

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة أبي بكر بلقايد تلمسان
Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen – Faculté de TECHNOLOGIE



Présenté pour l'obtention du diplôme de MASTER en : Télécommunication

Spécialité : Réseaux et télécommunication

Par : BENTOUATI Aya Khadidja et BOUBLENZ A Rokia Nassima

Sujet

Etude et conception d'antennes MIMO pour les systèmes de communication 5G

Soutenu publiquement, le 23/06/2022, devant le jury composé de :

Mr. FT. BENDIMERAD

PR Univ. Tlemcen

Président

Mme. Y. BELHADEF

MCA Univ. Tlemcen

Examinatrice

Mr.M. BOUSAHLA

MCB Univ. Tlemcen

Encadreur

Année universitaire : 2021-2022

Remerciements

Nous tenons avant tout à remercier ALLAH tout puissant de nous avoir donné la force et la volonté pour achever ce modeste travail.

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

*Nos vifs remerciements accompagnés de toute la gratitude, vont tout d'abord à notre encadrant **Ms.BOUSAHLA Miloud** pour nous avoir proposé ce sujet et dirigé notre travail et aussi sa disponibilité.*

*Nous saisissons également cette opportunité pour remercier **Ms.BENDIMERAD FT** professeur à l'université de Tlemcen pour avoir accepté de présider le jury*

*Nous adressons nos remerciements à **M^{me} BELHADEF Y** d'avoir accepté de faire partie du jury d'évaluation de notre travail de fin d'étude.*

Enfin, à tous ceux qui nous ont encouragés de près ou de loin pour la réalisation de ce projet de fin d'étude.

Merci...

Dédicace

Je dédie ce travail en premier lieu à mes chers parents BACHIR et FATIMA, à ma grand-mère KHEIRA qui je ne remercierai jamais assez pour tous ce qu'ils ont fait pour moi et sans eux je ne serai pas arrivée là où j'en suis aujourd'hui.

A mon frère SIDOU, mes sœurs BOUCHRA et RAYHAN.

Mon binôme ROKIA, avec qui j'ai partagée de merveilleux moments. A tous mes amis, tous ceux qui m'ont soutenu, Aux familles

BENTOUATI, MERSALI

AYA

Dédicace

Je dédie ce travail à :

A mon père, ma première école dans la vie, mon exemple de courage et de sacrifice continue.

A ma mère, qui m'a toujours poussée d'aller de l'avant avec ses prières.

Aucune dédicace ne pourra compenser les sacrifices de mes parents.

A mes sœurs, ABLA, ZINEB, TEMA, HAFSA et DJENNAT pour leurs amours.

A mes beaux-frères et mes neveux qui m'ont accompagnée de leurs amours.

A mes amies de toujours ASSIA, KARIMA, HAYET, NIHED et DJAHIDA.

A Mon binôme AYA avec qui j'ai pu réaliser ce modeste travail.

A tous mes amis qui me donnent l'envie d'aller plus loin.

ROKIA

Résumé

Le but de ce travail est l'étude, la simulation et la conception d'antennes MIMO pour les applications 5G.

En utilisant le logiciel CST, nous avons étudié et conçu une antenne tri-bandes fonctionnant aux fréquences 1.8, 3.5 et 6 GHz et possédant de bonnes performances tels que le coefficient de réflexion, le diagramme de rayonnement, le gain et le rapport d'ondes stationnaires. Ensuite nous avons conçu une antenne MIMO à deux ensuite à six éléments. Enfin, en insérant des diodes PIN nous avons conçu une antenne reconfigurable capable de s'adapter à des conditions changeantes en ajustant ses fréquences de fonctionnement pour plusieurs applications.

Mots clés : Antenne MIMO, 5G, Conception, Système de communication sans fil.

Abstract

The aim of this work is the study, simulation and design of MIMO antennas for 5G applications.

Using CST software, we studied and designed a tri-band antenna operating at 1.8, 3.5 and 6 GHz with good performances such as reflection coefficient, radiation pattern, gain and standing wave ratio. Then we designed a two and then a six element MIMO antenna. Finally, by inserting PIN diodes we designed a reconfigurable antenna capable of adapting to changing conditions by adjusting its operating frequencies for several applications.

Keywords : MIMO antenna, 5G, Design, Wireless communication system.

ملخص

الغرض من هذا العمل هو دراسة و محاكاة و تصميم هوائيات MIMO لتطبيقات 5G باستخدام برنامج CST، قمنا بدراسة و تصميم هوائي ثلاثي النطاق يعمل على ترددات 1.8, 3.5, 6 و جيجا هرتز و له أداء جيد مثل معامل انعكاس و مخطط اشعاع و الكسب و نسبة الموجة الدائمة.

ثم قمنا بتصميم هوائي MIMO مكون من عنصرين ثم من ستة عناصر.

أخيرا عن طريق ادخال صمامات PIN الثنائية، قمنا بتصميم هوائي قابل لإعادة التشكيل قادر على التكيف مع الظروف المعبرة عن ضبط ترددات التشغيل الخاصة به للعديد من التطبيقات.

الكلمات الرئيسية: هوائي، 5G MIMO، تصميم، نظام اتصال لاسلكي.

Table des matières

Liste des figures	VIII
Liste des Tableaux	XI
Liste des abréviations	XII
Introduction générale	1
Chapitre I : Généralité sur la technologie 5G	3
I.1. Introduction :	4
I.2. Historique :	4
I.2.1. La 5ème génération :	5
I.2.2. Objectifs et principe de la 5G :	5
I.2.3. Architecture du réseau 5G et ses services :	5
I.2.4. Fréquences utilisées pour la 5G :	7
I.2.5. Technologie utilisée pour la 5G :	8
I.2.5.1. Les ondes millimétriques :	8
I.2.5.2. Petites cellules (Small cels) :	9
I.2.5.3. Formation de faisceaux (Beamforming) :	9
I.3. La technologie Massive MIMO :	11
I.3.1. Les techniques MIMO :	11
I.3.2. Le Massive MIMO :	11
I.3.2.1. Les avantages des systèmes des massives MIMO :	12
I.4. Full duplex :	12
I.5. Conclusion :	13
Chapitre II : Les antennes imprimées	14
II.1 Introduction :	15
II.2 Définition :	15
II.3 Description d'une antenne micro ruban :	15
II.3.1 Forme des antennes imprimées :	15
II.3.1.1 Critères de choix du substrat :	16
II.4 Paramètres caractéristiques du rayonnement d'une antenne imprimée :	16

II.4.1 Coefficient de réflexion(S11) :	16
II.4.2 Diagramme de rayonnement :	17
II.4.3 Gain :	18
II.4.4 Directivité :	18
II.4.5 Impédance d'entrée :	18
II.4.6 Bande passante (BP) :	19
II.5 Techniques d'alimentation des antennes patch :	19
II.5.1 Alimentation par ligne par microruban :	20
II.5.2 Alimentation par sonde coaxiale :	20
II.5.3 Alimentation couplée par ouverture :	21
II.6 Techniques d'adaptation des antennes patch :	21
II.6.1 Adaptation par ligne quart d'onde :	21
II.6.2 Adaptation par stub :	22
II.6.3 Adaptation avec encoches :	22
II.7 Réseau d'antennes imprimées :	22
II.8 Les antennes reconfigurables :	24
II.8.1 Définition :	24
II.8.2 Techniques de reconfigurabilité :	24
II.8.3 Antennes reconfigurables en fréquence :	25
II.9 Conclusion :	25
Chapitre III : Etude et conception d'antenne MIMO pour les systèmes de communications 5G.....	26
III.1 Introduction :	27
III.2 Outils de simulation :	27
III.3 Conception d'antennes pour la 5G :	28
III.3.1 Cahier de charge :	28
III.4 Antennes initiales :	28
III.4.1.1 Adaptation de l'antenne initiale :	29
III.4.2 Performance de l'antenne initiale optimisée :	30

III.4.2.1 Coefficient de réflexion :	30
III.4.2.2 Rapport d'onde stationnaire (VSWR) :	31
III.4.2.3 Diagramme de rayonnement et de Gain :	31
III.4.2.4 L'efficacité :	35
III.4.2.5 Densité de courant :	35
III.5 Antenne proposée :	36
III.5.1 Etape de conception :	36
➤ Variation du paramètre b de la fente rhombique	37
➤ Variation du paramètre (a) de la fente triangulaire	38
III.5.2 Performances de l'antenne proposée :	39
III.5.3 Rapport d'onde stationnaire (VSWR) :	40
III.5.4 Diagramme de rayonnement et le Gain :	40
III.5.5 L'efficacité :	42
III.6 Antennes MIMO à deux éléments 2x1 :	42
III.6.1 Coefficient de réflexion (S11) :	43
III.6.2 Rapport d'onde stationnaire (VSWR) :	44
III.6.3 Diagramme de rayonnement et le Gain :	44
III.6.4 Densité de courant :	46
III.7 Antennes MIMO à six éléments 6x1 :	47
III.7.1 Coefficient de réflexion (S11) :	47
III.7.2 Rapport d'onde stationnaire (VSWR) :	48
III.7.3 Diagramme de rayonnement et le Gain :	48
III.8 Comparaison des résultats obtenus :	51
III.9 Conception d'une antenne reconfigurable en fréquence :	52
III.9.1 Antenne reconfigurable proposée :	52
III.9.2 Résultats et simulation :	54
III.10 Conclusion :	58

Liste des figures

Figure I-1 : Architecture du réseau 5G [8].....	6
Figure I-2:Architecture fonctionnelle du réseau 5G.	7
Figure I-3 : Fréquence utilisées pour la 5G.....	8
Figure I-4 : Petites cellules.....	9
Figure I-5 : Accès au terminal par un 1er faisceau de signalisation puis formation du faisceau dédié à l'UE (User Equipment).....	10
Figure I-6 : Formation de faisceaux MIMO. Source : National Instruments (10).	10
Figure I-7 : Schémas représentatifs du SISO, MISO, SIMO et MIMO.....	11
Figure I-8 : Illustration de MIMO massive.....	12
Figure II-1 : Structure d'une antenne imprimée [21].....	15
Figure II-2 : Différentes formes d'antennes patch.....	16
Figure II-3 : Diagramme en coordonnées polaires.....	17
Figure II-4 : Diagramme en coordonnées cartésiennes.....	17
Figure II-5 : Coefficient de réflexion d'une antenne et sa bande de fonctionnement [26].....	19
Figure II-6: Alimantation par ligne microruban.....	20
Figure II-7: Alimantation par sonde coaxiale	20
Figure II-8: Alimantation couplée par ouverture	21
Figure II-9: a : Modélisation de l'antenne b : adaptation par ligne quart d'onde	21
Figure II-10: a : Modélisation de l'antenne à Adaptation simple stub. b : Stub en circuit ouvert	22
Figure II-11: a : L'équivalence en circuit. b : Patch adapté par encoches.....	22
Figure II-12: a : Géométrie d'un réseau d'antennes patch 4x3 b : Réseau d'antennes patch 4x4 (extrait de [33])	23
Figure II-13: techniques de reconfigurabilité.....	24
Figure III-1: Structure initiale de l'antenne simulée.....	28
Figure III-2: Coefficient de réflexion de l'antenne simulée.....	29
Figure III-3: Antenne avec encoche.....	29
Figure III-4:Coefficient de réflexion de l'antenne avec encoches.....	30
Figure III-10: Diagramme de rayonnement en 2D de l'antenne initiale optimisée à la fréquence 3.5GHz.....	35
Figure III-11:Densité de courant surfacique du patch.....	35
Figure III-12: Géométrie de l'antenne tri-bandes proposée.....	36
Figure III-13:Insertion de fente rhombique.....	37

Figure III-14: Coefficient de réflexion de l'antenne avec fente rhombique.	37
Figure III-15: Coefficient de réflexion en variant le paramètre (b) de la fente rhombique.	37
Figure III-16: Insertion de fente triangulaire.	38
Figure III-17: Coefficient de réflexion en variant le paramètre (a) de la fente triangulaire.	38
Figure III-18: Coefficient de réflexion de l'antenne proposée.	39
Figure III-20: Diagramme de rayonnement 3D de l'antenne proposée à la fréquence 1.8GHz.	40
Figure III-21: Diagramme de rayonnement 2D ($\phi=90$) de l'antenne proposée.	41
Figure III-22: Diagramme de rayonnement 3D de l'antenne proposée à la fréquence 3.5GHz.	41
Figure III-23: Diagramme de rayonnement 2D ($\phi=90$) de l'antenne proposée à la fréquence 3.5GHz.	41
Figure III-24: Diagramme de rayonnement 3D de l'antenne proposée à la fréquence 6GHz.	42
Figure III-25: Diagramme de rayonnement 2D ($\phi=90$) de l'antenne proposée à la fréquence 6GHz.	42
Figure III-26: Géométrie de l'antenne MIMO à deux éléments et sa structure sous CST Microwave studio.	43
Figure III-27: Coefficient de réflexion en fonction de la fréquence.	43
Figure III-30: Diagramme de rayonnement 2D de l'antenne MIMO dans le plan E à la fréquence 1.8GHz.	45
Figure III-31: Diagramme de rayonnement 3D de l'antenne MIMO à la fréquence 3.5GHz.	45
Figure III-32: Diagramme de rayonnement 2D de l'antenne MIMO dans le plan E à la fréquence 3.5GHz.	46
Figure III-33: Diagramme de rayonnement 3D de l'antenne MIMO à la fréquence 6GHz.	46
Figure III-34: Diagramme de rayonnement 2D de l'antenne MIMO dans le plan E à la fréquence 6GHz.	46
Figure III-35: Distribution de courant surfacique de l'antenne MIMO à deux éléments.	47
Figure III-36: Géométrie d'antenne MIMO à six éléments et sa structure sous CST Microwave studio.	47
Figure III-37: Coefficient de réflexion en fonction de la fréquence.	48
Figure III-40: Diagramme de rayonnement 2D de l'antenne MIMO à six éléments à la fréquence 1.8GHz.	49
Figure III-41: Diagramme de rayonnement 3D de l'antenne MIMO à six éléments à la fréquence 3.5 GHz.	50
Figure III-42: Diagramme de rayonnement 2D de l'antenne MIMO à six éléments à la fréquence 3.5 GHz.	50

Figure III-43:Diagramme de rayonnement 3D de l'antenne MIMO à six éléments à la fréquence 6 GHz.....	51
Figure III-44: Diagramme de rayonnement 2D de l'antenne MIMO à six éléments à la fréquence 6 GHz.....	51
Figure III-45:Antenne reconfigurable proposée	53
Figure III-46:La structure de l'antenne correspondante à l'état OFF-OFF.....	54
Figure III-47: L'évolution de coefficient de réflexion pour l'état OFF-OFF.	55
Figure III-50: La structure de l'antenne correspondante à l'état OFF-ON.....	56
Figure III-51: La représentation du coefficient de réflexion pour l'état OFF-ON.....	57
Figure III-52: La structure de l'antenne correspondante à l'état ON-OFF.....	57
Figure III-53:La représentation du coefficient de réflexion pour l'état ON-OFF.....	58

Liste des Tableaux

Tableau I-1 : Comparaisons entre les caractéristiques des générations mobile.	5
Tableau I-2 : Description des fonctions du réseau 5G	7
Tableau III-1: Paramètres géométriques de l'antenne simulée.	29
Tableau III-2: Paramètres géométriques de l'antenne optimisée.	30
Tableau III-3: Dimensions géométriques de l'antenne proposée.	39
Tableau III-4: Paramètres d'antennes MIMO.	43
Tableau III-5: Paramètres de l'antenne MIMO à six éléments.	47
Tableau III-6: Comparaison des résultats d'antennes MIMO proposées à la fréquence 1.8 GHz.....	51
Tableau III-7: Comparaison des résultats d'antennes MIMO proposées à la fréquence 3.5 GHz.....	52
Tableau III-8: Comparaison des résultats d'antennes MIMO proposées à la fréquence 6 GHz.....	52
Tableau III-9: Les dimensions optimales de l'antenne reconfigurable proposée.	54
Tableau III-10: les résultats de différents cas possibles.	58

Liste des abréviations

1G : Première Génération

2G : Deuxième Génération

3G : Troisième Génération

4G : Quatrième Génération

5G : Cinquième Génération

MIMO: Multiple Input Multiple Output.

Massive-MIMO: Massive- Multiple Input Multiple Output.

3GPP: 3rd Génération Partnership Project

LTE: Long Term Evolution.

ITU: International Télécommunication Union

NRF: Network Repository Function

NEF: Network Exposure Function

UDM: Unified Data Management

NSSF: Network Slice Selection Function

AUSF: Authentication Server Function

PCF: Policy Control Function

SMF: Session Management Function

DN: Data Network

AF: Application Function

Wifi: Wireless Fidelity.

UDN : Réseaux ultra denses

MISO : Multiple Input Single Output

SISO: Single Input Single Output

SIMO: Single Input Multiple Output

gNB: Next génération Node B

NG-RAN: Next Generation-RadioAccess Network

AMF: Access and Mobility Management Function

UPF: User Plan Function

CST(MWS): computer Science Technology MICROWAVE STUDIO

S11: Coefficient of réflexion

VSWR: The Voltage Standing Wave Ratio

WIFI: Wireless Fidelity

PIN: Positive Intrinsic Negative Diode

Introduction générale

Les communications mobiles ont contribué de manière significative au développement économique et social des pays développés. Actuellement, ils représentent une partie indispensable de la vie quotidienne pour des millions de personnes dans le monde, une situation qui devrait continuer à augmenter jusqu'à devenir plus inévitable au futur.

Les nombreux opérateurs à travers le monde mettent en œuvre le LTE (Long Term Evolution) pour fournir un accès à des temps d'accès plus courts et une plus grande efficacité que les avancées 3G et 3.5G. Il est également dans le développement et la mise en œuvre du LTE-A qui est une évolution 4G. Par conséquent, on s'attend à ce qu'il y ait des défis importants pour le nouveau système de communication mobile qui commence à émerger, c'est-à-dire la génération V (5G) [1].

La principale caractéristique des réseaux 5G est qu'ils sont conçus pour que l'utilisateur puisse se connecter simultanément à plusieurs technologies sans fil et échanger entre eux. 5G se concentre sur les appareils qui prennent en charge la voix sur IP (VoIP), où l'utilisateur verra un taux élevé de transmission de données (débit de données d'envoi) et un volume approprié de l'appel. Cette technologie vise à répondre à toutes les exigences des clients qui aspirent à des fonctionnalités avancées dans les téléphones mobiles [2].

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 : la technologie du Massive MIMO qui 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 [3].

Notre objectif principal dans le cadre de ce mémoire est l'étude, la conception et la simulation d'antennes MIMO pour les applications 5G. Pour se faire, nous nous basons sur la théorie des antennes afin de déterminer les paramètres géométriques de notre antenne proposée. Pour simuler notre antenne, nous allons utiliser le logiciel CST Microwave Studio qui est spécialisé et équipé pour le calcul numérique rapide et précis.

Ce manuscrit est structuré comme suit :

Le premier chapitre expose des généralités sur la technologie 5G, nous débutons par donner un bref historique sur les générations de technologie de télécommunication, nous présentons ensuite l'objectif de

la 5G, l'architecture du réseau 5G et ses fréquences utilisées. Nous terminons par présenter les différents technologies clé comme le massif MIMO.

Le deuxième chapitre présente une vue d'ensemble sur les antennes imprimées, leurs caractéristiques fondamentales, leurs techniques d'alimentation et d'adaptation, et les différentes topologies de réseaux d'antennes. La deuxième partie de ce chapitre, expose une petite partie sur les antennes reconfigurables tout en expliquons le rôle d'une antenne reconfigurable en fréquence.

Le troisième chapitre, est consacré à la conception d'antennes, de faible coût de réalisation et très facile à fabriquer, pour les applications 5G. Nous allons présenter dans ce chapitre les résultats de simulation, obtenus en utilisant comme outil de simulation le logiciel CST Studio, des caractéristiques les plus importantes des antennes conçues tels que le coefficient de réflexion, le diagramme de rayonnement, le gain et le taux d'ondes stationnaires (ROS).

Nous présentons dans la première partie de ce chapitre les étapes de conception d'une antenne tri-bandes fonctionnant aux fréquences 1.8, 3.5 et 6 GHz. Ensuite, pour répondre à l'une des exigences de la 5G qui sera un gain élevé, nous présentons la conception d'une antenne MIMO à deux éléments puis à six éléments à partir de notre antenne proposée.

Nous terminons ce chapitre par la présentation d'une antenne reconfigurable en fréquence en insérant des diodes PIN. Cette antenne reconfigurable peut commuter entre la fréquence 4G, 5G et la bande [3.7-4.2] GHz qui est dédiée aux applications satellitaires.

Nous clôturons ce mémoire par une conclusion générale.

Chapitre I : Généralité sur la technologie 5

I.1. Introduction :

L'explosion des objets connectés impose actuellement au réseau mobile des changements d'architecture afin d'améliorer leurs performances pour répondre aux exigences du futur, ce qui de nos jours représente un vrai challenge pour la 5^{ème} génération.

Dans ce chapitre, après avoir rappelé les objectifs de ce nouveau standard 5G de système de communication, ainsi que ses catégories d'usages et ses différentes exigences, nous allons présenter les différentes technologies permettant de répondre à certaines exigences pour un bon fonctionnement de ce système. Parmi ces technologies, nous allons présenter la Massive MIMO qui permettra d'avoir une bonne efficacité spectrale, énergétique..., le Full duplex qui aidera à doubler la capacité du canal par rapport à la technologie Half duplex de la 4G et les Small cells combinées aux ondes millimétriques pour avoir une large bande passante.

