



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIC ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة



التعليم العالي

MEMOIRE

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

En : Télécommunications

Spécialité : Réseaux et Télécommunications

Par : BOUHAFS ABDERREZZAQ & ICHOU ABDELKADER

Sujet

Etude et conception d'un réseau d'antenne pour des applications 5G

Soutenu, le 21 / 06 / 2020, devant le jury composé de :

| | | | |
|-----------------------|-----------------------------|---------------|---------------------------|
| M. KHELLADI Mounir | Maitre de conférences « A » | Univ. Tlemcen | Président |
| M. BOUACHA Abdelhafid | Maitre de conférences « A » | Univ. Tlemcen | Directeur de mémoire |
| Melle MAHI Sarra | Docteur | Univ. Tlemcen | Co- Directrice de mémoire |
| Melle ZIANI Djemila | Docteur | Univ. Tlemcen | Co- Directrice de mémoire |
| Mme BOUSALAH Fayza | Maitre de conférences « B » | Univ. Tlemcen | Examinatrice |

Année universitaire 2019-2020

Remerciements

Notre parfaite gratitude et nos remerciements à ALLAH au premier lieu, le plus puissant qui nous a donné la force, le courage et la volonté pour aboutir à notre objectif.

Nous tenons à remercier particulièrement nos parents, nos succès demeurés loin le fruit de leurs longues années de sacrifices et de patience.

C'est avec une profonde reconnaissance et considération particulière que nous remercions à notre encadreur Monsieur « **BOUAACHA ABDELHAFID** » pour son soutien, conseils judicieux et sa grande bienveillance durant l'élaboration de ce projet et pour avoir bénéficié de ses compétences scientifiques et aussi pour sa disponibilité.

Nous saisissons également cette opportunité pour remercier Mademoiselle « **MAHI SARRA** » et Mademoiselle « **ZIANI DJAMILA** » pour la documentation et l'accompagnement tout au long de ce travail et pour leurs aides.

Nous exprimons aussi nos reconnaissances à tous les membres de jury d'avoir accepté de lire, de présider et d'examiner ce modeste travail et d'apporter les critiques nécessaires à la mise en forme de ce projet.

Nos vifs remerciements pour l'ensemble des enseignants du département de télécommunications qui ont contribué à notre formation d'ingénieur en TTL.

Enfin, à tous ceux qui nous ont soutenus de près ou de loin pour la réalisation de ce projet de fin d'étude, nous éprouvons incessamment leur estime et amabilité.

Merci...

Dédicace

Rien n'est aussi beau à offrir que le fruit d'un labeur qu'on dédié du fond du cœur à ceux qu'on aime et qu'on remercie en exprimant la gratitude et la reconnaissance durant toute notre existence.

Je dédie ce travail à :

À mon père, mon premier encadrant depuis ma naissance

À ma mère, qui m'a toujours poussé à aller de l'avant avec ses prières

Je ne serai jamais assez reconnaissant envers eux.

À mon frère AMINE, mes sœurs FATEMA ZOHR.A et KHADIDJA, pour leur patience, d'avoir tendu chaleureusement leurs bras et pour avoir évincer mes moments de doute.

À mon beau-frère HOUSSINE et mes neveux ALI et ZAYD qui m'ont accompagné de leur amour.

À mes amis de toujours ABDERAHMEN, REDA, KARIM et B.ADIS.

À Mon binôme KADER avec qui j'ai pu réaliser ce travail.

À toute la promo de Télécommunication dont je fais partie.

À mes professeurs tout au long du cycle de mes études qui m'ont dirigé vers la porte de réussite.

À cette terre, notre chère et bien aimé ALGERIE, qui m'a vu naitre (vive ma patrie)

***BOUHAFS
ABDERREZZAQ***

Dédicace

Tout d'abord je tiens à remercier Dieu le tout puissant de m'avoir donné la santé, la patience, la volonté et de m'avoir fourni sa bénédiction ;

Je dédie ce modeste travail ;

À ma très chère mère qui a toujours répondu présente dans les moments les plus difficiles, et m'a vouée un amour inconditionnel, son soutien, son encouragement m'ont toujours donné la force de poursuivre mes études ;

À mon très cher père, qui m'a comblé de son soutien ;

Tu es pour moi un exemple de courage et de sacrifice continu ;

Aucune dédicace ne pourra compenser les sacrifices de mes parents ;

À ma très chère sœur Meriem ;

À Imane, Zoubir ;

À mon binôme Abderrezzaq ;

À tous les gens qui me donnent l'envie d'aller en avant ;

Je vous remercie tous, votre soutien et vos encouragements me donnent la force de continuer.

Abdelkader

Sommaire

| | |
|--|------|
| Liste des figures | VI |
| Liste des tableaux | VIII |
| Liste des abréviations | IX |
| Introduction générale..... | XI |
| Chapitre I..... | 4 |
| I.1 Introduction : | 5 |
| I.2 Historique : | 5 |
| I.2.1 La 5^{ème} génération : | 6 |
| I.2.2 Objectif et Principe de la 5G : | 6 |
| I.2.3 Les technologies clés de la 5G : | 7 |
| I.2.3.1 Les ondes millimétriques : | 7 |
| I.2.3.2 Les micros-celles : | 8 |
| I.2.3.3 Beamforming : | 9 |
| I.2.3.4 Full-Duplex : | 9 |
| I.3 Le Massive MIMO : | 9 |
| I.3.1 La technologie MIMO : | 9 |
| I.3.2 Modèle du canal MIMO : | 10 |
| I.3.3 Capacité d'un canal MIMO : | 11 |
| I.3.4 La technologie Massive MIMO : | 12 |
| I.3.4.1 Les avantages des systèmes des Massive MIMO : | 13 |
| I.3.4.2 Types Massive MIMO : | 13 |
| I.3.4.2.1 SU-MIMO : | 13 |
| I.3.4.2.2 MU-MIMO : | 14 |
| I.3.4.3 Caractéristiques générales des systèmes MIMO Massif : | 14 |
| I.3.4.3.1 Diversité d'un système MIMO Massif : | 14 |
| I.3.4.3.2 L'évolutivité et la préférence du schéma TDD : | 15 |
| I.3.4.3.3 Antennes et propagation : | 16 |
| I.3.4.3.3.1 Caractéristiques des antennes : | 17 |
| a. Diagramme de rayonnement : | 17 |
| b. Le coefficient de réflexion (S_{11}) (adaptation) : | 18 |
| c. Gain : | 19 |

| | |
|--|-----------|
| d. Directivité : | 19 |
| e. Le rendement : | 19 |
| f. L'impédance d'entrée : | 20 |
| g. La bande passante (BP) : | 20 |
| I.3.4.3.3 Types des antennes : | 21 |
| 1. Antenne dipolaire (Fig.I.13.a) : | 22 |
| 2. Boucle magnétique | 22 |
| 3. Antenne cornet | 22 |
| 4. Antenne fente | 22 |
| 5. Antenne à réflecteur parabolique | 22 |
| 6. Antennes imprimées (micro-ruban) | 22 |
| 6.1 Mécanisme de radiation : | 23 |
| 6.2 Techniques d'alimentation : | 24 |
| 1) Couplage avec contact : | 24 |
| 1.1 Alimentation par ligne microruban : | 24 |
| 1.2 Alimentation par sonde coaxiale : | 25 |
| 2) Alimentation sans contact : | 25 |
| 2.1 Alimentation par couplage par fente : | 25 |
| 2.2 Alimentation par couplage de proximité : | 26 |
| I.3.4.3.4 Réseau d'antennes : | 26 |
| a) Réseaux linéaires uniformes : | 26 |
| b) Réseaux plans : | 28 |
| c) Réseaux circulaires : | 29 |
| Chapitre II | 32 |
| II.2 Outil de simulation : | 33 |
| II.2.1 Définition : | 33 |
| II.2.3 Cahier de charge : | 35 |
| II.3 Conception de l'antenne triangulaire : | 35 |
| II.3.1 longueur de la ligne d'alimentation : | 35 |
| II.3.2 largeur de la ligne d'alimentation : | 36 |
| II.3.3 Longueur du patch : | 36 |
| II.3.4 Longueur du substrat : | 37 |
| II.3.5 Largeur du substrat : | 37 |
| Chapitre III | 53 |

| | |
|---|-----------|
| III.1 Introduction : | 54 |
| III.2 Réseaux d'antennes : | 54 |
| III.2.1 Techniques d'alimentation d'un réseau d'antennes imprimées : | 54 |
| III.2.1.1 Alimentation parallèle : | 55 |
| III.2.1.2 Alimentation en série : | 56 |
| III.3 Diviseur de puissances : | 56 |
| III.3.1 Définition d'un diviseur de puissance : | 56 |
| III.3.2 Les paramètres de la jonction T : | 59 |

Chapitre I

Généralités sur la Technologie 5G

| | |
|--|-----------|
| Liste des figures | VI |
| Liste des tableaux | VIII |
| Liste des abréviations | IX |
| Introduction générale | XI |
| Chapitre I | 4 |
| I.1 Introduction : | 5 |
| I.2 Historique : | 5 |
| I.2.1 La 5^{ème} génération : | 6 |
| I.2.2 Objectif et Principe de la 5G : | 6 |
| I.2.3 Les technologies clés de la 5G : | 7 |
| I.2.3.1 Les ondes millimétriques : | 7 |
| I.2.3.2 Les micros-celles : | 8 |
| I.2.3.3 Beamforming : | 9 |
| I.2.3.4 Full-Duplex : | 9 |
| I.3 Le Massive MIMO : | 9 |
| I.3.1 La technologie MIMO : | 9 |
| I.3.2 Modèle du canal MIMO : | 10 |
| I.3.3 Capacité d'un canal MIMO : | 11 |
| I.3.4 La technologie Massive MIMO : | 12 |
| I.3.4.1 Les avantages des systèmes des Massive MIMO : | 13 |
| I.3.4.2 Types Massive MIMO : | 13 |

| | |
|---|----|
| I.3.4.2.1 SU-MIMO : | 13 |
| I.3.4.2.2 MU-MIMO : | 14 |
| I.3.4.3 Caractéristiques générales des systèmes MIMO Massif : | 14 |
| I.3.4.3.1 Diversité d'un système MIMO Massif : | 14 |
| I.3.4.3.2 L'évolutivité et la préférence du schéma TDD : | 15 |
| I.3.4.3.3 Antennes et propagation : | 16 |
| I.3.4.3.3.1 Caractéristiques des antennes : | 17 |
| a. Diagramme de rayonnement : | 17 |
| b. Le coefficient de réflexion (S_{11}) (adaptation) : | 18 |
| c. Gain : | 19 |
| d. Directivité : | 19 |
| e. Le rendement : | 19 |
| f. L'impédance d'entrée : | 20 |
| g. La bande passante (BP) : | 20 |
| I.3.4.3.3.3 Types des antennes : | 21 |
| 1. Antenne dipolaire (Fig.I.13.a) : | 22 |
| 2. Boucle magnétique | 22 |
| 3. Antenne cornet | 22 |
| 4. Antenne fente | 22 |
| 5. Antenne à réflecteur parabolique | 22 |
| 6. Antennes imprimées (micro-ruban) | 22 |
| 6.1 Mécanisme de radiation : | 23 |
| 6.2 Techniques d'alimentation : | 24 |
| 1) Couplage avec contact : | 24 |
| 1.1 Alimentation par ligne microruban : | 24 |
| 1.2 Alimentation par sonde coaxiale : | 25 |
| 2) Alimentation sans contact : | 25 |
| 2.1 Alimentation par couplage par fente : | 25 |
| 2.2 Alimentation par couplage de proximité : | 26 |
| I.3.4.3.4 Réseau d'antennes : | 26 |
| a) Réseaux linéaires uniformes : | 26 |
| b) Réseaux plans : | 28 |
| c) Réseaux circulaires : | 29 |
| I.3.4.3.4.1 Les avantages et les inconvénients des réseaux d'antennes : | 30 |

| | | |
|---------------------|--|-----------|
| I.4 | Conclusion : | 30 |
| Chapitre II | | 32 |
| II.2 | Outil de simulation : | 33 |
| II.2.1 | Définition : | 33 |
| II.2.3 | Cahier de charge : | 35 |
| II.3 | Conception de l'antenne triangulaire : | 35 |
| II.3.1 | longueur de la ligne d'alimentation : | 35 |
| II.3.2 | largeur de la ligne d'alimentation : | 36 |
| II.3.3 | Longueur du patch : | 36 |
| II.3.4 | Longueur du substrat : | 37 |
| II.3.5 | Largeur du substrat : | 37 |
| II.4 | Simulation de l'antenne : | 38 |
| II.4.1 | Technique d'adaptation: | 39 |
| II.4.1.1 | Adaptation par ligne quart d'onde : | 40 |
| II.4.1.2 | Adaptation par stub : | 40 |
| II.4.1.3 | Adaptation avec encoches : | 41 |
| II.4.2 | Etude paramétrique sur les encoches: | 43 |
| II.4.3 | Optimisation de coefficient de réflexion : | 43 |
| II.4.4 | Elargissement de bande : | 44 |
| II.4.5 | Optimisation de coefficient de réflexion : | 45 |
| II.5 | Discussion et interprétation des résultats : | 46 |
| II.5.1 | Coefficient de réflexion : | 46 |
| II.5.2 | Rapport d'onde stationnaire (VSWR) : | 47 |
| II.5.3 | Le diagramme de rayonnement et le Gain: | 47 |
| II.5.4 | L'impédance d'entrée : | 50 |
| II.5.5 | L'efficacité : | 50 |
| II.5.6 | Densité de courant : | 51 |
| II.6 | Conclusion : | 51 |
| Chapitre III | | 53 |
| III.1 | Introduction : | 54 |
| III.2 | Réseaux d'antennes : | 54 |
| III.2.1 | Techniques d'alimentation d'un réseau d'antennes imprimées : | 54 |
| III.2.1.1 | Alimentation parallèle : | 55 |
| III.2.1.2 | Alimentation en série : | 56 |
| III.3 | Diviseur de puissances : | 56 |

| | |
|---|----|
| III.3.1 Définition d'un diviseur de puissance : | 56 |
| III.3.2 Les paramètres de la jonction T : | 59 |
| III.4 Résultats et discussions : | 59 |
| III.4.1 Structure de réseau d'antenne proposée : | 59 |
| III.4.1.1 Coefficient de réflexion (S_{11}) : | 60 |
| III.4.1.2 L'impédance d'entrée : | 61 |
| III.4.1.3 Le taux d'onde stationnaire (VSWR) : | 61 |
| III.4.1.4 Diagramme de rayonnement : | 62 |
| III.4.1.5 L'efficacité de réseau : | 63 |
| III.4.1.6 Densité de courant : | 64 |
| III.5 Comparaison des résultats : | 65 |
| III.6 Conclusion : | 66 |

Liste des figures

| | |
|---|----|
| Figure I.1: Techniques utilisées dans la technologie 5G. | 7 |
| Figure I.2: Spectres des fréquences (ondes millimétriques). | 8 |
| Figure I.3: Schémas représentatifs du SISO, MISO, SIMO et MIMO. | 10 |
| Figure I.4: Système MIMO. | 11 |
| Figure I.5: Illustration de MIMO massive. | 12 |
| Figure I.6: Contrainte de M et K sur TDD et FDD pour un système MIMO massif. | 16 |
| Figure I.7: Diagramme en coordonnées polaires. | 17 |
| Figure I.8: Diagramme en coordonnées cartésiennes. | 17 |
| Figure I.9: Diagramme de rayonnement d'une antenne directive. | 18 |
| Figure I.10: Mesure de la bande passante à partir du tracé de coefficient de réflexion. | 21 |
| Figure I.13: Types des antennes. | 21 |
| Figure I.14: Structure de base d'une antenne imprimée. | 22 |
| Figure I.15: Différentes formes de l'antenne patch. | 23 |
| Figure I.16: Distribution de charge et de densité de courant. | 23 |
| Figure I.17: Distribution du champ | 24 |
| Figure II.1: Antenne micro-ruban à patch triangulaire. | 36 |
| Figure II.2: L'antenne initiale. | 38 |
| Figure II.3: Le coefficient de réflexion de l'antenne initiale. | 39 |
| Figure II.4: Modélisation de l'antenne quart d'onde. | 39 |
| Figure II.5: adaptation par quart d'onde. | 40 |
| Figure II.6: Modélisation de l'antenne | 40 |
| Figure II.7: Stub en circuit ouvert. | 40 |

| | |
|---|-----------|
| Figure II.8: L'équivalence en circuit..... | 41 |
| Figure II.9: Patch adapté par encoches..... | 41 |
| Figure II.10: Antenne avec deux ces encoches..... | 42 |
| Figure II.11: Le paramètre S11 après l'ajoute des encoches..... | 42 |
| Figure II.12: L'étude paramétrique des encoches..... | 43 |
| Figure II.13: L'étude paramétrique sur le paramètre A..... | 44 |
| Figure II.14: Antenne étoile..... | 44 |
| Figure II.15: Le coefficient de réflexion a 800Mhz..... | 45 |
| Figure II.16: Le paramètre S11 de l'antenne finale..... | 46 |
| Figure II.17: Le coefficient de réflexion S11 en dB..... | 47 |
| Figure II.18: Rapport d'onde stationnaire(VSWR)..... | 47 |
| Figure II.19: Diagramme de rayonnement polaire de l'antenne à la fréquence 28 GHz, (a) Plan E, (b) Plan H..... | 48 |
| Figure II.20: Le diagramme de rayonnement en 3D..... | 49 |
| Figure II.21: L'impédance d'entrée de l'antenne (partie réelle)..... | 50 |
| Figure II.22: L'impédance d'entrée de l'antenne (partie imaginaire)..... | 50 |
| Figure II.23: Densité de courant surfacique du patch..... | 51 |
| Figure III.1: Réseau linéaire avec une alimentation parallèle..... | 55 |
| Figure III.2: Réseau linéaire avec une alimentation en série..... | 56 |
| Figure III.3: Schéma d'un diviseur de puissance..... | 57 |
| Figure III.4: Exemples sur la jonction T [44]..... | 57 |
| Figure III.5: Structure de jonction T d'alimentation..... | 58 |
| Figure III.6: La structure de jonction de la division reliée avec les antennes alimentaires..... | 58 |
| Figure III.7: le réseau d'antenne d'alimentation proposé..... | 59 |
| Figure III.8: S11(dB) en fonction de la fréquence..... | 60 |
| Figure III.9: Le résultat de l'impédance d'entrée..... | 61 |
| Figure III.10: Le VSWR en fonction de la fréquence..... | 61 |
| Figure III.11: Diagramme de rayonnement (directivité) de réseau d'antenne..... | 62 |
| Figure III.12: Diagramme de rayonnement (Gain réalisé) de réseau d'antenne..... | 62 |
| Figure III.13: Diagramme de rayonnement polaire de réseau l'antenne sur le plan H..... | 63 |
| Figure III.14: Diagramme de rayonnement polaire de réseau l'antenne sur le plan E..... | 63 |
| Figure III.15: Distribution de courant de surface du réseau d'antenne proposé..... | 64 |

Liste des tableaux

| | |
|---|-----------|
| Tableau I.1: Comparaisons entre les caractéristiques des générations mobile..... | 5 |
| Tableau II.1: Le cahier charge..... | 35 |
| Tableau III.1: Paramètres de la jonction :..... | 60 |
| Tableau III.2: paramètres du réseau d'antennes du patch..... | 61 |
| Tableau III.3: Paramètres fondamentaux de réseau d'antennes proposé..... | 66 |
| Tableau III.4: Paramètres de comparaison..... | 67 |

Liste des abréviations

BDP : Bagley Power Divider

BP : Bande Passante.

CST (MWS) : Computer Science Technology MICROWAVE STUDIO.

FIT : Finite Integration Technic.

FDD : Frequency-Division Duplex

IoT : Internet des objets.

HF : Hautes Fréquences.

GPD : Gysel Power Divider.

1G : première génération.

2G : deuxième génération.

3G : troisième génération.

4G : quatrième génération.

5G : cinquième génération.

3GPP : 3rd Group Partnership Project.

LTE : Long Term Evolution.

Massive-MIMO : Massive- Multiple Input Multiple Output.

MIMO : Multiple Input Multiple Output.

MISO : Multiple Input Single Output

MU-MIMO : Multi User-Multiple Input Multiple Output.

MWS : Microwave Studio.

PBA : Perfect Border Approximation.

RF : Radio Frequency.

SB : Station de Base.

SIMO : Single Input Multiple Output

SISO : Single Input Single Output

SU-MIMO : Single User – Multiple Input Multiple Output.

S11: Coefficient of réflexion.

TDD : Time-Division Duplexing.

TST : technique Tôle mince

UT : User Terminal.

VSWR: The Voltage Standing Wave Ratio.

Wi-Fi : Wireless Fidelity.

WPD : Wilkinson Power Divider .

Introduction générale

Introduction générale

La nouvelle génération de télécommunication mobile connue sous l'acronyme de cinquième génération (5G) est une technologie évolutive qui prend en charge de nouvelles fonctionnalités et répond aux besoins et aux enjeux de demain, permettant aux réseaux mobiles de faire d'énormes progrès en matière de débit, de réactivité et d'adaptabilité aux usages.

Bien que le but de la 5G ce n'est pas seulement de répondre aux déficits liés à l'augmentation de débit ou à la bande passante, mais de réduire la consommation énergétique avec un service de qualité omniprésent et d'obtenir un temps de latence ultra-court. Face à ces exigences, la cinquième génération devra combiner plusieurs technologies afin d'avoir un réseau mobile qui pourra satisfaire aux attentes. Parmi ces technologies nous pouvons citer : l'utilisation des bandes millimétriques en exploitant les fréquences au-dessus de 6GHz qui devient plus que jamais indispensable pour la 5G et facilitera l'intégration de centaines d'éléments rayonnants au niveau de la station de base grâce à leurs faibles longueurs d'ondes. Ainsi, la technologie du Massive MIMO n'est rien d'autre qu'une densification du traditionnel MIMO (Multiple Input Multiple Output) utilisé dans les générations précédentes. Cette technique est une approche pour augmenter la capacité du canal et pour fournir des gains élevés de multiplexage et de diversité dans les directions de liaison montante et de liaison descendante. Ces performances vont dépendre fortement du nombre d'antennes dans la station de base par rapport aux nombres d'utilisateurs.

En plus, c'est grâce au MIMO Massif que les antennes pourront également gérer un grand nombre de connections en même temps, sans saturation. Un avantage crucial pour l'internet des objets, la voiture autonome ou les robots de chirurgie à distance. Enfin, ces antennes réduiront le temps de latence, c'est-à-dire le délai de transmission d'une information.

Le travail mené dans le cadre de ce mémoire s'inscrit dans ce contexte. Donc, notre objectif consiste à concevoir et simulé un petit réseau d'antennes travaillant dans les bandes de fréquences millimétriques des 28GHz pour une application 5G coté station de base (BTS). Pour ce faire, nous nous basons sur la théorie des antennes afin de déterminer les paramètres géométriques de notre antenne proposée et nous utilisons le logiciel CST MICROWAVE STUDIO (Computer Science Technology) comme outil de simulation pour notre travail.

Ce manuscrit est structuré comme suit :

Le chapitre I expose des généralités sur la 5G et ses technologies clé comme le Massif MIMO. La deuxième partie de ce chapitre, présente une vue d'ensemble sur les antennes imprimées et leurs caractéristiques et décrit brièvement les principes des réseaux d'antennes.

Le deuxième chapitre commence par une simple description du logiciel CST MICROWAVE STUDIO (Computer Science Technology) utilisé dans notre travail, suivi par une présentation des différents modules à réaliser ainsi que la définition du cahier de charge pour l'élaboration de notre étude. La dernière partie de ce chapitre, a pour but de concevoir et simulé une antenne imprimée étoile alimentée par une ligne micro-ruban qui résonne à la fréquence de 28 GHz pour une application de 5G. Nous présentons aussi, dans cette partie, les résultats de simulations en termes de coefficient de réflexion, de diagramme de rayonnement et de gain à fin d'évaluer les performances de l'antenne proposée.

Dans le chapitre trois nous présenterons en premier lieu les techniques d'alimentation d'un réseau d'antennes imprimées, et nous exposant une petite partie sur les diviseurs de puissance tout en justifiant le choix de la méthode utilisée dans notre travail. La dernière partie expose la mise en place et la conception d'un réseau d'antenne de quatre éléments pour la station de base à partir de l'antenne étoile proposée dans le deuxième chapitre. Enfin, une comparaison avec un article de recherche est réalisée afin d'évaluer les performances du réseau d'antenne proposé lors de ce mémoire.

