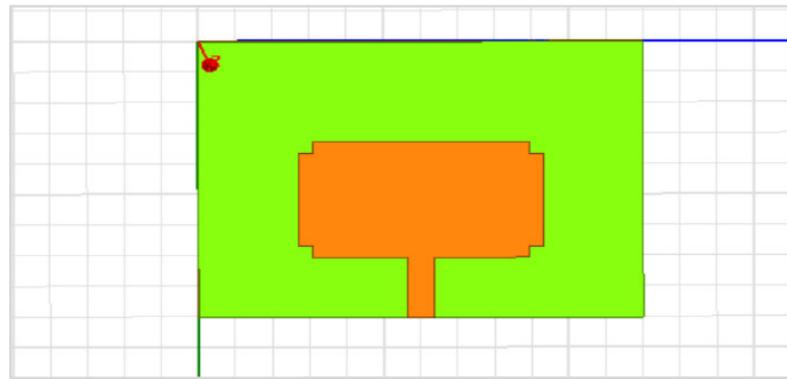
**Figure III-3 : Antenne patch proposée avec encoches**

Les valeurs des paramètres de l'antenne patch sont mentionnées dans le tableau III-2.

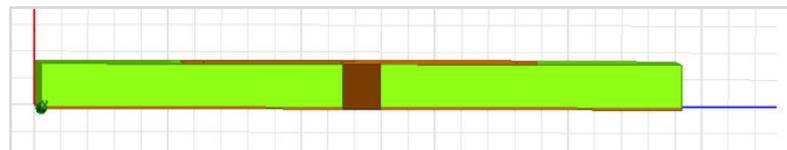
**Tableau III-2 : Paramètres dimensionnels de l'antenne patch adaptée par encoches**

| Élément      | Paramètre                              | Valeur (mm) |
|--------------|--|-------------|
| Substrat     | Permittivité relative ( $\epsilon_r$ ) | 4.3         |
|              | Hauteur (h)                            | 0.8         |
|              | Largeur ( $W_s$ )                      | 12          |
|              | Longueur ( $L_s$ )                     | 9           |
| Patch        | Largeur ( $W_p$ )                      | 6.618       |
|              | Longueur ( $L_p$ )                     | 3.765       |
| Alimentation | Largeur de la ligne ( $W_f$ )          | 0.7         |
|              | Longueur de la ligne ( $L_f$ )         | 1.962       |
| Encoches     | Bras de l'encoche ( $a*a$ )            | 0.379       |

- ❖ **Remarque :** Les dimensions du plan de masse (ground) sont identiques à celles du substrat, soit une largeur de 12 mm et une longueur de 9 mm.



(a)



(b)

Figure III-4 : Antenne patch développée en HFSS, (a) Vue de dessus, (b) Vue de profile

## II.4.2 Résultats de simulation pour l'antenne patch adaptée

### III.4.2.1 Coefficient de réflexion

Nous allons représenter le coefficient de réflexion  $S_{11}$ , qui permet d'évaluer le niveau d'adaptation et la bande passante autour de la fréquence de résonance de 17 GHz pour l'antenne patch rectangulaire étudiée.

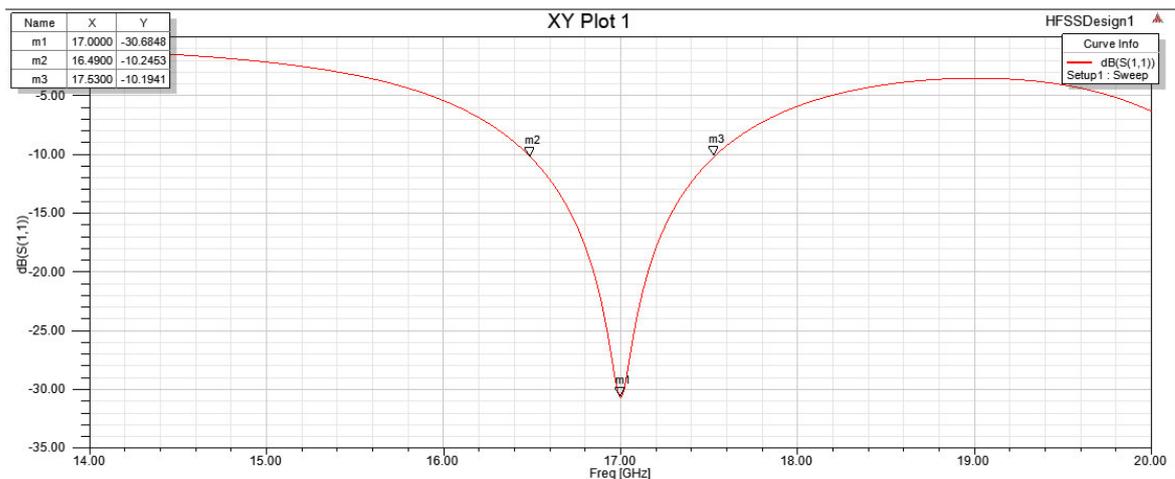


Figure III-5 : Courbe du coefficient de réflexion  $S_{11}$

Nous constatons que l'antenne est bien adaptée à 17 GHz, avec un minimum de  $S_{11}$  atteignant  $-30.68$  dB, ce qui indique une excellente adaptation et un faible taux de réflexion du signal.