I.2. Historique :

Comme son nom l'indique, la 5G est la cinquième génération de téléphones mobiles ("G" signifie "génération"), qui hérite (et s'ajoute) des autres générations : 2G, 3G, 4G. Ce à quoi le terme « génération » fait référence correspond en fait à un ensemble de normes élaborées par les organisations mondiales chargées de la normalisation, de la réglementation, de la planification et de la coordination des télécommunications. Ces normes fixent des exigences de performance et sont précisées par des spécifications techniques élaborées à partir de la 3G par le consortium 3GPP (3rd Generation Partnership Project). Tous les 10 ans environ (lorsque la technologie mûrit), une nouvelle génération émerge avec le potentiel d'atteindre de nouvelles performances. Par conséquent, la 5G n'est pas surprenante (la 6G est déjà en développement).

caractéristiques	1G	2G	3G	4G	5G
Date approximation de Deployment	Années 1980	Années 1980	Années 2000	Années 2010	Années 2020
Debit maximal	171.2 Kbit/s	9.6 Kbit/s	1.9 Mbit/s	1 Gbit /s	20 Gbit /s
Vitesse (Km/h)	/	/	/	350	500
Latence (ms)	/	/	150	10	1
Efficacité énergétique du Réseau	/	/	/	1X	100X
Débit sur une Zone	/	/	/	0,1(Mbit/s/m ²)	10(Mbit/s/m ²)
Bande passantede donnée	2Kbps	14.4-64Kbps	2Mbps	2Mbps à 1Gbps	1Gbps et plus selon le besoin

La bande de fréquence	150Mhz	1.8Ghz	2Ghz	2 à 8 GHz	3 à 300 GHz
-----------------------	--------	--------	------	-----------	-------------

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

I.2.1. La 5ème génération :

La 5G est le réseau mobile de 5e génération, la nouvelle norme mondiale sans fil, conçu pour répondre aux besoins croissants de la population en offrant de la vitesse plusieurs Gbps, une fiabilité et une disponibilité plus élevées, une latence ultra-faible et une capacité du réseau très élevée en raison des systèmes MIMO massifs.

La 5G englobe un ensemble de technologies qui constituent la prochaine étape majeure dans l'évolution des normes de télécommunications mobiles à partir de la norme actuelle 4G LTE (Long Term Evolution). Le réseau 5G est validé par les alliances ITU (International Télécommunication Union) et 3GPP (3rd Génération Partnership Hip Project) [4].

La 5G est conçue pour fournir des débits de données très élevés pour un grand nombre d'utilisateurs, tout en prenant en charge de multiples communications pour déployer un grand nombre de capteurs, tout en améliorant l'efficacité spectrale du réseau [5]. Les futurs téléphones et tablettes seront utilisés pour le transfert de données.

I.2.2. Objectifs et principe de la 5G :

La 5G permet des connexions et des téléchargements plus rapides que les autres générations. Elle 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.

La 5G permet 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 [6].

I.2.3. Architecture du réseau 5G et ses services :

La figure 1-1 décrit l'architecture simplifiée du réseau 5G [7]. Les stations de base sont soit des gNB fournissant des terminaisons de protocoles du plan utilisateur et du plan de contrôle, soit des ng-eNB. Les gNB sont les stations de base 5G natives supportant les fonctionnalités radio 5G par défaut alors que les

stations de base ng-eNB sont des stations de base 4G mises à niveau pour supporter les services radio 5G dans le but d'assurer une migration progressive entre les deux standards.

Les stations gNB et ng-eNB sont interconnectées via l'interface Xn. L'ensemble de ces stations constitue le réseau d'accès de nouvelle génération (NG-RAN, Next Generation-Radio Access Network). L'interconnexion des gNB et ng-eNB avec le réseau cœur (5GC, 5G Core) se fait avec les fonctions réseau AMF (Access and Mobility Management Function) et UPF (User Plan Function) du cœur à travers l'interface NG.

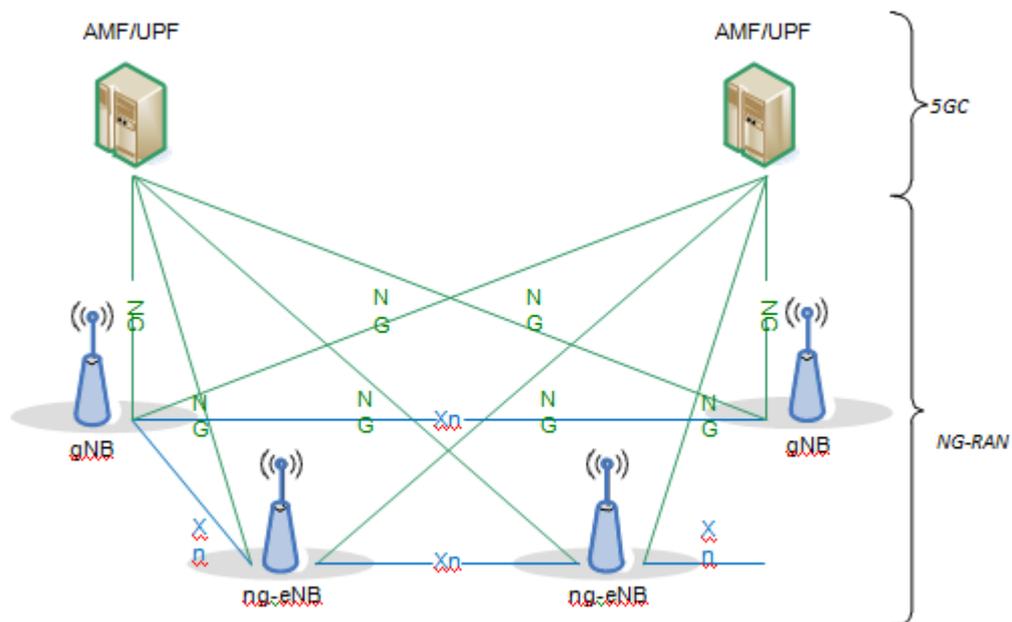


Figure I-1 : Architecture du réseau 5G [8].

La fonction AMF est chargée de la signalisation non liée aux données utilisateur (mobilité, sécurité, ...). Elle supporte des terminaux utilisateur (UE, User Equipment) avec différents profils de mobilité. L'UPF gère les fonctionnalités liées aux données utilisateur (routage de packets, QoS, reporting du trafic utilisateur...).

AMF et UPF sont les fonctions du réseau cœur qui s'interfaçent avec le réseau d'accès. Les autres fonctions du réseau cœur sont représentées sur la figure 1-3 qui décrit l'architecture fonctionnelle du réseau 5G. Une brève description de ces fonctions est donnée dans le tableau 1-2.

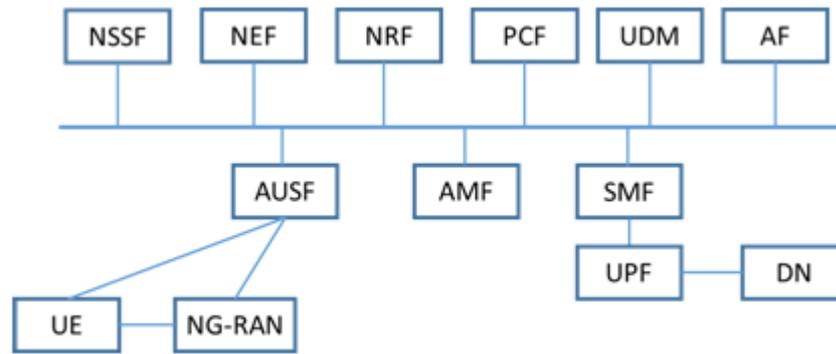


Figure I-2: Architecture fonctionnelle du réseau 5G.

	<i>Nom</i>	<i>Définition</i>
NRF	Network Repository Function	Fournit le support pour la gestion de services pour les fonctions réseau (enregistrement, autorisation, découverte)
NEF	Network Exposure Function	Fournit l'accès externe aux capacités des fonctions réseaux (la surveillance, la supervision, ...)
UDM	Unified Data Management	Stockage de données. Fonctionnalités de séparation entre traitement et stockage
NSSF	Network Slice Selection Function	Sélection et gestion du Network Slicing
AUSF	Authentication Server Function	Gestion de l'authentification
PCF	Policy Control Function	Fournit un cadre unifié pour le contrôle du comportement du réseau
SMF	Session Management Function	Gestion de sessions. Allocation et gestion des adresses IP des UEs
DN	Data Network	Gère l'interaction avec les réseaux de données externes
AF	Application Function	Fonction spécifiée et déployée par l'opérateur pour des services spécifiques

Tableau I-2 : Description des fonctions du réseau 5G

I.2.4. Fréquences utilisées pour la 5G :

La 5G est la première génération à pouvoir opérer sur trois spectres radio différents : bande basse, moyenne ou haute.

- La 5G à basse bande fonctionne sur les fréquences sous 2GHZ. Il s'agit des

fréquences cellulaires les plus anciennes. Elle couvre une large distance, mais il n'y a pas de larges canaux disponibles et la plupart sont utilisés par la 4G. la 5G basse bande et donc relativement lente, et ressemble à la 4G. [9]

- La 5G à bande moyenne utilise les fréquences de 2 à 10GHz. Ceci couvre la plupart des fréquences WIFI et cellulaires actuelles. [9]
- La 5G à bande haute, il est possible d'utiliser jusqu'à huit canaux 100MHz. Les ondes millimétrées sont la véritable nouveauté. Il s'agit d'ondes comprises entre 20 et 100GHz. Ces ondes n'avaient presque jamais été utilisées auparavant pour des applications grand public. [9]

Les fréquences déjà utilisées par les autres générations pourront également être utilisées pour la 5G : 800 Mhz, 900 MHz, 1800 MHz, 2100 MHz, 2600 MHz.

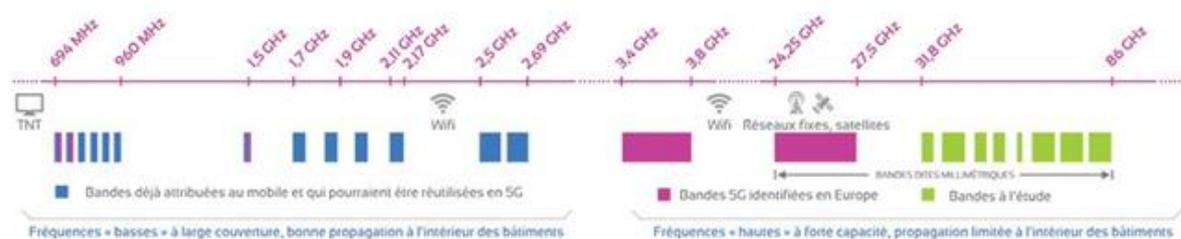


Figure I-3 : Fréquence utilisées pour la 5G

I.2.5. Technologie utilisée pour 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.

I.2.5.1. Les ondes millimétriques :

On parle des fréquences supérieures à 6 GHz qui n'ont encore jamais été pris pour l'implémentation des réseaux mobiles pour des raisons technologique et de qualité de propagation. Pour répondre à l'augmentation des débits de transmission et des volumes de données à transmettre, il faut offrir de telles réserves de spectre, et leur utilisation nécessite le développement de toutes les technologies nécessaires comme la miniaturisation à faible coût et avec une faible consommation d'énergie pour être compatible avec les terminaux portables (Amplificateur, codeur, traitement de signal, antenne...). En particulier, la communication par onde millimétrique peut être utilisée pour une couverture extérieure pour des réseaux à

haute densité telle que la portée allant jusqu'à 200 à 300 mètres (micro cellules) [9]. Chacune des cellules aura une couverture réduite, ce qui nécessitera l'implémentation de la technique de 'beamforming' [10].

I.2.5.2. Petites cellules (Small cels) :

Les petites cellules, ou plus précisément les UDN (réseaux ultra denses) à petites cellules, devraient jouer un rôle clé dans la 5G en tant que réponse forte au besoin de densification du réseau et d'augmentations spectaculaires de l'efficacité spectrale ou du débit. Nombres binaires par unité de surface.

Les petites cellules sont également une partie importante des réseaux hétérogènes (H et Nets) [11]. Chaque macro site compte au moins 10 petites cellules, ce qui permet de faire face à la densité d'utilisation en milieu urbain où les cellules sont déjà relativement compactes.

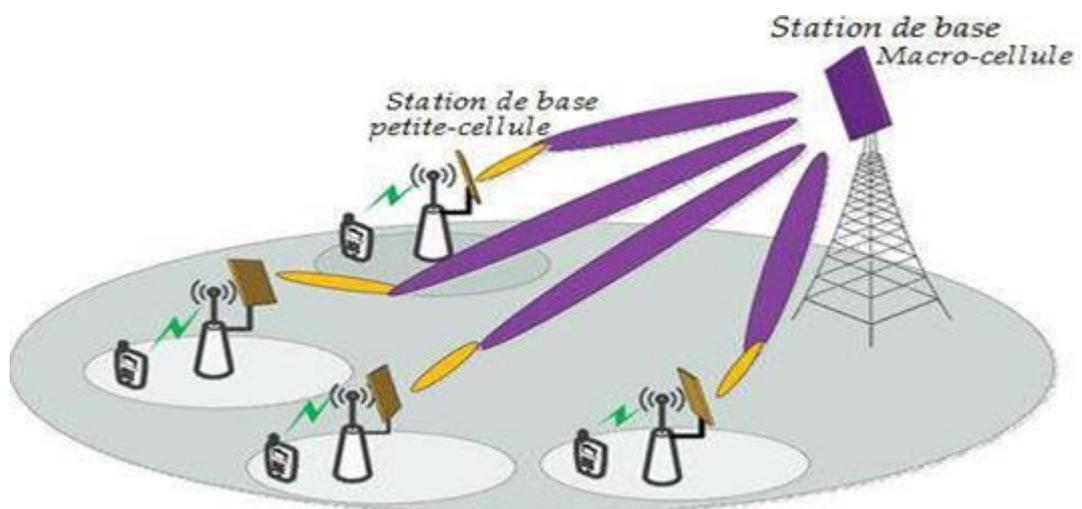


Figure I-4 : Petites cellules

I.2.5.3. Formation de faisceaux (Beamforming) :

Habituellement, les antennes radio diffusent les signaux dans toutes les directions. La technique du beamforming consiste à focaliser un signal dans une direction donnée. Pour cela, le même signal est envoyé par plusieurs antennes à proximité les unes des autres (d'où l'association avec la technologie MIMO). Des algorithmes font en sorte que les interférences entre les ondes qui se chevauchent puissent être utilisées de façon constructive pour rendre le signal plus fort : il est concentré sous forme d'un faisceau. Cette concentration permet d'augmenter la puissance utile au récepteur sans augmenter la puissance totale consommée.

- 1) L'antenne effectue une analyse séquentielle, à très haute vitesse et à très faible émission.

- 2) Si un terminal 5G est identifié, seul le terminal qui a besoin du signal reçoit le signal, et non tout ce qu'il y a autour de lui, et c'est seulement pendant le temps de la communication que le faisceau est activé. Cela marche également lorsque l'utilisateur est en mouvement.

Les antennes 5G sont caractérisées par le fait de pouvoir diriger le faisceau dans différentes directions (y compris au-dessus d'elles) du fait de toutes les micro-antennes qui les composent. Leur rayonnement est variable dans chaque direction. Elles sont ainsi dites « actives », par opposition aux anciennes antennes « passives » qui produisent un faisceau fixe dans une seule direction.

Même si la puissance calculatoire nécessaire pour faire tourner les algorithmes de formation de faisceau est grande, les opérateurs promettent une diminution de la consommation d'énergie (à volume de données constant) grâce à ce système du fait que :

- Les antennes n'émettent que lorsque l'utilisateur en a besoin
- Le terminal de l'utilisateur reçoit le signal maximum adapté à son besoin, sans avoir à rechercher en continu le meilleur signal disponible. (Voir figures 5 et 6).

Le beamforming n'est pas compatible avec toutes les gammes de fréquences. Il s'adresse aux fréquences « hautes » (à partir de la bande 3,5 GHz).

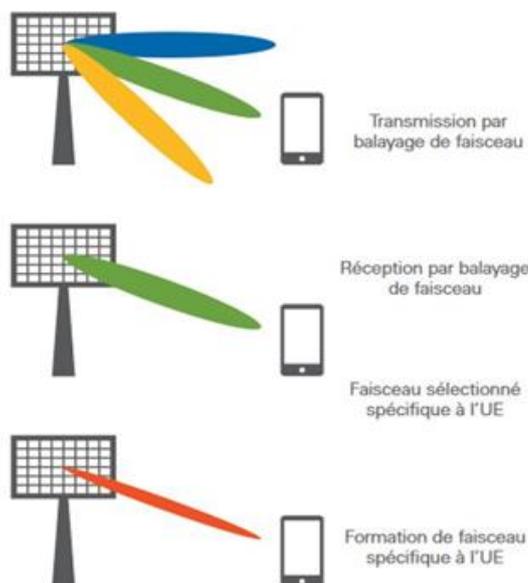


Figure I-5 : Accès au terminal par un 1er faisceau de signalisation puis formation du faisceau dédié à l'UE (User Equipment).

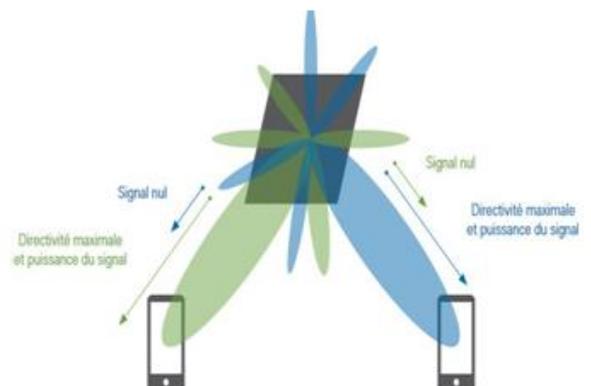


Figure I-6 : Formation de faisceaux MIMO. Source : National Instruments (10).

I.3. La technologie Massive MIMO :

I.3.1. Les techniques MIMO :

Les techniques MIMO, acronyme de Multiple Input Multiple Output, sont apparues dans les années 90 grâce à Gerard. J. Foschini [12]. 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) [13].

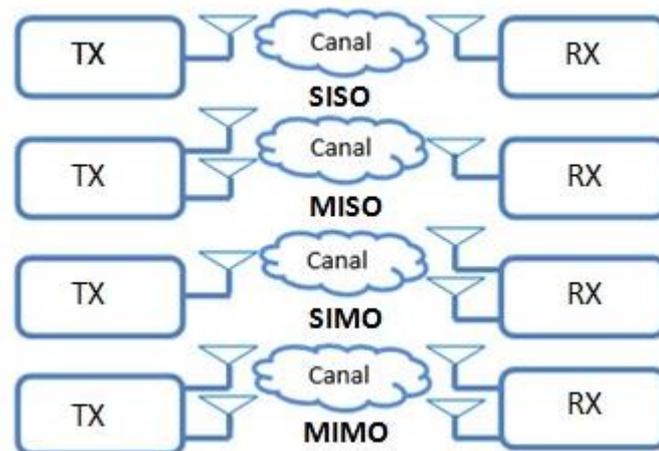


Figure I-7 : Schémas représentatifs du SISO, MISO, SIMO et MIMO.

I.3.2. Le Massive MIMO :

Les réseaux MIMO ne sont pas nouveaux et sont déjà utilisés en 4G LTE. L'utilisation de cette nouvelle technologie d'antenne en 5G permettra de pallier les problèmes de propagation rencontrés aux plus hautes fréquences (bande 3,5 GHz et mmWave). La technologie MIMO permet d'équiper une même station de base d'un grand nombre de minuscules antennes. En 4G, il y a plus d'une dizaine de micro-antennes par station. Pour la 5G, et la nécessité d'assurer la connectivité à davantage de petites cellules et de terminaux, c'est une nouvelle étape qui doit être franchie grâce au MIMO massif, qui permet de concentrer plus de 128 micro-antennes par station (et probablement beaucoup plus bientôt). Cette technique peut augmenter le débit de données en utilisant les diverses techniques de multiplexage. Mais il a aussi une autre fonctionnalité intéressante : le beamforming.

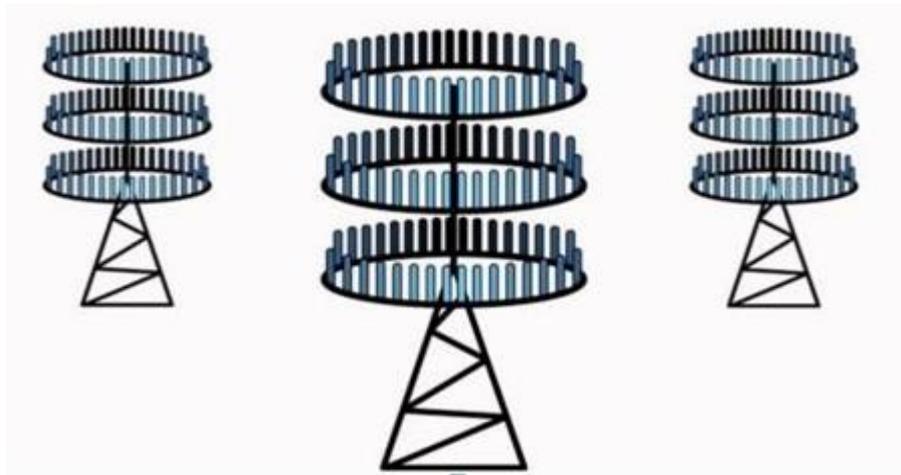


Figure I-8 : Illustration de MIMO massive.

I.3.2.1. Les avantages des systèmes des massives MIMO :

Les principaux avantages des systèmes MIMO massives peuvent être résumés comme suit [14] :

- Gain d'efficacité spectrale élevé.
- Gain d'efficacité énergétique élevé.
- Traitement simple.
- Robustesse et fiabilité accrues.
- Réduction des coûts dans les composants RF.
- Augmentation du débit de données.
- Augmentation du rapport signal sur bruit de liaison de base.
- Renforcement des canaux.