Nous clôturons ce mémoire par une conclusion générale.

Chapitre I

Généralités sur la Technologie 5G

I.1 Introduction :

La 5G est une nouvelle fondation technologique développée dans le but de soutenir les demandes croissantes des clients en termes de rapidité, de diversité et de facilité. Comme elle devrait permettre notamment d'augmenter les débits et la capacité des réseaux grâce au système MIMO massive. Dans ce premier chapitre, nous allons présenter un large aperçu sur les récentes évolutions de la 5^{ème} génération. Nous nous intéressons par la suite aux antennes et leurs caractéristiques. Enfin, la dernière partie de ce chapitre sera consacré aux réseaux d'antennes, et nous terminons par une conclusion.

I.2 Historique :

Les technologies de communication mobile [1] sont prises en charge par des organisations de développement des standards à l'échelle globale comme le 3GPP (3rd Group Partnership Project), ils sont souvent divisés en générations. Ainsi, la (1G) est le système mobile analogique des années 1980s du siècle dernier. La (2G) est le premier système mobile numérique et la 3G le premier des systèmes pouvant supporter des données à haut débit (Broadband data). L'évolution à long terme ou la LTE (Long Term Evolution) souvent appelée "4G", est la LTE-Advanced est l'étape de l'évolution réelle vers la 4^{ème} génération, avec la première version de la LTE : version (release) 8 comme étant la "3.9G".

D'après le tableau I.1, nous voyons un écart de 10 ans entre les principales générations des technologies de communication sans fil. Le tableau I.1 décrit aussi les caractéristiques spécifiques des cinq générations.

| | 1G | 2G | 3G | 4G | 5G |
|-------------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Date approximation de déploiement | Années 1980 | Années 1990 | Années 2000 | Années 2010 | Années 2020 |
| Vitesse de téléchargement théorique | 2 kbit/s | 384 kbit/s | 56 Mbit/s | 1 Gbit/s | 10 Gbit/s |
| Temps de latence | Sans objet | 629 ms | 212 ms | 60-98 ms | <1 ms |

Tableau I.1: Comparaisons entre les caractéristiques des générations mobile.

I.2.1 La 5^{ème} génération :

La «5G» [2] est une nouvelle génération de technologie de télécommunications sans fil, qui fait suite aux précédentes générations de la téléphonie mobile. Elle promet de révolutionner la façon dont le monde communique. Cette cinquième génération (5G) vise à augmenter la vitesse et la réactivité des réseaux sans fil. Avec elle, la transmission des données sur connexions haut débit sans fil pourrait atteindre, selon certaines estimations, une vitesse de 20Gbit/s, supérieure à celle des réseaux filaires, et une latence égale ou inférieure à 1ms pour les usages à boucle de retour en temps réel. La 5G, avec l'avantage de bande passante et sa technologie d'antenne avancée, ouvre aussi la voie à la croissance exponentielle des données transmises sur les systèmes sans fil.

I.2.2 Objectif et Principe de la 5G :

La 5G permet des connexions et des téléchargements plus rapides que les autres générations et intègre toute une série de nouveaux usages, en se concentrant sur l'internet des objets la 5G vise donc à :

- Assurer un accès internet haut débit depuis un smart phone ou tablette.
- Atteindre les meilleurs débits (1 Gb par seconde).
- Avoir de plus gros forfaits data : le volume de données devra être 1000 fois plus élevé.
- Obtenir un délai de transmission inférieur à 10 ms.
- Avoir un temps de « latence » plus court qui donne l'impression que le réseau est très réactif.
- Avoir Moins d'antennes : le nombre de terminaux pouvant être connectés par antenne devra être 100 fois supérieur, mais le nombre d'antennes dépend surtout des fréquences utilisées.

Comme principe [3], la 5G conduira à une meilleure utilisation du spectre électromagnétique avec l'exploitation de plusieurs bandes de fréquences dont celles des ondes millimétriques, entre 24 et 300 GHz, mais aussi les bandes comprises entre 3 et 30 GHz qui ne sont pas exploitées dans la 4G. Elles apportent un très haut débit sur une courte portée, associé à la densification du réseau et à des antennes directives MU-MIMO et Massive-MIMO.

I.2.3 Les technologies clés de la 5G :

La 5G reprend les technologies déjà utilisées avec la 4G LTE (tel que les bandes de fréquence de la 4G), mais se différencie sur plusieurs points très importants. Elle fait également appel à de nouvelles bandes de fréquences comme les ondes millimétriques permettant d'augmenter sensiblement le débit au détriment de la portée. En plus de cela, la 5G propose de nouvelles technologies nous citons l'utilisation du MIMO Massif. Dans ce qui suit nous décrivons brièvement les principes de ces nouvelles technologies.



Figure I.1: Techniques utilisées dans la technologie 5G.

I.2.3.1 Les ondes millimétriques :

Les ondes millimétriques [4] sont les ondes radioélectriques couvrant les fréquences de 30 à 300 GHz (Figure I.2). Nos appareils électroniques communiquent sur une bande de fréquences spécifiques actuellement au-dessous des 6GHz, mais cette bande de fréquence est très encombré, plus il y'a des objets connectés plus ce service se dégrade. Dans une commande à distance et pour traiter un plus grand volume de données, il nous faut travailler avec de plus hautes fréquences est un plus large spectre. D'une part, les hautes fréquences permettent de passer plus d'information par seconde, d'autre part l'augmentation du spectre permet d'augmenter le nombre de canaux de transmission. Ces deux améliorations permettent de désencombrer le réseau. Cependant, les ondes millimétriques présentent la contrainte de pénétration, où elles traversent les obstacles difficilement, elles sont à plus courte portée et ont tendance à être absorbé par les arbres ou la pluie. Pour résoudre ces problèmes, nous avons besoin d'une deuxième technologie, un réseau de petites antennes [4].

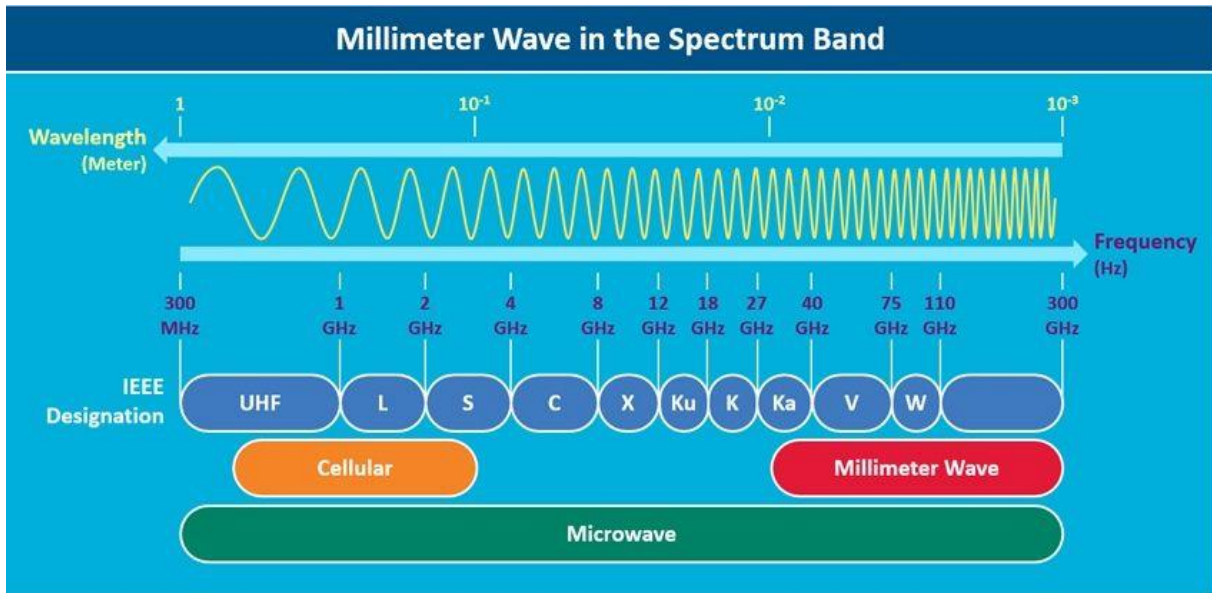


Figure I.2: Spectres des fréquences (ondes millimétriques).

I.2.3.2 Les micros-celles :

De nos jours, un réseau hétérogène est souvent associé aux cellules dites Small cells [5]. Une telle cellule a la particularité de posséder un rayon de couverture réduit et d'offrir ainsi un débit élevé à ses utilisateurs, découlant directement du fait que moins de terminaux se partagent la ressource temps/fréquence. Elle peut alors aisément être complémentaire d'une cellule à plus large couverture, mais au débit moindre (Macro-cell). On parle d'ailleurs d'offloading des données lorsque la transmission d'information est attribuée à la small cell au lieu de la macro cell. La densification des réseaux avec ces small cells rentre pleinement dans les problématiques 5G, tant pour améliorer l'efficacité énergétique (grâce au simple fait de diminuer la taille des cellules) que pour supporter les futurs besoins en débit [5].

Une telle densification va également nécessiter un backhaul 5 pouvant supporter ces forts débits. L'utilisation du MIMO Massif comme backhaul sans fil (en anglais Wireless Backhaul) est une solution attrayante. Ainsi, à terme, la Station de Base (SB) de la macro cell pourra ne consacrer son activité qu'au signaling et au backhaul avec le transfert de données effectué par les small cells [5].

I.2.3.3 Beamforming :

Le Beamforming [6] est la possibilité d'adapter le diagramme de rayonnement du réseau d'antennes selon un certain modèle. Cette technologie consiste à focaliser les ondes en direction de chaque objet spécifique. Cette précision réduit les interférences et augmente l'efficacité du signal et donc consomme moins d'énergie, en même temps économise de la bande passante et de l'énergie. La fréquence de chaque faisceau s'adaptera aux besoins des applications.

I.2.3.4 Full-Duplex :

Le Full duplex [7] caractérise une connexion série où réseau qui permet la réception et l'émission de données simultanément.

Le mode full-duplex a fait l'objet de tests lors de la première phase des essais de la 5G. D'après les premiers tests, ce mode permet la transmission et la réception simultanées des données au niveau de la station de base, avec trois niveaux de technologie en cascade, à savoir l'annulation analogique passive, les tests ont prouvé que le Full-Duplex permet d'optimiser l'annulation des auto-interférences de plus de 113 dB en situation réelle, ce qui assure une augmentation de 90 % du débit du système.

Cette technologie est connue sous le nom de duplex intégral et pourrait doubler la capacité des réseaux sans fil à leur couche physique la plus fondamentale : imaginez deux personnes parlant en même temps, mais toujours capables de se comprendre, ce qui signifie que leur conversation pourrait prendre la moitié du temps et leur prochaine discussion pourrait commencer plus tôt.

I.3 Le Massive MIMO :

I.3.1 La technologie MIMO :

Les techniques MIMO, acronyme de Multiple Input Multiple Output, sont apparus dans les années 90 grâce à Gerard. J. Foschini [8]. Le but étant d'augmenter le débit et la portée des réseaux sans fil, elles se basent sur l'utilisation de plusieurs antennes aussi bien du côté de l'émetteur que celui du récepteur. Dans les systèmes multi antennes, la capacité augmente linéairement avec le nombre d'antennes émettrices. Ces systèmes possèdent un avantage en plus car ils résistent aux évanouissements et aux interférences. Les systèmes MIMO sont considérés comme une technologie capable de résoudre les problèmes d'encombrement et de limitation de capacité des réseaux sans fil large bande. Lorsqu'un système MIMO comprend,

seulement, une seule antenne à l'émission et plusieurs antennes à la réception, il est nommé SIMO (Single Input Multiple Output). De même, lorsqu'il comprend plusieurs antennes à la réception et une seule antenne à l'émission, il est nommé MISO (Multiple Input Single Output). Finalement, si les deux côtés comptent une antenne chacun, le système est dit SISO (Single Input Single Output) [9].

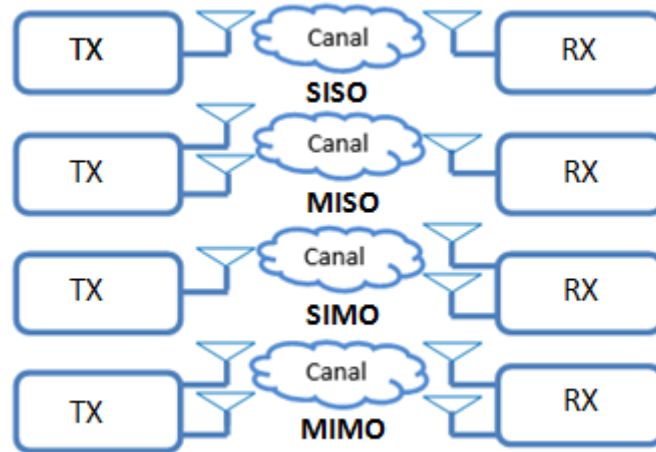


Figure I.3: Schémas représentatifs du SISO, MISO, SIMO et MIMO.

I.3.2 Modèle du canal MIMO :

Considérons un système MIMO (Figure I.4) composé de N_T antennes à l'émission et N_R antennes à la réception. L'information est émise par les N_T antennes à la fois. Lors de sa propagation, elle est portée par plusieurs canaux reliant chacun une antenne d'émission à une autre en réception. A la réception on détecte un signal $y(t) \in \mathcal{C}^{N_R \times 1}$ qui s'écrit :

$$y(t) = Hx(t) + b(t) \quad (I.1)$$

Avec $H \in \mathcal{C}^{N_R \times N_T}$ la matrice du canal, $x(t) \in \mathcal{C}^{N_T \times 1}$ le signal émis et, $b(t) \in \mathcal{C}^{N_R \times 1}$ un bruit additif gaussien [10].

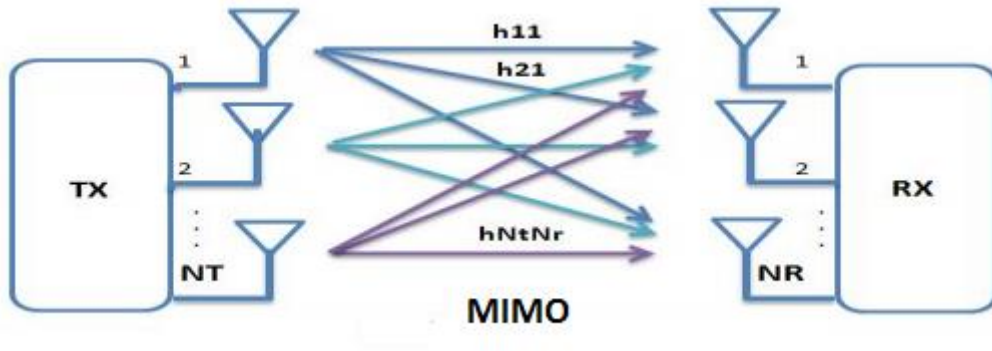


Figure I.4: Système MIMO.

$$x(t) = [x_1(t)x_2(t) \dots x_{N_T}(t)] \quad (I.2)$$

$$y(t)=[y_1(t)y_2(t) \dots y_{N_R}(t)] \quad (I.3)$$

Avec $x_i(t)$ et $y_j(t)$ représentent, respectivement, le signal relatif à la $i^{\text{ème}}$ antenne d'émission et celui relatif à la $j^{\text{ème}}$ antenne de réception.

$$H = \begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} & \dots & H_{1N_T} \\ H_{21} & H_{22} & \dots & H_{2N_T} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ H_{N_R1} & H_{N_R2} & \dots & H_{N_RN_T} \end{bmatrix} \quad (I.4)$$

Avec H_{ij} le coefficient complexe du canal entre la $i^{\text{ème}}$ antenne d'émission et la $j^{\text{ème}}$ antenne de réception. En fonction de l'environnement de propagation, de l'espacement entre les antennes ou même de leurs polarisations, ces coefficients peuvent être plus ou moins corrélés entre eux.

I.3.3 Capacité d'un canal MIMO :

La capacité du canal, notion introduite dans les années 40, mesure la quantité d'information maximum par unité de temps et par bande de fréquence pouvant être transmise à travers un canal particulier [11].

La capacité des systèmes MIMO est un sujet d'actualité dans la littérature, la puissance totale moyenne émise P reste constante. Lorsque le nombre d'antennes varie à l'émetteur, alors

la puissance est répartie entre les N_t antennes de façon à ce que leur somme reste égale à P . Si aucune connaissance du canal n'est disponible à l'émetteur, la répartition de puissance uniforme est optimale en termes de capacité (chaque antenne émet une puissance p/N_t).

Le calcul de la capacité dépend principalement de deux paramètres, le modèle du canal MIMO et la distribution des puissances entre les antennes émettrices.

$$C = \log_2 \left(\det \left[I_{N_r} + \frac{p}{N_t} \cdot H \cdot H^* \right] \right) \quad \text{bps/Hz} \quad (\text{I.5})$$

Où I_{N_r} présente la matrice unité et H présente la matrice du canal MIMO de taille $N_T \times N_R$.

I.3.4 La technologie Massive MIMO :

Le Massive MIMO (Multiple Inputs - Multiple Outputs) est une technologie sans fil, qui utilise la technologie de communication multiutilisateur. 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 [12]. Par conséquent, le massive MIMO est l'une des technologies clés pour la prochaine génération des réseaux sans-fil (5G).

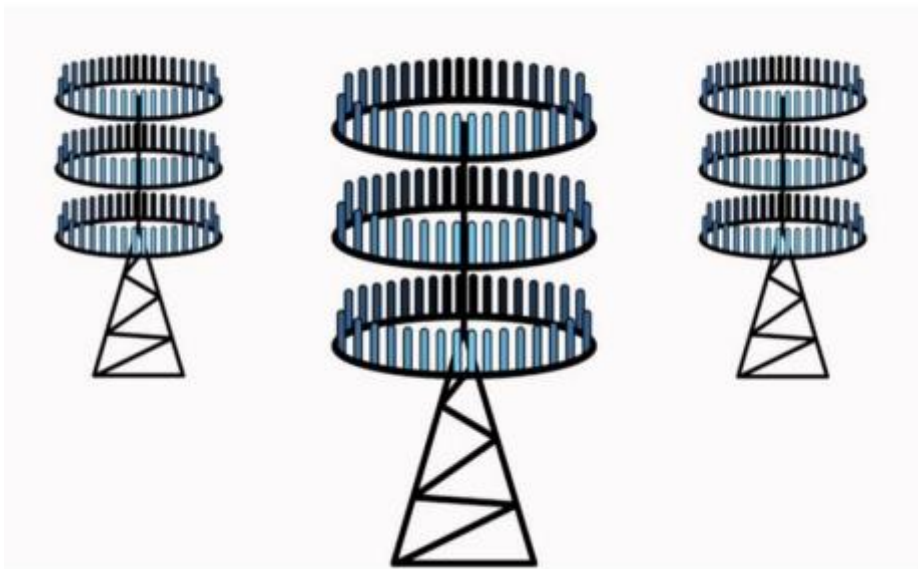


Figure I.5: Illustration de MIMO massive.

Son principe consiste à multiplier le nombre de canaux entre l'antenne et les objets connectés, les futures antennes 5G pourront gérer plusieurs centaines de canaux, pour connecter des milliers d'objets. La multiplication de ces signaux dans toutes les directions peut générer des interférences gênantes que la 4^{ème} génération. Ainsi, cette technologie se caractérise par l'utilisation d'un nombre élevé de micro antennes « intelligentes », situées sur le même panneau (de 8 à 128 actuellement, mais le nombre augmentera avec l'utilisation de fréquences supérieures à 30 GHz, mmWave). L'attrait de l'utilisation du massive MIMO est double : d'une part, cette technologie permet d'augmenter les débits, grâce au multiplexage spatiotemporel ; d'autre part, elle permet de focaliser l'énergie sur un terminal, pour améliorer son bilan de liaison, grâce à la formation de faisceau, ou beamforming. Le Massive MIMO augmente aussi le nombre d'antennes d'émission (des dizaines ou plus de 100 éléments) sur une station de base (Figure I.5).

I.3.4.1 Les avantages des systèmes des Massive MIMO :

Les principaux avantages des systèmes Massive MIMO peuvent être résumés comme suite [13] :

- ✓ Gain d'efficacité spectrale élevé.
- ✓ Gain d'efficacité énergétique élevé.
- ✓ Traitement simple.
- ✓ Augmentation du débit de données.
- ✓ Augmentation du rapport signal sur bruit de liaison de base.

I.3.4.2 Types Massive MIMO :

I.3.4.2.1 SU-MIMO : ou (Single User – Multiple Input Multiple Output)

La SU-MIMO est une technologie radio qui correspond à augmenter les capacités (principalement en débit) entre un émetteur et un récepteur en introduisant plusieurs antennes de chaque côté. Ces multiples antennes permettent, via des algorithmes de décalage temporel et via l'usage des rebonds naturels des ondes radios sur les obstacles (multipath), de créer ce qu'on appelle des flux spatiaux entre l'émetteur et le récepteur. Chacun de ces flux spatiaux permet de transférer des données de manière indépendante et dans le même laps de temps. Comme l'indique son nom, cette technique permet uniquement de focaliser la communication des antennes vers un seul récepteur à la fois depuis un seul émetteur [14].

I.3.4.2.2 MU-MIMO : ou (Multi User – Multiple Input Multiple Output)

Cette technologie nécessite de plus gros calculs algorithmiques pour une raison évoquée plus tard dans ce paragraphe, elle implique donc une asymétrie : l'infrastructure peut communiquer avec plusieurs clients simultanément, sans oublier qu'une antenne rayonne entièrement son champ et pas seulement vers le client qui l'intéresse. Dans ce mode de communication ou plusieurs clients doivent recevoir des données sur le même laps de temps, il a donc été introduit dans différents protocoles de communication (4G, 802.11ac wave 2, bientôt 5G) un mécanisme qui permet à l'infrastructure de déterminer à quelle « position » se trouve le client dans la cellule. Cette information est soit échangée explicitement avec le client, soit le client réalise lui-même une estimation dite « à l'aveugle » en fonction des données envoyées par l'infrastructure et renvoie ainsi ces informations. En effet, en désynchronisant légèrement les émissions de données des antennes, il est possible d'augmenter la puissance de réception du signal dans une zone spécifique par « ajout » des amplitudes (résonance) [14].

I.3.4.3 Caractéristiques générales des systèmes MIMO Massif :

I.3.4.3.1 Diversité d'un système MIMO Massif :

La principale source des perturbations que subit un signal lors de sa propagation est le canal. En effet, à cause des phénomènes de propagation multi-trajets, le signal subit des évanouissements, des décalages fréquentiels ou même temporels. Contrairement aux systèmes classiques, les systèmes à diversité prennent avantage de ces types de propagation pour améliorer les performances du système. Pour mettre en place ces améliorations, les systèmes MIMO Massif exploitent les techniques de [15]:

- **Diversité temporelle :** Lorsque l'on sépare l'envoi du même signal par le temps cohérence du canal, il est possible de profiter de la diversité temporelle. Tout dépend également de la vitesse de déplacement du mobile et de la fréquence porteuse [15].
- **Diversité spatiale :** La diversité spatiale peut être exploitée lorsqu'un signal est émis de plusieurs points distincts de l'espace.

Restriction : La distance (d) entre chaque antenne d'un même réseau d'antennes doit être d'au moins une demi longueur d'onde pour que la diversité puisse être exploitée

(antennes suffisamment décorrélées). Le couplage entre les antennes va également dégrader les performances [16].

$$d > \frac{\lambda}{2} \quad (I.6)$$

- **Diversité spatio-temporelle** : La diversité spatio-temporelle est un exemple de combinaison de techniques de diversité. En effet, dans cette technique en envoi des versions de signal différées dans le temps via plusieurs antennes transmetteurs. Ainsi, on atteint un niveau de diversité plus aisé [17].
- **Le multiplexage spatial** : Le principe du multiplexage spatial est l'agencement sans redondance de la séquence d'information suivant l'axe spatial. Le système transmet alors N_t fois plus de symboles utiles par unité de temps qu'un système SISO. Un tel système a été proposé par Foschini en 1996, l'architecture de premier système MIMO, est appelée D-BLAST [18].