### III.4.2.2 Rapport d'onde stationnaire

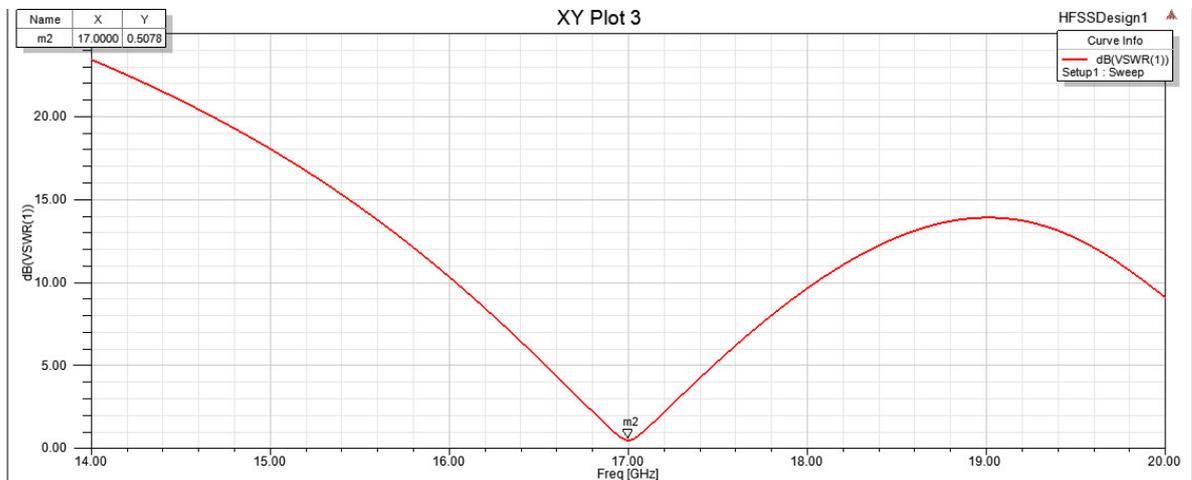


Figure III-6 : Rapport d'onde stationnaire

Le ROS montré à la Figure III-9 à la fréquence de 17 GHz est de 0.5 dB équivalent de 1.12 très proche à la valeur idéale ( $\sim 1$ ), ce qui indique une excellente adaptation d'impédance.

### III.4.2.3 Gain

Le gain d'une antenne représente sa capacité à diriger l'énergie rayonnée dans une direction privilégiée. Un gain élevé indique une meilleure directivité et une efficacité de rayonnement accrue.



Figure III-7 : Courbe du gain

D'après la Figure III-6, notre antenne patch rectangulaire conçue pour fonctionner à 17 GHz présente un gain maximal de 6.67 dB, ce qui est satisfaisant pour ce type de structure. Ce résultat confirme que l'antenne rayonne efficacement dans sa direction principale, avec de faibles pertes.

#### III.4.2.4 Diagramme de rayonnement

Dans la Figure III-7-a, on présente le diagramme de rayonnement du gain en coordonnées polaires à la fréquence de 17 GHz. La Figure III-7-b illustre le diagramme de rayonnement en 3D à cette même fréquence, mettant en évidence la directivité de l'antenne dans l'espace.

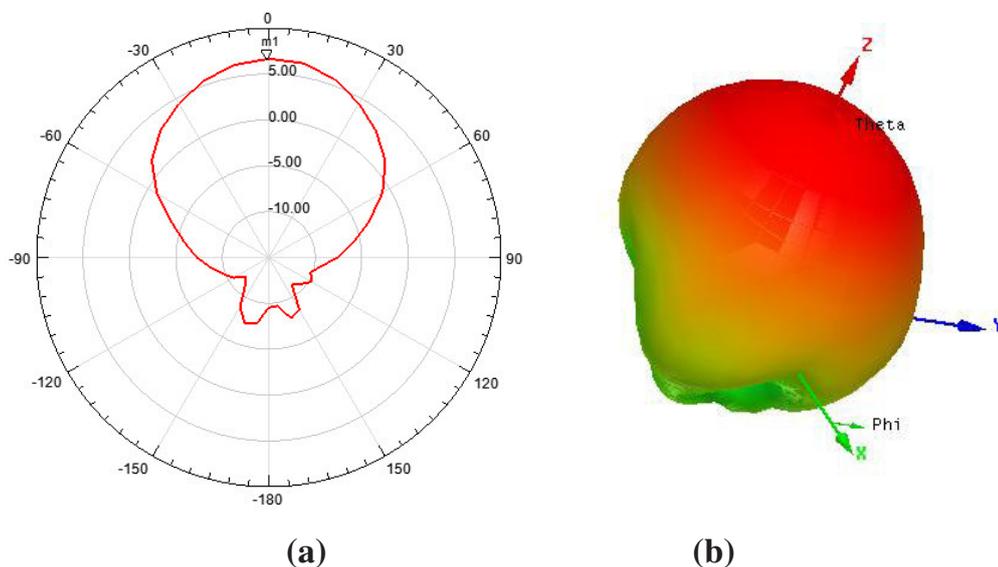


Figure III-8 : Diagramme de rayonnement, (a) polaire, (b) en 3D

### III.5 Conception de réseaux d'antennes pour la 5G mobile

Dans cette partie, nous avons simulé deux configurations de réseaux d'antennes patch rectangulaires fonctionnant à 17 GHz : un réseau à 2 éléments et un réseau à 4 éléments. Ces réseaux sont construits à partir de l'antenne unitaire précédemment conçue, dans le but d'augmenter le gain global et d'améliorer les performances de rayonnement, tout en répondant aux exigences des applications 5G. Les deux structures ont été modélisées et simulées avec le logiciel HFSS, sur un substrat FR4 caractérisé par une constante diélectrique  $\epsilon_r=4.3$  et une épaisseur  $h=0.8$  mm.