I.4. Full duplex :

Le support sans fil est une ressource partagée dans les systèmes de communication sans fil actuellement déployés. Les systèmes de communications sans fil continuent de partager les ressources par répartition de fréquence ou dans le temps avec le principe Half-Duplex [15]. Cela nécessite une transmission et une réception des signaux qui se font dans deux bandes de fréquences différentes ou dans deux intervalles de temps séparés. En plus, l'émetteur-récepteur ne peut pas transmettre et recevoir un signal en même temps à la même fréquence. Ce qui limite considérablement la capacité des réseaux cellulaires, contrairement à la technologie Full duplex. Cette technologie permet une transmission et une réception simultanées dans le temps et sur la même bande de fréquence, ce qui peut doubler le débit du système par rapport aux systèmes Half duplex conventionnels [16].

I.5. Conclusion :

Dans ce chapitre, après avoir rappelé les objectifs du standard 5G, ainsi que ses catégories d'usages et ses différentes exigences, nous avons présenté les différentes technologies permettant de répondre à certaines exigences. Parmi ces technologies, nous avons présenté la Massive MIMO qui permettra d'avoir une bonne efficacité spectrale, énergétique..., le Full duplex qui aidera à doubler la capacité du canal par rapport à la technologie Half duplex de la 4G et les Small cells combinées aux ondes millimétriques pour avoir une large bande passante.

Chapitre II : Les antennes imprimées

II.1 Introduction :

Dans ce chapitre nous allons présenter les antennes imprimées qui sont très utilisées dans le domaine de télécommunications, leurs principales caractéristiques (le gain, directivité...) ainsi que leurs techniques d'alimentation et d'adaptation. Dans la deuxième partie de ce chapitre nous présentons les antennes reconfigurables.

II.2 Définition :

Une antenne est un dispositif qui permet de transformer l'énergie électrique en énergie électromagnétique en émission et vice versa en réception afin d'assurer la transmission sans fil de l'information [17].

II.3 Description d'une antenne micro ruban :

L'antenne imprimée qui porte aussi l'appellation Microstrip, micro-ruban, ou encore patch est une antenne plane dont l'élément rayonnant est une surface conductrice, séparée d'un plan réflecteur conducteur par un matériau diélectrique. Ce type d'antenne est caractérisé par un rayonnement maximal dans la direction perpendiculaire à l'antenne [18].

La figure suivante montre une simple géométrie de l'antenne imprimée.

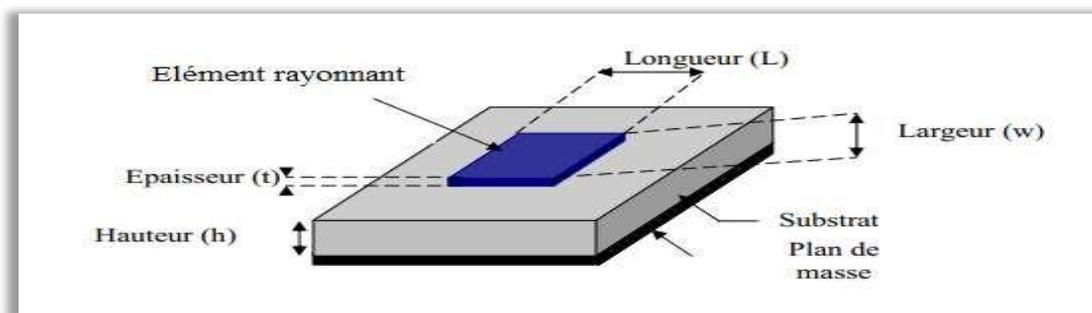


Figure II-1 : Structure d'une antenne imprimée [21].

II.3.1 Forme des antennes imprimées :

L'antenne patch peut prendre plusieurs formes qui peuvent être rectangulaire, carré, circulaire ou simplement un dipôle. Ces formes sont les plus courantes car elles présentent une grande facilité d'analyse et de fabrication, mais également un diagramme de rayonnement très intéressant. La figure suivante montre ces différentes formes [19].

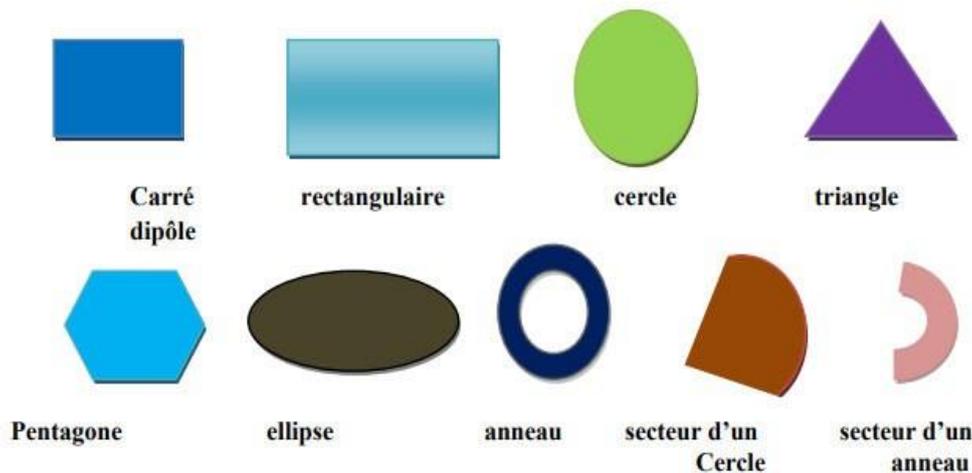


Figure II-2 : Différentes formes d'antennes patch.

II.3.1.1 Critères de choix du substrat :

Le substrat joue un rôle double dans la technologie microruban. Il est à la fois un matériau diélectrique, où viennent se graver les circuits, et une pièce mécanique qui joue un rôle de support mécanique car il supporte la structure. Cela implique des exigences à la fois sur le plan mécanique et électrique parfois difficiles à concilier. D'épaisseur généralement faible devant la longueur d'onde de fonctionnement ($h \ll \lambda$), le substrat diélectrique affecte le comportement et les performances électromagnétiques de l'antenne. On préfère souvent utiliser des substrats à faibles pertes diélectriques ($\tan(\delta) < 10^{-3}$) qui favorisent le rendement de l'antenne et ceux à permittivité relative faible ($\epsilon_r < 3$) qui améliorent le rayonnement tout en diminuant les pertes par ondes de surface pour une hauteur donnée [20].

II.4 Paramètres caractéristiques du rayonnement d'une antenne imprimée :

II.4.1 Coefficient de réflexion(S11) :

Le coefficient de réflexion est un paramètre qui permet de quantifier la quantité du signal réfléchi par rapport au signal incident [21], Généralement ce coefficient Γ est lié à l'impédance d'entrée de l'antenne Z_e et l'impédance caractéristique Z_c par la relation :

$$\Gamma = \frac{Z_e - Z_c}{Z_e + Z_c} \quad (\text{II.3})$$

Nous pouvons représenter Γ sous forme de paramètre S en dB tel que :

$$S_{11}(db) = 20 \log(\Gamma) \quad (II.4)$$

II.4.2 Diagramme de rayonnement :

Le diagramme de rayonnement d'une antenne présente les variations de la puissance rayonnée par unité d'angle solide dans les différentes directions de l'espace. En dehors du cas des antennes omnidirectionnelles dans certains plans, les antennes ne rayonnent pas leurs puissances de façon uniforme dans toutes les directions de l'espace[22].

Il y a généralement une direction de rayonnement maximale autour de laquelle se trouve concentrée une grande partie de la puissance rayonnée et des directions secondaires autour desquelles se répartit la fraction de la puissance restante. La fonction caractéristique de rayonnement de l'antenne permet d'avoir une vision globale du rayonnement [22].

Différents types de représentation des diagrammes sont utilisées :

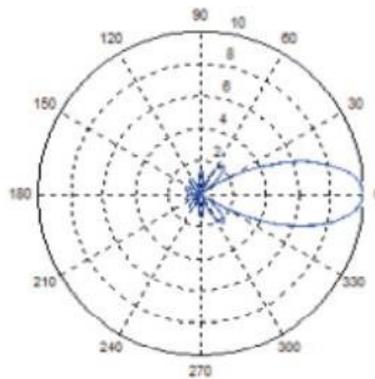


Figure II-3 : Diagramme en coordonnées polaires.

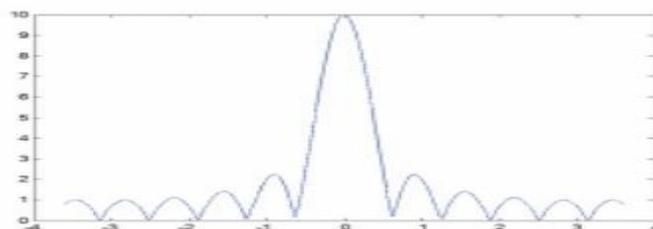


Figure II-4 : Diagramme en coordonnées cartésiennes.

II.4.3 Gain :

Le gain représente le rapport entre la puissance rayonné dans une direction et la puissance rayonnée par une antenne isotrope sans perte, il est exprimé en dB et présenté par l'équation suivante [23] :

$$G(\theta, \varphi) = \frac{P(\theta, \varphi)}{P_a} \quad (\text{II.6})$$

Avec :

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

II.4.4 Directivité :

La directivité d'une antenne caractérise la manière dont cette antenne concentre son rayonnement dans certaines directions de l'espace. Elle 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.

La directivité est donnée par la relation suivante [24] :

$$D(\theta, \varphi) = \frac{P(\theta, \varphi)}{P(\theta, \varphi)_{iso}} = \frac{P(\theta, \varphi)}{\left(\frac{P_r}{4\pi}\right)} \quad (\text{II.7})$$

Avec:

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

II.4.5 Impédance d'entrée :

L'impédance d'entrée de l'antenne est l'impédance vue de la part de la ligne d'alimentation au niveau de l'antenne [25]. Cette impédance est donnée par la formule :

$$Z_e = Z_c \frac{(1+S_{11})}{(1-S_{11})} \quad (\text{II.8})$$

Où:

- Z_c est l'impédance caractéristique de la ligne d'alimentation.
- S_{11} est le coefficient de réflexion.

II.4.6 Bande passante (BP) :

Ce paramètre correspond à la gamme de fréquence où le transfert d'énergie vers l'antenne ou de l'antenne vers le récepteur est maximal (largeur de bande de fonctionnement) [26] :

$$|BP| = F_2 - F_1$$

Généralement, ce paramètre est évalué aussi en pourcentage du rapport de la bande passante relative par rapport à la fréquence centrale :

$$BP\% = \frac{BP}{f_0}$$

La figure II.5 présente la courbe coefficient de réflexion S_{11} d'une antenne en fonction de la fréquence et met en évidence la largeur de bande de fonctionnement (bande passante à -10 dB).

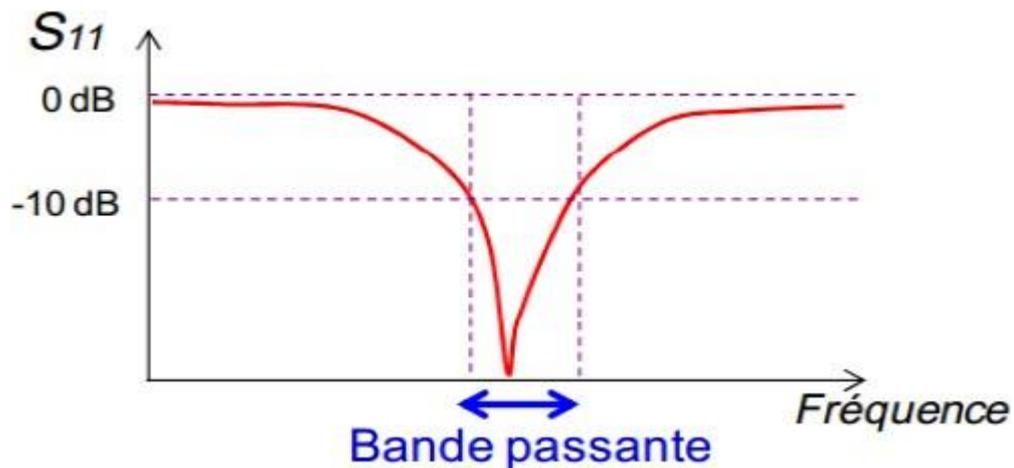


Figure II-5 : Coefficient de réflexion d'une antenne et sa bande de fonctionnement [26].

II.5 Techniques d'alimentation des antennes patch :

Les méthodes d'alimentation des antennes patch peuvent être divisées en deux types : avec contact et sans contact. Dans la méthode avec contact, la puissance RF est envoyée directement au patch rayonnant via des éléments de connexion tels que des lignes microruban. En sans contact, un couplage de champ électromagnétique est effectué pour transférer la puissance entre la ligne microruban et le patch rayonnant.

II.5.1 Alimentation par ligne par microruban :

Dans ce cas, une ligne microruban est directement connectée à l'élément rayonnant comme le montre la **Figure II.6**, le point de jonction peut être sur l'axe de symétrie du patch ou complètement décalé pour permettre une meilleure adaptation d'impédance [27]. 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 % [27].

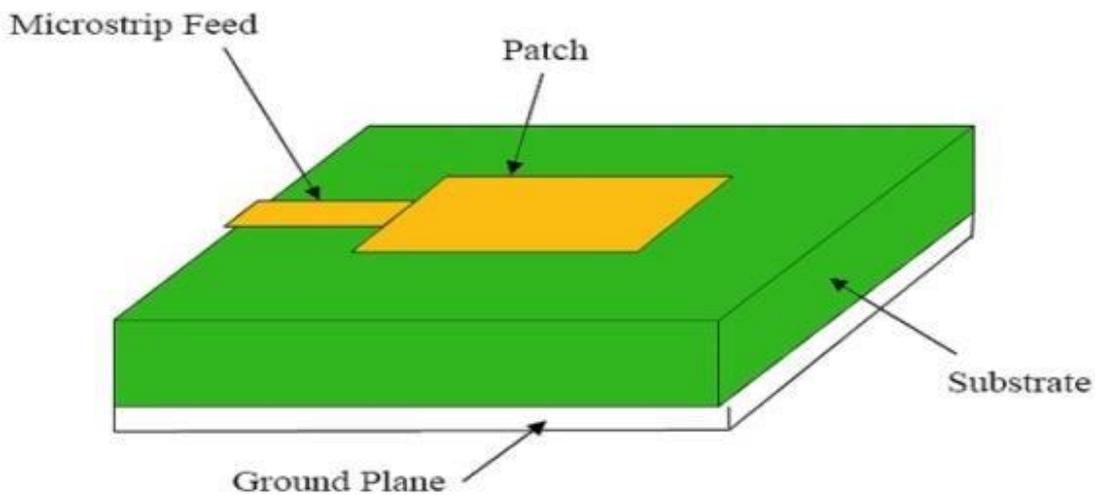


Figure II-6: Alimentation par ligne microruban.

II.5.2 Alimentation par sonde coaxiale :

L'alimentation par sonde coaxiale est montrée sur la **Figure II.7**, dans ce cas, le conducteur central (intérieur) est soudé directement à l'élément rayonnant (patch) après avoir traversé le diélectrique et le plan de masse, le conducteur extérieur est relié directement à ce dernier. L'avantage de cette méthode est qu'elle peut être appliquée à n'importe quel endroit du patch avec moins de rayonnement parasite. [28]

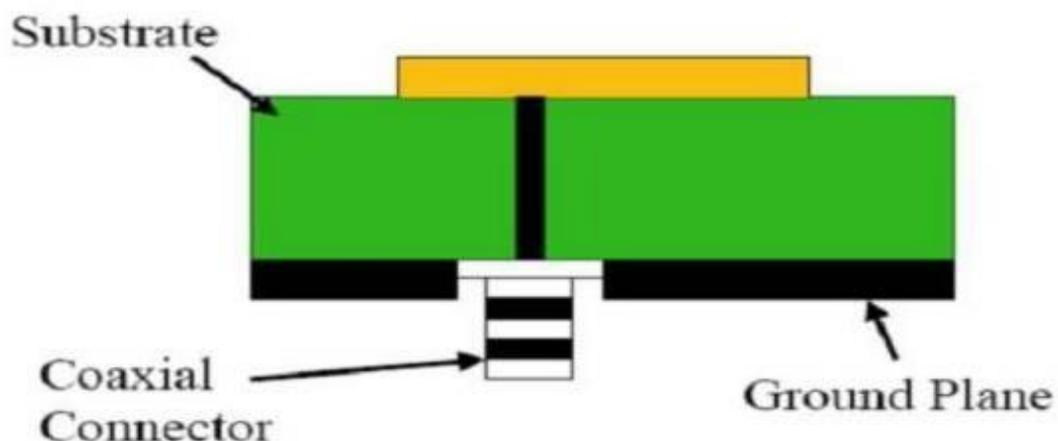


Figure II-7: Alimentation par sonde coaxiale

II.5.3 Alimentation couplée par ouverture :

Dans cette technique d'alimentation, le patch de rayonnement et la ligne d'alimentation sont séparés par le plan de masse comme indique sur la **Figure II.8**. La conjonction entre le patch et la ligne d'alimentation est faite par une ouverture ou une fente dans le plan de masse [29].

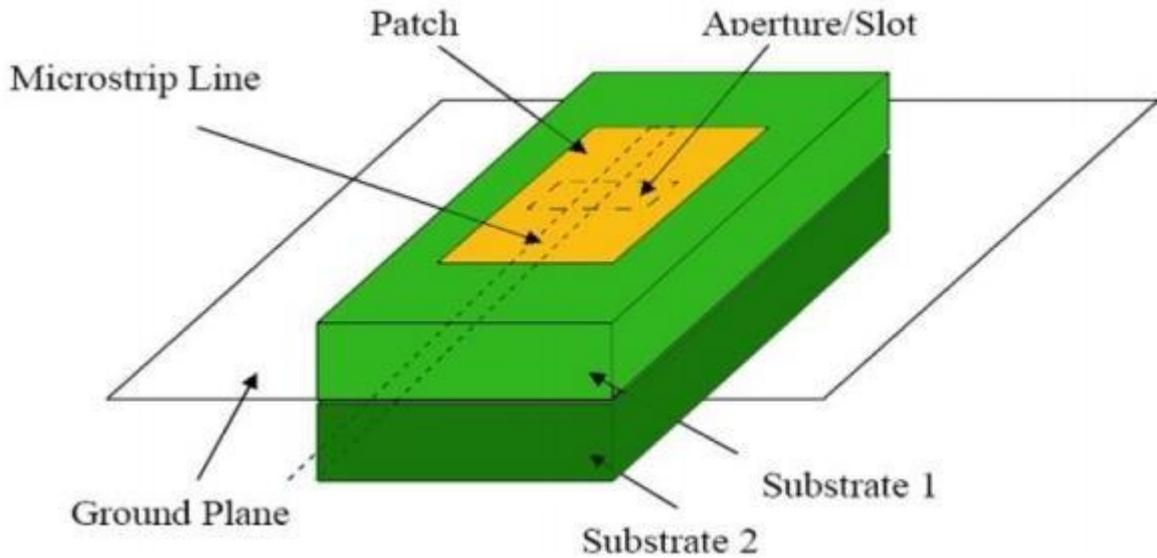


Figure II-8: Alimentation couplée par ouverture

II.6 Techniques d'adaptation des antennes patch :

Dans la conception 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 [30]. Plusieurs techniques d'adaptation existent, les plus utilisées sont :

II.6.1 Adaptation par ligne quart d'onde :

Pour améliorer l'adaptation de l'antenne on utilise un transformateur quart d'onde, il suffit que le transformateur soit placé entre la ligne microruban et l'extrémité du patch comme le montre la **Figure II.9**.

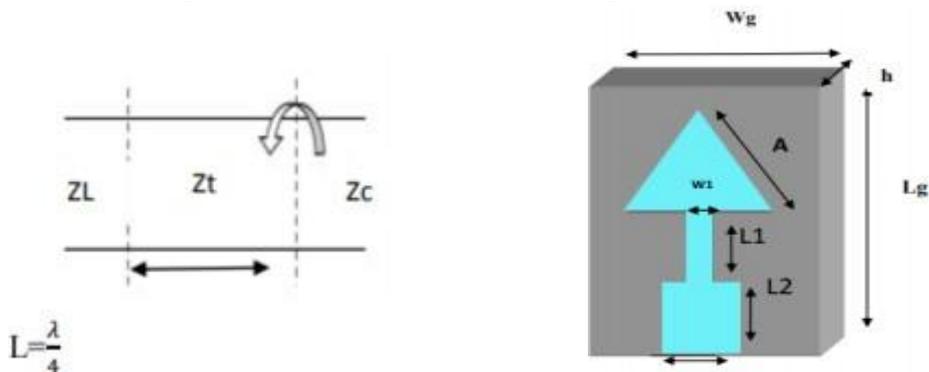


Figure II-9: a : Modélisation de l'antenne

b : adaptation par ligne quart d'onde

II.6.2 Adaptation par stub :

Pour réaliser l'adaptation d'une charge quelconque, on utilise un stub en circuit ouvert (open stub) ou en court-circuit (short stub). Un stub est un tronçon de ligne de longueur L_s que l'on branche en dérivation sur la ligne principale à une distance d de la charge [30].

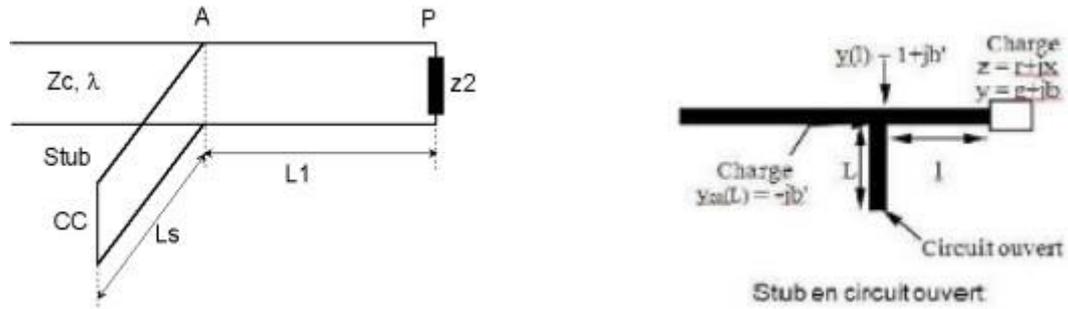


Figure II-10: a : Modélisation de l'antenne à Adaptation simple stub. b : Stub en circuit ouvert

II.6.3 Adaptation avec encoches :

Pour améliorer l'adaptation de l'antenne on utilise des encoches dans la géométrie du patch [30].