I.3.4.3.2 L'évolutivité et la préférence du schéma TDD :

1. L'évolutivité :

La station de base apprend les canaux via un apprentissage de liaison montante, avec opération TDD [15]. Le temps requis pour l'estimation du canal est indépendant du nombre d'antennes BS. Par conséquent, la large gamme d'antennes BS peut être aussi large que souhaiter sans extension de la surcharge d'estimation de canal. De plus, le traitement du signal à chaque UT (User Terminal) est essentiel et ne dépend pas de l'existence d'autres UT, le traitement du signal par démultiplexage est effectué au niveau des UT. L'ajout ou la perte de certains UT du service n'a plus d'incidence sur les autres activités UT.

2. La préférence du schéma TDD en MIMO Massif :

En mode FDD [15], l'estimation de canal repose sur le nombre d'antennes BS M . Par contre, en mode TDD, le temps d'estimation de canal est non biaisé de M . Dans Massive MIMO, M est grande, et par conséquent, le fonctionnement TDD est préférable. Par exemple, supposons que l'intervalle de cohérence soit $T = 200$ symboles (correspondant à un temps de cohérence de 1 ms et à une largeur de bande de cohérence de 200 kHz). Ensuite, dans les systèmes FDD, la quantité d'antennes BS et la quantité d'UT sont limitées par $M + K < 200$, tandis que dans les

systèmes TDD, la contrainte sur M et K est $2K < 200$. On peut voir sur la Figure I.6 que la place FDD est beaucoup plus petite que la région TDD. Avec TDD, l'ajout d'antennes supplémentaires n'affecte plus les sources nécessaires à l'acquisition du canal.

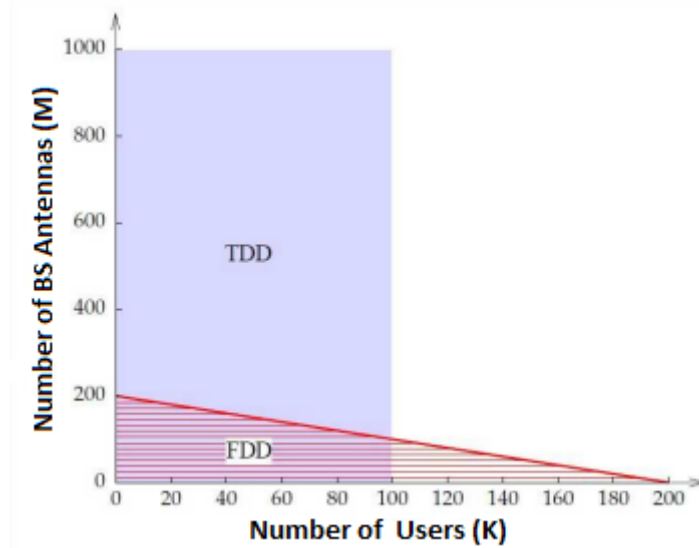


Figure I.6: Contrainte de M et K sur TDD et FDD pour un système MIMO massif.

I.3.4.3.3 Antennes et propagation :

Une antenne [19] est un dispositif qui permet de transformer l'énergie électrique en énergie électromagnétique en émission et vis versa en réception afin d'assurer la transmission de l'information. On peut le qualifier comme un adaptateur d'impédance entre l'espace et l'émetteur ou le récepteur.

Les systèmes existants des radiocommunications sont équipés par des antennes classiques (omnidirectionnelles, sectorielles) dont les diagrammes de rayonnement sont déterminés d'une telle manière que la couverture soit optimale. En tant que ces diagrammes sont fixes donc ils ne peuvent pas s'adapter aux phénomènes rencontrés lors de la propagation. Pour résoudre ce problème, un concept des antennes intelligentes est apparu, il est basé sur les réseaux d'antennes (linéaires, planaires, circulaires...) qui offrent la combinaison dynamique entre les différents signaux et l'optimisation des bilans de liaison ; plus la possibilité de les orienter vers des directions privilégiées selon la direction de mouvement du mobile pendant la communication pour but de limiter les interférences avec les signaux voisins.

I.3.4.3.1 Caractéristiques des antennes :

a. Diagramme de rayonnement :

La représentation graphique de la fonction caractéristique de l'antenne porte le nom de « diagramme de rayonnement ». C'est la représentation du rayonnement en 2D ou 3D de la puissance, du gain ou du champ électrique rayonné.

Il est donné par la relation suivante : $r(\theta, \varphi) = \frac{P(\theta, \varphi)}{P_0(\theta_0, \varphi_0)}$ (I.7)

Avec :

- ❖ $P(\theta, \varphi)$: Puissance rayonnée dans une direction quelconque.
- ❖ $P_0(\theta_0, \varphi_0)$: Puissance rayonnée max.

En général, le diagramme de rayonnement est relevé dans deux plans qui sont : le plan E (plan vertical) et le plan H (plan horizontal) ceux sont respectivement les plans pour lesquels les champs électriques et magnétiques atteignent leurs valeurs maximales [20]. C'est un diagramme qui représente les variations de la puissance que rayonne l'antenne par unité d'angle solide dans les différentes directions de l'espace. En réalité, l'énergie rayonnée est répartie inégalement dans l'espace certaines directions sont privilégiées, ce sont les lobes de rayonnement.

Différents types de représentation des diagrammes sont utilisées :

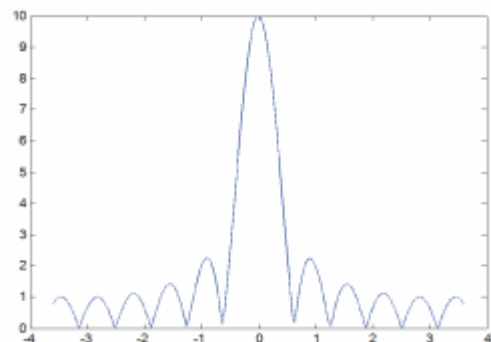
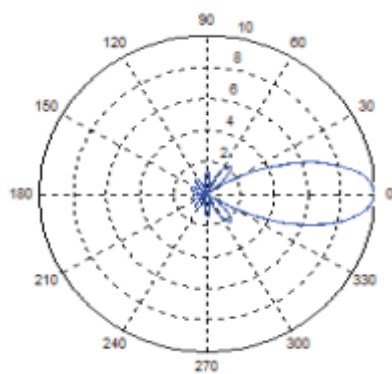


Figure I.7: Diagramme en coordonnées polaires. Figure I.8: Diagramme en coordonnées cartésiennes.

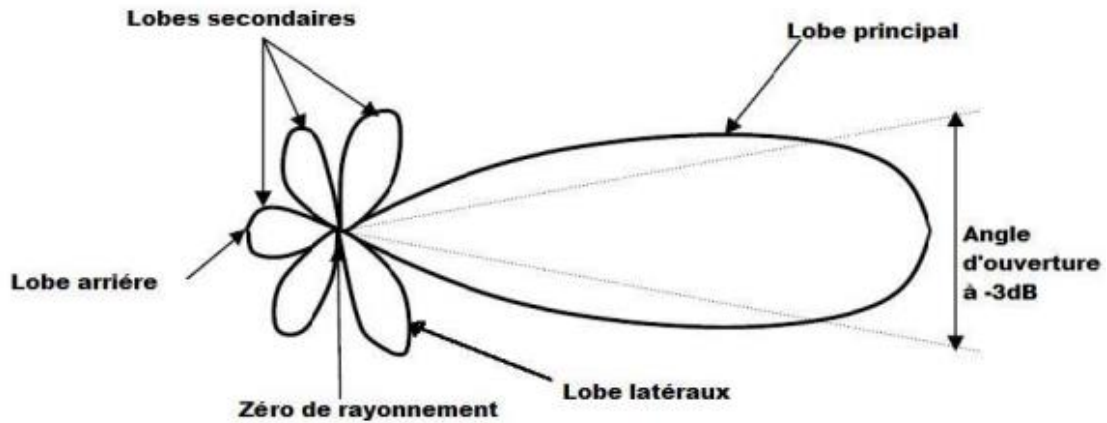


Figure I.9: Diagramme de rayonnement d'une antenne directive.

Un type plus pratique est l'antenne directionnelle qui rayonne plus de puissance dans certaines directions et moins de puissance dans d'autres directions. Le diagramme de rayonnement de l'antenne directive est représenté dans la « Figure I.9».

En général, la puissance est concentrée dans un ou plusieurs lobes sont :

- **Un lobe principal** : C'est le lobe de rayonnement contenant le maximum d'énergie et la direction du maximum de rayonnement.
- **Un angle d'ouverture** : C'est l'angle de direction pour lequel la puissance rayonnée est la moitié de la puissance rayonnée dans la direction la plus favorable. Plus cet angle est étroit plus l'antenne est directive.
- **Des lobes secondaires** : Ils représentent le rayonnement de l'antenne dans les directions indésirables.
- **Un lobe arrière** : C'est le lobe secondaire présent dans la direction opposé à 180° du lobe principal.

b. Le coefficient de réflexion (S_{11}) (adaptation) :

D'une manière générale, lorsqu'une onde incidente change de milieu de propagation ou rencontre une nouvelle interface, une partie de cette onde incidente est réfléchiée et l'autre partie est transmise dans le nouveau milieu. Le coefficient de réflexion [21] d'une antenne se définit comme étant le rapport des amplitudes des ondes incidentes sur les ondes réfléchiées. Pour une antenne d'impédance Z , reliée à la source par une ligne d'impédance caractéristique Z_s (souvent égale à 50Ω), le coefficient de réflexion peut être défini comme suite :

$$S_{11} = \frac{(Z_e(f) - Z_0)}{(Z_e(f) + Z_0)} \quad (I.8)$$

Avec :

- ❖ z_e : est l'impédance d'entrée de l'antenne.
- ❖ z_0 : est l'impédance caractéristique (Généralement égale à 50Ω).

Le module du coefficient de réflexion est souvent exprimé en décibel (dB) et est noté $|S_{11}|$ et se définit comme suit :

$$|S_{11}|_{dB} = 20 \log |S_{11}| \quad (I.9)$$

Le coefficient de réflexion permet de connaître la qualité d'adaptation d'une antenne. En effet, plus son module tend vers l'infini, plus l'antenne est adaptée. Souvent, la fréquence de résonance d'une antenne est celle où le coefficient de réflexion est minimal.

c. Gain :

Le gain $G(\theta, \phi)$ [22] d'une antenne dans une direction (θ, ϕ) est le rapport entre la puissance rayonnée dans une direction donnée $P(\theta, \phi)$ sur la puissance que rayonne la source isotrope par unité d'angle solide. Il est exprimé en dB et présenté par l'équation [22] :

$$G(\theta, \phi) = \frac{P(\theta, \phi)}{(P_a/4\pi)} \quad (I.10)$$

Avec :

- ❖ $P(\theta, \phi)$: Puissance rayonnée dans une direction.
- ❖ P_a : Puissance rayonnée par l'antenne.

d. Directivité :

La directivité d'une antenne caractérise la manière dont cette antenne concentre son rayonnement dans certaines directions de l'espace. La directivité est définie comme : le rapport de l'intensité de rayonnement dans une direction de l'antenne par rapport à l'intensité de puissance que rayonnerait la source isotrope. Elle est donnée par la relation suivante [23] :

$$D(\theta, \phi) = \frac{P(\theta, \phi)}{P(\theta, \phi)_{iso}} = \frac{P(\theta, \phi)}{(P_r/4\pi)} \quad (I.11)$$

Avec :

- ❖ $P(\theta, \phi)$: La Puissance rayonnée par unité d'angle solide (θ, ϕ) .
- ❖ P_r : est la puissance totale rayonnée.

Une antenne qui a un lobe principal étroit à une meilleure directivité qui est large.

e. Le rendement :

Le rendement est le rapport entre l'énergie rayonnée par une antenne et celle qui lui fournit l'alimentation. Il est exprimé par [24] :

$$\eta = \frac{R_r}{(R_r + R_p)} \quad (I.12)$$

Avec :

- ❖ R_r : Résistance liée à son rayonnement.
- ❖ R_p : Résistance liée aux pertes de l'antenne.

Il est aussi exprimé par :

$$\eta = \frac{P_r}{P_a} \quad (\text{I.13})$$

Avec :

- ❖ P_r : Puissance totale rayonné.
- ❖ P_a : Puissance d'alimentation de l'antenne.

f. L'impédance d'entrée :

L'impédance d'entrée est définie comme étant l'impédance présentée par une antenne à ses bornes ; elle est égale au rapport de la tension V_e sur le courant I_e [25].

$$Z_e = \frac{V_e}{I_e} = R + jX \quad (\text{I.14})$$

Où :

Z =impédance d'entrée aux bornes a et b.

R = résistance de l'antenne aux bornes a et b.

X = réactance de l'antenne aux bornes a et b.

g. La bande passante (BP) :

La bande passante d'une antenne peut être définie comme étant la gamme des fréquences utile, en laquelle l'antenne possède des capacités optimales pour émettre ou recevoir l'énergie électromagnétique correspondante dans l'espace environnement.

La valeur des limites sur les critères de fonctionnement de l'antenne définit un domaine de fréquences situées entre une valeur minimale f_{\min} et une valeur maximale f_{\max} . La bande passante est donnée par I.15, ainsi la bande relative peut être exprimée comme donnée par l'équation I.16 [26] :

$$BP = f_{\max} - f_{\min} \quad (\text{I.15})$$

$$BP(\%) = \left[\frac{f_{\max} - f_{\min}}{f_c} \right] \times 100 \quad (\text{I.16})$$

Avec f_c est la fréquence centrale ou de résonance.

Une méthode pour mesurer la bande passante d'une antenne est représentée sur la Figure I.10.

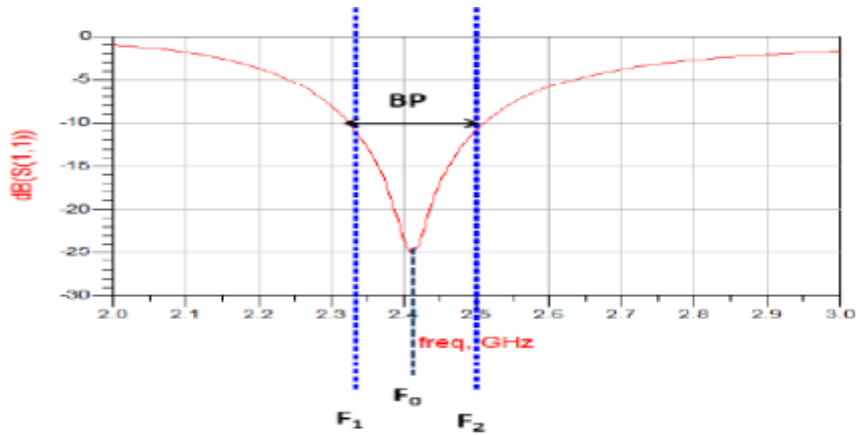


Figure I.10: Mesure de la bande passante à partir du tracé de coefficient de réflexion.

I.3.4.3.3 Types des antennes :

Une antenne peut émettre dans toutes les directions (antenne omnidirectionnelle) ou dans une seule direction définie (antenne directionnelle), et dans ces deux catégories les types d'antennes sont multiples et diversifiées mais peuvent être regroupées en famille comme suite [29] :

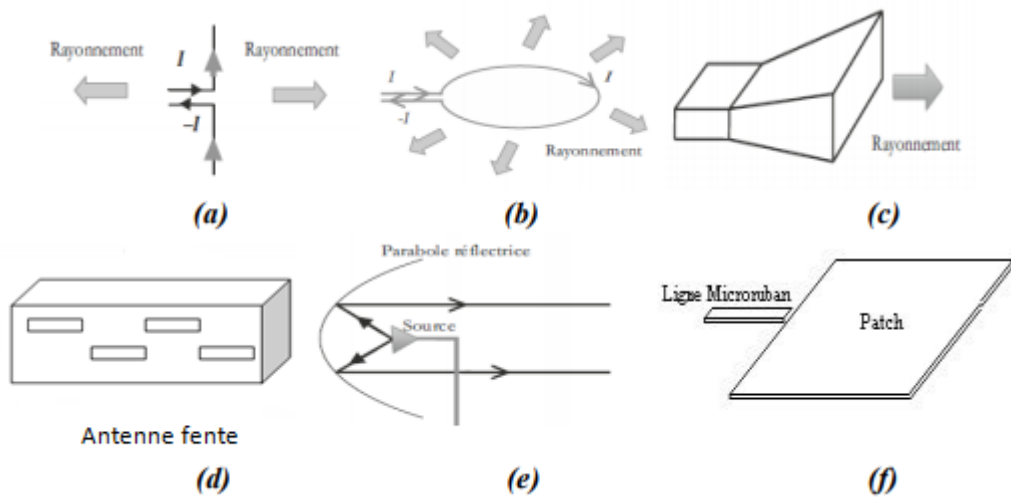


Figure I.11: Types des antennes.

1. **Antenne dipolaire (Fig.I.13.a)** : elle est constituée de deux fils alignés alimentés par une ligne bifilaire, elle est souvent utilisée aux basses fréquences.
2. **Boucle magnétique (Fig.I.13.b)** : elle est constituée d'un conducteur circulaire alimenté par un générateur à travers une ligne bifilaire.
3. **Antenne cornet (Fig.I.13.c)** : c'est un guide d'onde rectangulaire dont la section est variable ce qui permet de passer graduellement l'onde guidée vers l'espace libre. Elle est très utilisée en haute fréquence.
4. **Antenne fente (Fig.I.13.d)** : c'est un guide d'onde rectangulaire qui contient des fentes sur sa paroi métallique, le rayonnement s'effectue alors perpendiculairement au plan troué du guide.
5. **Antenne à réflecteur parabolique (Fig.I.13.e)** : elle est constituée d'une source d'émission associée à une partie métallique réfléchissante, souvent de forme parabolique.
6. **Antennes imprimées (micro-ruban) (Fig.I.13.f)** : L'antenne imprimée, appelée aussi antenne patch est un type récent d'antenne dont le développement et l'utilisation sont de plus en plus fréquents. Elle est constituée d'un diélectrique (substrat), possédant un plan de masse métallique sur une face. Sur l'autre face une gravure métallique permet de supporter des courants de surface (patch) qui créent le rayonnement électromagnétique « Figure I.14 ».

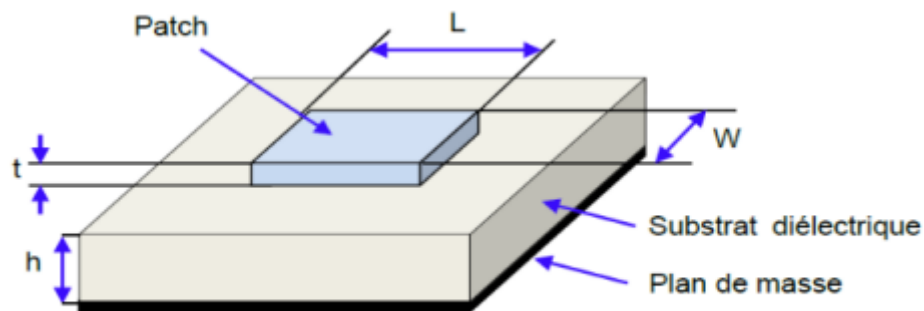


Figure I.12: Structure de base d'une antenne imprimée.

L'antenne patch peut prendre plusieurs formes comme suivants (Figure I.15) :

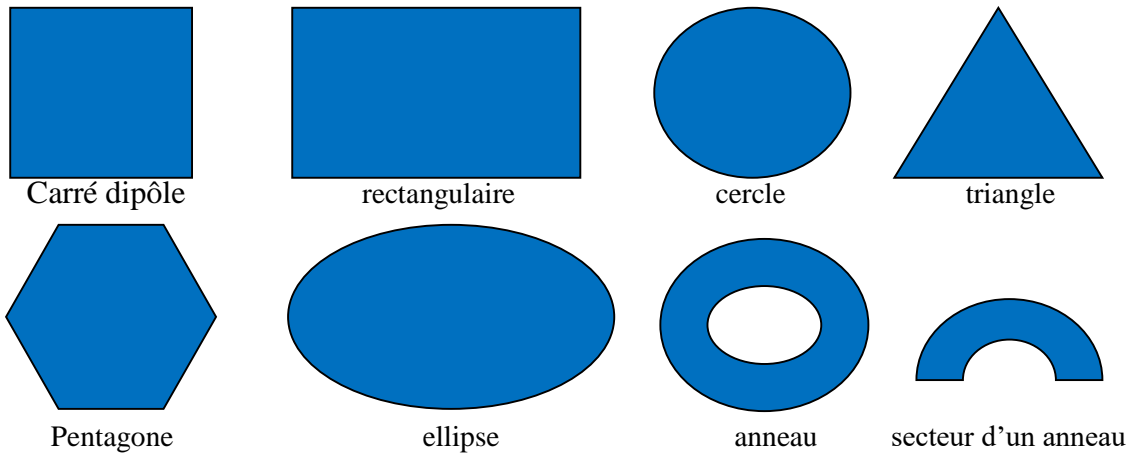


Figure I.13: Différentes formes de l'antenne patch.

6.1 Mécanisme de radiation :

Le mécanisme de radiation d'une antenne patch se réalise à partir de sa forme géométrique. Quand on excite la ligne d'alimentation avec une source RF, une onde électromagnétique va se propager sur cette ligne, après elle attaque l'élément rayonnant (de largeur plus grande que la ligne, donc plus facile à rayonner). Une distribution de charge (figure I.16) va s'établir à l'interface substrat/plan de masse sur et sous l'élément rayonnant. Cette distribution va créer un champ électrique vertical (figure I.17) entre le patch et le plan de masse ce qui va provoquer une inversion des phases des composantes verticales du champ électrique sur la longueur de l'antenne et à l'inverse de la précédente des rayonnements qui sont en phase dans le plan de l'antenne est dus aux composantes horizontales des lignes de champ qui entoure l'élément imprimé [30].

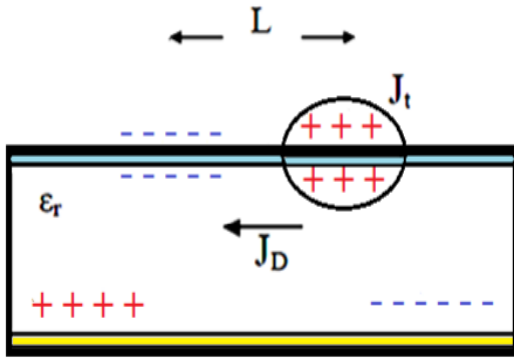


Figure I.14: Distribution de charge et de densité de courant.

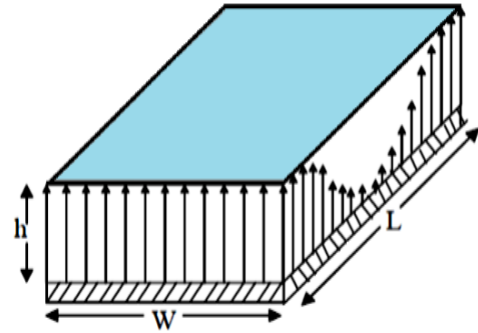


Figure I.15: Distribution du champ électrique vertical.

6.2 Techniques d'alimentation :

L'adaptation de l'alimentation de l'antenne est une phase cruciale pour garantir un transfert maximal de l'énergie. Il existe dans la littérature des divers types d'alimentation qui sont classés en deux catégories : alimentation avec contact et sans contact [31].

1) Couplage avec contact :

Cette catégorie d'alimentation permet un contact direct entre la ligne de transmission et la surface rayonnante. Nous distinguons deux types d'alimentation avec contact :

1.1 Alimentation par ligne microruban :

Dans le premier cas, une ligne microruban est directement connectée à l'élément rayonnant comme le montre la Figure I.18.a, le point de jonction peut être sur l'axe de symétrie du patch ou complètement décalé pour permettre une meilleure adaptation d'impédance [31].

Ce type d'alimentation est facile à mettre en œuvre et à modéliser, mais peut engendrer un rayonnement parasite qui peut devenir considérable et une bande passante typiquement entre 2 et 5 % [31].