### III.5.1 Réseau d’antennes à 2 éléments

La première configuration consiste en un réseau de 2 antennes patch rectangulaires. Les deux éléments sont alimentés à l’aide d’un diviseur en T adapté, garantissant une répartition équitable du signal et une adaptation d’impédance correcte. Ce réseau permet une augmentation modérée du gain tout en maintenant une compacité appréciable du dispositif (Figure III-10) :

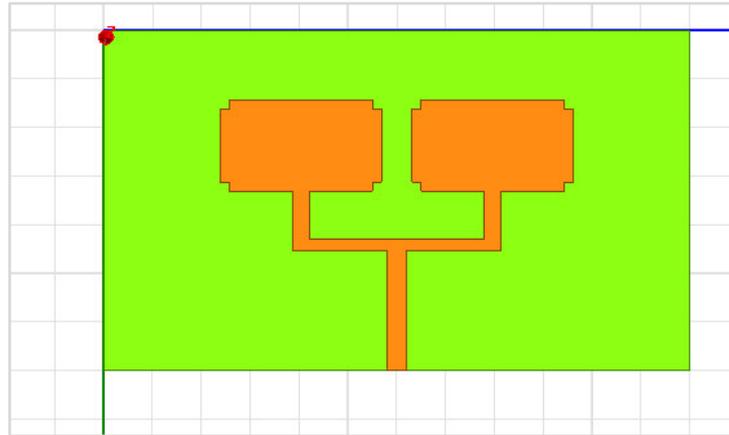


Figure III-9 : Structure du réseau d’antenne à 2 éléments

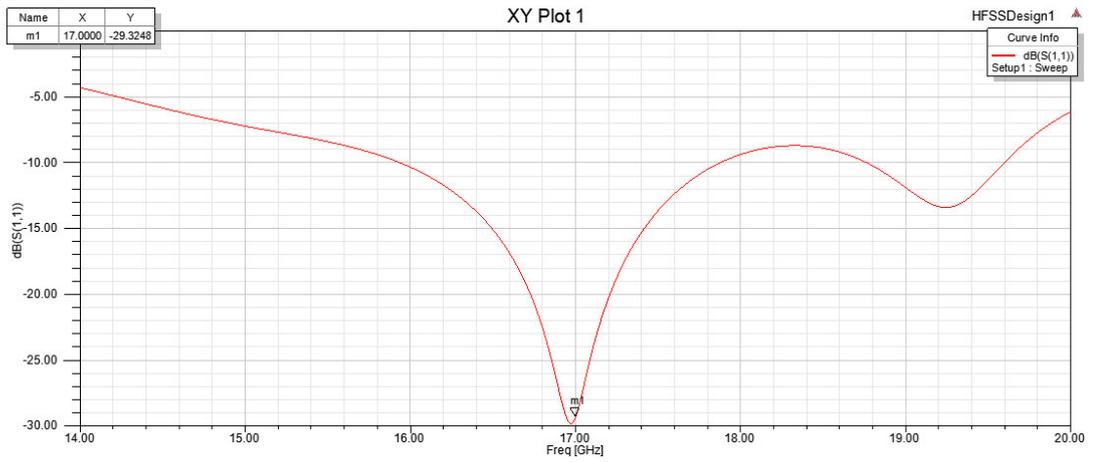
Le tableau III-3 montre les valeurs des principaux paramètres suivis dans la conception de notre réseau d’antennes patch à 2 éléments.

Tableau III-3 : Paramètres du réseau d’antennes patch à 2 éléments

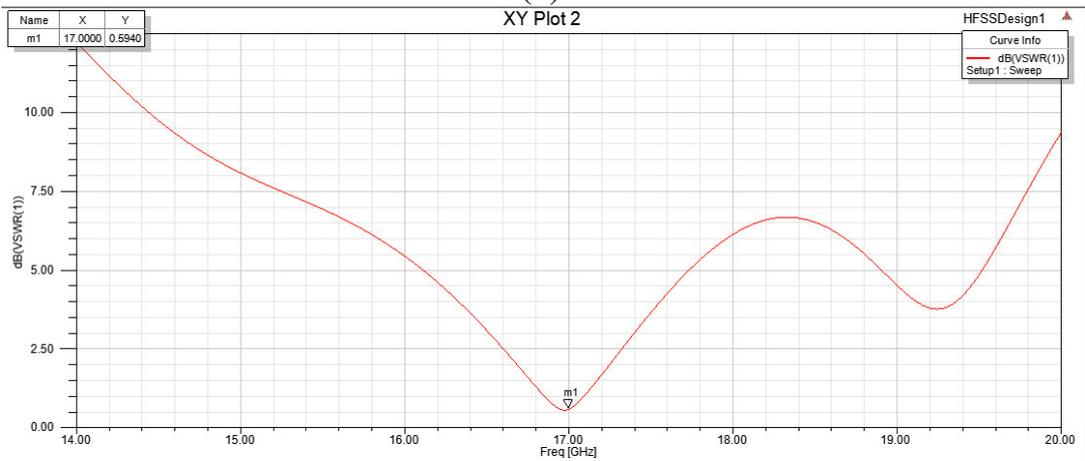
| Élément                           | Paramètre                | Valeur (mm) |
|-----------------------------------|--------------------------|-------------|
| Substrat                          | Largeur (Ws)             | 24          |
|                                   | Longueur (Ls)            | 14          |
| Ligne d’alimentation (T-junction) | Largeur ligne verticale  | 0.7702      |
|                                   | Longueur ligne verticale | 4.9215      |
|                                   | Largeur bras horizontal  | 0.4967      |
|                                   | Longueur bras horizontal | 8.5645      |

### III.5.2 Résultats de simulation du réseau d’antennes à 2 éléments

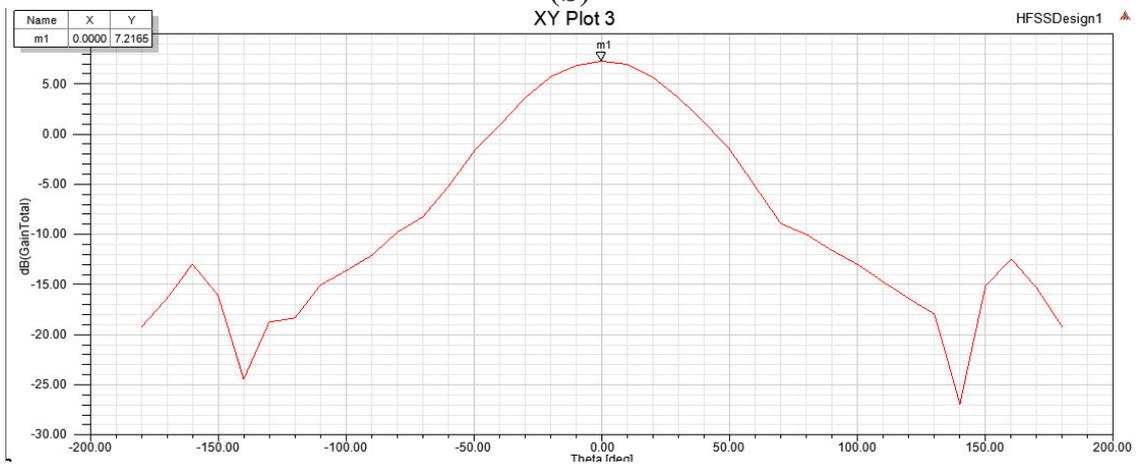
La simulation du réseau d’antennes constitué de deux patch rectangulaires a permis d’évaluer ses performances électromagnétiques (Figure 3-11) :