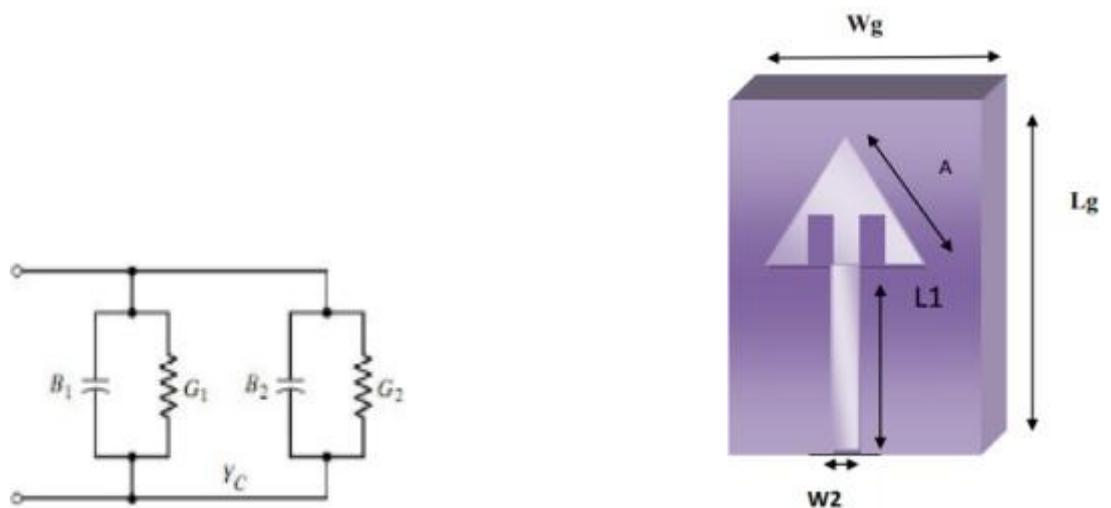


Figure II-11: a : L'équivalence en circuit.

b : Patch adapté par encoches.

II.7 Réseau d'antennes imprimées :

L'utilisation d'une antenne imprimée à patch unique s'avère souvent insuffisante pour répondre aux contraintes de rayonnement imposées. Des caractéristiques spécifiques comme un gain élevé ou un lobe principal conformé ne peuvent généralement être obtenus que par le regroupement de plusieurs sources rayonnantes pour former un système appelé réseau d'antennes [31,32].

Il y'a quatre configurations de réseaux d'antennes possibles qui sont [34] :

- ❖ **Antenne en réseau linéaire** : les éléments rayonnants sont placés l'un après l'autre par des déplacements parallèles sur une même droite.
- ❖ **Antenne en réseau circulaire** : antenne constituée d'un groupement d'éléments rayonnants identiques dans lesquels chaque ensemble de points est placé sur un cercle [35].
- ❖ **Antenne en réseau plan** : les éléments rayonnants se déduisent l'un de l'autre par des translations parallèles à un même plan.
- ❖ **Antenne en réseau tridimensionnelle** : Pour obtenir la forme du faisceau dans tout l'espace et toutes les directions, une configuration cubique ou sphérique est requise, c'est-à-dire une configuration tridimensionnelle.

La figure suivante montre un réseau plan.

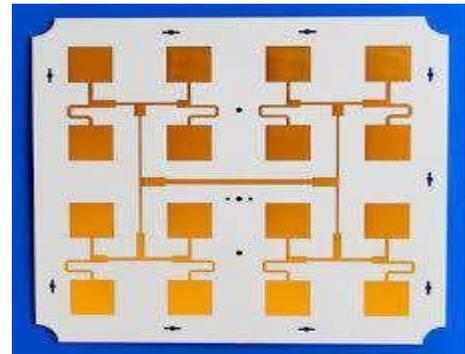
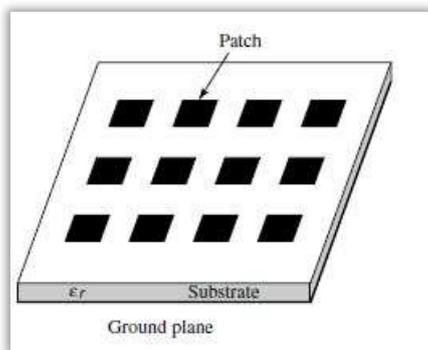


Figure II-12: a : Géométrie d'un réseau d'antennes patch 4x3

b : Réseau d'antennes patch 4x4 (extrait de [33])

II.8 Les antennes reconfigurables :

II.8.1 Définition :

Une antenne reconfigurable est définie comme un dispositif capable de modifier ses caractéristiques de fonctionnement (fréquence opérationnelle, bande passante, polarisation, diagramme de rayonnement) d'une manière dynamique, même durant le fonctionnement du dispositif en temps réel. Ces changements permettent à l'antenne de s'adapter au changement de l'environnement et aux contraintes liées aux systèmes de communications [36].

II.8.2 Techniques de reconfigurabilité :

Une antenne reconfigurable est une antenne dans laquelle au moins une de ces propriétés (fréquence, polarisation et diagramme de rayonnement) est modifiable après sa fabrication. Il existe différentes techniques de reconfigurabilité.

La reconfigurabilité peut être obtenue en utilisant des composants actifs tels que des diodes PIN et RF-MEMS et des varactors pour les types électriques. Dans le domaine optique, des éléments de commutation optique tels que des photoconducteurs doivent être utilisés. L'utilisation de matériaux intelligents tels que les ferrites et les cristaux liquides permettent de rendre l'antenne reconfigurable.

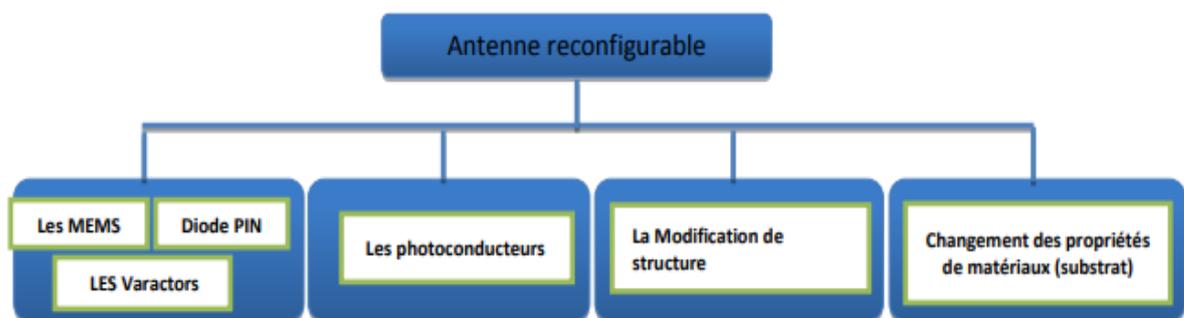


Figure II-13: techniques de reconfigurabilité

II.8.3 Antennes reconfigurables en fréquence :

La reconfiguration en fréquence permet de modifier la ou les fréquences de fonctionnement de l'antenne, elle peut être obtenue par commutation ou de façon continue. La commutation consiste à permettre à l'antenne de commuter entre plusieurs bandes, à l'aide d'interrupteurs (diodes PIN par exemple). Les antennes accordables en fréquence offrent en revanche, à l'aide de composants de type diodes varicap, la possibilité de faire varier de façon continue une ou plusieurs fréquences de résonance.

Pour mieux comprendre la reconfigurabilité en fréquence, on prend l'exemple de l'application WIFI (2,4GHz : Norme 802.11b). Ce service comprend plusieurs canaux de fréquences ISM. Une antenne reconfigurable en fréquence pour l'application WIFI, doit être conçue pour recouvrir tous les canaux précédents par commutation. La bande passante instantanée doit être suffisamment grande afin de couvrir chaque canal et l'agilité fréquentielle permet de se déplacer d'un canal à un autre [37].

II.9 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté les antennes patch qui sont utilisées dans une variété d'applications grâce à leurs bonnes performances. Nous avons aussi présenté leurs caractéristiques et leurs techniques d'alimentation les plus utilisées. La deuxième partie de ce chapitre a présenté les antennes reconfigurables.

**Chapitre III : Etude et conception
d'antennes MIMO pour les systèmes de
communications 5G**

III.1 Introduction :

La 5G est la cinquième génération des standards pour la téléphonie mobile. En proposant des débits plus importants et une latence fortement réduite, tout en évitant le risque de saturation des réseaux liés à l'augmentation des usages numériques (smartphones, tablettes, objets connectés).

Dans ce chapitre nous allons présenter les résultats de simulations des antennes conçues. Dans la première étape, on présente une étude, par simulation avec le logiciel CST Microwave Studio, d'une antenne à patch unique pour trouver ses paramètres (paramètres S, bande passante, gain, directivité...). La deuxième étape nous allons faire la conception d'une nouvelle antenne afin d'améliorer les performances de l'antenne initiale. Ensuite nous allons entamer la conception d'antennes MIMO à deux éléments puis à six éléments regroupant des patches identiques à l'antenne patch proposée afin d'augmenter le gain de l'antenne et élargir la bande passante. Comme dernière partie nous allons concevoir une antenne reconfigurable en fréquence qui est réalisée en utilisant des diodes PIN.

III.2 Outils de simulation :

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 basée 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 DESIGN STUDIO suite, et offre un certain nombre de solveurs différents selon le type d'application et du problème rencontré [38].

III.3 Conception d'antennes pour la 5G :

III.3.1 Cahier de charge :

Notre choix s'est porté sur l'antenne imprimée qui possède des propriétés géométriques et électromagnétiques intéressantes et qui est très utilisée dans plusieurs domaines. La fréquence de fonctionnement choisie est 1.8GHz et le substrat c'est le FR-4 de permittivité relative 4.3, d'épaisseur 1.6 et de tangente de perte diélectrique $\tan \delta = 0.002$.

III.4 Antenne initiale :

La structure de cette antenne est représentée sur la **figure III.1**. Elle est constituée d'un patch rectangulaire gravé sur la face supérieure d'un substrat diélectrique de type FR-4, de permittivité relative 4.3, d'épaisseur 1.6 et de tangente de perte diélectrique $\tan \delta = 0.002$. Le plan de masse et le patch sont conçus avec du cuivre, Copper (annealed), d'épaisseur 0.018.

Tous les paramètres géométriques de l'antenne sont donnés dans le **tableau III-1**

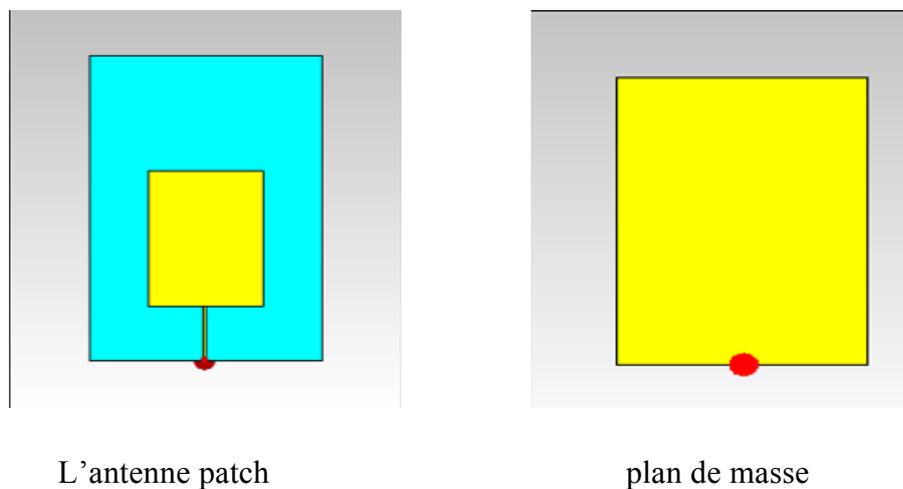


Figure III-1: Structure initiale de l'antenne simulée.

Paramètres	variables	Valeurs (mm)
Largeur du substrat	Ws	60.76
Longueur du substrat	Ls	90
Epaisseur du substrat	H	1.6
Epaisseur du ground et patch	em	0.018

Longueur du patch	L_p	39.90
Largeur du patch	W_p	30
Largueur de la ligne de transmission	W_f	0.755
Longueur de la ligne de transmission	L_f	16

Tableau III-1: Paramètres géométriques de l'antenne simulée.

La simulation nous a donné le coefficient de réflexion montré dans la **figure III-2**.

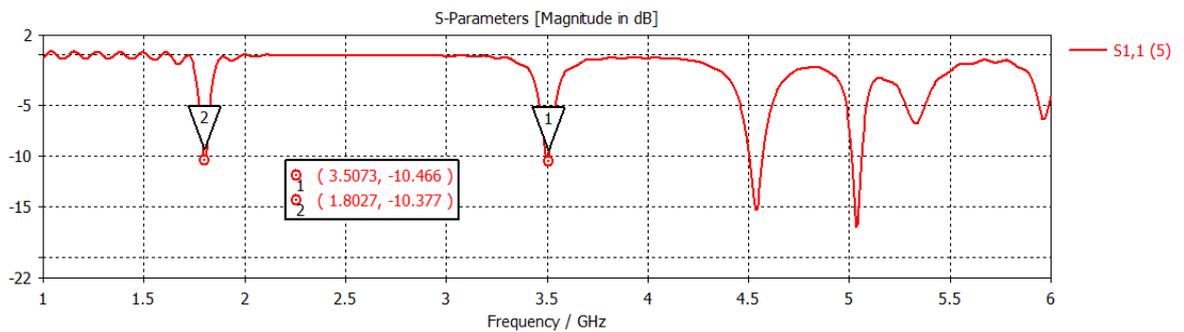


Figure III-2: Coefficient de réflexion de l'antenne simulée.

D'après le résultat obtenu, nous remarquons que le coefficient de réflexion S_{11} est inférieur à -10dB à la fréquence de résonance 1.8GHz et à la deuxième fréquence 3.5GHz . Mais il faut améliorer l'adaptation de notre antenne aux deux fréquences.

III.4.1.1 Adaptation de l'antenne initiale :

Nous introduisons maintenant des encoches dans le patch pour obtenir une meilleure adaptation. La **figure III-3** montre la structure de l'antenne après introduction des encoches.

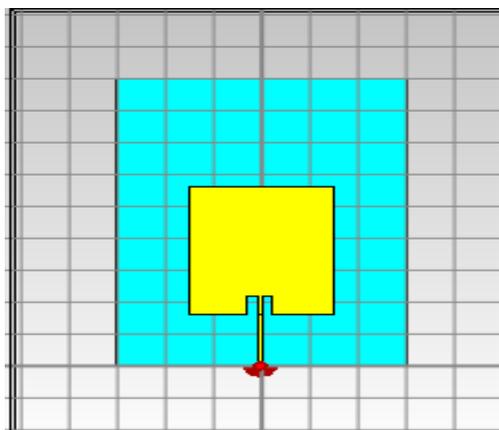


Figure III-3: Antenne avec encoche.

La **figure III-4** représente le coefficient de réflexion de l'antenne initiale étudiée après une étude paramétrique et une optimisation de quelques paramètres géométriques importants de l'antenne.

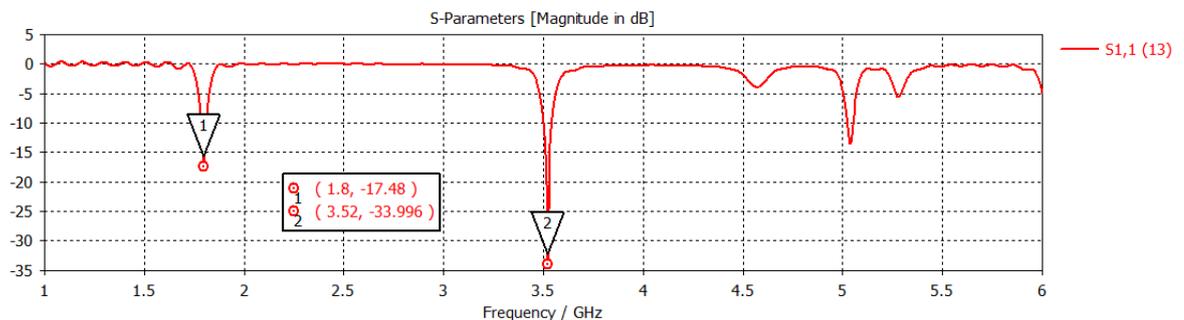


Figure III-4: Coefficient de réflexion de l'antenne avec encoches.

Nous remarquons une bonne adaptation de l'antenne aux deux fréquences de fonctionnement.

III.4.2 Performance de l'antenne initiale optimisée :

Le **tableau III-2** montre les dimensions de l'antenne initiale optimisée.

Paramètres	variables	Valeurs (mm)
Largeur du substrat	W _s	60.76
Longueur du substrat	L _s	90
Epaisseur du substrat	H	1.6
Epaisseur du ground et patch	em	0.018
Longueur du patch	L _p	40.34
Largeur du patch	W _p	30
Largeur de la ligne de transmission	W _f	0.755
Longueur de la ligne de transmission	L _f	16
Longueur de l'encoche	L _c	6
Largeur de l'encoche	W _c	3

Tableau III-2: Paramètres géométriques de l'antenne optimisée.

III.4.2.1 Coefficient de réflexion :

La figure III-5 représente le coefficient de réflexion de l'antenne initiale optimisée.

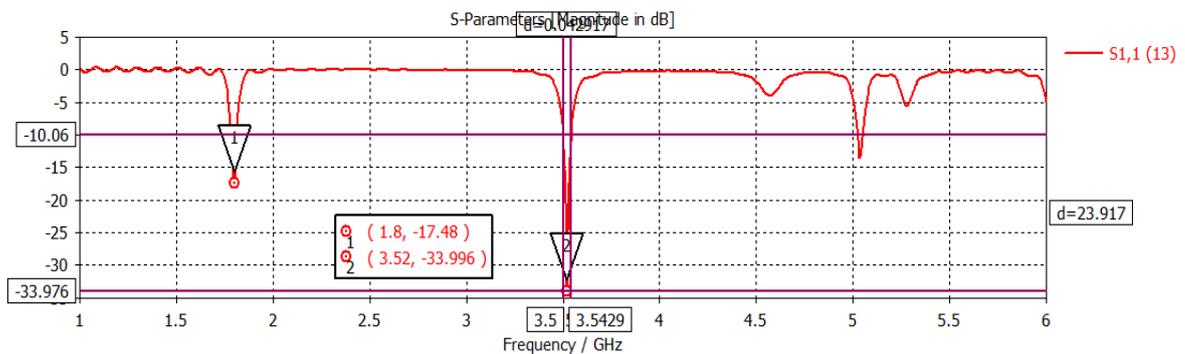


Figure III-5 : Coefficient de réflexion de l'antenne initiale optimisée.

Nous remarquons que le coefficient de réflexion est de -33.996 dB à la fréquence 3.52 GHz et de -17.48 dB à la fréquence 1.8 GHz, ce qui montre que les fréquences de résonance sont bien ajustées et bien adaptées aux fréquences de fonctionnement désirées.

III.4.2.2 Rapport d'onde stationnaire (VSWR) :

Le résultat de simulations du taux d'onde stationnaire simulé de l'antenne initiale optimisée, est présenté dans la figure III-6.

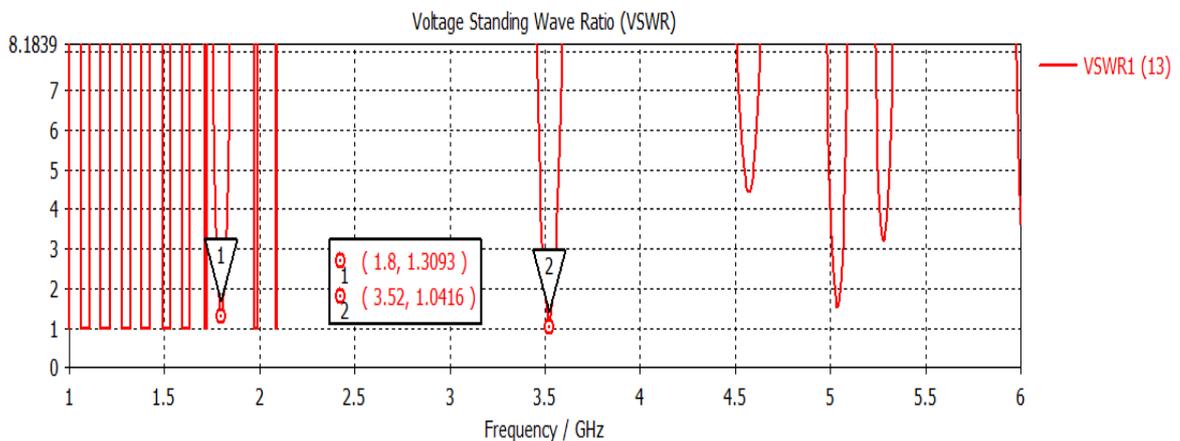


Figure III-6 : Rapport d'onde stationnaire (VSWR).

Nous observons que le taux d'ondes stationnaire est compris entre 1 et 2 pour les deux fréquences de résonances ce qui montre que l'antenne est bien adaptée.

III.4.2.3 Diagramme de rayonnement et de Gain :

Le diagramme de rayonnement 3D simulé du gain et de la directivité, à la fréquence de résonance 1.8 GHz est présenté dans la figure III-7 et le second diagramme de rayonnement

3D simulé du gain et de la directivité, à la fréquence de résonance 3.5GHz est présenté dans la figure III-8.