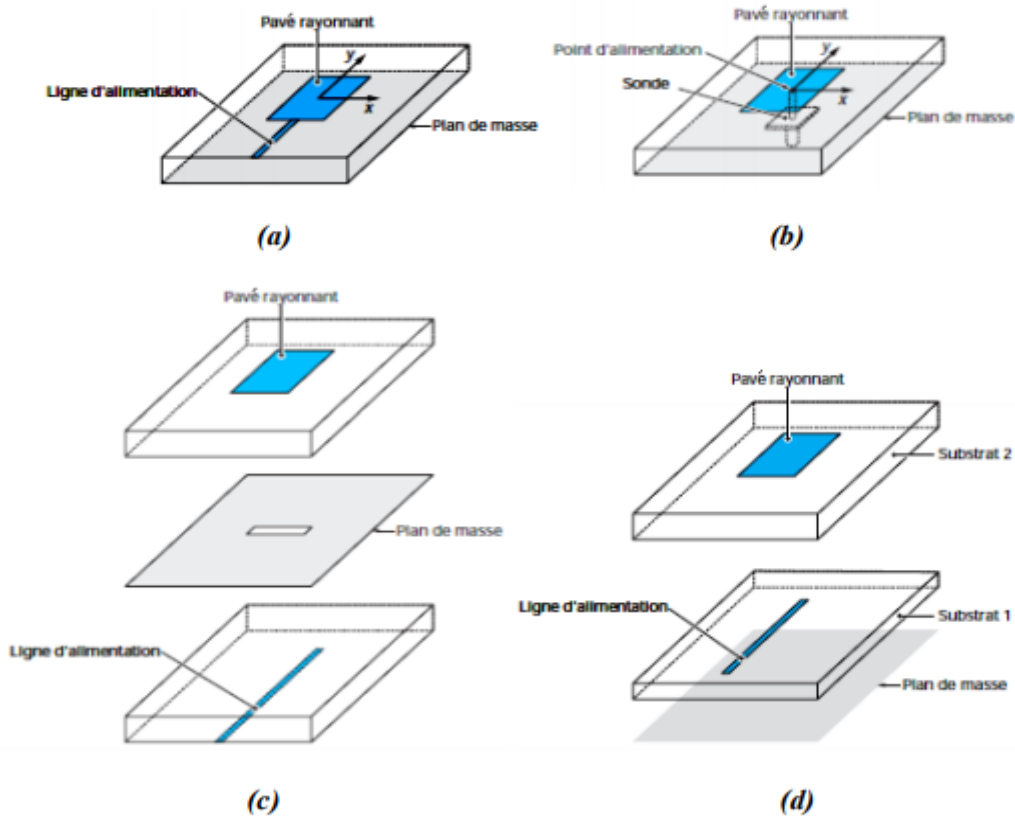


Figure I.16 : Techniques d'Alimentation d'une antenne imprimée.

1.2 Alimentation par sonde coaxiale :

L'alimentation par sonde coaxiale est réalisée par un contact direct de l'élément rayonnant au conducteur central d'une ligne coaxiale, tandis que son conducteur externe est relié au plan de masse Figure I.18.b. L'adaptation d'impédance est réalisable en déplaçant le point d'alimentation sur le patch. L'inconvénient de ce type d'alimentation réside dans la bande passante étroite et la difficulté de modélisation surtout pour des substrats électriquement épais [31].

2) Alimentation sans contact :

L'alimentation sans contact utilise le couplage de champ électromagnétique pour transférer la puissance au patch, cette catégorie comporte deux types d'alimentation :

2.1 Alimentation par couplage par fente :

L'alimentation par ligne micro-ruban ou par ligne coaxiale présentent une asymétrie qui génère des modes d'ordres supérieurs produisant un rayonnement de polarisation croisée, pour y remédier à cet état de fait l'alimentation par fente a été introduite. Un couplage électromagnétique est introduit à travers une petite fente réalisée dans le plan de masse qui sépare deux substrats l'un portant l'élément rayonnant et l'autre la ligne microruban comme le

montre la Figure I.18.c. Cette configuration permet une optimisation indépendante entre la ligne d'alimentation et le patch, facile à modéliser et présente un rayonnement parasite modéré. Cependant, elle est la plus difficile à mettre en œuvre et présente une bande passante étroite [31].

2.2 Alimentation par couplage de proximité :

La meilleure bande passante pouvant atteindre 13% est réalisable en utilisant l'alimentation par couplage de proximité illustrée par la Figure I.18.d. L'avantage de cette technique d'alimentation réside dans l'affaiblissement du rayonnement parasite et la facilité du couplage, ce dernier peut être optimisé par l'ajustement des dimensions de la ligne. Cependant, elle est très difficile à mettre en œuvre [31].

I.3.4.3.4 Réseau d'antennes :

Un réseau d'antennes est formé de capteurs spatialement séparés et dont les sorties alimentent un réseau pondéré. Généralement, n'importe quelle combinaison des éléments dans différentes structures géométriques peut former un réseau [32]. Le réseau d'antenne contient plusieurs conditions comme :

- L'espacement entre les éléments du réseau est assez petit qu'il n'y a aucune variation d'amplitude entre les signaux reçus aux différents éléments.
- Il n'y a aucun couplage manuel entre les éléments.
- Tous les champs d'incidence peuvent être décomposés en nombre discret d'ondes planes. C'est-à-dire, il y a un nombre fini de signaux.
- La largeur de bande du signal incident sur le réseau est petite comparée à la fréquence porteuse.

Le réseau d'antennes peut être arrangé dans diverses configurations de la géométrie dont les plus populaires sont linéaires, circulaires et planaire.

a) Réseaux linéaires uniformes :

Par définition, on appelle un réseau linéaire un ensemble d'antenne placée suivant une ligne et uniforme quand les éléments sont identiques et alimentée avec un courant de même amplitude avec un déphasage Progressif φ [33].

Considérons maintenant un réseau de N éléments de sources isotropes représentés sur la (Figure I.19). La distance de séparation entre les éléments adjacents est d. Dans ce cas-ci, le Facteur de réseau peut être exprimé comme la somme des contributions de chaque élément :

$$F(\psi) = 1 + e^{j\psi} + e^{j2\psi} + e^{j3\psi} + \dots + e^{j(N-1)\psi} \quad (\text{I.17})$$

Où :

$$\psi = kd \cos \theta + \phi \quad (\text{I.18})$$

C'est une série géométrique qui peut s'écrire de façon compacte par :

$$F = \frac{\sin(N\psi/2)}{\sin(\psi/2)} \quad (\text{I.19})$$

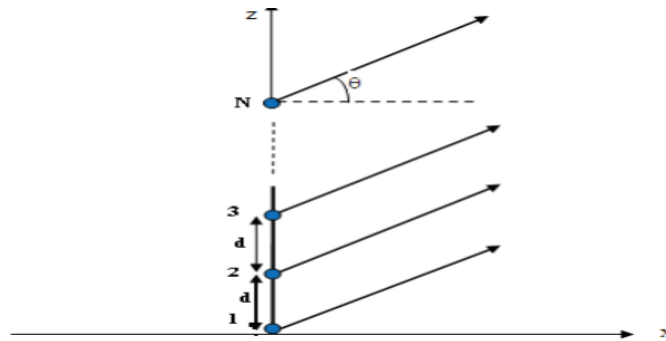


Figure I.17: Configuration d'un réseau linéaire uniforme de N sources.

L'examen de cette équation permet de faire ressortir les points suivants concernant le facteur de réseau d'un réseau linéaire uniforme :

- ✓ Le maximum principal (lobe principal) se produit quand $\psi = 0$, c'est-à-dire,

$$kd \cos \theta_{MAX} + \psi = 0 \quad (\text{I.20})$$

Où :

$$\theta_{MAX} = \text{Arc cos} \left\{ -\frac{\lambda\psi}{2\pi d} \right\} \quad (\text{I.21})$$

- Les nuls se produisent quand $\sin(N\psi/2) = 0$, c'est-à-dire, $\frac{N\psi}{2} = \pm n\pi$ pour $n=1,2,3\dots$

A titre d'exemple, nous illustrons dans la figure I.20 le diagramme de rayonnement de deux réseaux linéaires uniformes, le premier se compose de $N = 8$ antennes et le deuxième contient $N = 20$ antennes.

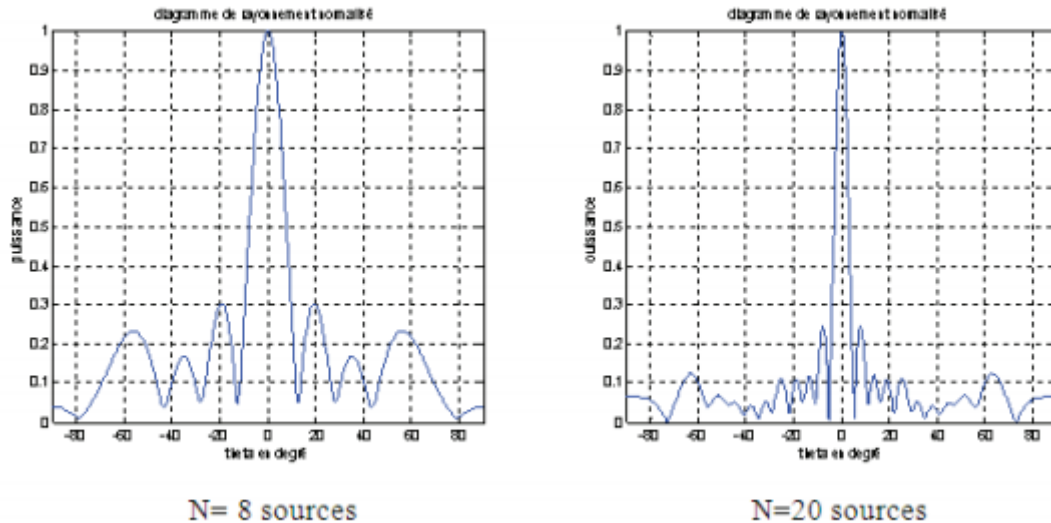


Figure I.18: Exemple d'un diagramme de rayonnement d'un réseau d'antennes linéaires uniformes.

➤ **Remarque**

D'après la (figure I.18), l'augmentation de N augmente la directivité (l'ouverture du lobe principal) et le nombre de lobes secondaires, donc le réseau d'antennes est plus directif s'il contient plus d'éléments, mais cela augmente en revanche le nombre de lobes secondaires, ce qui nous oblige à chercher un compromis ou à manipuler d'autres paramètres.

b) Réseaux plans :

A la différence des réseaux linéaires qui peuvent seulement balayer dans un plan (θ ou ϕ), les réseaux plans peuvent balayer dans les deux plans (θ ou et ϕ).

Les réseaux plans offrent un gain plus élevé et des lobes secondaires plus bas aux dépens d'un nombre d'éléments plus grand. Les principes de conception des réseaux plans sont semblables à ceux présentés pour les réseaux linéaires. Puisque les éléments sont placés dans deux dimensions (Figure I.21), le facteur de réseau d'un réseau plan peut être exprimé comme le produit des facteurs de réseau de deux réseaux linéaires : l'un situé le long de l'axe des abscisses et l'autre le long de l'axe des ordonnées [34] :

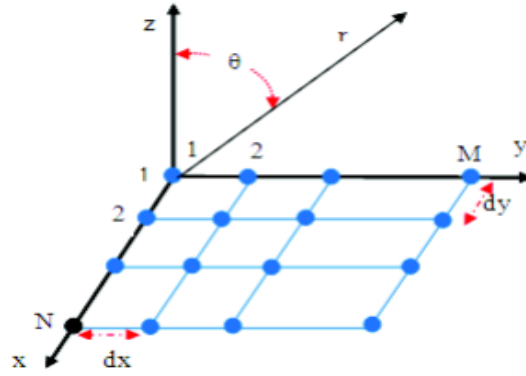


Figure I.19: Réseau plan MxN.

Le facteur de directivité du réseau est donné par :

$$F = \left\{ \frac{\sin(N\psi_x/2)}{N \sin \psi_x/2} \right\} \left\{ \frac{\sin(N\psi_y/2)}{M \sin \psi_y/2} \right\} \quad (I.22)$$

Où

$$\psi_x = \frac{2\pi}{\lambda} d_x \cos \theta \cos \varphi + \phi_x \quad (I.23)$$

$$\psi_y = \frac{2\pi}{\lambda} d_y \sin \theta \sin \varphi + \phi_y \quad (I.24)$$

c) Réseaux circulaires :

Dans une configuration de réseau circulaire, les éléments sont placés sur un cercle, comme, représenté sur la (Figure I.20).

Le facteur de réseau dans ce cas est donné par [33] :

$$F(\theta, \phi) = \sum_{n=1}^N I_n e^{jka(\sin \theta \cos(\varphi - \varphi_n) - \sin \theta_0 \cos(\varphi_0 - \varphi_n))} \quad (I.25)$$

Où : θ_0 et φ_0 sont les angles du faisceau principal, a est le rayon du réseau circulaire et I_n les courants d'excitation des éléments.

La Figure I.20 représente un réseau circulaire de 12 éléments avec un espacement de $(\lambda/2)$.

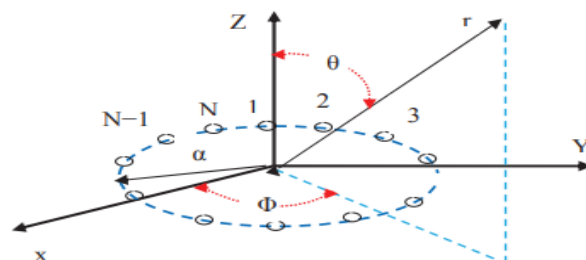


Figure I.20: Réseau circulaire de N élément.

I.3.4.3.4.1 Les avantages et les inconvénients des réseaux d'antennes :

Les avantages des réseaux d'antennes sont nombreux comme nous venons de le voir :

- Un faible coût de fabrication.
- La possibilité de les imprimer sur des surfaces non-planes dans le cas de substrats.
- La possibilité d'améliorer la directivité.
- La possibilité de les intégrer dans des appareils électriques.
- Elles sont légères et peu encombrantes (en quelque mm² jusqu'à quelque cm² de la surface)
- Le choix de déphasage régulier entre les éléments fixes, une orientation de faisceaux dans l'espace dans certaines limites d'angles.

Malheureusement, les antennes présentent également un certain nombre d'inconvénients qui peut limiter leur domaine d'application, on peut noter :

- Une bande passante limitée (de 1 à 5%).
- Un faible gain (de l'ordre de 5db).
- Une pureté de polarisation difficile à obtenir.
- Des puissances transportées faibles en comparaison à des antennes traditionnelles.
- Problème de choix de technique d'excitation.

I.4 Conclusion :

Ce premier chapitre nous a permis d'introduire les généralités nécessaires à la bonne compréhension du contexte de cette mémoire. Nous avons commencé par un bref historique sur les générations de technologie de télécommunications, en suite nous avons décrit les clés de la 5G qui représente la prochaine génération de normes de téléphonie mobile et promet d'améliorer l'expérience de l'utilisateur final en offrant de nouveaux services et applications à des débits se mesurant en gigabits, et d'améliorer grandement la qualité de fonctionnement et la fiabilité des réseaux. La partie qui suit présente les antennes et leurs caractéristiques. Vers la fin de chapitre, nous avons présenté des généralités sur les réseaux d'antennes.

Le prochain chapitre sera consacré à la conception et la simulation d'une antenne patch destinée à une application de la technologie 5G dans la bande des 28Ghz.

Chapitre II

Conception et Simulation d'une antenne imprimée sous CST

II.1 Introduction :

Afin d'optimiser les paramètres de la structure et de réduire le coût de réalisation, la conception de l'antenne réalisée avec le logiciel approprié est une étape indispensable ; elle prend en compte les paramètres diélectriques et conducteurs de l'antenne. Nous avons choisi le logiciel de simulation électromagnétique CST MICROWAVE STUDIO (MWS), qui se caractérise par la capacité d'analyser rapidement et avec précision les structures haute fréquence (HF), telles que les antennes. Nous avons donc choisi des matériaux et nous nous rapprochons de plus en plus des futures antennes.

Le but de ce chapitre est de concevoir une antenne imprimée pour une application de la technologie 5G utilisant le logiciel CST. Nous allons d'abord introduire le logiciel CST Microwave Studio (MWS), puis nous décrivons les différents modules à produire, par la suite nous définirons les spécifications pour formaliser la recherche. Après, nous présentons en détail la méthode utilisée pour déterminer les paramètres géométriques du motif imprimé conçu (antenne étoile) sur la base de la théorie des antennes. Finalement, nous présentons les résultats des simulations réalisés pour évaluer les performances de notre antenne proposée en termes de coefficient de réflexion, le taux des ondes stationnaires (VSWR), le diagramme de rayonnement, le gain, la direction, l'impédance ainsi que l'efficacité. Et nous terminons ce chapitre par une conclusion.

II.2 Outil de simulation :

II.2.1 Définition :

Le logiciel de simulation électromagnétique CST STUDIO SUITE est l'aboutissement de nombreuses années de recherche et de développement dans les solutions les plus efficaces et précises de calcul pour la conception électromagnétique.

Le CST Microwave Studio est un logiciel de simulation électromagnétique de structure passives en 3 Dimensions basé sur la résolution des équations de Maxwell suivant la technique des équations intégrales (FIT, Finite Integration Technic). Cette méthode numérique offre une discrétisation de l'espace permettant la description directement en 3D de tous les composants des systèmes décrits, ce qui lui permet d'être appliqué à de nombreux problèmes

électromagnétiques allant de la statique aux hyperfréquences en analyses temporelle et fréquentielle. De plus, contrairement à la plupart des logiciels de simulation électromagnétique, CST discrétise la forme intégrale des équations de Maxwell plutôt que leurs formes différentielles, et ce qui est l'une de ses caractéristiques clé de ce simulateur. CST Microwave Studio fait partie de CST DEIGN STUDIO suite, et offre un certain nombre de solveurs différents selon le type d'application et du problème rencontré [35].

✓ **Ce logiciel présente les avantages et les inconvénients principaux suivants :**

- C'est une option très intéressante pour la conception d'antenne en micro ruban.
- L'optimisation du modèle afin que celui-ci présente les divers critères de performance, de sorte que le VSWR soit limité entre 1 et 2 à la fréquence de résonance désirée.
- Offre plusieurs graphiques différents pour faciliter l'analyse de notre modèle.
- Il est possible de créer des variables qui pourront être utilisées pour spécifier les dimensions d'une composante.
- La durée de la simulation est proportionnellement croissante par-apport au volume du projet, (plus le projet est grand la durée d simulation est grande).

✓ **Les principales caractéristiques de logiciel CST Microwave Studio sont :**

- Une mémoire technique efficace d'intégration finie.
- La structure peut être vue soit comme un modèle 3D ou un schéma.
- Très bonne performance en raison de rapprochement frontière Perfect (PBA). Fonctionnalité pour les unités à l'aide d'une grille hexaédrique. Les solveurs transitoires et mode propre également en charge la technique Tôle mince (TST).
- Caractéristique hybride à base de modélisation permet les changements structurels rapides.
- Importation d'un ensemble de données modèle humain visible ou d'autres ensembles de données.
- L'importation de modèles 2D et 3D.
- Paramétrages des fichiers de CAO importés.
- Base de données des matériaux.
- Modèles de structure pour la description du problème simplifié.

II.2.3 Cahier de charge :

Pour réaliser notre projet il faut une antenne patch microstrip qui résonne à la fréquence de 28 GHz.

L'antenne triangulaire est choisie parce qu'elle occupe moins de surface sur le substrat que d'autres formes existantes telles que le patch rectangulaire et circulaire. Le substrat Rogers5880 (Loss free) est choisi pour des mesures en standalone avec un coefficient de perte de 0,0009. Le plan de masse et le patch de type matériaux Copper (annealed). Le cahier de charge décrit dans tableau II.1, nous exige les valeurs caractérisant des différents éléments de l'antenne.

| Le type de matériaux | Les composants d'antenne | Hauteur (mm) | Permittivité diélectrique |
|-----------------------|---------------------------|--------------|---------------------------|
| Rogers5880(Loss free) | Substrat | 0.508 | 2.2 |
| Copper (annealed) | Plan de masse et le patch | 0.035 | - |

Tableau II.1: Le cahier de charge.

II.3 Conception de l'antenne triangulaire :

II.3.1 Longueur de la ligne d'alimentation :

Elle nous permet de définir la longueur de la ligne d'alimentation est de l'ordre de la demi-longueur d'onde [36], pour l'antenne, donc elle est d'environ 5,4mm :

$$L_L = \frac{\lambda}{2} = \frac{C}{2F} \quad (\text{II.1})$$

Avec :

- ❖ C : C'est la vitesse de la lumière.
- ❖ λ : La longueur d'onde.
- ❖ F : La fréquence de résonances.

II.3.2 Largeur de la ligne d'alimentation :

Pour adapter l'antenne à son alimentation, la largeur de la ligne est déterminée en fonction de l'impédance caractéristique (Z_c qui est généralement égale à 50 Ohm) en utilisant l'équation suivante [36] :

$$Z_c = \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon_{re}} \left[\frac{W_0}{h} + 1,393 + 0,667 \ln \left(\frac{W_0}{h} + 1,444 \right) \right]} \quad (\text{II.2})$$

Avec :

- ❖ h : L'épaisseur du substrat.
- ❖ W_0 : La largeur de la ligne d'alimentation.
- ❖ ϵ_{re} représente la permittivité effective de l'antenne et elle est définie par l'équation suivante :

$$\epsilon_{re} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[1 + 12 \frac{h}{W} \right]^{-1/2} \quad (\text{II.3})$$

Nous obtenons une largeur de la ligne d'alimentation $W_0 = 3.044$ mm.

II.3.3 Longueur du patch :

Le patch triangulaire a trois côtés d'une longueur (a), comme le montre la figure II.1 :

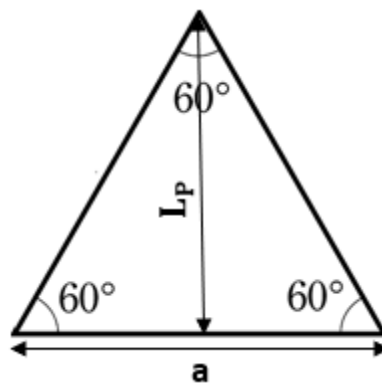


Figure II.1: Antenne micro-ruban à patch triangulaire.

La longueur du patch est exprimée par la relation suivante [37] :

$$W_P = a = \frac{2c}{3f_r\sqrt{\epsilon_r}} \quad (\text{II.4})$$

Avec :

- ❖ $C = 3 \times 10^8$ m/s [vitesse de la lumière].
- ❖ $f_r = 28$ GHZ [la fréquence de résonances].
- ❖ $\epsilon_r = 2.2$ [permittivité relative].

La valeur de la longueur du triangle est obtenue $a = 4,815$ mm. Ainsi la hauteur (L_p) est déterminée par l'équation mathématique comme suit [37] :

$$L_p = \sqrt{a^2 - \left(\frac{1}{2} \times a\right)^2} \quad (\text{II.5})$$

La hauteur L_p égale à 4,17 mm.

II.3.4 Longueur du substrat :

L'équation de la longueur du substrat est donnée par [38] :

$$L_g = 6 \times h + L_p + L_L \quad (\text{II.6})$$

D'où :

- ❖ $h = 0,508$ mm [l'épaisseur du substrat].
- ❖ $L_p = 4,17$ mm [la hauteur].
- ❖ $L_L = 2.67$ mm [la longueur de la ligne d'alimentation].

La longueur de notre substrat égale à 9,888 mm.

II.3.5 Largeur du substrat :

La largeur du substrat est exprimée par la relation suivante [38] :

$$W_g = 6 \times h + W_p \quad (\text{II.7})$$

Où :

- ❖ $h = 0,508$ mm [l'épaisseur du substrat].
- ❖ $W_p = 4,815$ mm.

Le résultat du calcul de la largeur du substrat est égal à 7,863 mm.

II.4 Simulation de l'antenne :

Pour modéliser une antenne sous CST MWS, nous introduisons les paramètres de ses différentes composantes comme le substrat, la ligne d'alimentation, le patch ainsi que le plan de masse. La figure (II.2) nous présente la structure primaire de l'antenne proposée.