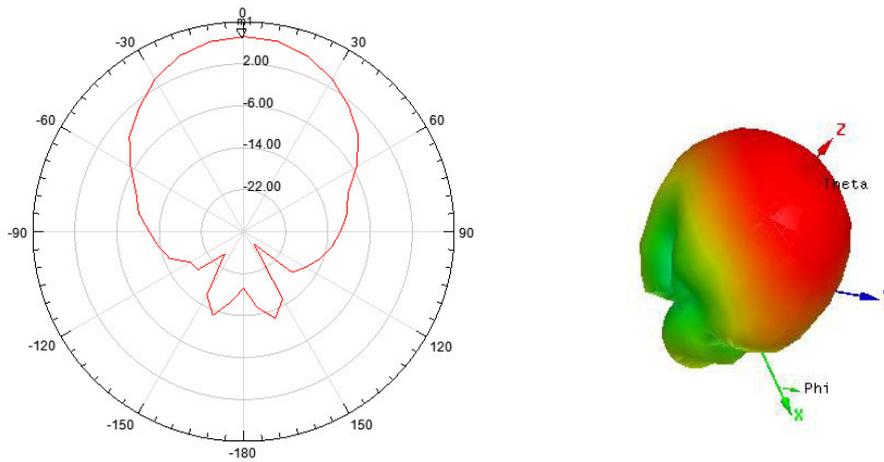
(a)



(b)



(c)



(d)

**Figure III-10 : Réponse électromagnétique pour le réseau d’antennes à deux éléments, (a) coefficient de réflexion, (b) rapport d’onde stationnaire, (c) gain et (d) diagramme de rayonnement polaire et en 3D**

Le coefficient de réflexion  $S_{11}$ , présenté dans la figure III-11-a, atteint une valeur minimale de  $-29.32$  dB à la fréquence de résonance, ce qui témoigne d’une excellente adaptation d’impédance entre l’antenne et la ligne d’alimentation. Cette bonne adaptation est confirmée par une valeur optimale du ROS de  $0.594$  dB égale à  $1.01$ , comme illustré dans la figure III-11-b, indiquant une quasi-absence d’onde réfléchi. La figure III-11-c montre que le gain maximal atteint  $7.2165$  dB, confirmant une amélioration significative du gain par rapport à un patch unique. En fin, le diagramme de rayonnement polaire, montré dans la figure III-11-d, révèle une directivité marquée avec un lobe principal centré autour de  $0^\circ$ , tandis que les lobes secondaires restent faibles, ce qui reflète un rayonnement efficace vers l’avant.

### III.5.3 Réseau d’antennes à 4 éléments

La seconde configuration est un réseau de 4 antennes patch rectangulaires, disposées pour maximiser le gain et améliorer la directivité. L’alimentation est assurée par une structure de lignes en T hiérarchisées, permettant de distribuer le signal de manière équilibrée vers chaque patch. Afin d’assurer une bonne adaptation d’impédance entre la source et le réseau, une ligne quart d’onde a été

ajoutée à l'entrée du circuit. Cette structure est particulièrement adaptée aux applications nécessitant une meilleure couverture directionnelle à haute fréquence (Figure III-12) :

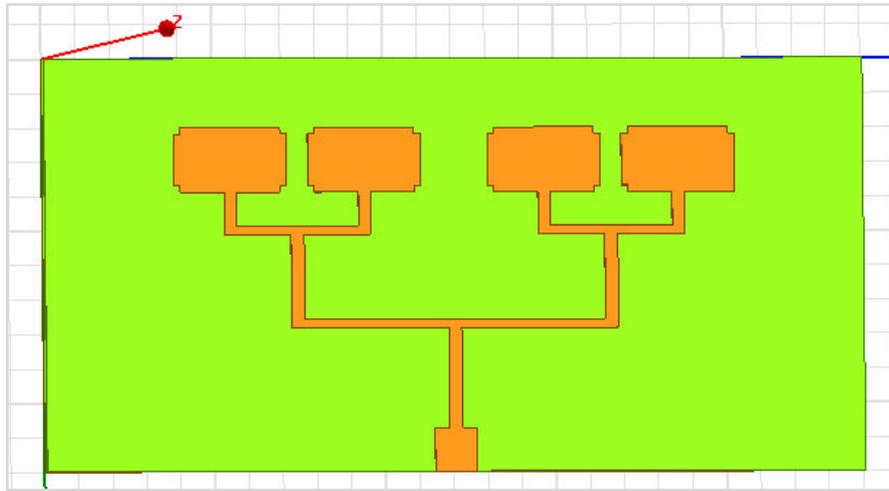


Figure III-12 : Structure du réseau d'antenne de 4 éléments.

Le tableau III-4 montre les valeurs des principaux paramètres suivis dans la conception de notre réseau d'antennes patch à 4 éléments.