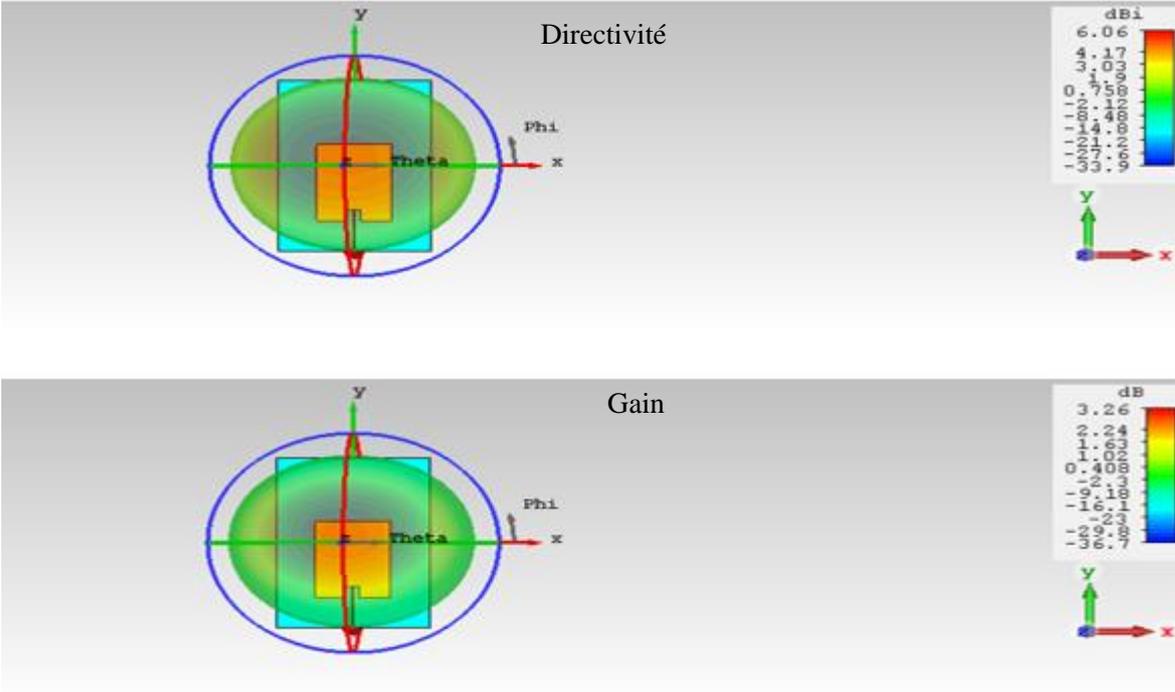


Figure III-7 : Diagramme de rayonnement 3D de l'antenne initiale optimisée à la fréquence 1.8GHz.

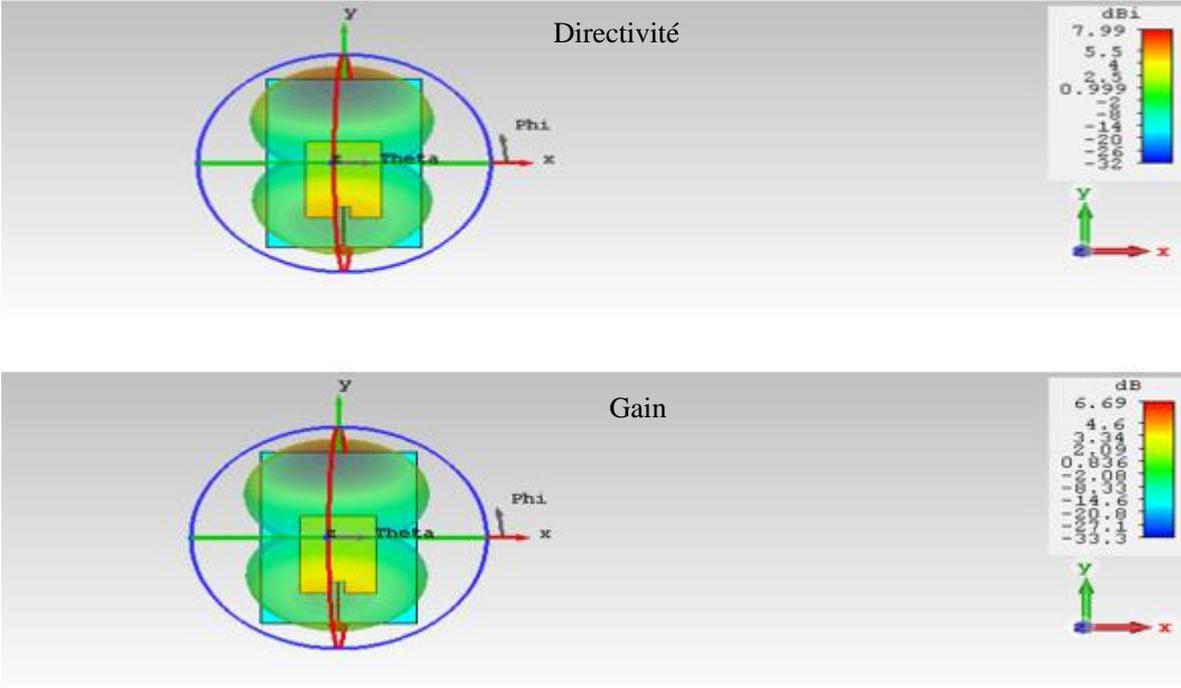


Figure III-8: Diagramme de rayonnement 3D de l'antenne initiale optimisée à la fréquence 3.5GHz

Le digramme de rayonnement 2D simulé du gain et de la directivité, à la fréquence de résonance 1.8GHz est présenté dans la figure III-9 et la figure III-10 représente le digramme de rayonnement 2D simulé du gain et de la directivité, à la fréquence de résonance 3.5 GHz.

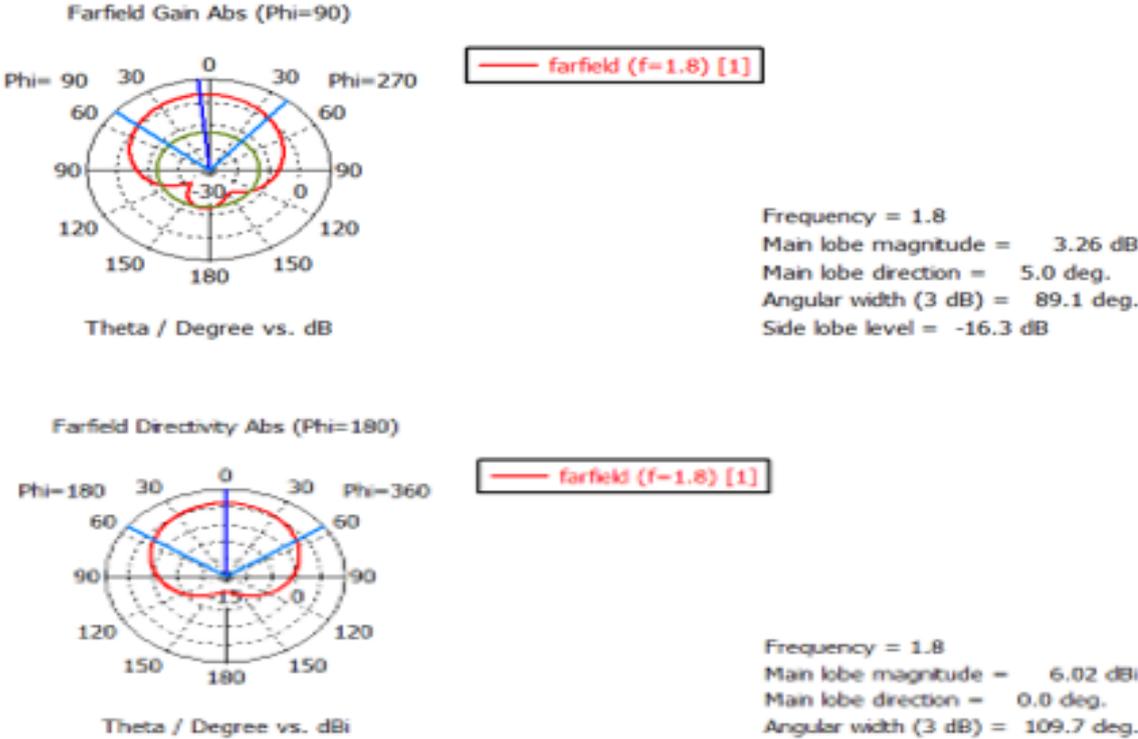


Figure III-9: Diagramme de rayonnement en 2D de l'antenne initiale optimisée à la fréquence 1.8GHz.

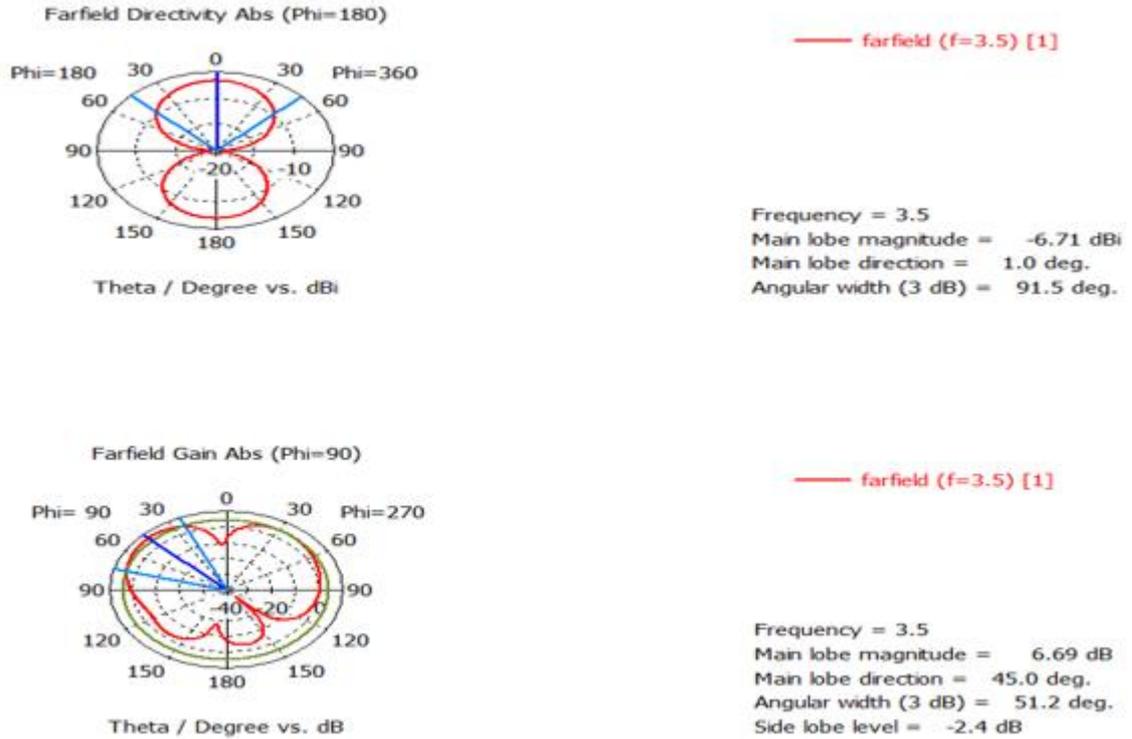


Figure III-5: Diagramme de rayonnement en 2D de l'antenne initiale optimisée à la fréquence 3.5GHz.

III.4.2.4 L'efficacité :

Nous déterminons l'efficacité de notre antenne en fonction du gain et de la directivité par la relation suivante :

$$\eta = \frac{\text{Gain}}{\text{Directivité}} = \frac{6.69}{7.99} = 83\% \quad (\text{III- 1})$$

L'efficacité de notre antenne initiale optimisée est égale à : 83%.

III.4.2.5 Densité de courant :

La figure III-11 montre la distribution de courant surfacique du patch.

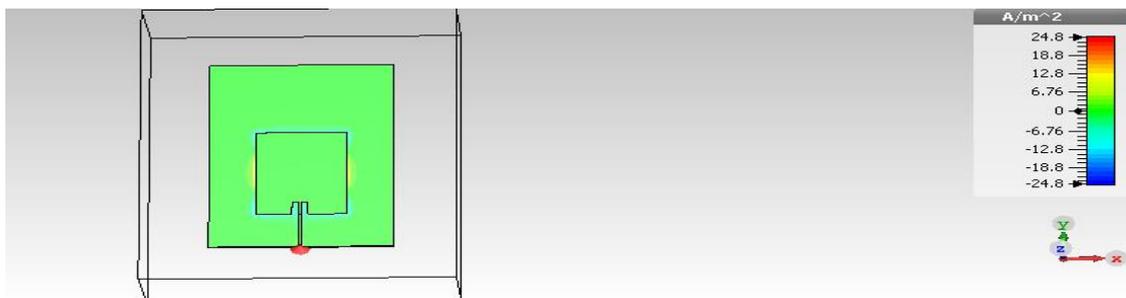


Figure III-6:Densité de courant surfacique du patch.

Nous avons remarqué que le courant est concentré sur le patch à côté de la ligne d'alimentation.

III.5 Antenne proposée :

Suite à l'étude de l'antenne précédente, nous avons conçu une nouvelle antenne tri-bandes fonctionnant aux fréquences 1.8, 3.5 et 6.1 GHz en insérant des fentes dans le patch de l'antenne initiale qui fonctionne aux deux fréquences 1.8 et 3.5 GHz. La **figure III-12** représente la géométrie de la nouvelle structure de l'antenne proposée. Le plan de masse recouvre toute la face arrière du substrat.

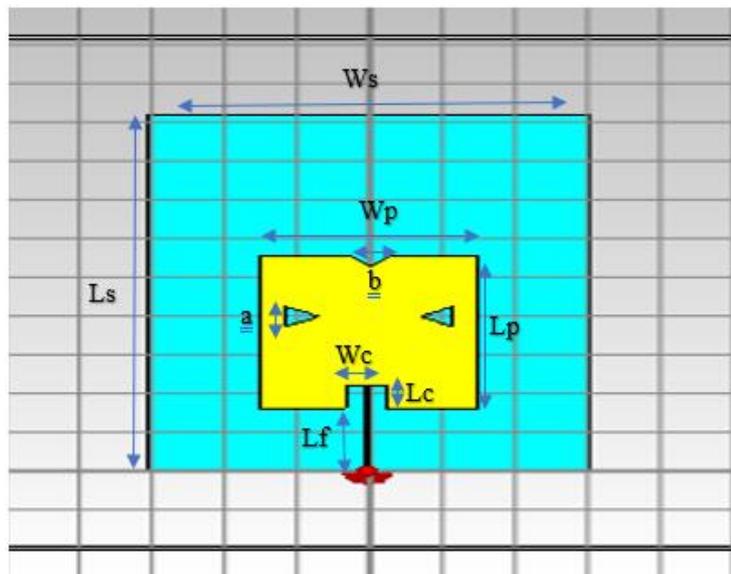


Figure III-7: Géométrie de l'antenne tri-bandes proposée.

III.5.1 Etape de conception :

Pour obtenir une antenne tri-bandes et pour encore améliorer les performances de l'antenne nous avons commencé par insérer une fente de forme rhombique comme montré sur la **figure III-13**.

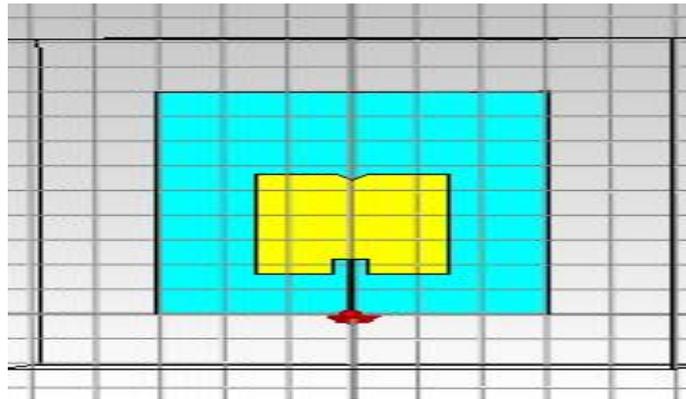


Figure III-8: Insertion de fente rhombique.

La figure III-14 montre le coefficient de réflexion après avoir inséré la fente rhombique.

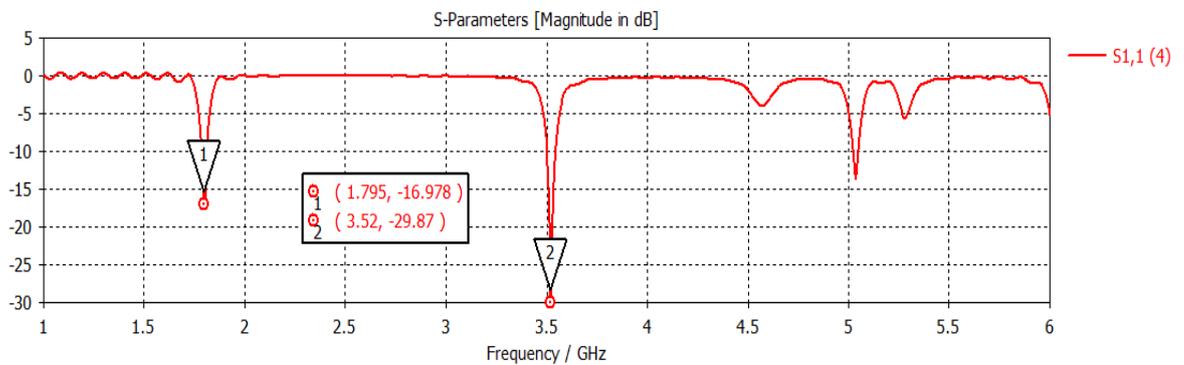


Figure III-9: Coefficient de réflexion de l'antenne avec fente rhombique.

Nous remarquons un déplacement de la fréquence de résonance de 1.8 GHz et qu'on n'a pas une bonne adaptation à cette fréquence.

➤ Variation du paramètre b de la fente rhombique

La figure III-15 montre l'impact de la variation du paramètre (b) sur le coefficient de réflexion en fonction de la fréquence.

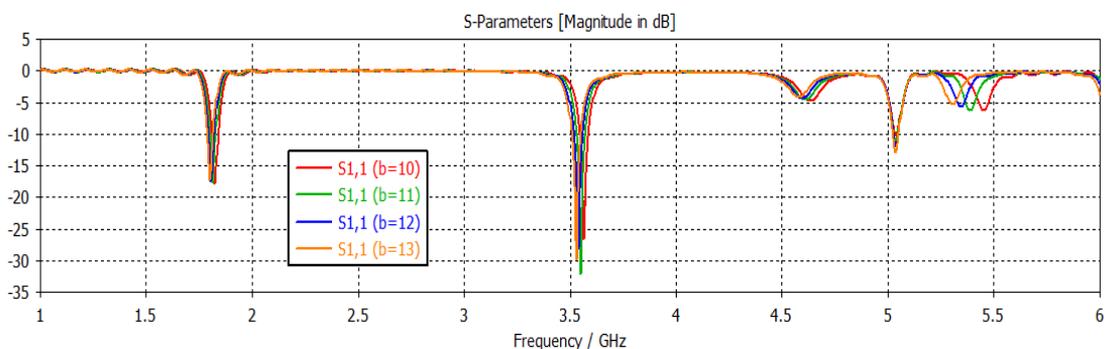


Figure III-10: Coefficient de réflexion en variant le paramètre (b) de la fente rhombique.

Pour une valeur de b égal à 12 mm, nous observons que le coefficient de réflexion est bien ajusté aux deux fréquences 1.8 et 3.5GHz.

Ensuite, nous avons inséré deux fentes de forme triangulaire toujours sur l'élément rayonnant, afin d'obtenir une meilleure adaptation d'impédance et d'avoir des bonnes performances de l'antenne proposée.

La figure III-16 montre la géométrie de l'antenne après insertion des fentes de forme triangulaire.

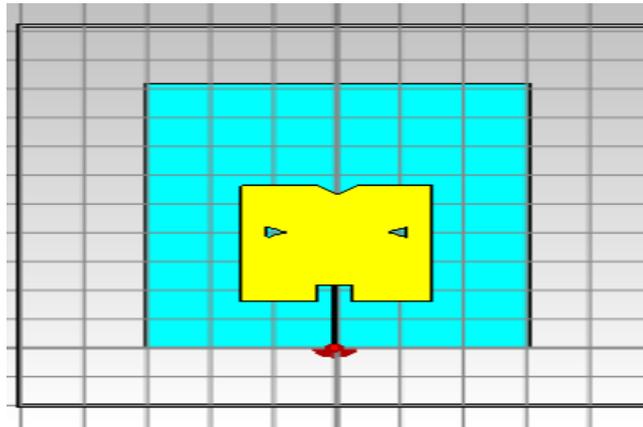


Figure III-11: Insertion de fente triangulaire.

➤ Variation du paramètre (a) de la fente triangulaire

La figure III-17 représente la variation du paramètre (a) en fonction de la fréquence.

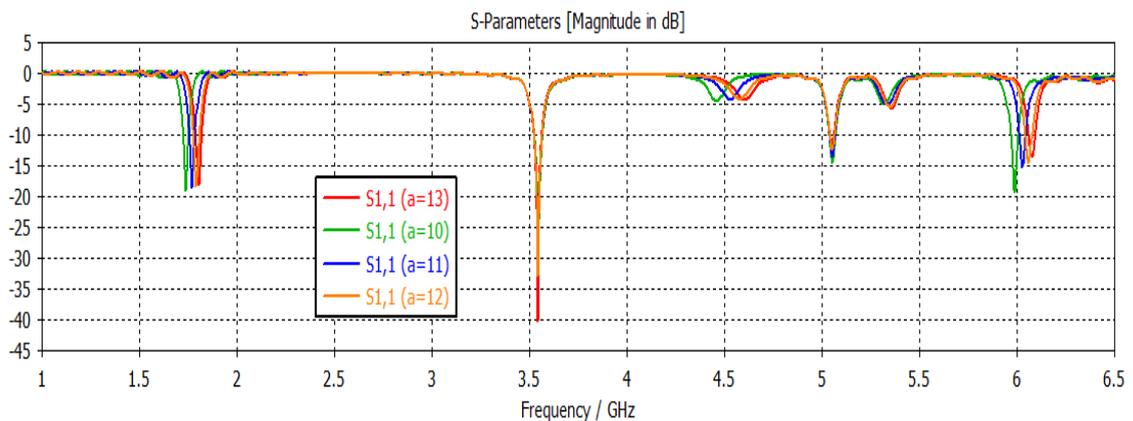


Figure III-12: Coefficient de réflexion en variant le paramètre (a) de la fente triangulaire.