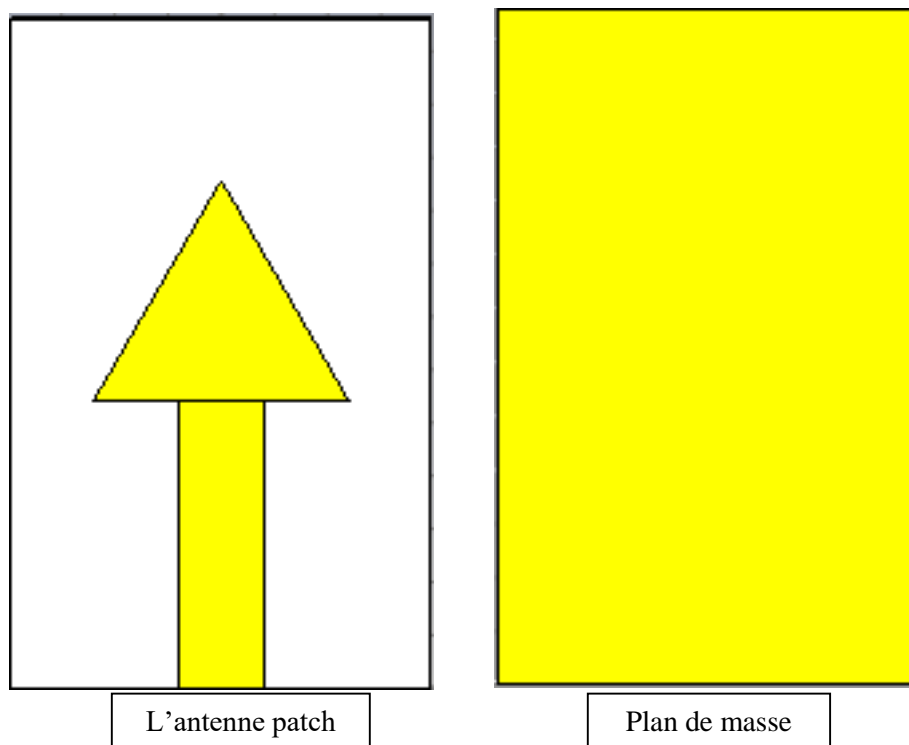


Figure II.2: L'antenne initiale.

Après les calculs des paramètres de l'antenne élémentaire, la première simulation nous a donné le coefficient de réflexion montré dans la figure (II.3) :

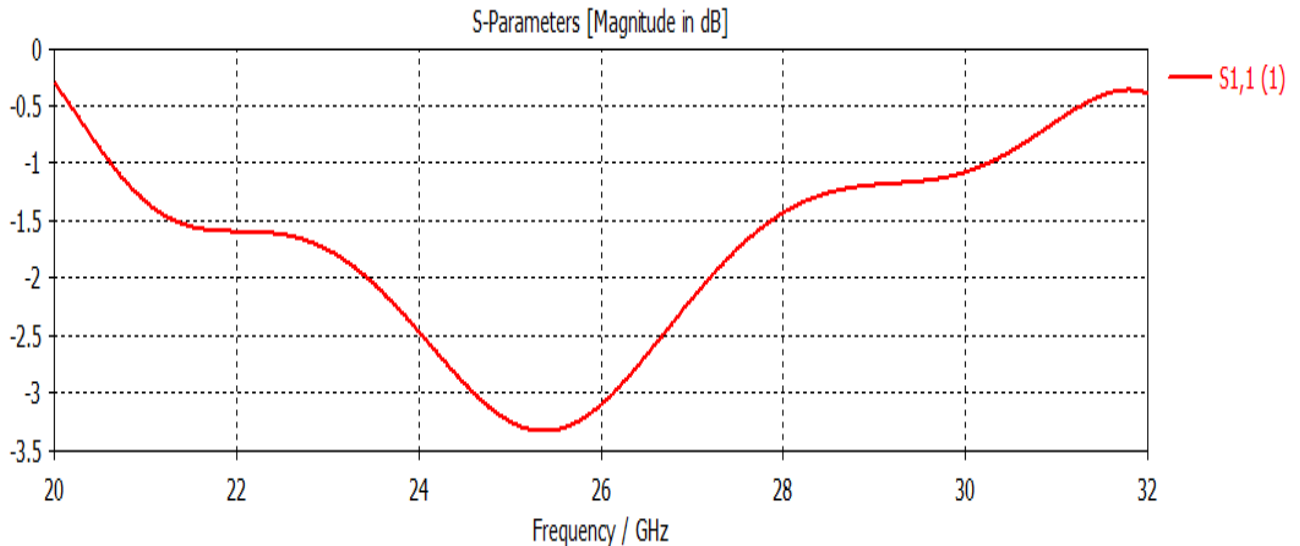


Figure II.3: Le coefficient de réflexion de l'antenne initiale.

Nous avons constaté que le coefficient de réflexion S_{11} de cette antenne est inférieur à -10dB et on peut conclure que l'antenne présente une mauvaise adaptation, pour cela nous procéderons à une optimisation des paramètres de l'antenne initiale afin d'arriver aux résultats souhaités.

II.4.1 Technique d'adaptation:

Pour chaque système qui transforme l'énergie sur une ligne de transmission à besoin d'adaptation car la ligne transforme l'impédance de charge en une autre valeur d'impédance au droit de la source. Ce que voit la source dépend donc de l'impédance de charge, de la longueur électrique de la ligne et de son impédance caractéristique [39].

D'abord trois différentes approches peuvent être employées pour améliorer l'adaptation de l'antenne [36]. La première méthode utilise une transformation quart d'onde pour adapter l'antenne à 50 Ohm. Dans la transformation est placée entre la ligne micro-ruban et la fin du patch pour l'assortiment d'impédance et d'inductance. La deuxième méthode permet d'adapter n'importe quelle charge à condition de pouvoir placer le stub librement. La dernière méthode approche consiste à introduire des encoches à l'entrée du patch comme nous montre la figure II.9.

II.4.1.1 Adaptation par ligne quart d'onde :

Dans la construction de circuits hyperfréquences, on recherche souvent l'adaptation, c'est à dire à se ramener à une impédance différente (qui est souvent l'impédance caractéristique) de celle obtenue en fin de circuit [39].

Pour améliorer l'adaptation de l'antenne on utilise un transformateur quart d'onde, il suffit que le transformateur soit placé entre la ligne micro-ruban et l'extrémité du patch comme montre la Figure II.5.

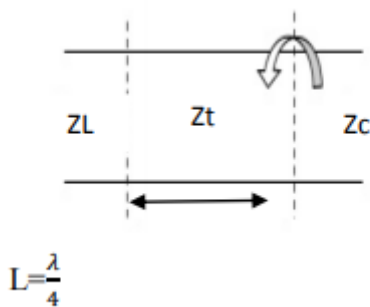


Figure II.4: Modélisation de l'antenne quart d'onde.

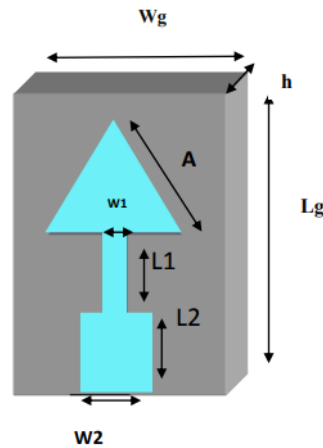


Figure II.5: adaptation par quart d'onde.

II.4.1.2 Adaptation par stub :

Une autre façon de procéder pour arriver à l'adaptation d'une charge quelconque consiste à utiliser un stub. Grâce à un stub en un circuit ouvert (open stub) ou en court-circuit (short stub). La solution retenue est généralement celle présentant le plus faible encombrement. Le raisonnement peut se faire en impédance mais il est plus facile de travailler dès le départ en admittance pour faire la somme des impédances parallèles ramenées [39].

Un stub est un tronçon ligne de longueur L_s que l'on branche en dérivation sur la ligne principale à une distance d de la charge [39].

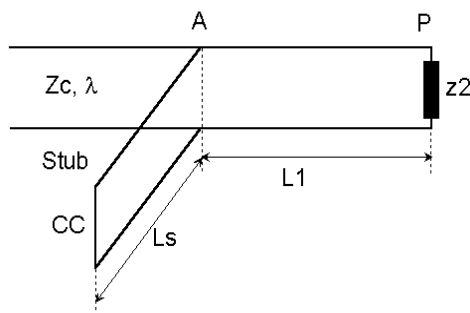


Figure II.6: Modélisation de l'antenne à Adaptation simple stub.

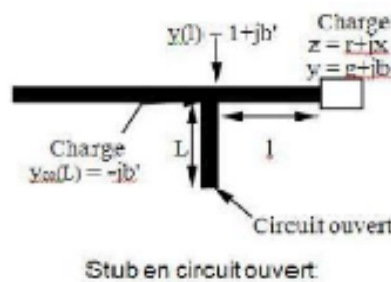


Figure II.7: Stub en circuit ouvert.

II.4.1.3 Adaptation avec encoches :

Une autre méthode pour améliorer l'adaptation de l'antenne est l'utilisation des encoches, il suffit de modifier la géométrie du patch [39].

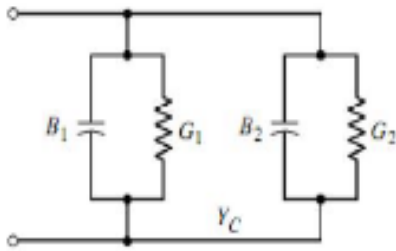


Figure II.8: L'équivalence en circuit.

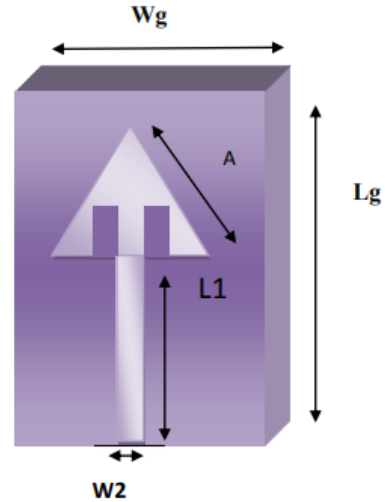


Figure II.9: Patch adapté par encoches.

Parmi les trois techniques, nous choisissons la méthode des encoches dans notre antenne pour améliorer l'adaptation à la fréquence (28GHZ), comme nous le montre la figure II.9.

D'après BALANIS, le premier calcul de la longueur des encoches est donné par l'équation II.8 [40] :

$$Y_0 = \frac{2a}{2\pi} \times \arcsin(1 - 2 \times Z_{in} \times G) \quad (\text{II.8})$$

Avec :

$$G = \begin{cases} \frac{1}{90} \left(\frac{2a}{\lambda_0}\right)^2 & \text{si } 2a \leq \lambda_0 \\ \frac{1}{120} \left(\frac{2a}{\lambda_0}\right)^2 & \text{si } 2a \geq \lambda_0 \end{cases} \quad : \text{conductance de rayonnement.} \quad (\text{II.9})$$

Où :

- ❖ $Z_{in} = 50 \Omega$. impédance d'entrée de l'antenne.
- ❖ a : rayon du patch.
- ❖ λ_0 : longueur d'onde dans le vide.

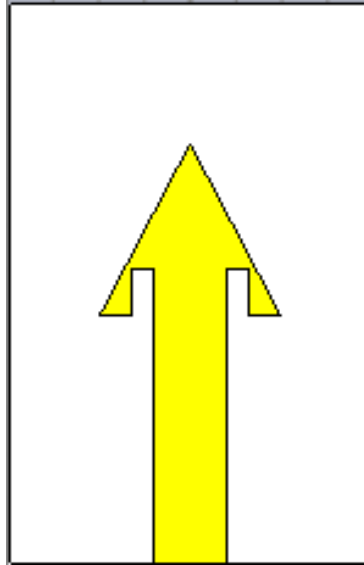


Figure II.10: Antenne avec deux ces encoches.

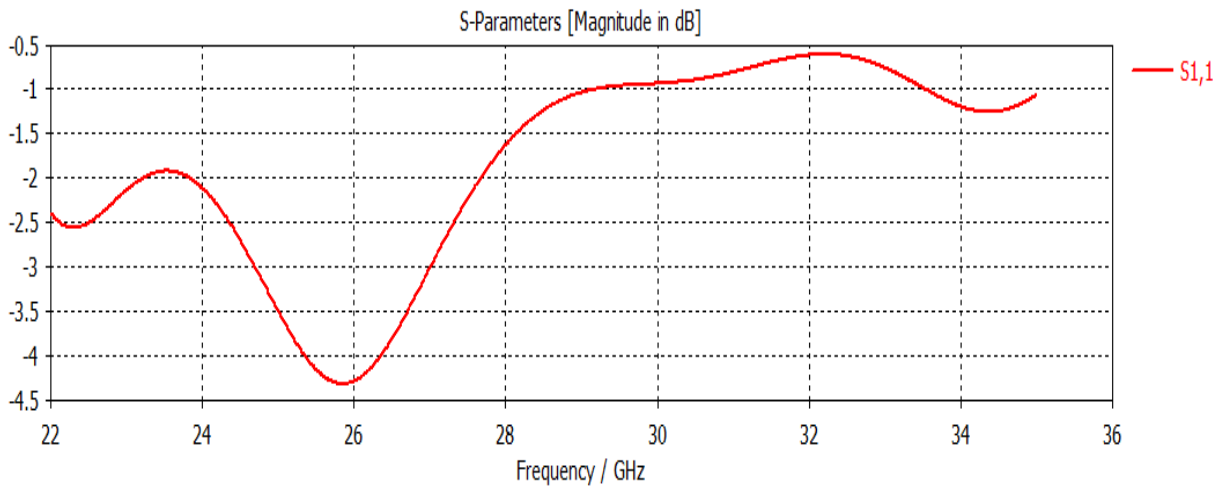


Figure II.11: Le paramètre S11 après l'ajoute des encoches.

Après avoir appliqué les encoches sur notre antenne, le résultat de la simulation est défavorable parce que le coefficient de réflexion est toujours inférieur a -10dB (pas d'adaptation), pour améliorer ce résultat il faut prévoir une étude paramétrique sur les encoches.

II.4.2 Etude paramétrique sur les encoches:

La figure II.12 nous montre l'impact de la longueur des encoches sur la variation du coefficient de réflexion en fonction de la fréquence. Pour une longueur des encoches égales à 1 mm, nous observons une adaptation acceptable mais elle ne correspond pas à la fréquence de 28GHz. De plus, la bande de fréquence à « -10 dB » est très étroite par rapport à la bande de fréquence théorique.

Pour l'amélioration du coefficient de réflexion a la fréquence de résonance on a choisi le paramétrés (A) pour tester le résultat.

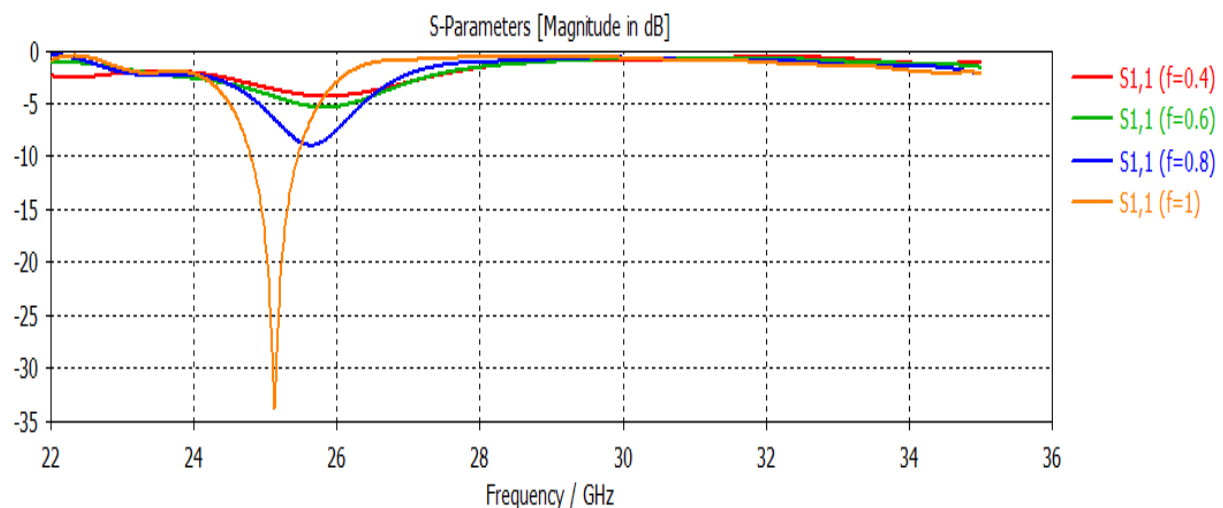


Figure II.12: L'étude paramétrique des encoches.

II.4.3 Optimisation de coefficient de réflexion :

Pour arriver à la fréquence 28 GHz, nous avons utilisé l'option d'optimisation de longueur (A) du patch, cette méthode nous a permis d'avoir un meilleur résultat avec une longueur du patch qui est égale à 4,35 mm le montre la Figure (II.13).

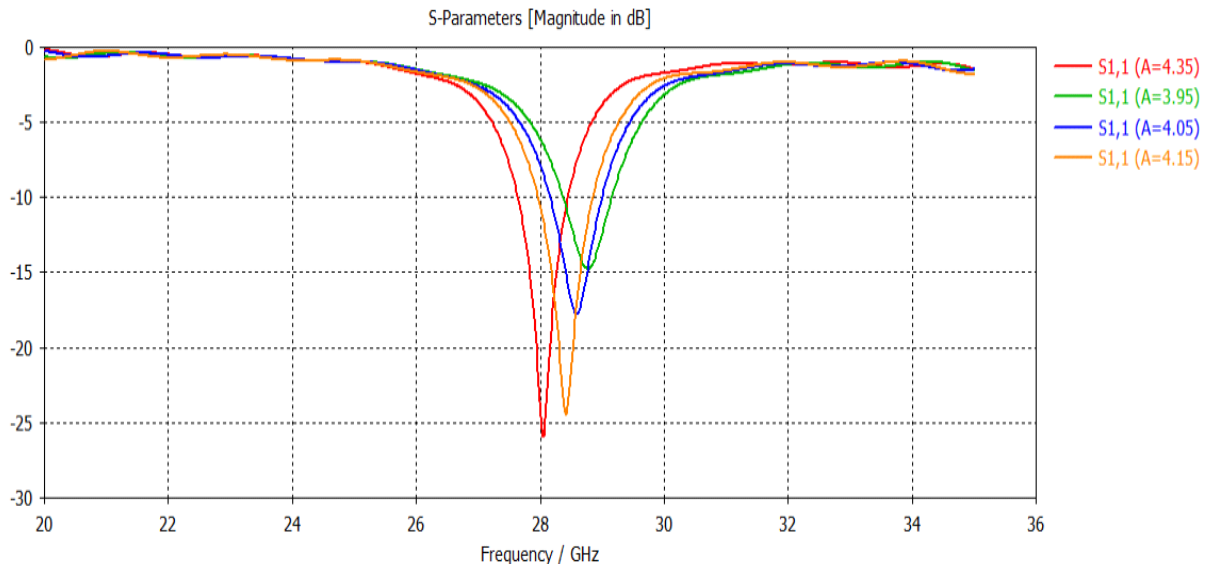


Figure II.13: L'étude paramétrique sur le paramètre A.

II.4.4 Elargissement de bande :

Pour avoir des résultats de l'adéquation de la largeur de bande de fréquences d'antenne aux conditions d'utilisation de la technologie 5G, nous avons utilisé plusieurs méthodes (insertion des fentes et minimisation de la longueur du plan de masse) pour élargir cette dernière, malheureusement il n'y a pas de résultat concret. On a donc, préconisé de rajouter un autre triangle inversé pour avoir une étoile à cinq branches comme le montre la figure ci-dessous :

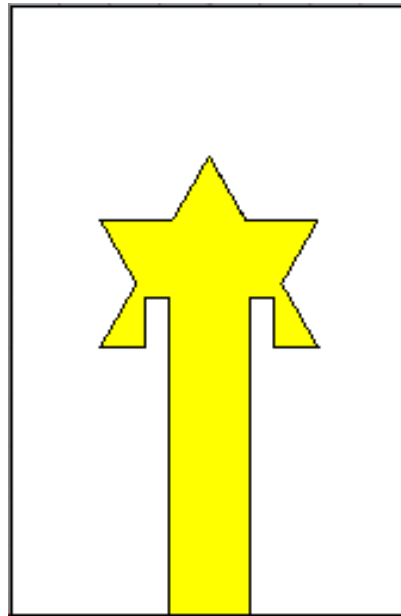


Figure II.14: Antenne étoile.

Suite à plusieurs changements des valeurs du paramètre (A) nous sommes arrivés au résultat de 800Mhz pour un A=4,35mm (c'est la bande choisie pour les applications 5G).

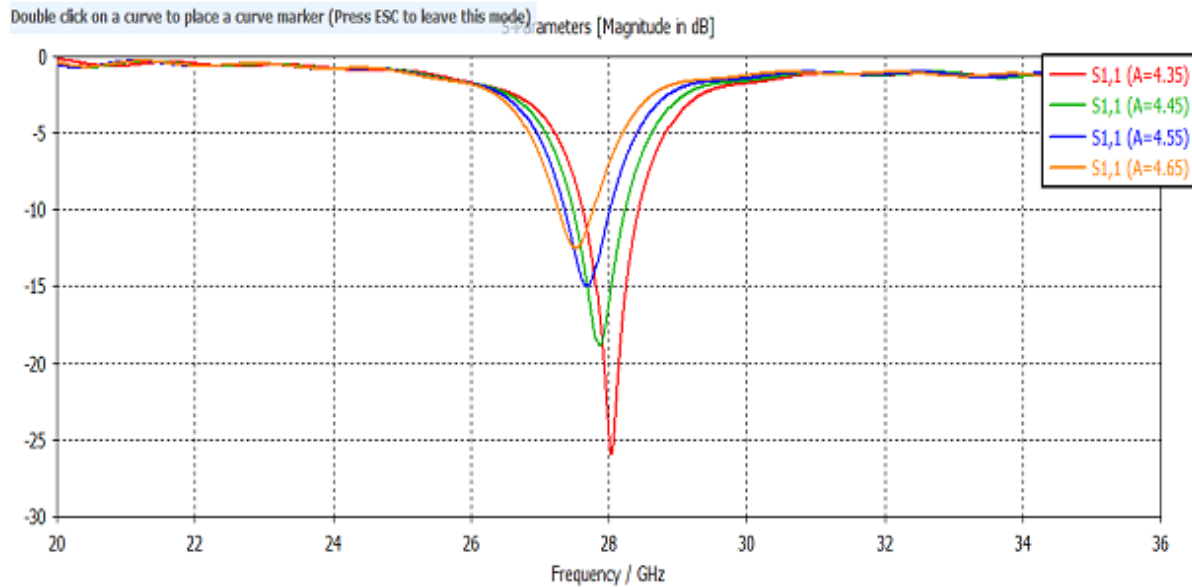


Figure II.15: Le coefficient de réflexion de l'antenne étoile.

II.4.5 Optimisation de coefficient de réflexion :

A l'aide de la fonction d'optimisation qui se trouve dans le simulateur CST, nous obtenons (Figure II.16) une meilleure adaptation à notre fréquence (28 GHz) et un coefficient de réflexion avec un pic de l'ordre de -26dB.

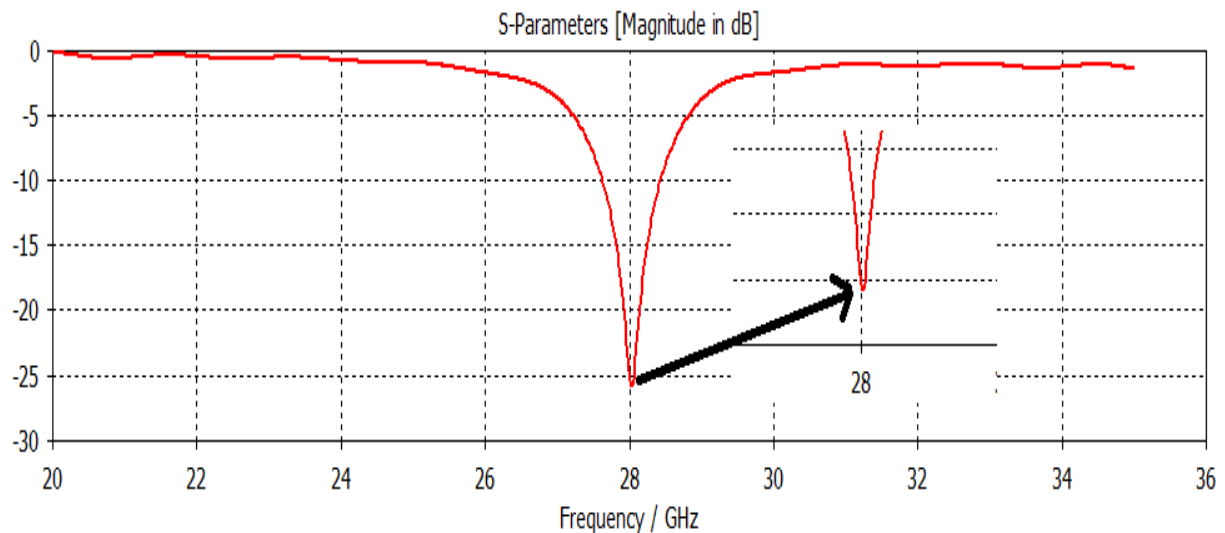


Figure II.16: Le paramètre S11 de l'antenne finale.