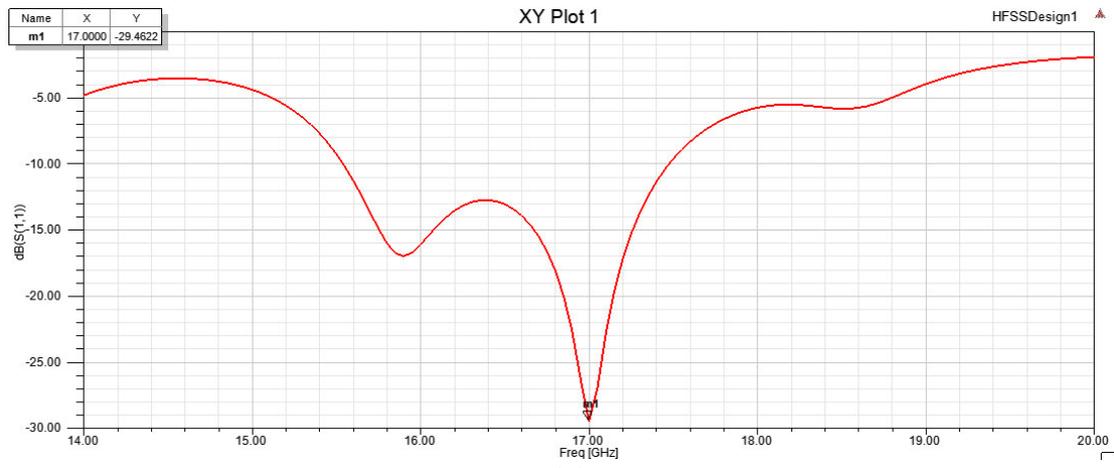
Tableau III-4 : Paramètres du réseau d'antennes patch à 4 éléments

| Élément                           | Paramètre                | Valeur (mm) |
|-----------------------------------|--------------------------|-------------|
| Substrat                          | Largeur (Ws)             | 48          |
|                                   | Longueur (Ls)            | 24          |
| Ligne d'alimentation (T-junction) | Largeur ligne verticale  | 0.7615      |
|                                   | Longueur ligne verticale | 5.8132      |
|                                   | Largeur bras horizontal  | 0.5068      |
|                                   | Longueur bras horizontal | 19.1711     |
| Ligne quart d'onde                | Longueur (l)             | 2.5189      |
|                                   | Largeur (w)              | 2.4619      |

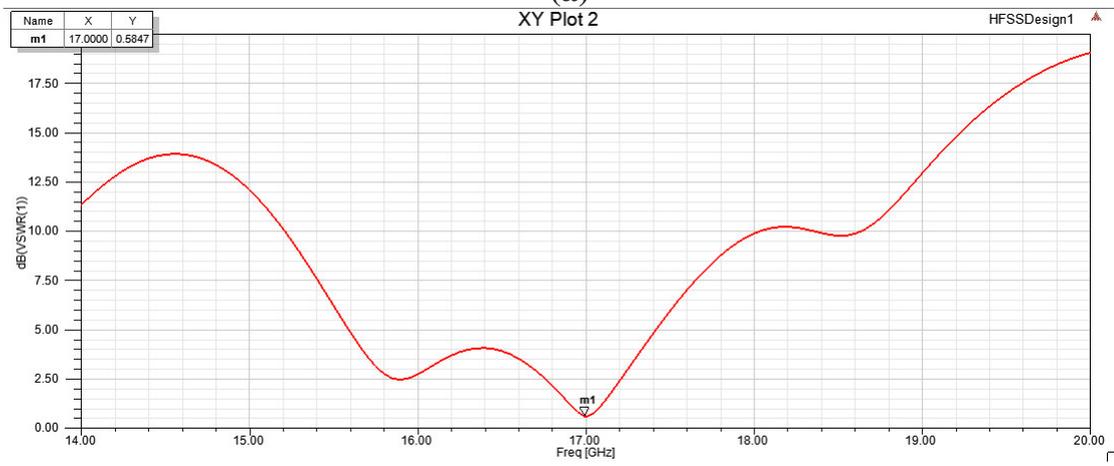
### III.5.4 Résultats de simulation du réseau d'antennes à 4 éléments

La simulation du réseau composé de quatre antennes patch rectangulaires a permis d'évaluer précisément ses performances électromagnétiques. Le coefficient de réflexion  $S_{11}$ , présenté à la figure III-13-a, atteint un minimum de  $-29,46$  dB à la fréquence de résonance, ce qui montre une bonne adaptation d'impédance entre l'antenne et son circuit d'alimentation. Cette adaptation est confirmée par un rapport d'onde stationnaire optimal, mesuré à  $0,58$ dB (1.14)

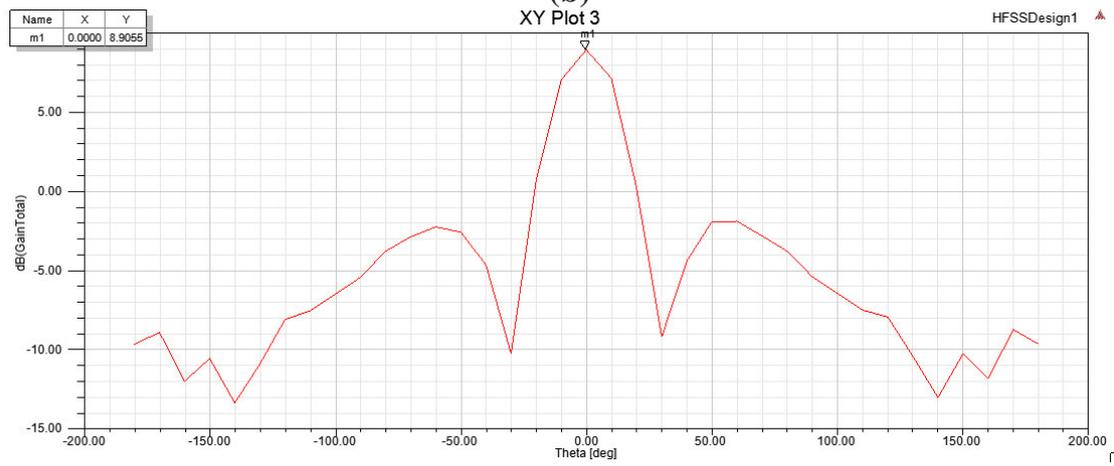
(Figure III-13-b), indiquant une réflexion très réduite et une bonne transmission de la puissance.