Suite à cette étude paramétrique sur le paramètre (a) nous avons déterminé la valeur de ce paramètre ((a)=13) qui permet d'obtenir une bonne adaptation et un bon ajustement des fréquences de résonance.

III.5.2 Performances de l'antenne proposée :

Le **tableau III-3** résume les dimensions optimales relatives à l'antenne proposée.

Paramètres	variables	Valeurs (mm)
Largeur du substrat	W_s	60.76
Longueur du substrat	L_s	92
Epaisseur du substrat	H	1.6
Epaisseur du ground et patch	em	0.018
Longueur du patch	L_p	39.69
Largeur du patch	W_p	30
Largueur de la ligne de transmission	W_f	0.5
Longueur de la ligne de transmission	L_f	16
Longueur de l'encoche	L_c	6
Largeur de l'encoche	W_c	3

Tableau III-3:Dimensions géométriques de l'antenne proposée.

Nous montrons dans la **figure III-18** la variation du coefficient de réflexion de l'antenne proposée.

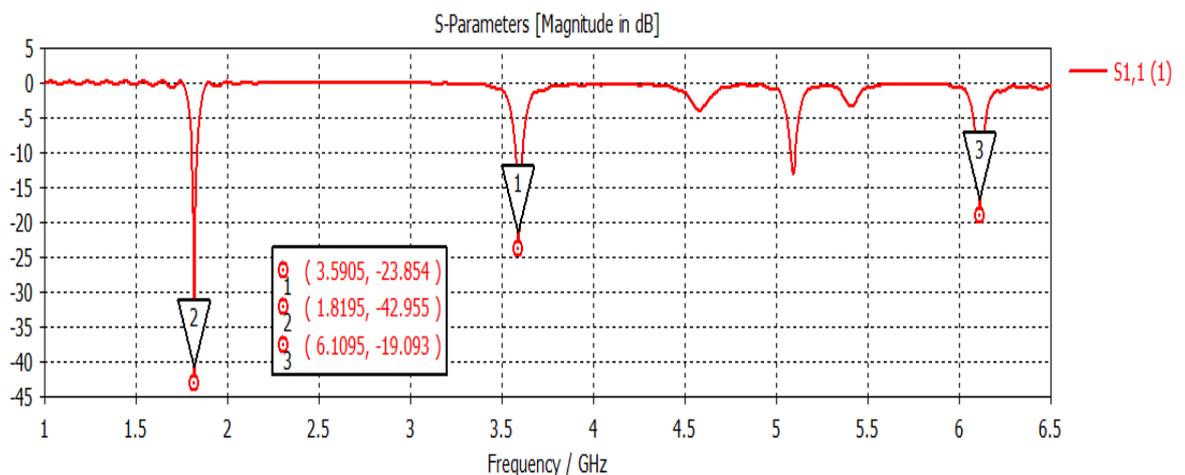


Figure III-13:Coefficient de réflexion de l'antenne proposée.

Nous observons que le S11 est de -23.854 dB à la fréquence 3.5905 GHz de -42.955 dB à la fréquence 1.8195 GHz et de -19.093 dB à la troisième fréquence à 6.1095 GHz. Cette fréquence de 6.1095 GHz correspond à Wifi 6E [39].

III.5.3 Rapport d'onde stationnaire (VSWR) :

La figure III-19 représente le rapport d'onde stationnaire (ROS) en fonction des fréquences.

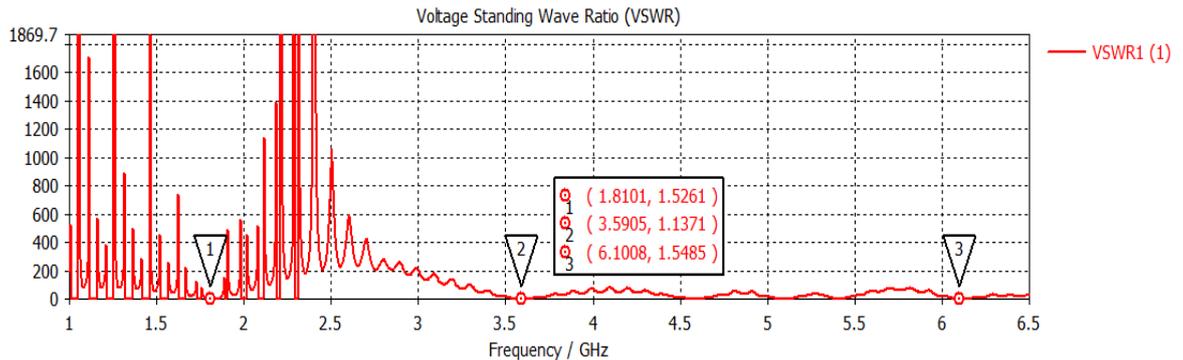


Figure III-19: Rapport d'onde stationnaire (VSWR).

Nous remarquons que le VSWR est compris entre 1 et 2 pour les trois fréquences de résonance ce qui montre que l'antenne est bien adaptée à ces fréquences.

III.5.4 Diagramme de rayonnement et le Gain :

Les diagrammes de rayonnement 3D et 2D, simulés aux fréquences 1.8 3.5 et 6 GHz de l'antenne proposée sont illustrés dans les figure III-20, III-21, III-22, III-23, III-24 et III-25.

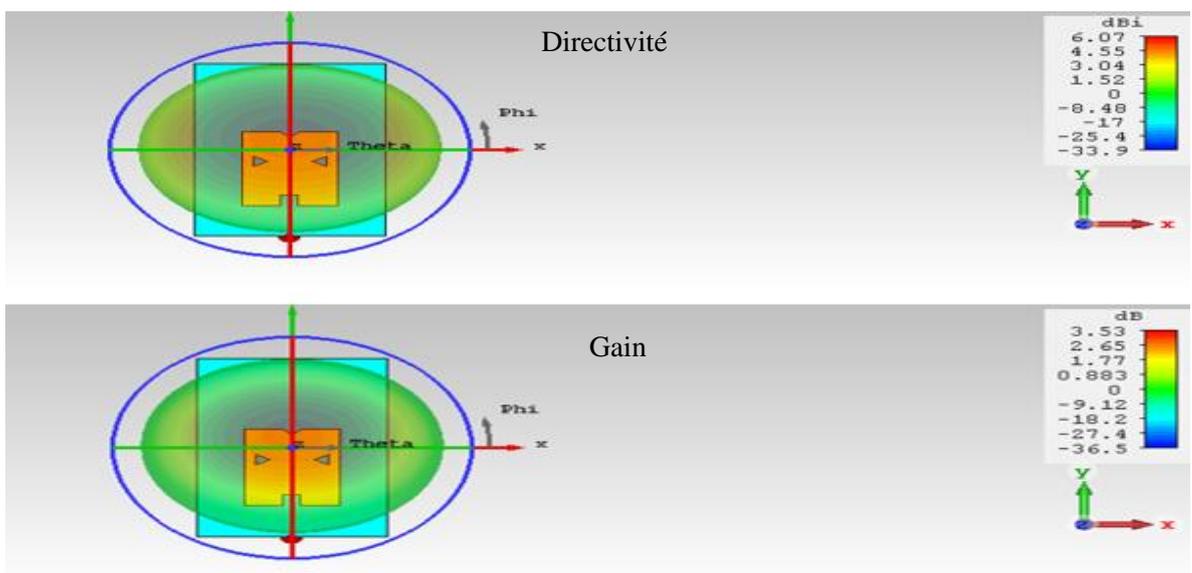


Figure III-14: Diagramme de rayonnement 3D de l'antenne proposée à la fréquence 1.8GHz.

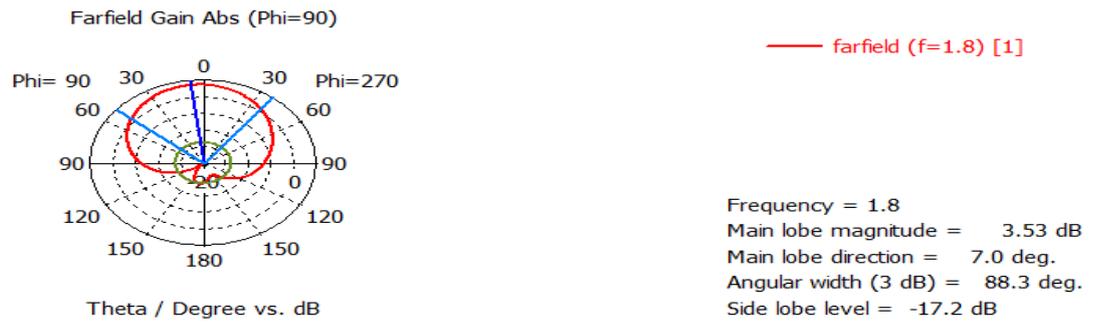


Figure III-15: Diagramme de rayonnement 2D (phi=90) de l'antenne proposée.

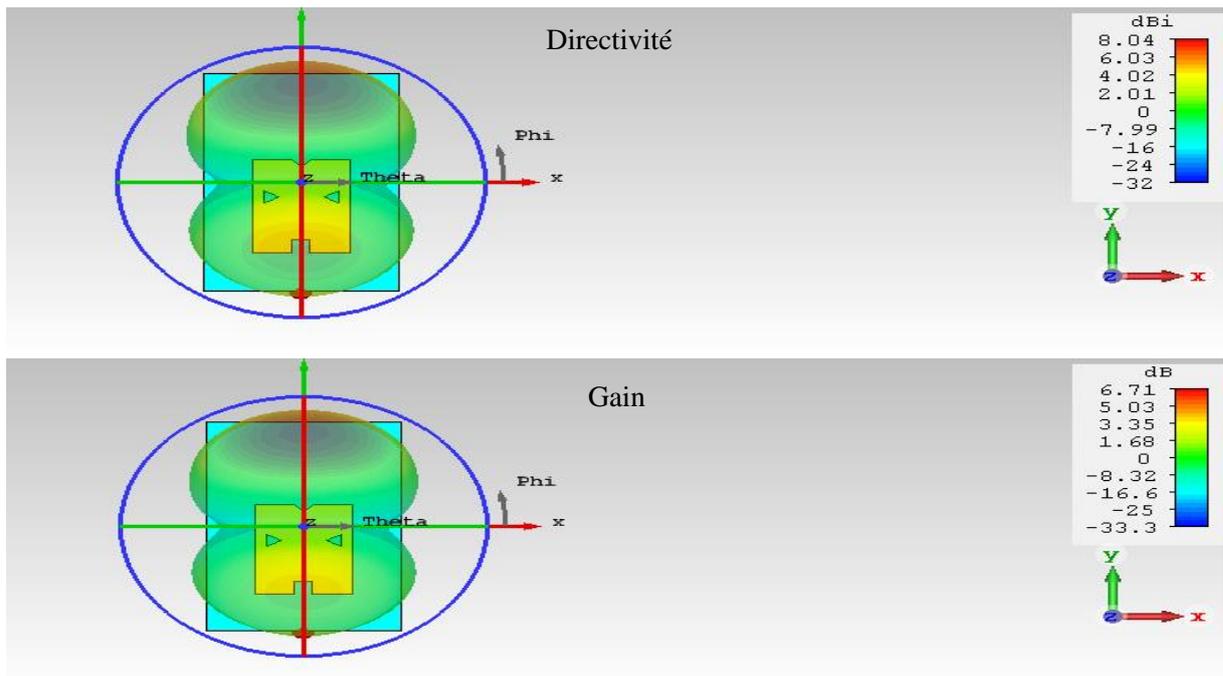


Figure III-16: Diagramme de rayonnement 3D de l'antenne proposée à la fréquence 3.5GHz.

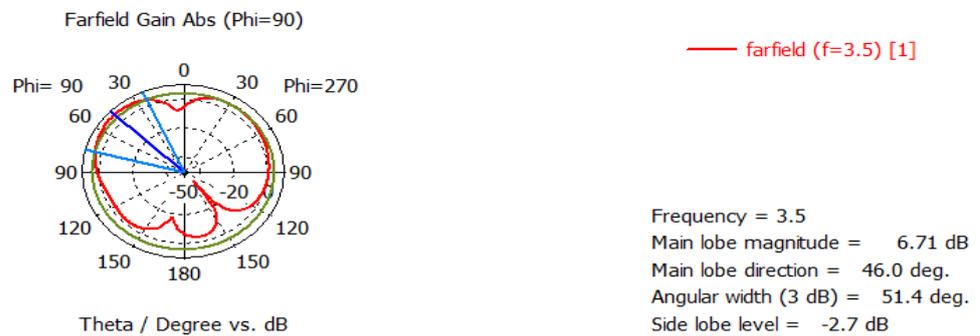


Figure III-17: Diagramme de rayonnement 2D (phi=90) de l'antenne proposée à la fréquence 3.5GHz.

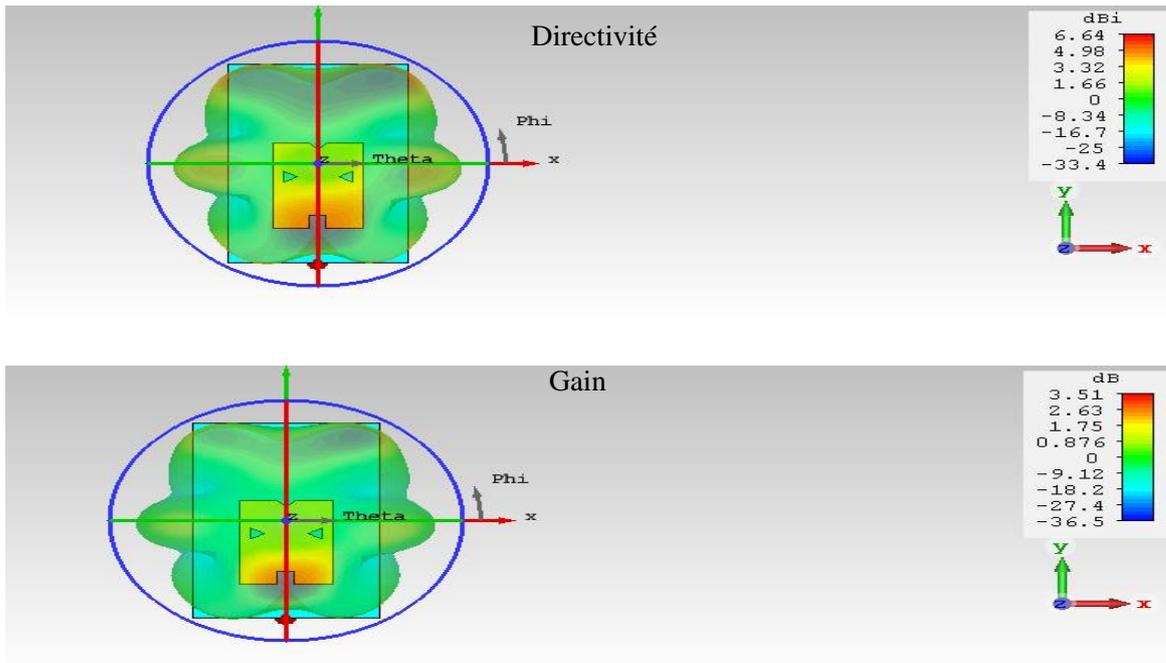


Figure III-18: Diagramme de rayonnement 3D de l'antenne proposée à la fréquence 6GHz.



Figure III-19: Diagramme de rayonnement 2D ($\phi=90$) de l'antenne proposée à la fréquence 6GHz.

III.5.5 L'efficacité :

En utilisant la relation (III:1) l'efficacité de l'antenne égale à 83%.

III.6 Antennes MIMO à deux éléments 2x1 :

Après avoir terminé la conception de l'antenne tri-bandes (l'antenne proposée) nous avons conçu une antenne MIMO. La première antenne MIMO conçue est constituée de deux éléments.

La figure III-26 présente la structure d'antennes MIMO à deux éléments.

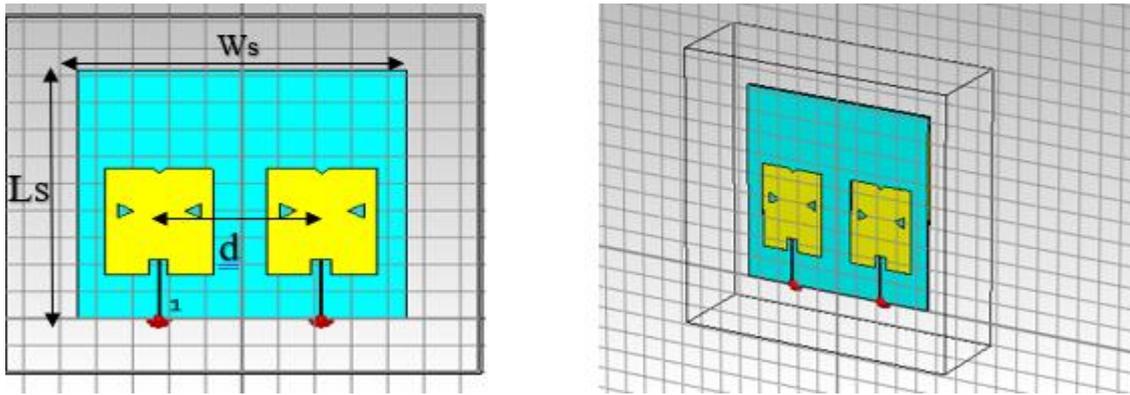


Figure III-20: Géométrie de l'antenne MIMO à deux éléments et sa structure sous CST Microwave studio.

Le tableau III-4 résume les valeurs des principaux paramètres utilisés dans la conception de notre antenne MIMO.

Les paramètres	Ws Largeur de substrat et de plan de masse	Ls Longueur de substrat et de plan de masse	d L'espace entre les deux patches	H Épaisseur de substrat
La valeurs (mm)	90.76	92	41.7	1.6

Tableau III-4: Paramètres d'antennes MIMO.

III.6.1 Coefficient de réflexion (S11) :

La figure III-27 représente le (S11) de l'antenne MIMO à deux éléments.

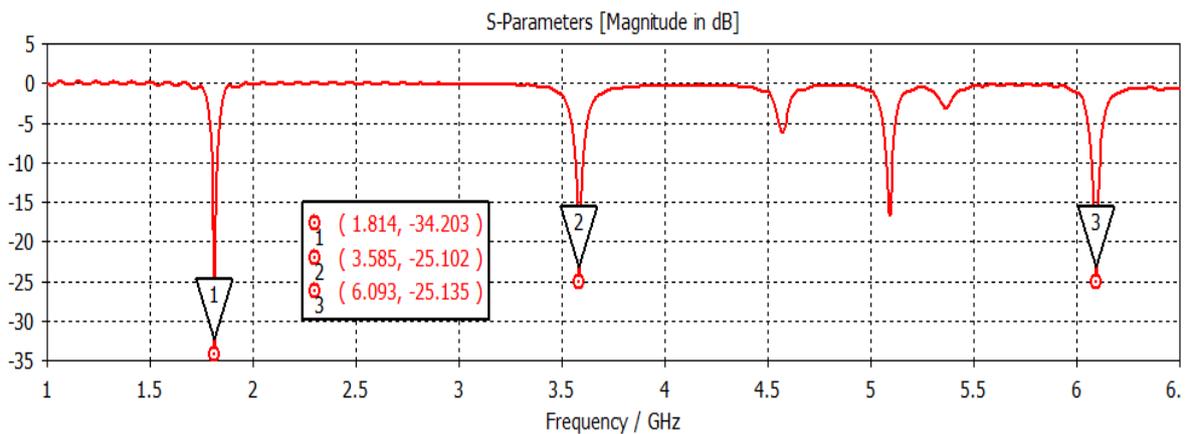


Figure III-21: Coefficient de réflexion en fonction de la fréquence.

Nous observons que le S11 est de -25.102 dB à la fréquence 3.585 GHz, de -34.203 dB à la fréquence 1.814 GHz et de -25.135 dB à la fréquence 6.093 GHz ce qui indique une bonne adaptation aux trois fréquences de fonctionnement.

III.6.2 Rapport d'onde stationnaire (VSWR) :

La **figure III-28** représente le rapport d'onde stationnaire (VSWR) de notre antenne MIMO.