II.5 Discussion et interprétation des résultats :

Dans cette partie, nous présenterons et nous évaluerons tous les résultats de l'antenne conçue en termes du coefficient de réflexion, du rapport d'ondes stationnaires, du diagramme de rayonnement, du gain, de l'impédance, de la densité de courant et de l'efficacité.

II.5.1 Coefficient de réflexion :

Le coefficient de réflexion obtenu avec le logiciel CST présenté dans figure II.17, montre une meilleure précision sur l'adaptation de l'antenne avec un pic de l'ordre de -26 dB pour la fréquence 28GHz.

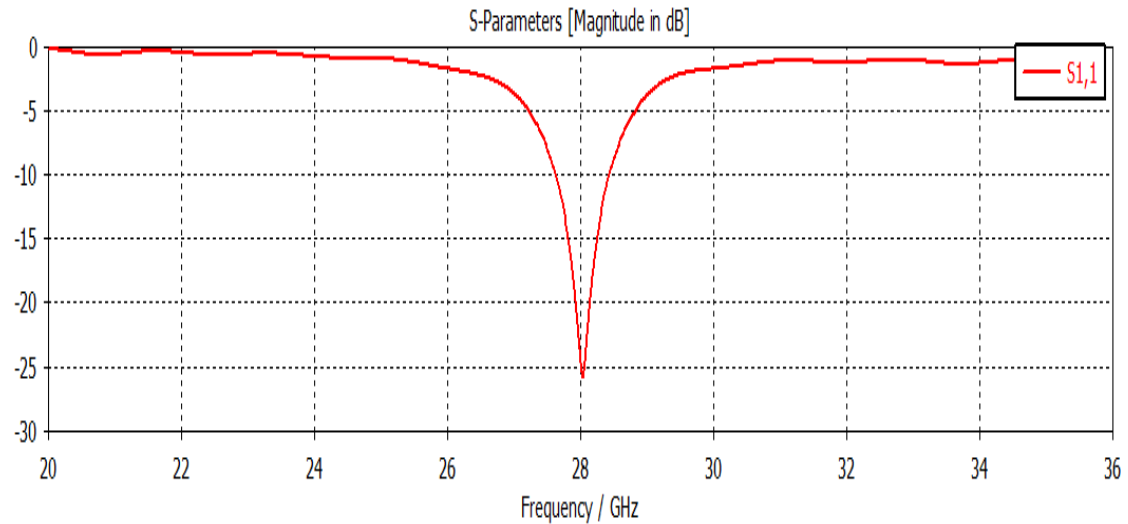


Figure II.17: Le coefficient de réflexion S11 en dB.

II.5.2 Rapport d'onde stationnaire (VSWR) :

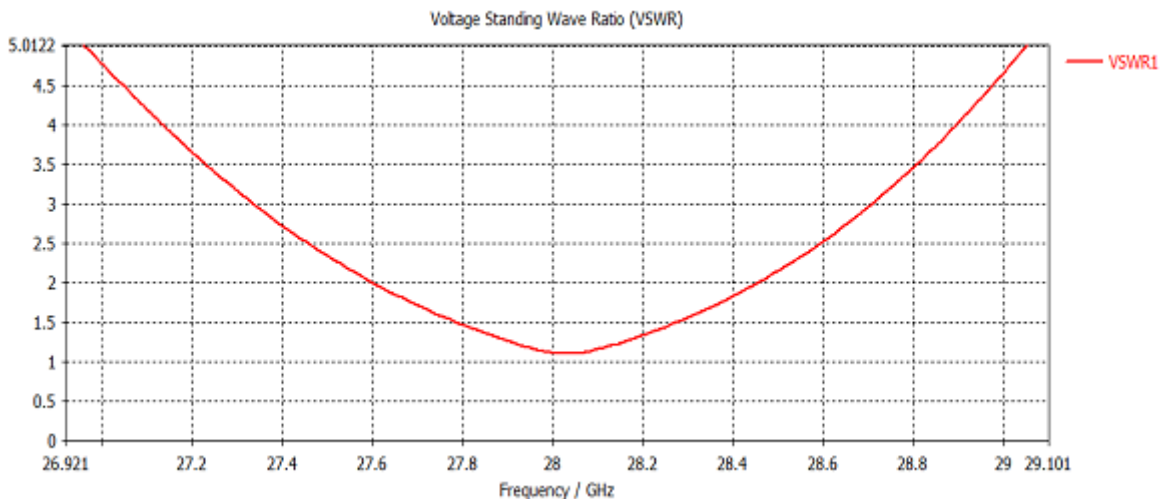
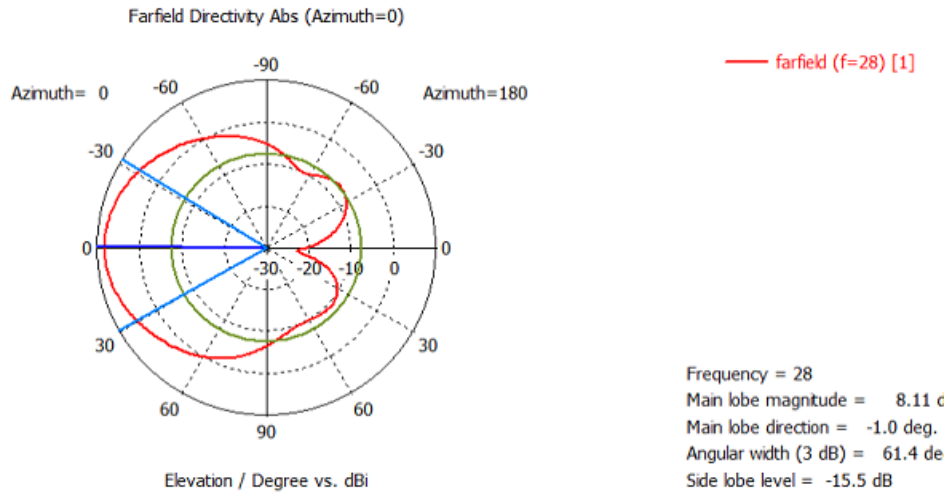


Figure II.18: Rapport d'onde stationnaire (VSWR).

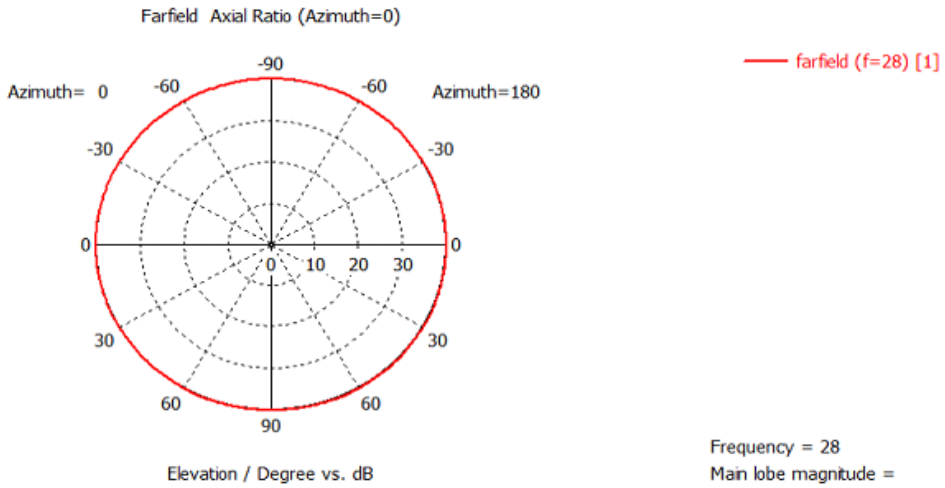
La courbe du rapport d'onde stationnaire simulé et montré dans la figure II.18 est comprise entre 1 et 2, ce qui montre une bonne adaptation d'impédance entre l'antenne et la ligne de transmission.

II.5.3 Le diagramme de rayonnement et le Gain:

Les figure (II.19) et (II.20) respectivement, représenté le diagramme de rayonnement en présentations polaire et en 3D. Nous remarquons que l'antenne présente un rayonnement quasi-omnidirectionnel.



(a)



(b)

Figure II.19: Diagramme de rayonnement polaire de l'antenne à la fréquence 28 GHz, (a) Plan E, (b) Plan H.

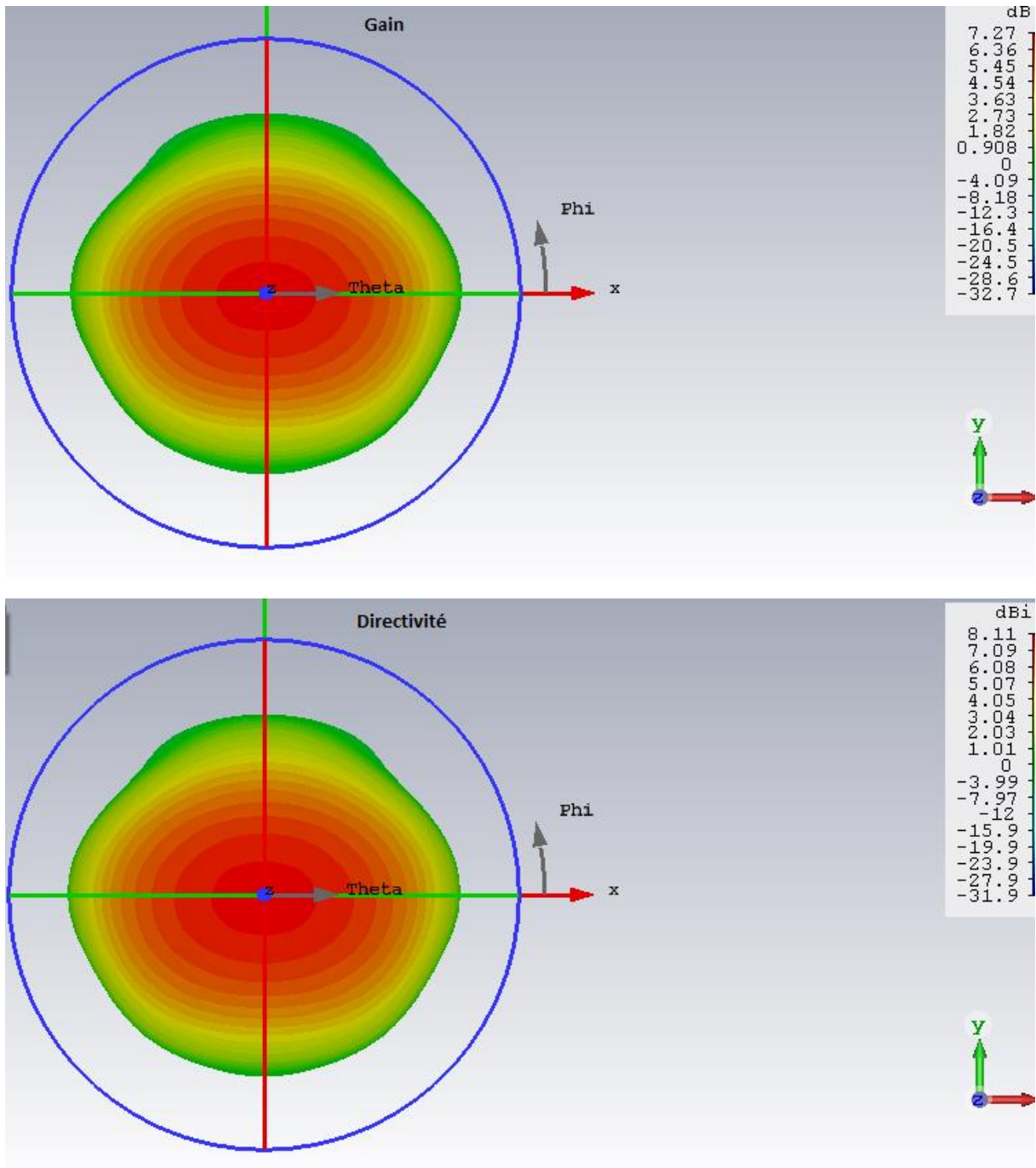


Figure II.20: Le diagramme de rayonnement en 3D.

Le diagramme de rayonnement de l'antenne a une forme appropriée comme le montre la figure II.20 parce que le rayonnement est concentré dans la partie supérieure de l'antenne (le plan Z), la valeur de gain = 7,268 dB, la directivité maximale = 8,108 dB.

II.5.4 L'impédance d'entrée :

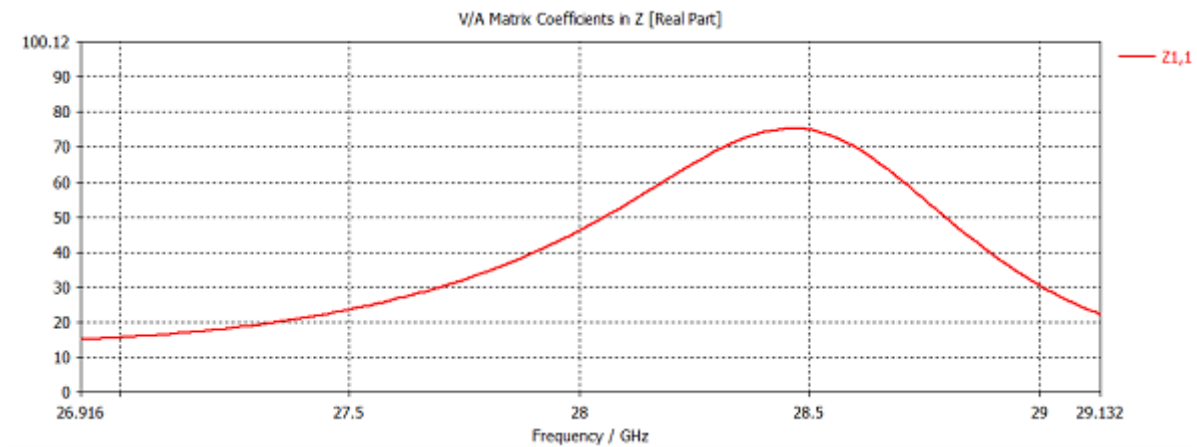


Figure II.21: L'impédance d'entrée de l'antenne (partie réelle).

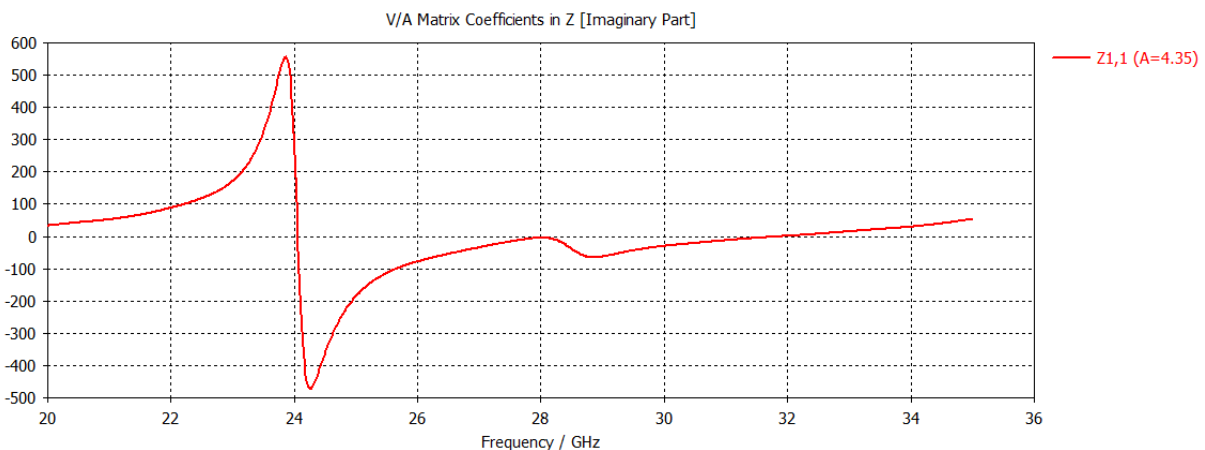


Figure II.22: L'impédance d'entrée de l'antenne (partie imaginaire).

Le résultat de la figure II.21 présente la partie réelle de l'impédance d'entrée de l'antenne. La valeur est autour l'impédance caractéristique (50 Ohm), ce qui implique un bon transfert de l'énergie entre l'alimentation et la ligne micro-ruban. La partie imaginaire de l'impédance d'entrée est illustré sur la figure II.22, nous constatons qu'elle est autour de « 0 » dans la bande souhaitée.

II.5.5 L'efficacité :

L'efficacité est déterminée par la relation (II.10) en fonction du gain et de la directivité, pour notre antenne nous avons une efficacité moyenne d'antenne égale à 60%.

$$\eta = \frac{\text{Gain}}{\text{Directivité}} \quad (\text{II.10})$$

Vu que l'efficacité se désigne à la puissance rayonnée de l'antenne et à la puissance fournie. Un transfert moyen de l'énergie ou de puissance estimé à 60% est fourni à cette antenne.

II.5.6 Densité de courant :

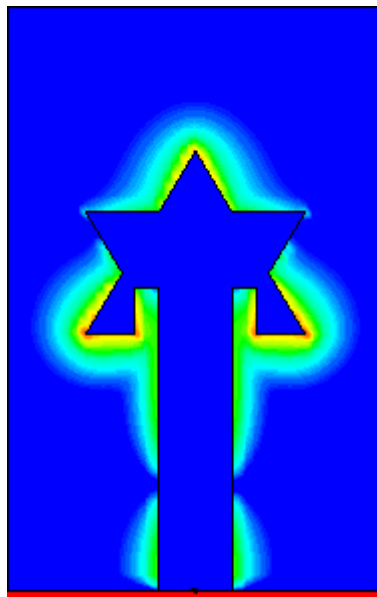


Figure II.23: Densité de courant surfacique du patch.

Nous avons remarqué que le courant est concentré sur le patch à côté des encoches et sur la tête d'étoile (couleur jaune), cela indique que cette antenne envoie un rayonnement d'une manière acceptable.

II.6 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons abordé plusieurs étapes pour concevoir une antenne imprimée étoile alimentée par une ligne micro-ruban qui résonne à la fréquence de 28 GHz. Nous avons commencé par la conception d'une antenne triangulaire simple en se basant sur la théorie des antennes. Les résultats de simulation présentés sous l'environnement CST de cette antenne proposée en termes de coefficient de réflexion nous montre une désadaptation à la fréquence

espérée. Afin d'améliorer l'adaptabilité de l'antenne conçue, nous avons choisi la méthode d'insertion des encoches au niveau de l'élément rayonnant. Les résultats de simulations en termes de coefficient S11 montre l'effet positif de ces encoches sur l'adaptation de l'antenne à la fréquence souhaitée. Par contre, la bande passante fonctionnelle de l'antenne ne répond pas à celle désirée pour l'application 5G (28 GHz).

Après une recherche bibliographique, on a préconisé l'utilisation de deux triangles en formant une étoile à cinq branches. Au terme de cette étude, nous avons atteint notre objectif.

A la fin de ce chapitre, nous présentons les résultats obtenus à partir de l'antenne étoile proposée. Ces résultats indiquent que l'antenne a des bonnes performances en termes de coefficient de réflexion, de taux d'ondes stationnaires, de diagramme de rayonnement, de gain, d'impédance d'entrée et d'efficacité à la fréquence requise de 28 GHz.

Le chapitre suivant sera consacré à la mise en place et la conception d'un réseau d'antenne de quatre éléments à partir de l'antenne étoile proposée dans ce deuxième chapitre.

Chapitre III

Conception et simulation d'un réseau d'antenne pour une application 5G

III.1 Introduction :

Dans le chapitre précédent, nous avons mis l'accent sur la conception d'une antenne imprimée à patch unique qui résonne à la fréquence des 28 GHz pour une application de la cinquième génération. Cependant, malgré un gain maximal de 7,268dBi la fréquence de 28GHz, les attentes de la 5G nécessitent beaucoup plus de gain. Pour répondre à ceci, nous devons augmenter le gain total de l'antenne. Pour se faire nous passons dans ce dernier chapitre à la mise en réseau de quatre antennes, en utilisant l'antenne étoile proposé dans le deuxième chapitre. Dans ce contexte nous décrivons brièvement en premier lieu les techniques d'alimentation d'un réseau d'antennes imprimées, et nous présenterons une petite partie sur les diviseurs de puissance tout en justifiant le choix de la méthode utilisé dans notre travail. La partie qui suit présente la structure du réseau d'antenne proposée et les résultats des simulations réalisées sous le CST pour évaluer le réseau conçu.

III.2 Réseaux d'antennes :

III.2.1 Techniques d'alimentation d'un réseau d'antennes imprimées :

La synthèse d'un réseau consiste à trouver les bons coefficients de pondération en amplitude et/ou en phase qui permettent d'approcher au mieux le besoin. Pour cela, l'alimentation d'un réseau d'antennes s'effectue à travers un réseau d'alimentation qui assure la répartition d'énergie sur différentes antennes élémentaires [41].

Le réseau d'excitation peut avoir des architectures variées selon le besoin. Le principe de répartition d'énergie se fait par l'utilisation des lignes micro-rubans et des transformateurs d'impédances (quart d'ondes). Les déphaseurs dans le circuit d'alimentation peuvent être formés d'éléments supraconducteurs. Toutes les structures d'alimentations sont supposées uniformes de point de vue distribution de puissance (les patches doivent être alimentés avec la même puissance). Il faut prendre en considération que les signaux émis par les sources sont tous avec la même fréquence en fonction du temps [42].

Le circuit d'excitation peut prendre plusieurs architectures ; on distingue l'alimentation en série et l'alimentation en parallèle. Le choix de l'une ou de l'autre se fait en fonction de différents paramètres qui sont soit la loi de pondération souhaitée (en amplitude et ou en phase), soit la bande passante souhaitée.

III.2.1.1 Alimentation parallèle :

Dans l'alimentation en parallèle, le circuit d'alimentation possède une entrée et plusieurs sorties égales aux nombres des éléments rayonnants. La synthèse du réseau permet de déterminer les coefficients de pondération et les déphasages des signaux à affecter à chaque élément [43] comme montre la figure (III.1).

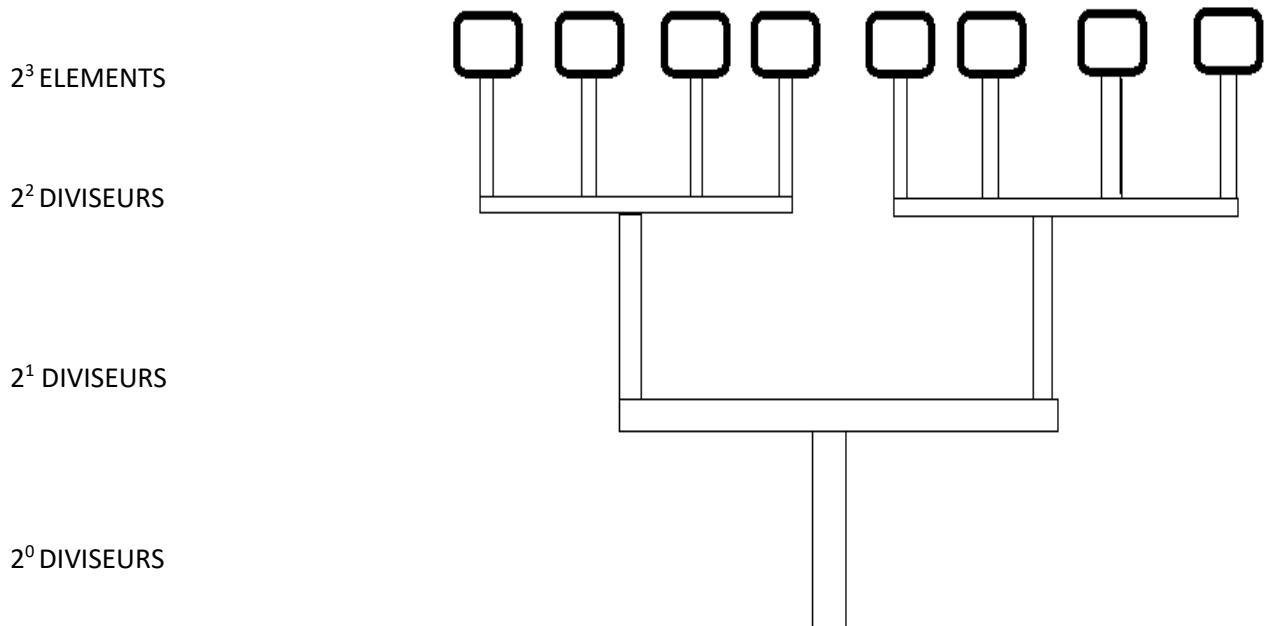


Figure III.1: Réseau linéaire avec une alimentation parallèle.