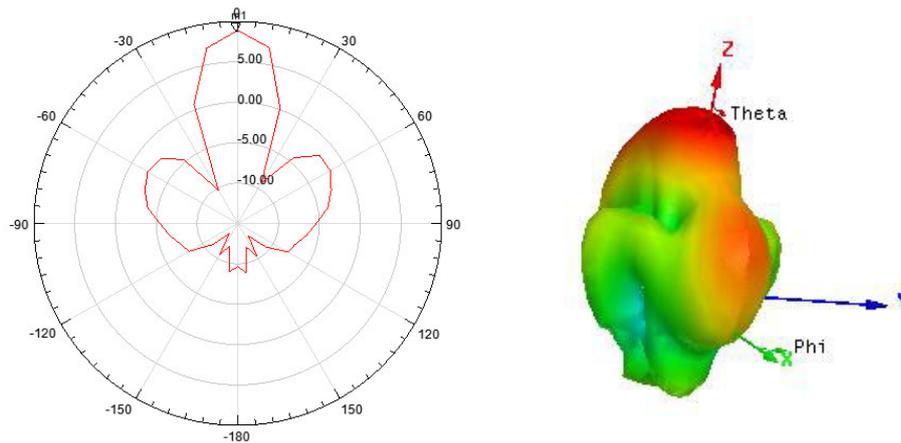
(a)



(b)



(c)



(d)

**Figure III-13 : Réponse électromagnétique pour le réseau d'antennes à quatre éléments, (a) coefficient de réflexion, (b) rapport d'onde stationnaire, (c) gain et (d) diagramme de rayonnement polaire et en 3D**

Le gain maximal atteint 8,9 dB (Figure III-13-c), ce qui représente une amélioration notable par rapport à une configuration à deux antennes. Enfin, le diagramme de rayonnement polaire (Figure III-13-d) montre une directivité importante avec un lobe principal centré à  $0^\circ$ , tandis que les lobes secondaires sont peu marqués, ce qui traduit une concentration efficace du signal vers l'avant.

### III.6 Comparaison et validation de résultats

Au cours des dernières années, des efforts importants ont été déployés sur la conception des antennes et des réseaux d'antennes pour l'application à la 5G mobile. Comme dernière étape de simulation, il est très intéressant de valider les résultats obtenus pour les réseaux d'antennes conçus afin de procéder à la réalisation d'un prototype réel et mesurer les résultats de réponse électromagnétique. Ceci était par comparer les résultats achevés avec d'autres précédents [33, 34] qui montraient de très bonnes performances répondant aux exigences désirées en termes d'adaptation, de coefficient de réflexion, de gain et de plage d'applications. A travers le tableau de comparaison III-5, il est très clair que les paramètres dimensionnels et la réponse électromagnétique pour l'antenne patch conçue aussi pour les réseaux d'antennes développés atteignent de très bonnes valeurs validant la performance achevée. Nous pouvons déduire aussi que le réseau d'antennes à deux éléments peut être considéré comme optimal en

terme de réponse électromagnétique en compromis avec son profil léger vis-à-vis l'application ciblée. Il peut être facilement réalisé au niveau du laboratoire d'Antennes et Canaux de Transmission du Département de Télécommunications à l'Université Dr. Moulay Tahar de Saida qui possède une imprimante du type PFLK et un Analyseur de réseaux de 20GHz.

**Tableau III-5 : Comparaison et validation de résultats obtenus**

| Designs   |  | Antenne patch rectangulaire conçue | Réseaux à 2 éléments développé | Réseaux à 4 éléments développé | [33]    | [34] |
|---|--|------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|---------|------|
| <b>Outil de simulation</b>                                  |  |                                    |                                |                                |         |      |
| /   |  | HFSS                               |                                |                                | CST     |      |
| <b>Paramètres dimensionnels (mm)</b>                        |  |                                    |                                |                                |         |      |
| <b>Alimentation</b>   | Largeur de la ligne (Wf)               | 0.7                                |                                |                                | 1       | 1    |
|   | Longueur de la ligne (Lf)              | 1.96                               |                                |                                | 2.38    | 0.2  |
| <b>Encoches</b>   | Bras d'encoche (a*a)                   | 0.38*0.38                          |                                |                                | 0.2*0.3 |      |
| <b>Substrat</b>   | Permittivité relative ( $\epsilon_r$ ) | 4.3                                |                                |                                | 4.3     | 2.2  |
|   | Hauteur (h)                            | 0.8                                |                                |                                | 1.5     | /    |
|   | Largeur (Ws)                           | 12                                 | 24                             | 48                             | 49.55   | 2.9  |
|   | Longueur (Ls)                          | 9                                  | 14                             | 24                             | 15.8    | 2.9  |
| <b>Patch</b>  | Largeur (Wp)                           | 6.61                               |                                |                                | 3.54    | 4.4  |
|   | Longueur (Lp)                          | 3.76                               |                                |                                | 1.95    | 3.05 |
| <b>Ligne d'alimentation (T-junction)</b>                    | Largeur ligne verticale                | /                                  | 0.77                           | 0.76                           | /       | /    |
|   | Longueur ligne verticale               | /                                  | 4.9                            | 5.81                           | /       | /    |
|   | Largeur bras horizontal                | /                                  | 0.49                           | 0.50                           | /       | /    |
|   | Longueur bras horizontal               | /                                  | 8.56                           | 19.17                          | /       | /    |
| <b>Ligne quart d'onde</b>                                   | Longueur (l)                           | /                                  | /                              | 2.51                           | /       | /    |
|   | Largeur (w)                            | /                                  | /                              | 2.46                           | /       | /    |
| <b>Réponse électromagnétique</b>                            |  |                                    |                                |                                |         |      |
| <b>Fréquence de coupure (<math>f_c</math>) en GHz</b>       |  | 17                                 |                                |                                | 26      | 27.9 |
| <b>Bande de fréquence (W) en GHz</b>                        |  | 3.5                                | 4                              | 3                              | 2       | 0.4  |
| <b>Coefficient de réflexion (<math>S_{11}</math>) en dB</b> |  | 30.6                               | 29.3                           | 29.4                           | 21.8    | 20   |
| <b>Rapport d'Ondes Stationnaire (ROS)</b>                   |  | 1.12                               | 1.01                           | 1.14                           | < 2     | < 2  |
| <b>Gain (G) en dBi</b>                                      |  | 6.6                                | 7.2                            | 8.4                            | 9.3     | 8.4  |
| <b>Applications</b>   |  | Radar – New Mobile Générations     |                                |                                |         |      |