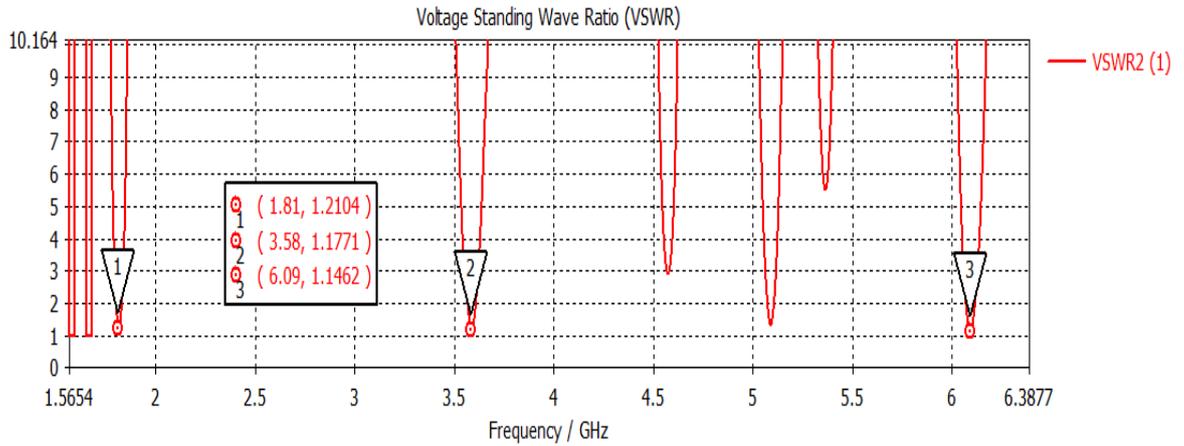
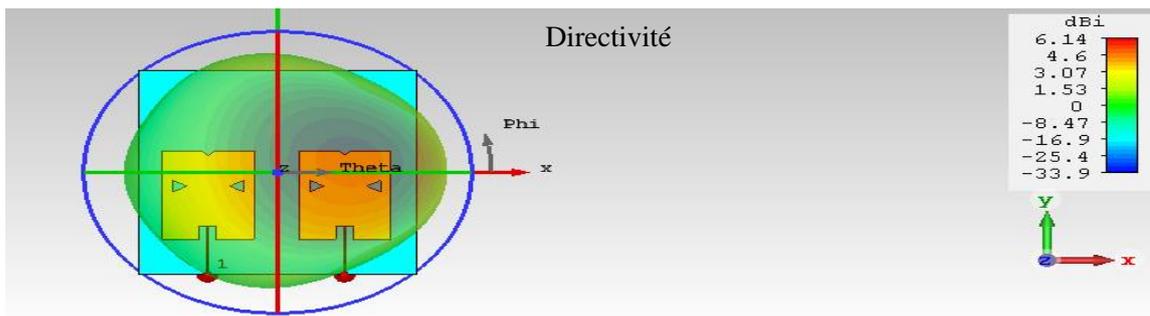


Figure III-28: Rapport d'onde stationnaire (VSWR) en fonction de la fréquence.

Le VSWR est compris entre 1 et 2 pour les trois fréquences, ceci implique une bonne adaptation de notre antenne MIMO à deux éléments.

III.6.3 Diagramme de rayonnement et le Gain :

Les diagrammes de rayonnement 3D et 2D, simulés aux fréquences 1.8 3.5 et 6 GHz de l'antennes MIMO à deux éléments sont illustrés dans les **figures III-29, III-30, III-31, III-32, III-33 et III-34**



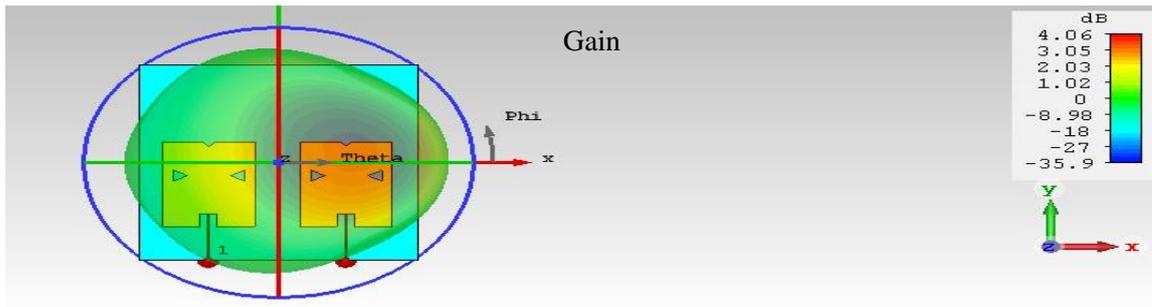


Figure III-29: Diagramme de rayonnement 3D de l'antenne MIMO à la fréquence 1.8GHz.



Figure III-22: Diagramme de rayonnement 2D de l'antenne MIMO dans le plan E à la fréquence 1.8GHz.

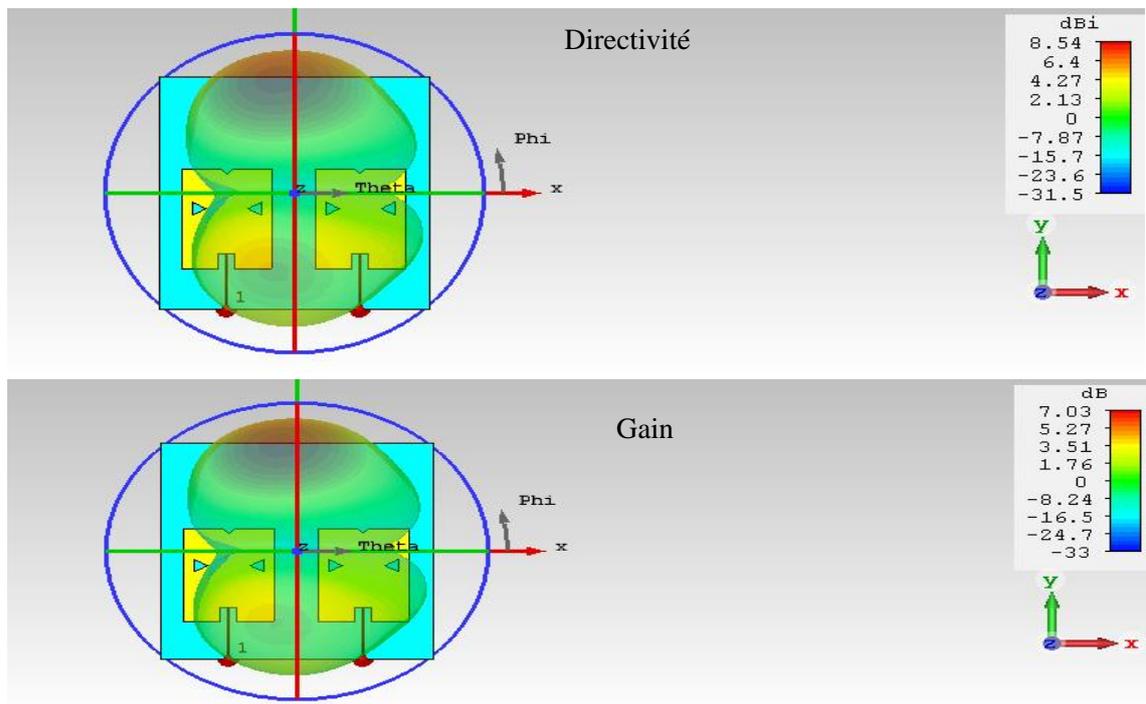


Figure III-23: Diagramme de rayonnement 3D de l'antenne MIMO à la fréquence 3.5GHz.



Figure III-24: Diagramme de rayonnement 2D de l'antenne MIMO dans le plan E à la fréquence 3.5GHz.

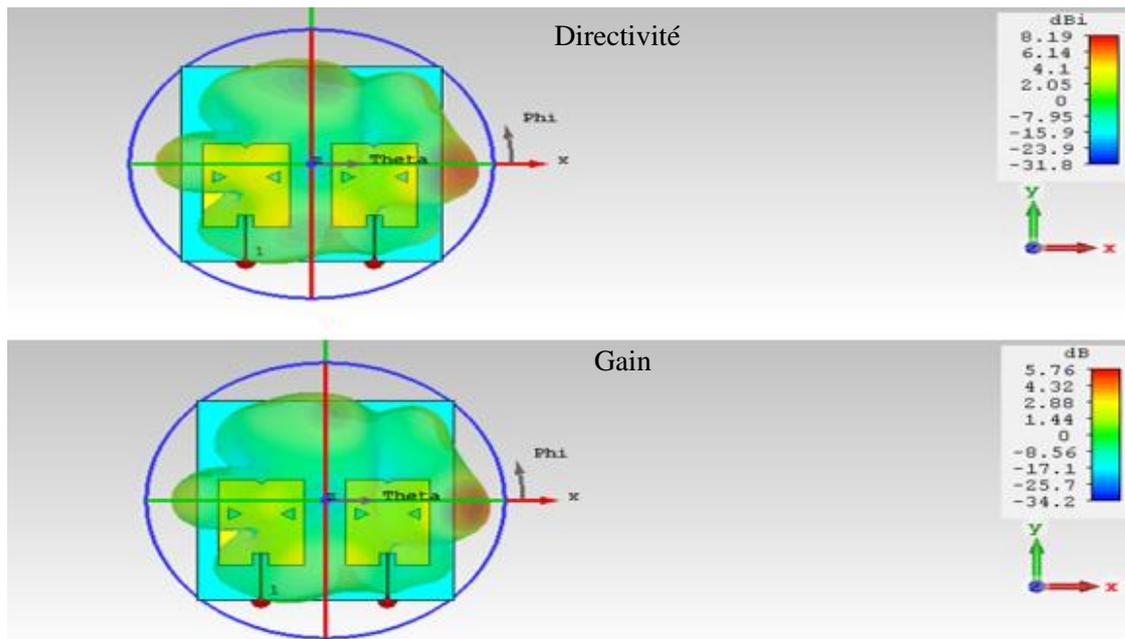


Figure III-25: Diagramme de rayonnement 3D de l'antenne MIMO à la fréquence 6GHz.



Figure III-26: Diagramme de rayonnement 2D de l'antenne MIMO dans le plan E à la fréquence 6GHz.

III.6.4 Densité de courant :

La figure III-35 montre la distribution de courant surfacique de l'antenne MIMO à deux éléments.

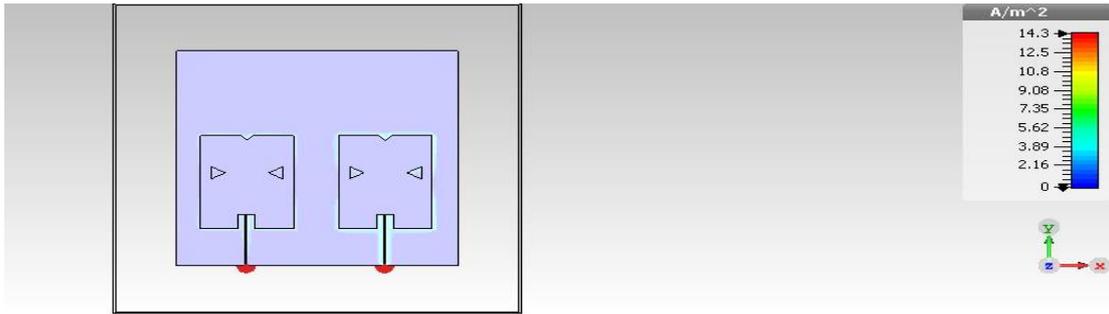


Figure III-27: Distribution de courant surfacique de l'antenne MIMO à deux éléments.

Nous observons qu'un fort courant est localisé sur les deux patches.

III.7 Antennes MIMO à six éléments 6x1 :

La deuxième antenne MIMO conçue est une antenne MIMO à six éléments. La figure III-36 montre la géométrie de cette antenne.

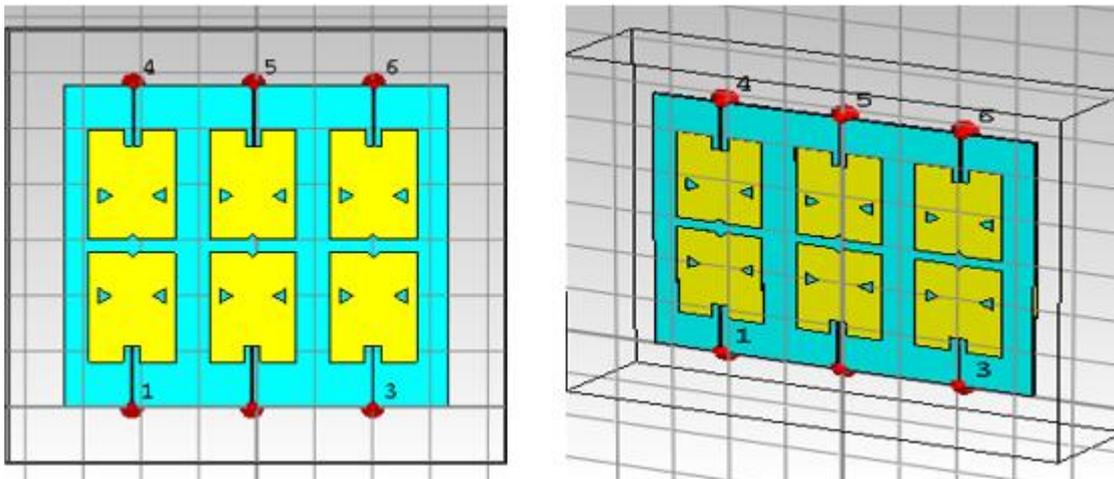


Figure III-28: Géométrie d'antenne MIMO à six éléments et sa structure sous CST Microwave studio.

Les paramètres de l'antenne MIMO à six éléments sont présentés dans le tableau III-5.

Les paramètres	W_s Largeur de substrat et de plan de masse	L_s Longueur de substrat et de plan de masse	d l'espace entre les deux patches	H Epaisseur de substrat
La valeurs (mm)	132.46	115.69	41.7	1.6

Tableau III-5: Paramètres de l'antenne MIMO à six éléments.

III.7.1 Coefficient de réflexion (S11) :

La **figure III-37** représente le coefficient de réflexion de l'antenne MIMO à Six éléments.

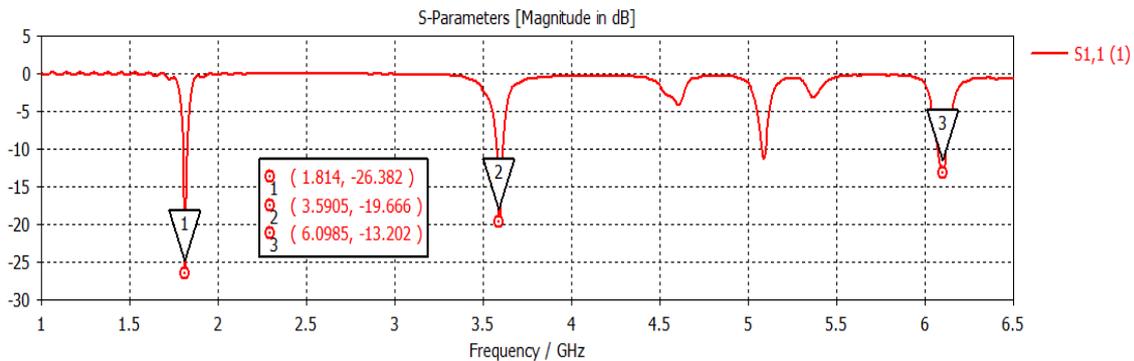


Figure III-29: Coefficient de réflexion en fonction de la fréquence.

Nous remarquons que le coefficient de réflexion est de -19.666 dB à la fréquence 3.59 GHz, de -26.382 dB à la fréquence 1.814 GHz, et à la fréquence 6.098 GHz il est de -13.202 dB ce qui indique une bonne adaptation aux trois fréquences de fonctionnement.

III.7.2 Rapport d'onde stationnaire (VSWR) :

La **figure III-38** montre le rapport d'onde stationnaire en fonction de fréquence.

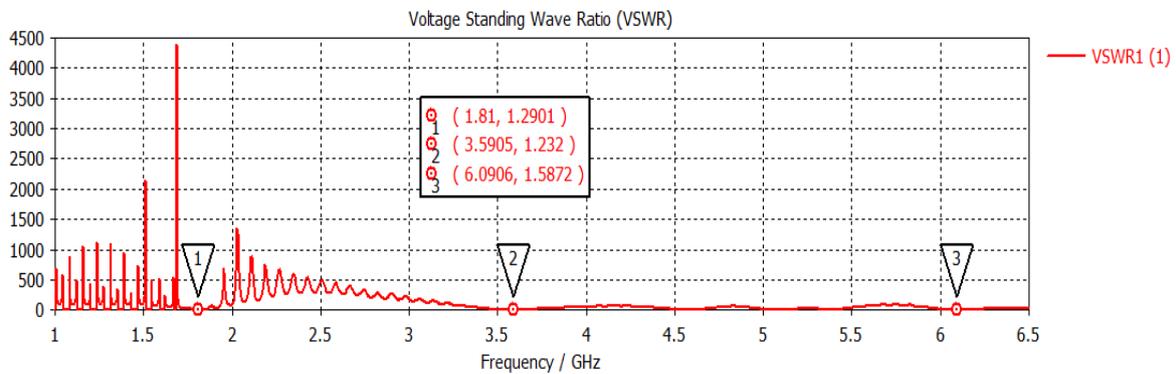


Figure III-38 : Rapport d'onde stationnaire (VSWR) en fonction de la fréquence.

On remarque que le VSWR est de l'ordre de 1 aux trois fréquences utilisées, ce qui démontre que nous avons une bonne adaptation d'impédance.

III.7.3 Diagramme de rayonnement et le Gain :

Les diagrammes de rayonnement 3D et 2D, simulés aux fréquences 1.8, 3.5 et 6 GHz de l'antenne MIMO à six éléments sont illustrés dans les figures suivantes : **III-39, III-40, III-41, III-42, III-43 et III-44.**

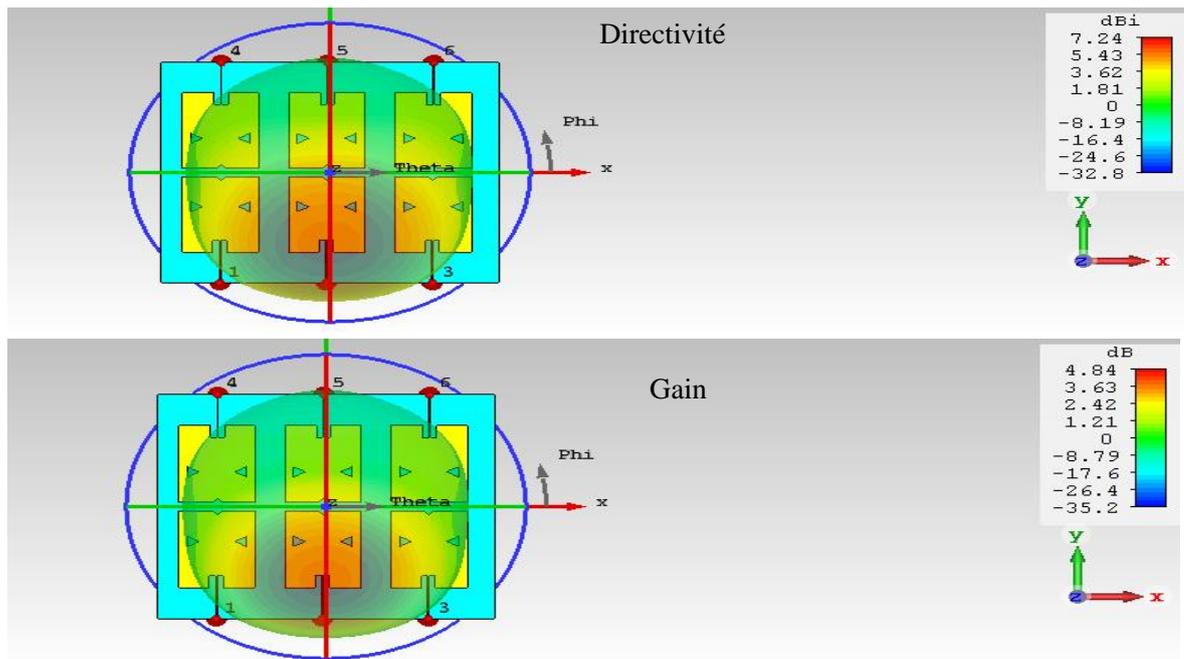


Figure III-39: Diagramme de rayonnement 3D de l'antenne MIMO à six éléments à la fréquence 1.8GHz.



Figure III-30: Diagramme de rayonnement 2D de l'antenne MIMO à six éléments à la fréquence 1.8GHz.

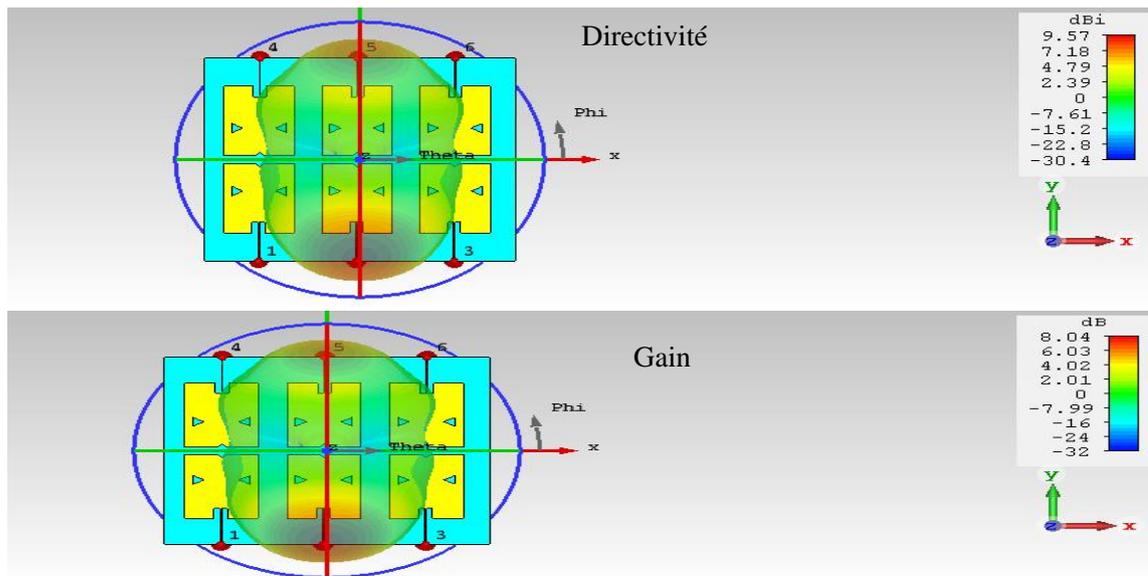


Figure III-31: Diagramme de rayonnement 3D de l'antenne MIMO à six éléments à la fréquence 3.5 GHz.



Figure III-32: Diagramme de rayonnement 2D de l'antenne MIMO à six éléments à la fréquence 3.5 GHz.