III.2.1.2 Alimentation en série :

Pour ce type d'alimentation, les éléments rayonnants sont excités en série à travers une ligne de transmission. Entre deux éléments rayonnants consécutifs il y a un déphaseur qui permet d'imposer la loi de phase appropriée [43] figure (III.2).



Figure III.2: Réseau linéaire avec une alimentation en série.

III.3 Diviseur de puissances :

III.3.1 Définition d'un diviseur de puissance :

Les diviseurs de puissance sont des composants passifs très utilisés dans le domaine des micro-ondes et RF. Ces diviseurs sont largement utilisés dans les réseaux d'antennes, les amplificateurs équilibrés, les mélangeurs, les multiplicateurs de fréquence, etc.... en tant que combineurs ou diviseurs de puissance. L'utilisation de ces diviseurs est pour assurer une alimentation d'un réseau d'antennes, un chemin doit être branché en utilisant un ou plusieurs diviseurs de puissance permettant de faire une jonction entre une entrée d'une seule voie avec la sortie de plusieurs voies.

Parmi les diviseurs les plus utiles dans les systèmes de communications sans fils, on peut citer :

- 1-Des réseaux à trois ports prennent la forme d'une jonction T.
- 2-Le diviseur résistif adapté.
- 3-Le diviseur de Wilkinson (WPD : Wilkinson Power Divider).
- 4-Diviseur Gysel (GPD: Gysel Power Divider).
- 5-Le diviseur de Bagley (BDP : Bagley Power Divider).
- 6-Le type de Diviseurs de puissance à N voies.

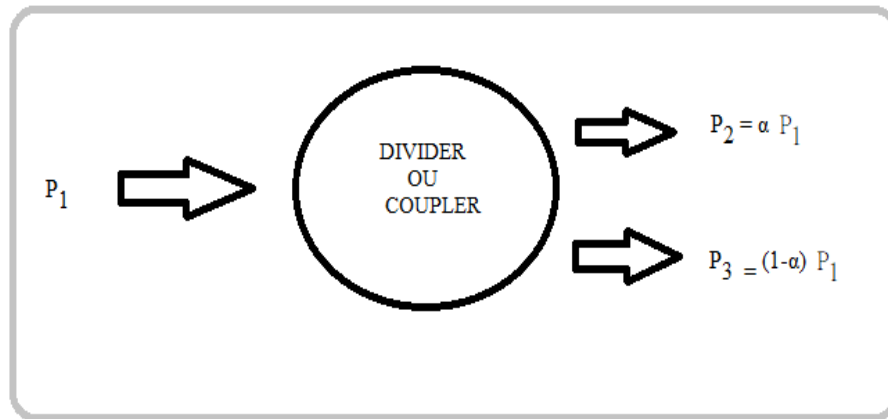


Figure III.3: Schéma d'un diviseur de puissance.

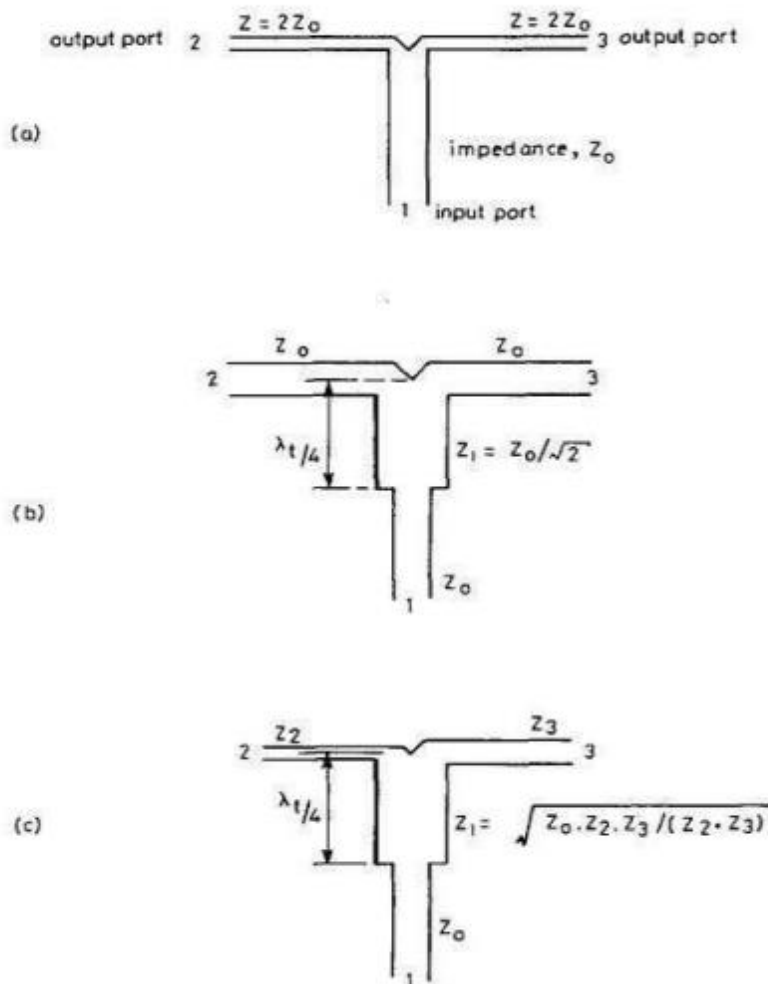


Figure III.4: Exemples sur la jonction T [44].

L'exemple montré dans la figure (III.4) (a) est le plus simple, car l'impédance d'entrée est adaptée, par contre, les impédances de sorties sont terminées avec la double valeur de l'impédance d'entrée. Dans ce cas, la valeur de l'impédance d'entrée est de 50 Q, alors que l'impédance de sortie aura la valeur de 100 Q. En ce qui concerne l'exemple de la figure (III.4) (b), tous les ports ont la même impédance de 50 Q.

- On ne peut pas adapter les trois ports au même temps.
- Aucune isolation entre les ports.

Pour notre travail, nous choisissons le diviseur de puissance de type jonction T parce que ce genre est facile à modéliser, à fabriquer, à calculer et à modifier et ainsi compatible avec la structure des réseaux d'antennes. Il donne la forme d'un arbre.

Cette jonction permet d'augmenter le mouvement du courant dans les coudes de celle-ci, qui engendre une consommation de ce courant dans le réseau, et qui permet aussi la division symétrique de la puissance d'entrée à l'extrémité des coudes pour la réflexion des ondes, les deux figures (III.5 et III.6) suivantes montrent la jonction de notre travail :

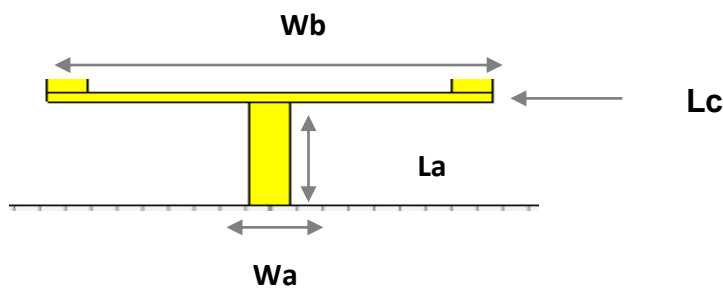


Figure III.5: Structure de jonction T d'alimentation.

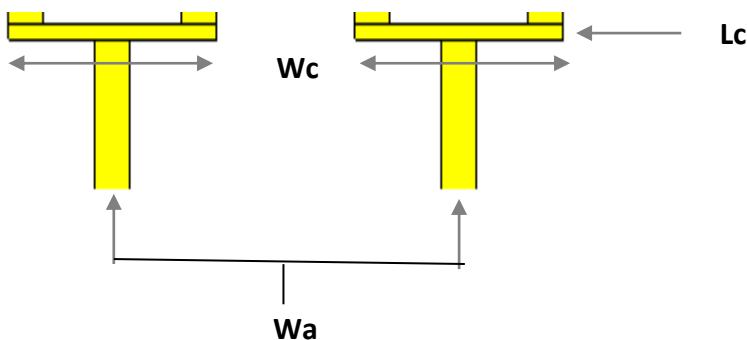


Figure III.6: La structure de jonction de la division reliée avec les antennes élémentaire

Avec :

W_b, W_c, W_b : Largeur des dimension de la jonction T ;

L_c, L_a : la hauteur des dimension de la jonction T .

III.3.2 Les paramètres de la jonction T :

Le tableau (III.1) présente les paramètres de la jonction T et leurs valeurs utilisés dans notre travail.

| Les paramètres | Wa | La | Wb | WC | Lc |
|----------------|-------|-----|--------|-------|--------|
| La valeur (mm) | 1,578 | 5,4 | 15,726 | 7,863 | 0,9124 |

Tableau III.1: Paramètres de la jonction T.

III.4 Résultats et discussions :

III.4.1 Structure de réseau d'antenne proposée :

Dans cette partie, nous allons nous focaliser sur l'étude de la conception d'un réseau d'antennes à quatre éléments afin de d'augmenter le gain avec une large couverture. L'antenne élémentaire utilisée dans ce réseau est notre antenne étoile conçue dans le deuxième chapitre. En ce qui suit, nous décrivons la structure du réseau proposé et nous validons ces performances à travers une série de simulations qui évaluent l'amélioration obtenue en termes de gain. Comme le montre la figure qui suit (figure III.7) la structure de réseau d'antennes à quatre éléments proposés.

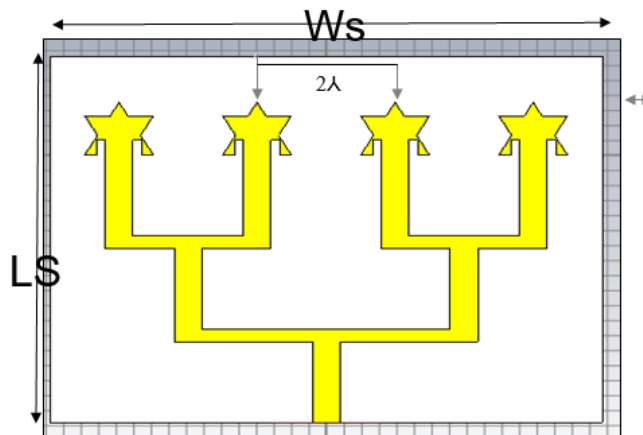


Figure III.7: Le réseau d'antenne proposé.

Le tableau (III.2) résume les valeurs des principaux paramètres suivis dans la conception de notre réseau d'antennes proposé :

| Les paramètres | 'Ws' (Largeur de substrat et de plan de masse) | 'Ls' (Longueur de substrat et de plan de masse) | 'Hs' (Épaisseur de substrat) | '2λ' (L'espace entre les 2 éléments du patch) |
|----------------|---|--|---------------------------------|--|
| La valeur (mm) | 31,452 | 24,4728 | 0,508 | 7,863 |

Tableau III.2: paramètres du réseau d'antennes de patch.

III.4.1.1 Coefficient de réflexion (S_{11}) :

Le résultat de la figure (III.8) représente le S_{11} (dB) en fonction de la fréquence indiquant la fréquence de résonance fondamentale de 27,968 GHz.

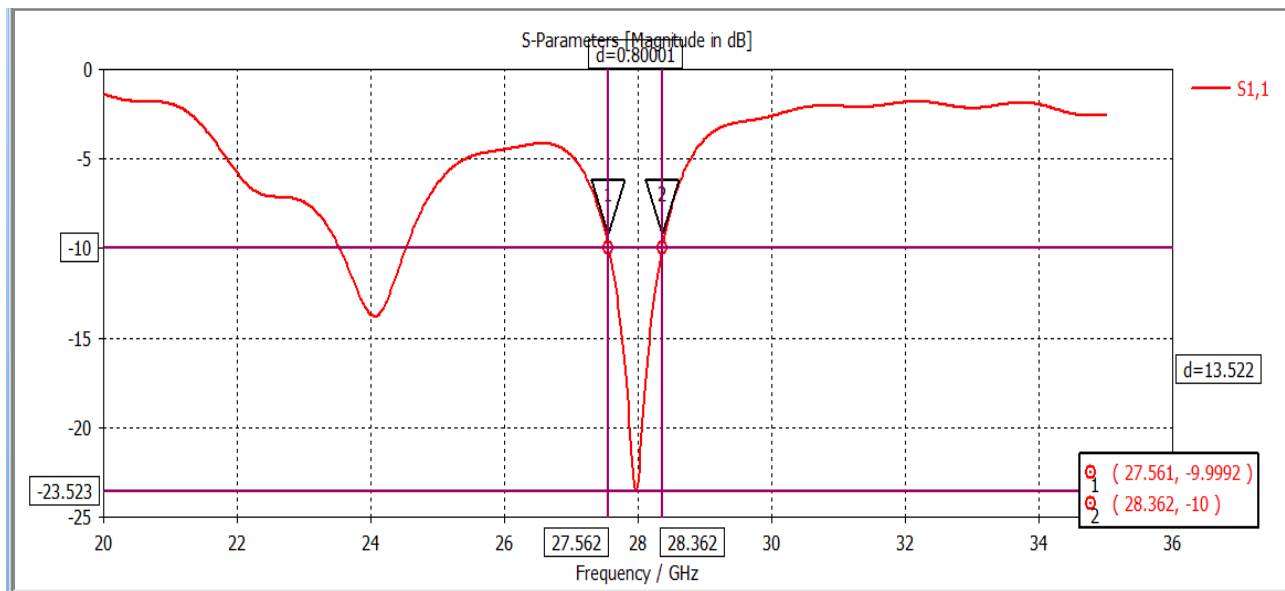


Figure III.8: S_{11} (dB) en fonction de la fréquence.

Nous remarquons que la largeur de la bande de notre antenne est de plus de 800 MHz à la fréquence 28 GHz qui appartient à l'intervalle [27,562-28,362]GHz.

III.4.1.2 L'impédance d'entrée :

La figure (III.9) montre la partie réelle de l'impédance d'entrée de notre réseau. Nous observons une bonne adaptation qui est autour de 50 ohms dans la bande opérationnelle.

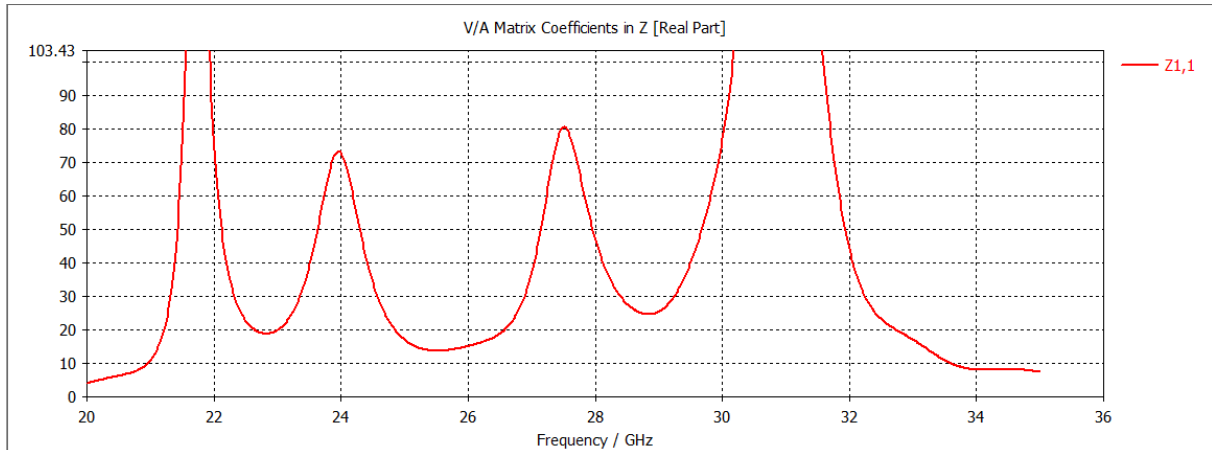


Figure III.9: Le résultat de l'impédance d'entrée.

III.4.1.3 Le taux d'onde stationnaire (VSWR) :

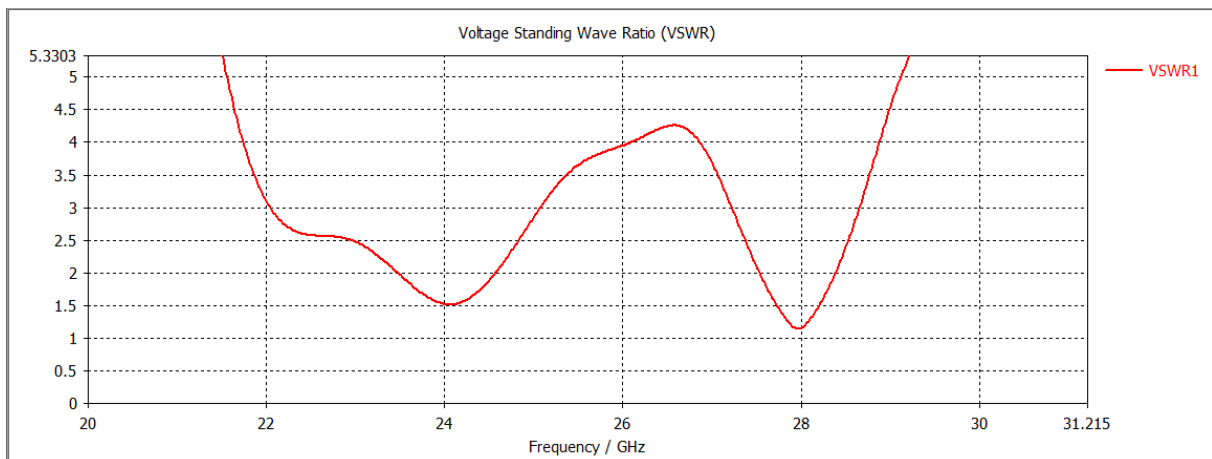


Figure III.10: Le VSWR en fonction de la fréquence.

Le rapport d'onde stationnaire (VSWR) de notre réseau est représenté dans la figure (III.10). Il est compris entre 1 et 2 dans toute la bande de fréquence souhaitée et ceci implique une bonne adaptation qui mène à un transfert maximal de la puissance entre l'alimentation et le reste du réseau.

III.4.1.4 Diagramme de rayonnement :

Nous observons dans la figure (III.11 et III.12) que la valeur maximale du gain et directivité sont localisés sur le plan Z dans le lobe du bas et légèrement dense dans les autres lobes.

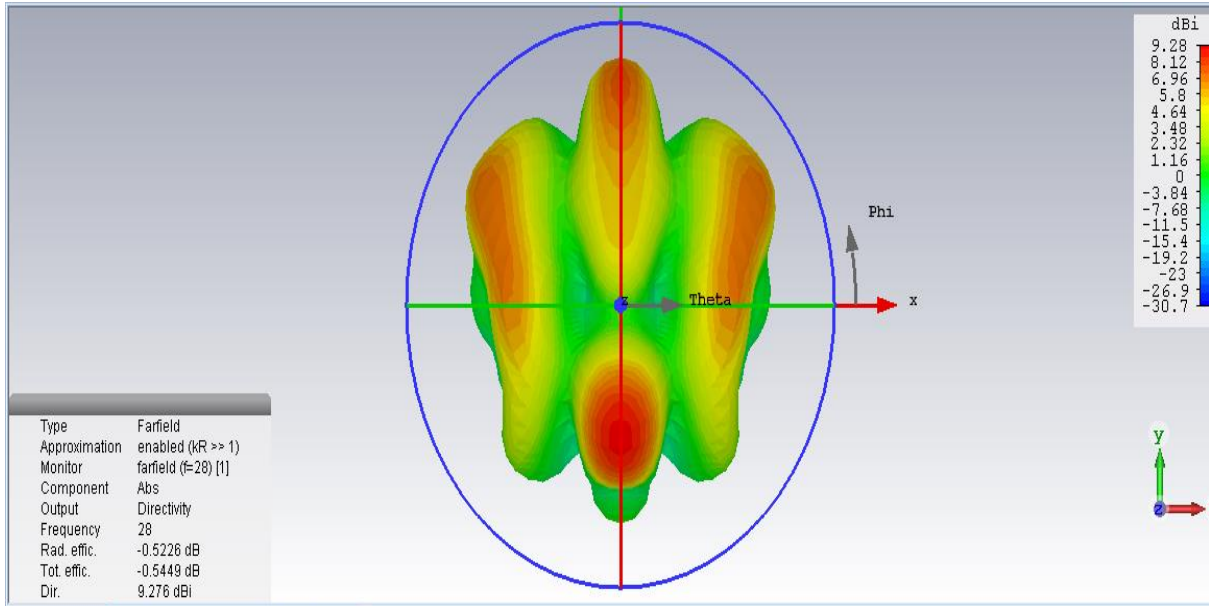


Figure III.11: Diagramme de rayonnement (directivité) de réseau d'antenne.

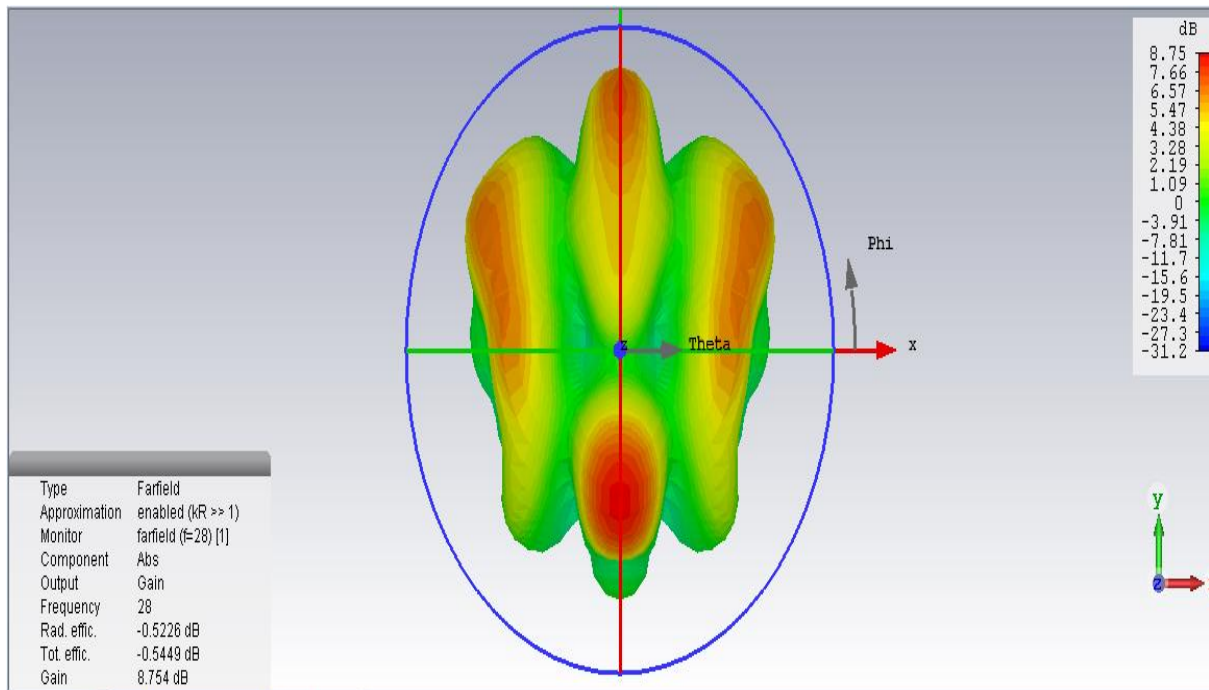


Figure III.12: Diagramme de rayonnement (Gain réalisé) de réseau d'antenne.