### **III.7 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons réalisé la conception et la simulation d'un réseau d'antennes patch optimisé pour les applications 5G millimétriques à 17 GHz. Grâce à une approche soignée de modélisation et d'optimisation sous HFSS, nous avons pu atteindre des performances satisfaisantes en termes d'adaptation d'impédance, de directivité et de gain. Le réseau conçu permet une meilleure concentration du signal et une transmission efficace de la puissance, démontrant des améliorations notables par rapport aux configurations plus simples. Ces résultats confirment que l'antenne proposée répond aux exigences des systèmes de communication 5G et constitue une base solide pour des développements et optimisations futurs.

---

## **CONCLUSION GENERALE**

À travers ce travail, nous avons étudié l'évolution des réseaux mobiles jusqu'à la 5G, en montrant comment cette nouvelle génération répond aux besoins actuels en termes de débit élevé, de faible latence et de grand nombre de connexions simultanées. Nous avons également souligné l'importance des antennes patch micro-ruban, qui offrent une solution compacte, économique et efficace pour les systèmes de communication sans fil modernes.

Dans la partie pratique, nous avons conçu et simulé une antenne patch adaptée aux applications 5G en utilisant HFSS. Les résultats obtenus ont montré que l'antenne proposée présente de bonnes performances, notamment en matière de gain, d'adaptation d'impédance et de directivité, ce qui la rend conforme aux exigences des réseaux 5G.

Ce mémoire ouvre des perspectives intéressantes pour la suite. Des améliorations peuvent encore être apportées à travers l'optimisation des dimensions, le choix de matériaux plus performants ou l'intégration de techniques avancées. Ces pistes pourraient permettre de relever les nouveaux défis des futures générations de réseaux, notamment la 6G. En conclusion, ce travail constitue une base solide pour poursuivre les recherches et développer des antennes toujours plus performantes et adaptées aux besoins croissants des technologies de communication sans fil.

---

## **REFERENCES**

- [1] Ericsson, Ericsson Mobility Report: Q4 2024 Update, Ericsson, 2024.
- [2] International Telecommunication Union (ITU), Facts and Figures 2023.
- [3] A. Gupta and R. K. Jha, “A Survey of 5G Network: Architecture and Emerging Technologies,” *IEEE Access*, vol. 3, pp. 1206–1232, 2015.
- [4] Boccardi, F., et al., “Towards the 5th Generation of Wireless Communication Systems,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, no. 2, pp. 26–32, Feb. 2014.
- [5] Rapport sur la 5G et les réseaux de communications mobiles, Agence Nationale, 2022.
- [6] ITU-R (Union internationale des télécommunications) – IMT-2020 Requirements, Document M.2410 : Minimum requirements related to technical performance for IMT-2020 radio interface(s), 2017.
- [7] B. Tezergil, E. Onur, *Wireless Backhaul in 5G and Beyond: Issues, Challenges and Opportunities*, *IEEE Communications Magazine*, 2021.
- [8] M. N. Tehrani, M. Uysal, H. Yanikomeroğlu, Device-to-Device Communication in 5G Cellular Networks: Challenges, Solutions, and Future Directions, *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, no. 5, pp. 86–92, May 2014. DOI: 10.1109/MCOM.2014.6829950
- [9] Sassan Ahmadi, *5G NR: Architecture, Technology, Implementation, and Operation of 3GPP New Radio Standards*, Academic Press, 2019. Chapitre : Spectrum Considerations for 5G.
- [10] S. Wu, Y. Wang, M. Al-Imari, M. Nekovee, *Frequency and Quadrature Amplitude Modulation for 5G Networks*, Samsung R&D Institute UK. Communications House, Staines-upon-Thames, United Kingdom.
- [11] Mahyuni, M., Bimantara, A. A., Nurfaizi, R., Ahsanitaqwm, R., & Victorianda. (2024). *Advancements and Challenges in the Implementation of 5G Networks: A Comprehensive Analysis*. *Journal of Computer Science and Technology Application (CORISINTA)*, 1(2), 111–118.
- [12] T. S. Rappaport et al., *Millimeter Wave Mobile Communications for 5G Cellular: It Will Work!*, *IEEE Access*, vol. 1, pp. 335–349, May 2013. DOI: 10.1109/ACCESS.2013.2260813

- [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. doi: 10.1109/JSAC.2014.2328098.
- [14] N. Hassan and X. Fernando, "Massive MIMO wireless networks: An overview," *Electronics*, vol. 6, no. 3, pp. 1–30, Sep. 2017
- [15] E. Ali, M. Ismail, R. Nordin, and N. F. Abdullah, "Beamforming techniques for massive MIMO systems in 5G: Overview, classification, and trends for future research," *International Journal of Communication Systems*, vol. 30, no. 10, pp. 1-20, 2017.
- [16] Z. Zhang, K. Long, A. V. Vasilakos, and L. Hanzo, "Full-Duplex Wireless Communications: Challenges, Solutions, and Future Research Directions," *Proceedings of the IEEE*, vol. 104, no. 7, pp. 1427-1445, July 2016.
- [17] Techniques de l'Ingénieur, *Comprendre la 5G : forces, faiblesses et acteurs*, Livre blanc, novembre 2020.
- [18] George, A. S., & Sagayarajan, S. (2023). Exploring the Potential and Limitations of 5G Technology: A Unique Perspective. *Partners Universal International Innovation Journal (PUIIJ)*, 1(2), 160.
- [19] Bikkasani, D. C., & Yerabolu, M. R. (2024). AI-driven 5G network optimization: A comprehensive review of resource allocation, traffic management, and dynamic network slicing. *American Journal of Artificial Intelligence*, 8(2), 55-62.
- [20] Khan, M. A., Khan, A., Abuibaid, M., & Huang, J. S. (2023). Harnessing 5G networks for enhanced precision agriculture: Challenges and potential solutions. In *Proceedings of the 2023 International Conference on Smart Applications, Communications and Networking (SmartNets)* (pp. 1-6). IEEE.
- [21] Rafique, W., Barai, J. R., Fapojuwo, A. O., & Krishnamurthy, D. (2025). A survey on beyond 5G network slicing for smart cities applications. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 27(1), 595-620.
- [22] Huawei Technologies Co., Ltd. (2024). *6G: The Next Horizon from Connected People and Things to Connected Intelligence*.

- [23] T. A. Milligan, *Modern Antenna Design*, 2nd ed. Wiley Interscience, chap. 2, p. 285.
- [24] A. Chaabane, F. Djahli, H. Attia, L. M. Abdelghani, and T. A. Denidni, "Wideband and high-gain EBG resonator antenna based on dual layer PRS," *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 59, no. 1, pp. 98–101, 2017.
- [25] D. M. Pozar, "Microstrip antennas," *Proceedings of the IEEE*, vol. 80, no. 1, pp. 79–91, Jan. 1992.
- [26] O. Picon, *Les antennes : théorie, conception et application*. Paris, France: Dunod, 2009.
- [27] K. R. Caver and J. W. Mink, "Microstrip antenna technology," *IEEE Transactions*, 1981.
- [28] A. Zitouni, *Antennes : polycopié de cours destiné aux étudiants de 1ère Master en Télécommunications, spécialité Systèmes des Télécommunications*, Univ. Hassiba Benbouali de Chlef, Faculté de Technologie, Département d'Électronique, sept. 2018.
- [29] L. Ouallil, *Simulation des antennes sous HFSS (High Frequency Structure Simulator)*, Université Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou, 2012–2013.
- [30] Y. Huang and K. Boyle, *Antennas: From Theory to Practice*, John Wiley & Sons, 2008, ISBN 978-0-470-51028-5.
- [31] R. Diaoui, *Conception d'une nouvelle antenne ULB avec caractéristique de suppression de plusieurs bandes*, Université 8 Mai 1945 - Guelma, mai 2013.
- [32] R. Garg, P. Bhartia, I. Bahl, and A. Ittipiboon, *Microstrip Antenna Design Handbook*. Artech House, 2001, ISBN 0-89006-513-6.
- [33] M. ERROUANE, E. BOUDAUD, *Conception d'un Réseau d'Antennes Patch pour les Réseaux Mobiles 5G Millimétrique*, Université de Ain Temouchent, 2021.
- [34] Safpbri Johari, Muhammad Abdul Jalil, Shaifol Ifrad Ibrahim, Mohd Nazry, Mohammad and Norhafiza Hassan, "28 GHz Microstrip Patch Antennas for Future 5G». *Journal of Engineering and Science Research*. 2 (4): 01-06, 2018.

## Résumé

La technologie 5G rend les réseaux de communication mobile encore plus essentiels pour alimenter un large éventail de secteurs d'avenir, du commerce de détail à l'éducation, des transports au divertissement, de la maison connectée à la santé, qui nécessitent des antennes intégrées plus performantes pour supporter haut débit, débit et performances. Cette étude démontrera comment concevoir et optimiser des antennes patch performantes pour les applications réseau 5G à 17 GHz grâce à la technologie microruban, basée sur des techniques précises utilisant un simulateur EM comme environnement réaliste pour des procédures d'analyse et d'optimisation efficaces afin de développer une conception haute performance.

**Mots clés :** Réseaux 5G, Applications sans fil, Antennes patch, Conception et optimisation EM, Fréquences 17 GHz.

## ملخص

تجعل تقنية الجيل الخامس شبكات الاتصالات المتنقلة أكثر أهمية لتشغيل مجموعة واسعة من الصناعات المستقبلية، من تجارة التجزئة إلى التعليم، ومن النقل إلى الترفيه، ومن المنازل الذكية إلى الرعاية الصحية، والتي تتطلب هوائيات متكاملة أكثر فعالية لدعم السرعة العالية والخصم والأداء. ستوضح هذه الدراسة كيفية تصميم وتحسين هوائيات رقعة فعالة لتطبيقات شبكات الجيل الخامس بتردد 17 جيجاهرتز باستخدام تقنية الشرائط الدقيقة، استنادًا إلى تقنيات دقيقة باستخدام محاكي كهرومغناطيسي كبيئة واقعية لإجراءات التحليل والتحسين الفعالة، بهدف تطوير تصميم عالي الأداء.

**الكلمات المفتاحية:** شبكات الجيل الخامس، التطبيقات اللاسلكية، هوائيات الرقعة، تصميم وتحسين كهرومغناطيسي، ترددات 17 جيجاهرتز.

## Summary

5G technology makes mobile communication networks more essential to power a wide range of future industries from retail to education, transportation to entertainment, and smart homes to healthcare that requires more effective integrated antennas to support high speed, debit and performance. This study will demonstrate how to design and optimize efficient patch antennas for 17GHz 5G network applications using microstrip technology based on accurate techniques using EM-simulator as a realistic environment for effective analysis and optimization procedures in order to develop a high performance design.

**Key words:** 5G Networks, Wireless Applications, Patch Antennas, EM-Design and Optimization, 17GHz Frequencies.