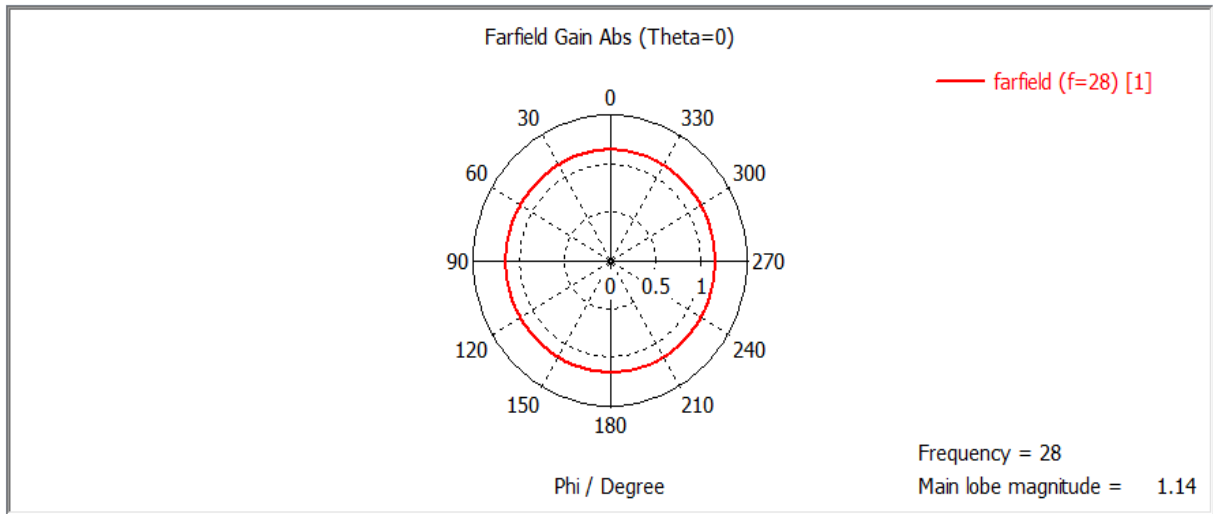


Figure III.13: Diagramme de rayonnement polaire de réseau l'antenne sur le plan H.

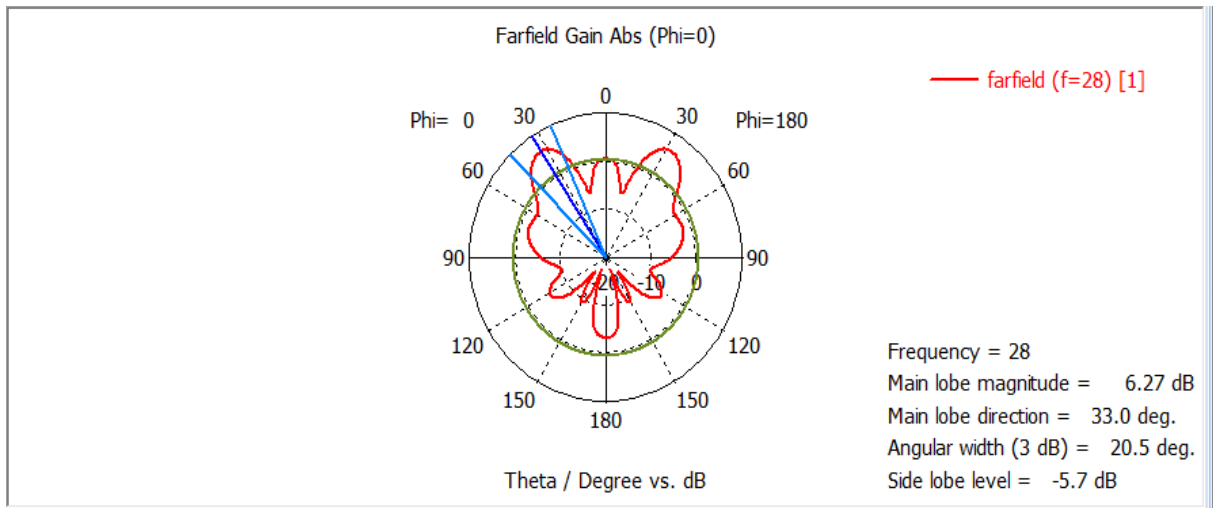


Figure III.14: Diagramme de rayonnement polaire de réseau l'antenne sur le plan E.

D'après les résultats de la figure (III.13 et III.14), nous observons que le diagramme de rayonnement polaire de l'antenne dans le plan H ($\varphi = 0^\circ$ la figure III.11) il est bien omnidirectionnel. Or sur le plan E ($\varphi = 90^\circ$ la figure III.12), nous remarquons qu'on trouve 4 lobes dont 2 lobes l'un vers $20,5^\circ$ et l'autre vers $-20,5^\circ$ qui dépassent 3dB, pour les 2 autres qui sont symétriques par rapport au centre, on constate que le lobe du haut arrive à la valeur 3dB par contre celui du bas est inférieur à 3dB.

III.4.1.6 Densité de courant :

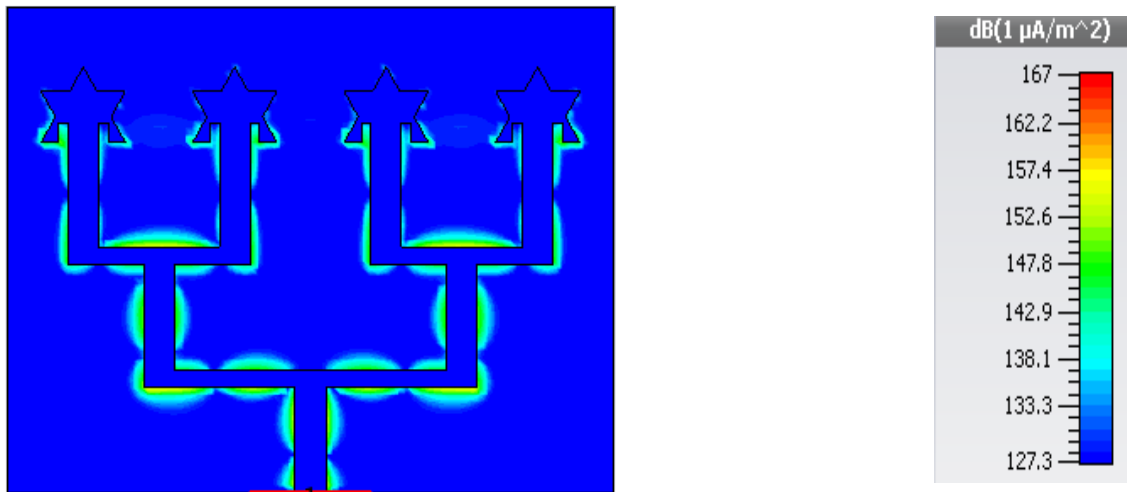


Figure III.15: Distribution de courant de surface du réseau d'antenne proposé.

Nous constatons que la distribution du courant du surface de ce réseau à la fréquence 28 GHz est bien centré au niveau des coudes des lignes des diviseurs de puissances ainsi que sur les encoches du patch et aussi sur le ventre de l'intersection qui relie les antennes alimentaires. Ces résultats sont symétriques par rapport au centre d'alimentation. Ce phénomène est bénéfique pour notre conception qui est compatible avec nos résultats.

Le tableau (III.3) présente les paramètres précédemment analysés du réseau d'antennes proposé pour la bande des 28 GHz.

D'après les résultats du tableau (III.3) ci-dessous, on constate que les paramétrés S11 de chapitre 2 sont différents par rapport à ceux obtenus dans le chapitre 3. Cependant, il reste toujours favorable ($S_{11} \leq -10\text{dB}$) dans la fréquence 28 GHz malgré le changement de cette dernière variée en même temps, le VSWR ($ROS \leq 2$) reste dans les normes de rapport d'onde stationnaire, et que la bande passante dépasse 800 MHz ce qui est conforme à la compatibilité dans les applications 5G. On peut remarquer dans la conception des quatre antennes que le diagramme de rayonnement est meilleur par rapport à celui d'une seule antenne. Finalement, nous déduisons alors une relation proportionnelle entre le gain et le nombre d'éléments, Autrement dit, plus le nombre des éléments est croissant automatiquement le gain augmente proportionnellement ce qui fait que le réseau devient plus directif et le faisceau de rayonnement se rétrécit.

| Paramètres | Valeur |
|---|--|
| Pertes de retour (S_{11}) | $S_{11} \text{ min} = -23,523 \text{ dB}$ |
| Directivité | 9,276dBi |
| Gain | 8,754dB |
| Bande passante (BW) | BW = 802 MHz à $S_{11} = -10 \text{ dB}$; [27,562-28,362] |
| Largeur de faisceau (AW) | AW=27,8° |
| Efficacité de rayonnement (η_{rad}) | $\eta_{\text{rad}} = -0,5226 \text{ dB}$ |
| Efficacité totale (η_{T}), 94% | $\eta_{\text{T}} = -0,5449$ |

Tableau III.3: Paramètres fondamentaux de réseau d'antennes proposé.

III.5 Comparaison des résultats :

Au cours des dernières années, des efforts importants ont été déployés sur la conception des réseaux d'antennes pour l'application 5G. Afin de valider les performances de notre réseau d'antennes, nous citons à titre comparatif le travail de recherche intitulé « 28 GHz Microstrip Patch Antennas for Future 5G » proposé par S.Johari et al [45]. Ce travail présente un modèle d'un réseau d'antennes destiné aux applications de la 5G ; le réseau est composé de quatre éléments (antennes) rectangulaires avec distribution uniforme, fonctionnant à une bande de fréquence de 400 MHz avec une fréquence centrale de 28 GHz. Le tableau III.4 récapitule les caractéristiques de notre réseau ainsi du travail cité.

Tableau III.4: Paramètres de comparaison.

| Paramètres | Nos résultats | Résultat de article[5] |
|--|--|--|
| Coefficient de réflexion S_{11} (dB) | -23,523 | -19,66 |
| Fréquence de résonance(GHz) | 27,965 | 27,905 |
| VSWR | < 2 | < 2 |
| Gain (dB) | 8,754 | 8,393 |
| Directivité (dB) | 9,276 | 10,13 |
| Dimensions (patch) (mm) | 31,452 x 24,9428 | 26,751 x 20,37 |
| Bande passante (Mhz) | 800 | 400 |
| Efficacité (η_T) | 94% | 82% |
| Substrat | ROGERS RT 5880 h=0,508 (ϵ_r) =2,2 | ROGERS <u>Ultralam</u> <u>@3850ht</u> h=2,9 (ϵ_r) =2,2 |

Comme nous pouvons le constater, le réseau d'antennes proposé par S.Johari et al possède des petites dimensions, mais au détriment d'une bande passante étroite tandis que notre conception peut atteindre un compromis satisfaisant entre la taille et la large bande passante tout en gardant un gain relativement élevé. D'autre part, notre réseau permet d'aboutir à une adaptation et une efficacité plus intéressante que celle du travail de référence qui assure une bonne qualité de transfert du signal et qui fait de notre réseau une bonne option pour les applications 5G qui nécessite à la fois une topologie simple avec un gain élevé.

III.6 Conclusion :

Ce chapitre avait pour objectif de déterminer une solution qui répondait à l'une des exigences de la 5G qui sera un gain plus élevé. Cette solution était la mise en réseau de quatre éléments à partir de l'antenne étoile présentée dans le deuxième chapitre. Les éléments du réseau est reliés entre elles par un diviseur de puissance en jonction T , la conception a été faite dans cette optique, en conséquence l'analyse des résultats montre une bonne adaptation au toure de 28GHz avec une amélioration du gain. Par ailleurs, la bande passante du patch réseau répond

aux applications 5G (28GHz), les résultats indiquent que le réseau a des bonnes performances en termes de taux d'ondes stationnaires, d'impédance d'entrée et d'efficacité à la fréquence 28 GHz. Enfin, l'étude comparative avec des travaux de recherche récents qui utilisent les mêmes paramètres de fréquence et de bande passante, confirme que notre conception est acceptable pour des applications 5G.

Conclusion générale

Conclusion Générale

Porté par un intérêt accru envers la cinquième génération (5G) en tant que technologie prometteuse pour les télécommunications mobile, la communauté scientifique cherche toujours à atteindre des meilleures performances. Cependant, garantir une bonne qualité tout en alliant les limitations de complexité, temps de latence, cout, gain ...etc, reste un défi qui occupe les chercheurs. Dans le premier chapitre de ce mémoire, les généralités sur la 5G avec ses technologies clés ont été présentées d'une manière générale afin de se familiariser avec le concept de base de ces notions. Nous avons ensuite présenté les antennes imprimées et les réseaux d'antennes étant donné qu'ils constituent une bonne solution qui a pu améliorer les performances du système.

L'objectif de ce travail était d'élaborer un système multi antennaire pour une application 5G dans la bande des ondes millimétriques. Nous avons dans un premier temps mis l'accent sur la conception de l'antenne élémentaire qui va former notre réseau. Évidemment, l'antenne doit assurer de meilleures performances dans la bande désirée et qui est autour de la fréquence 28 GHz. Notre choix s'est penché vers une antenne imprimée grâce à ses nombreux avantages en particulier ses faibles dimensions qui permettent son intégration aisée dans un réseau. Notre conception a commencé par une antenne triangulaire de base et afin d'améliorer sa bande passante étroite à l'origine, nous avons lui mené des études paramétriques et certaines modifications aboutissant à une bande de 800 MHz à la fréquence centrale de 28 GHz. Ainsi, notre antenne finale a une forme d'étoile et les résultats de simulations montrent que les performances de notre antenne répondent aux exigences désirées en termes de coefficient de réflexion, adaptation, gain, diagramme de rayonnement et efficacité.

L'utilisation des réseaux d'antennes améliore la qualité de transmission et permet d'augmenter le gain et large bande passante et ainsi augmentation le débit. Toutefois, le défi réside dans la conception de l'alimentation de ces antennes, leurs nombres et leur emplacement dans le réseau. Le but donc est de concevoir un réseau compact, simple, à faible cout et à un gain élevé. Dans le troisième chapitre de ce mémoire, nous avons brièvement présenté les techniques d'alimentation des réseaux d'antennes phasés avant d'entamer sa conception. Puis, nous avons fait le choix sur le type d'alimentation de la jonction en T grâce à sa simplicité de conception. Le réseau conçu comporte quatre antennes étoile (conçue dans le chapitre 2) alimenté par trois ponts de jonction T. Les résultats de simulations ont permis de montrer que

de notre réseau constitue un bon choix pour les applications en 5G en leur comparant avec d'autres existant dans la littérature où nous avons constaté qu'avec le même nombre d'antennes, nous avons pu atteindre une efficacité, bande passante et gain élevés.

Références

- [1] A. J. Paulraj; D. A. Gore; R. U. Nabar and H. Bölcskei . «An Overview of MIMO Communications-A Key to Gigabit wireless». PROCEEDINGS OF THE IEEE, VOL. 92, NO. 2, Février 2004.
- [2] Edward M. Roche, Benjamin H. Dickens-Jr. Walker Townes. « La prochaine génération de téléphonie mobile (5G) et ses implications (Infrastructure, Réglementation) », Netcom, 32-1/2 | 2018, 139-162.
- [3] Olivier Ezratty . «Opinions Libres» <https://www.oezratty.net>,20 février 2018.
- [4] François MAGNE. «Télécommunications haut débit en ondes millimétriques»,10 mai 1998.
- [5] T. Nakamura, S. Nagata, A. Benjebbour, Y. Kishiyama, T. Hai, S. Xiaodong, Y. Ning et L. Nan, «Trends in small cell enhancements in LTE advanced», IEEE Communications Magazine, vol. 51, no. 2, pp. 98-105, 2013.
- [6] Shahram ShahbazPanahi, Yindi Jing, in Academic Press Library in Signal Processing, Volume 7, 2018
- [7] Mahmood, Nurul Huda; Gatnau, Marta; Berardinelli, Gilberto. Mogensen, Preben Elgaard. « Full Duplex Communications in 5G Small Cells». International Wireless Communications and Mobile Computing Conference. pp. 1665-1670.2017.
- [8] G. J. Foschini and M. J. Gans, « On limits of wireless communications in a fading environment when using multiple antennas ». Wireless Personal Communications, vol. 6, no. 3, pp. 311–335, 1998
- [9] C. YANNICK, «Etude paramétrique avancée de canaux SISO et MIMO en environnements complexes : Application au système HiperLAN/2 ». Thèse de Doctorat, l'ENST de Bretagne, Décembre 2005.
- [10] ZERROUKI HADJ « cross-layer design et accés multiple dans les réseaux sans fil mimo: application au réseau WIMAX».THESE DE DOCTORAT EN SIENCE Université de Tlemcen, juillet 2013.
- [11] Ilham OUACHANI «Analyse de performance de systems de communication sans fils exploitant micro et macro diversité», UNIVERSITE DE PARIS-SUD U.F.R. SCIENTIFIQUE D'ORSAY,28 juin 2005.
- [12] N. Hassan, X. Fernando « Massive MIMO Wireless Networks: An Overview Electronics» 2017, 6, 63; 5 September 2017.
- [13]HAJRI, Salah Eddine. (Thèse de doctorat 2018). « L'amélioration des performances de systèmes sans fil 5G par groupements adaptatifs des utilisateurs». Université Paris-Saclay.
- [14] Adrien GAILLARD. « Évolution du Massive-MIMO». 17 avr, 2018 [Enligne]. https://blog.netxp.fr/evolution-du-massive-mimo/?fbclid=IwAR2sgaCY4EEXgml-sNqUeq1Rj2aW5n4axVoACG3Mw6a_DnMwuLzr2z22jJo.
- [15] DACI Kaoutar. DOU Warda. «Etude de massive MIMO pour 5G».Thème mémoire, Faculté des Sciences Et De La Technologie,Universit Echahid Hamma Lakhdar El-Oued é.2018.

- [16] Rozé, Antoine. «Massive MIMO, une approche angulaire pour les futurs systèmes multi-utilisateurs aux longueurs d'onde millimétriques». Diss. INSA de Rennes, 2016.
- [17] Benosman. Radia ,Sidhoum. Amel. «Etudes et simulation des performances des systèmes MIMO en configurations STBC et V-BLAST». Diss. 2013.
- [18] Bendimerad. FT, Hadj.AL, Debbat. F, Djennas. SA, Benamar .A, Bahri. SM. «MIMO et Accès Multiples Avancés pour Réseaux Sans Fil». Laboratoire de Télécommunications de Tlemcen (LTT), Université Abou-Bekr Belkaid – Tlemcen. Nov 2013.
- [19] Xavier BEGAUD. «Conception d'antennes – Fondamentaux», 10 nov. 2015.
- [20] Ulaby, F.T, «Fundamentals of Applied Electromagnetic» Prentice Hall, 1999.
- [21] S. Tebache .« Méthode De Caractérisation Hyperfréquence Des Antennes Imprimées » Magister, Faculté des Sciences Et De La Technologie, Université Mohamed Khider, Biskra 2013.
- [22] A. Boyer « Antennes, Support De Cours Enonce De Travaux Dirigés » Institut National Des Sciences Appliquées De Toulouse.
- [23] Keit.R.Caver and James.W.Mink , «Microstrip antenna Technology», IEEE.1981.
- [24] Stalling, D, Zockler, M; Hege, H-C: «Fast display of illuminated field lines "Visualization and computer Graphics », IEEE transaction on .Vol.3, Issue2, pp.118-128, June 1997.
- [25] D. Ameziane « Etude Et Optimisation D'antennes Fractales Plaquées » Mémoire de Magister, Université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen 2008.
- [26] M, Gujral, J.L.W, Li,T, Yuan, and CW.Qiu, « Bandwidth improvement of microstrip antenna array using dummy ebg pattern on feed line» national university of singapore, progress in electromagnetic research, Vol.127, pp.79-92, 2012.
- [27] Dr.BOUKERROUM Fayçal. «Propagation d'ondes et Antennes».Thème mémoire ,Faculté des Sciences Et De La Technologie, Université Mohamed Seddik Benyahia de Jijel,2016.
- [28] Site web; <http://www.Wikipédia.org>.
- [29] O. Picon, Coll les antennes, Théorie, « conception et application l'usine du nouvelle», Dunod, 2009.
- [30] J. H. Visser .« Array And Phased Array Antenna Basics » Antenna Engineer. The Netherlands 2005.
- [31] J. Dauvignac, N. fortino, S. Tourette, G. Kassias, P. Ciais. « Miniaturisation Des Antennes UWB Planaires » Université De Nice-Sophia Antipolis. 25 OCT 2006.
- [32] Oussoukine.Amel, Rayeh. Narimane. «MIMO Beamforming Multi Utilisateur». L'Université De Tlemcen Faculté De Technologie Département De Telecommunication. Mai 2016.
- [33] N. Nora, «Etude et simulation de diagramme de rayonnement de l'antenne intelligente », thèse de doctorat, université de Blida, édition 2007.
- [34] W.SAMATI «optimisation d'un réseaux d'antenne » thèse d'ingénieur, université de Blida, édition 2010.

- [35] L Douchet, M Sauzeix, S Tisserant, « Electronique MP», 2007.
- [36] A.Balanis . « Antenna Theory Analysis And Design » Arizona State University Tempe,AZ. 2005.
- [37] P. Arunagiri, C.N. Kumar, K. Adhavan. IJRASET, 4, IV:88–92 (2016). **Error! Hyperlink reference not valid.**
- [38] P.S. Nakar. «Design of a compact microstrip patch antenna for use in wireless cellular devices». [Thesis]. Florida State University, Florida, USA (2004). p. 51 <http://diginole.lib.fsu.edu/islandora/object/fsu:181039/datastream/PDF/view>. page 51.
- [39] Par fouedbenamrane. « Conception d'une antenne patch microstrip ».mémoire online, uneversité sidi mohamed ben abedellah (Fès) maroc.2011.
- [40] J. H. Visser. « Array And Phased Array Antenna Basics » Antenna Engineer. The Netherlands 2005.
- [41] Mr. GUELLIL Nasser. « Etude et conception d'un réseau d'antennes beamforming à base de la matrice de Butler en utilisant ADS Momentum ». Thème mémoire, Faculté De Technologie, UNIVERSITE FERHAT ABBAS –SETIF 1- UFAS (ALGERIE).
- [42] BARKAT OUARDA. « Etude et Synthèse des Caractéristiques de Réseaux d'antennes Imprimées Supraconductrices dans la Bande Millimétrique ».Thèse doctorat, Faculté des Sciences de l'Ingénieur, UNIVERSITE MENTOURI – CONSTANTINE,2009.
- [43] TITTAFI Abdelhadi, MOULAY Saïd . « Etude et conception d'un diviseur de puissance bi-bande à quatre ports ».Thème mémoire académique, UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA,2018.
- [44] HAMID HORFI . «Conception d'un nouveau système d'antenne réseau conforme en onde millimétrique ».
- [45] 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

Les réseaux d'antennes ont suscité ces dernières années un très grand intérêt auprès des chercheurs dans le monde de télécommunications surtout pour les applications 5G. La course de cette technologie est motivée par des exigences d'intégrations d'antennes intelligentes de l'architecture des terminaux mobiles, ces réseaux sont utilisés à titre d'exemple de technologie des MIMO massives vu leurs conformités dans la bande millimétrique.

Ce travail s'inscrit dans ce contexte, avec l'objectif principal qui consiste à concevoir et à simulé un petit réseau d'antennes travaillant dans les bandes de fréquences millimétriques des 28GhZ pour une application 5G, les résultats obtenus ont été sujet à une comparaison avec un travail récents dans ce domaine pour évaluer les performances du réseau proposé.

Mots clés : réseaux d'antenne, 5G, MIMO Massive.

Abstract

The antenna networks have aroused great interest in recent years among researchers in the telecommunications world, especially for 5G applications. The race for this technology is motivated by requirements for integration of intelligent antennas into the architecture of mobile terminals, these networks are used as an example of massive MIMO technology given their conformities in the millimeter band.

This work is part of this context, with a main objective which consists of designing and simulating a small array of antennas working in the millimeter frequency bands of 28GhZ for a 5G application, the results obtained were subject to a compared with recent work in this area to assess the performance of the proposed network.

Key words : antenna networks, 5G, MIMO Massive.

ملخص

لقد أثارت شبكات الهوائي اهتمامًا كبيرًا في السنوات الأخيرة بين الباحثين في عالم الاتصالات ، خاصة لتطبيقات 5G. السباق لهذه التكنولوجيا مدفوع بمتطلبات دمج الهوائيات الذكية في بنية المطاريف المتنقلة ، تُستخدم هذه الشبكات كمثال لتكنولوجيا MIMO الضخمة نظرًا لمطابقتها في النطاق المليمتر .

هذا العمل هو جزء من هذا السياق ، مع هدف رئيسي يتمثل في تصميم ومحاكاة مجموعة صغيرة من الهوائيات التي تعمل في نطاقات التردد المليمترية من 28 جيجا هرتز لتطبيق 5G ، وكانت النتائج التي تم الحصول عليها تخضع ل مقارنة بالأعمال الحديثة في هذا المجال لتقييم أداء الشبكة المقترحة.

كلمات مفتاحية : شبكة الهوائي, 5G, تقنية MIMO.