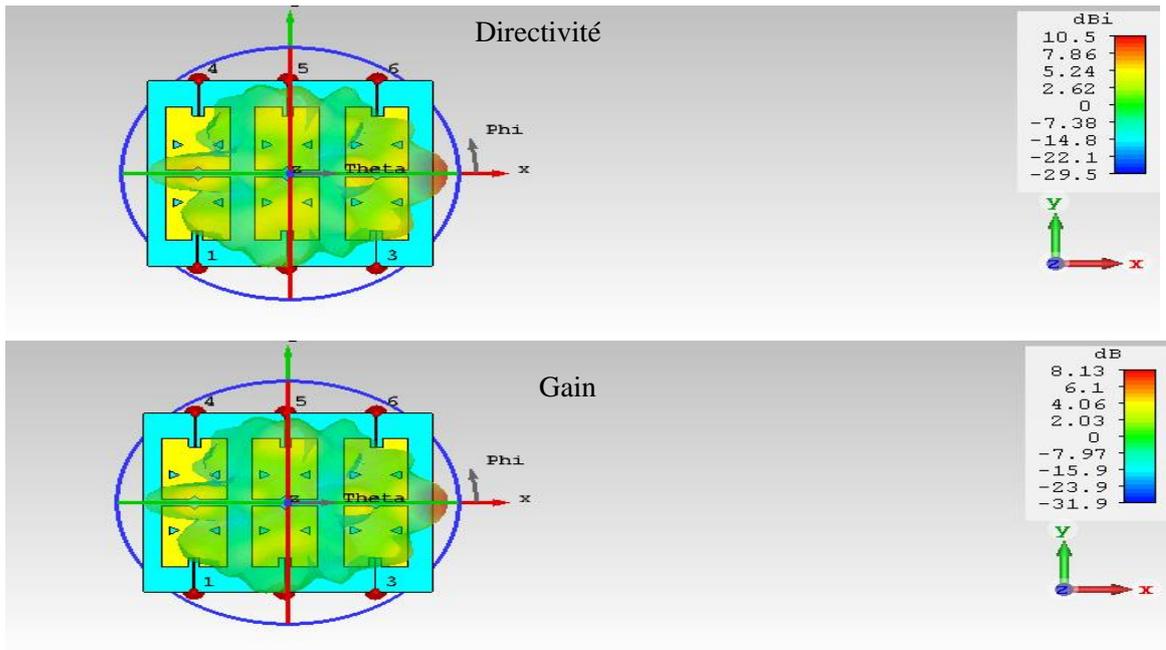


Figure III-33: Diagramme de rayonnement 3D de l'antenne MIMO à six éléments à la fréquence 6 GHz.

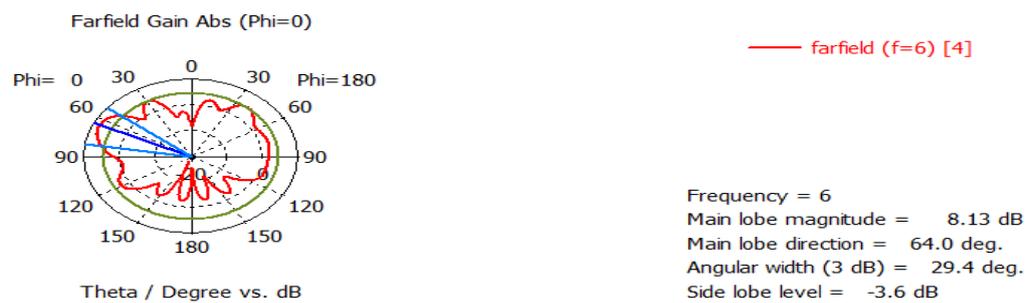


Figure III-34: Diagramme de rayonnement 2D de l'antenne MIMO à six éléments à la fréquence 6 GHz.

III.8 Comparaison des résultats obtenus :

	Antenne patch design	Réseau à deux éléments	Réseau à six éléments
Coefficient de réflexion	-42.955	-34.203	-26.382
Directivé	6.07	6.14	7.24
Gain (dB)	3.53	4.06	4.84
Efficacité	58.15%	66.12%	66.85%

Tableau III-6: Comparaison des résultats d'antennes MIMO proposées à la fréquence 1.8 GHz

	Antenne patch design	Réseau à deux éléments	Réseau à six éléments
Coefficient de réflexion	-23.854	-25.102	-19.666
Directivé	8.04	8.54	9.57
Gain (dB)	6.71	7.03	8.04
Efficacité	83.45%	82.31%	84.01%

Tableau III-7: Comparaison des résultats d'antennes MIMO proposées à la fréquence 3.5 GHz

	Antenne patch design	Réseau à deux éléments	Réseau à six éléments
Coefficient de réflexion	-19.093	-25.135	-13.202
Directivé	6.64	8.19	10.5
Gain (dB)	3.51	5.76	8.13
Efficacité	52.86%	70.32%	77.42%

Tableau III-8: Comparaison des résultats d'antennes MIMO proposées à la fréquence 6 GHz.

III.9 Conception d'une antenne reconfigurable en fréquence :

Dans cette partie, nous allons concevoir une antenne reconfigurable, en utilisant des diodes PIN. Cette antenne reconfigurable peut rayonner sur la bande 4G, 5G et la bande [3.7-4.2] GHz qui est dédiée pour les applications satellitaires [40].

III.9.1 Antenne reconfigurable proposée :

La structure de l'antenne reconfigurable proposée est basée sur notre antenne précédente, qui fonctionne aux fréquences 1.8, 3.5 et 6 GHz. Nous avons inséré des tronçons de lignes (stub) sur la face supérieure du substrat, en suite nous avons optimisé tout l'antenne afin d'avoir des caractéristiques voulues en termes de fréquence de résonance souhaitée et d'adaptation.

La structure de l'antenne reconfigurable proposée est montrée dans **la figure III-45.**

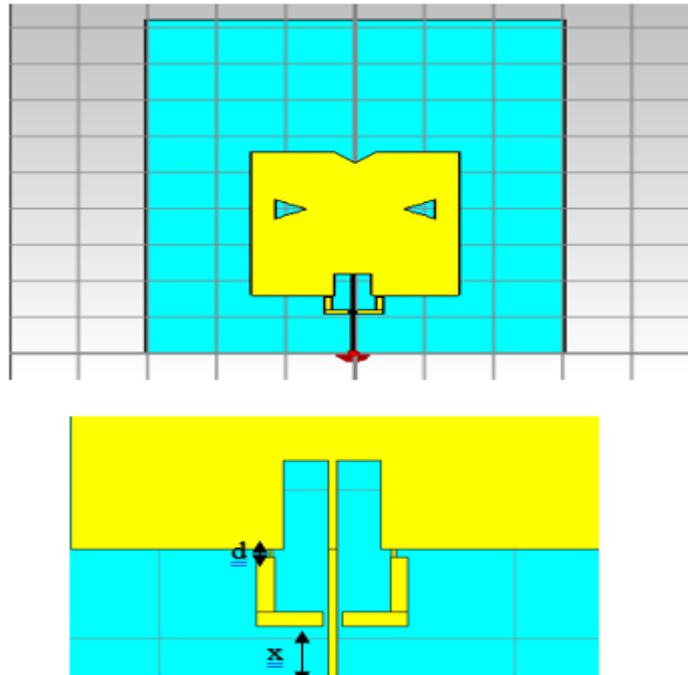


Figure III-35:Antenne reconfigurable proposée

Les dimensions optimales de l'antenne reconfigurable proposée sont illustrées dans le **tableau III-9**

Paramètres	variables	Valeurs (mm)
Largeur du substrat	W_s	60.76
Longueur du substrat	L_s	92
Epaisseur du substrat	H	1.6
Epaisseur du ground et patch	e_m	0.018
Longueur du patch	L_p	39.69
Largeur du patch	W_p	30
Largeur de la ligne de transmission	W_f	0.5
Longueur de la ligne de transmission	L_f	16
Longueur de l'encoche	L_c	6
Largeur de l'encoche	W_c	3
Longueur du stub	L_{e1}	1

Largeur du stub	dl	1.5
Position du stub	X	2.8
La distance entre le stub et le patch initial (sans diode)	d	7.5

Tableau III-9: Les dimensions optimales de l'antenne reconfigurable proposée.

Pour obtenir une antenne reconfigurable en fréquence nous avons inséré des diodes PIN entre le patch de l'antenne proposée et les tronçons de ligne ajoutés dans la structure du patch. Ces diodes vont prendre deux états ON (passante) ou OFF (bloquée).

Dans notre conception on va utiliser un morceau de ligne pour modéliser l'état ON de la diode alors que l'état OFF est modélisé par un circuit ouvert (vide).

III.9.2 Résultats et simulation :

Nous avons utilisé deux diodes ce qui permet d'avoir quatres cas possibles (ON-ON, OFF-OFF, OFF-ON, ON-OFF).

Etat 1 : OFF-OFF

L'état OFF-OFF est modélisé par des discontinuités à la structure de l'antenne, ce vide est considéré comme une fente qui va affecter l'adaptation.

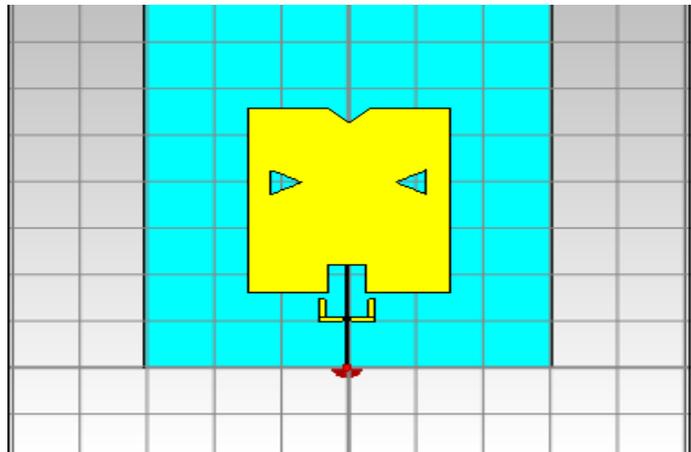


Figure III-36:La structure de l'antenne correspondante à l'état OFF-OFF.

Le coefficient de réflexion de cette reconfiguration est représenté sur la **figure III-47** .il est de -16.78 dB à la fréquence 3.596 GHz qui correspond à l'application 5G, de -35.618 dB à la fréquence 1.819 GHz qui correspond à l'application 4G, nous remarquons aussi qu'à la fréquence 6.109 GHz le S11 est de -25.32 dB qui correspond à l'applications satellitaires, ceci indique une bonne adaptation aux trois fréquences.

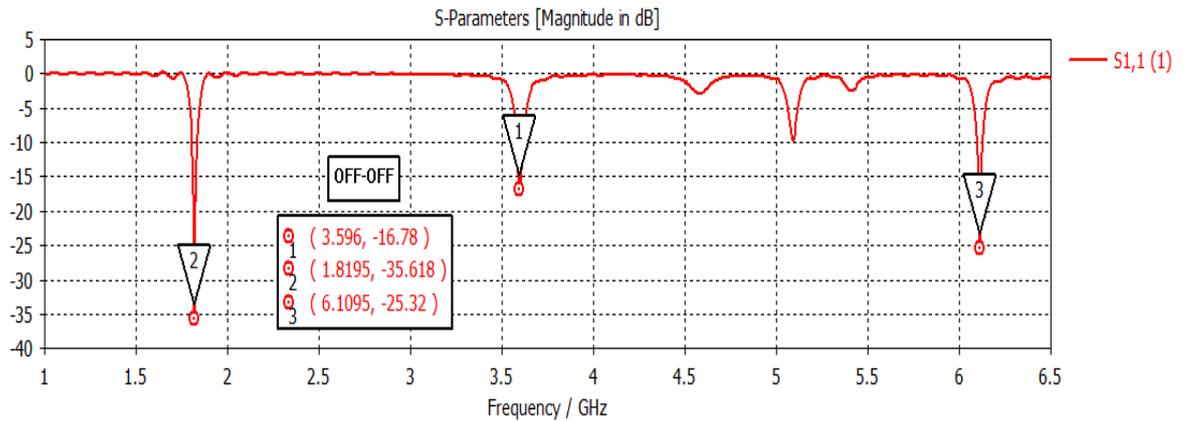


Figure III-37: L'évolution de coefficient de réflexion pour l'état OFF-OFF.

Etat 2 : ON-ON

Dans cet état, nous remplaçons les deux diodes par des morceaux de ligne. Le stub est relié avec le patch. La **figure III-48** montre la structure de l'état ON-ON.

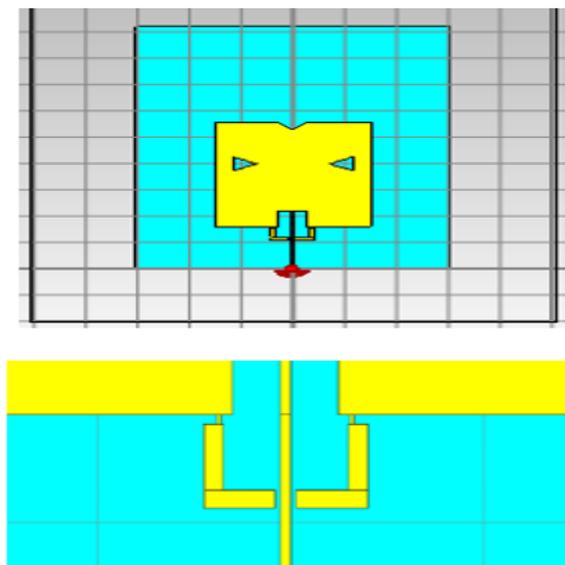


Figure III-48: La structure de l'antenne correspondante à l'état ON-ON.

Cette reconfiguration permet d'avoir une résonance à la fréquence 4.234 GHz qui correspond à la bande des applications satellitaires, avec un coefficient de réflexion de -29.153 dB qui présente une bonne adaptation.

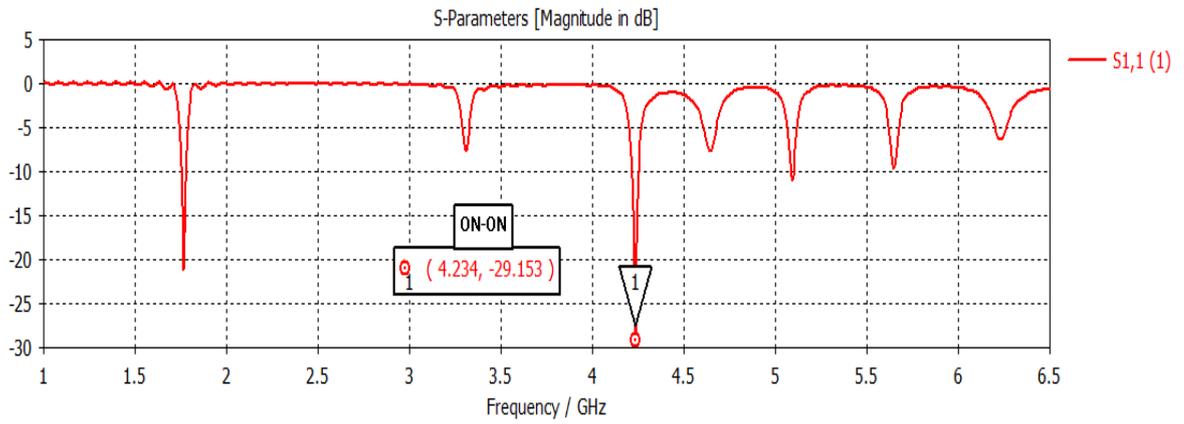


Figure III-49 : L'évolution de coefficient de réflexion pour l'état ON-ON.

Etat 3 : OFF-ON

L'état OFF-ON est représenté sur la **figure III-50**.

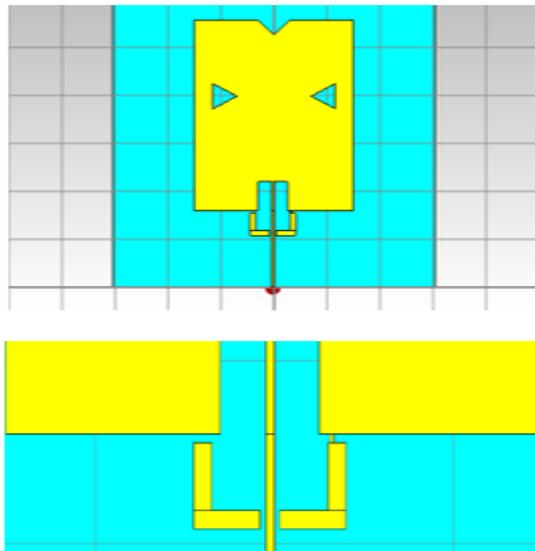


Figure III-38: La structure de l'antenne correspondante à l'état OFF-ON.

Nous avons obtenu dans cette reconfiguration une résonance à la fréquence 3.94GHz qui correspond à la bande des applications satellitaires, avec une adaptation de -25.339dB.

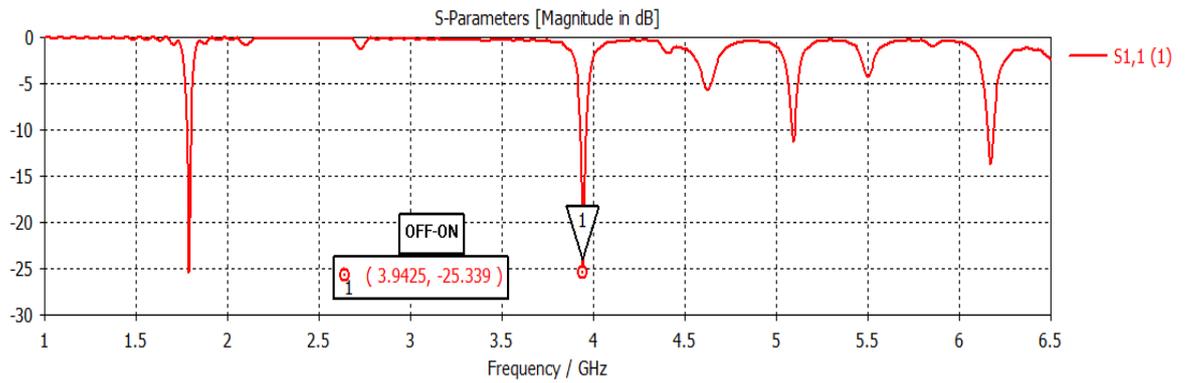


Figure III-39: La représentation du coefficient de réflexion pour l'état OFF-ON.

Etat 4 : ON-OFF

La figure III-52 représente L'état ON-OFF.

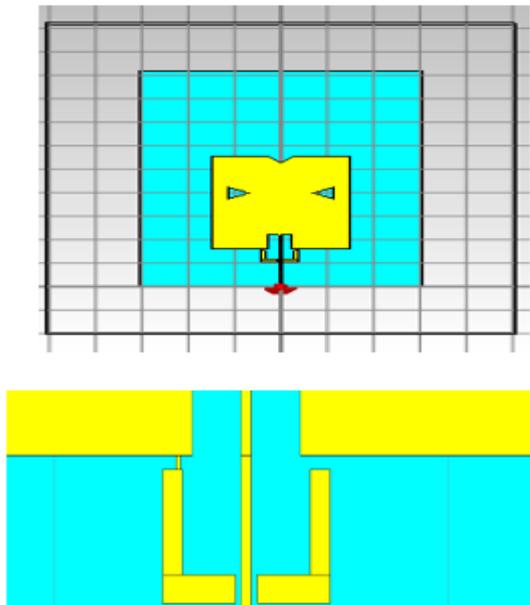


Figure III-40: La structure de l'antenne correspondante à l'état ON-OFF.

Cette reconfiguration permet d'obtenir deux fréquences de résonance, une à 3.95 GHz qui correspond à la bande des applications satellitaires [3.7-4.2] GHz, avec un coefficient de réflexion de -25.404 dB et une autre fréquence à 6.14 GHz avec un S11 de -28.39dB.

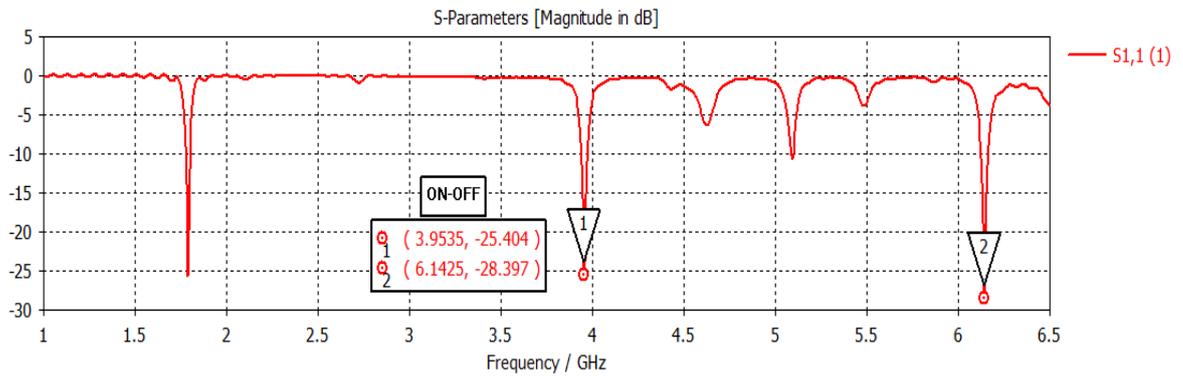


Figure III-41: La représentation du coefficient de réflexion pour l'état ON-OFF.

Le tableau III-10 résume les résultats des différents cas possibles.

	La fréquence de résonance (GHz)	Coefficient de réflexion (dB)
OFF-OFF	1.81	-35.618
ON-ON	4.23	-29.153
ON-OFF	3.95	-25.404
OFF-ON	3.94	-25.339

Tableau III-10: les résultats de différents cas possibles.

Nous remarquons que la reconfigurabilité permet de commuter entre la fréquence 4G, 5G et la bande [3.7-4.2] ans changer l'antenne, ce qui est intéressant pour les antennes destinées pour les applications 4G, 5G et applications satellitaires.

III.10 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous nous sommes intéressés à la conception d'antennes, de faible coût de réalisation et très facile à fabriquer, pour les applications 5G. Nous avons utilisé comme outil de simulation le logiciel CST Studio. Les caractéristiques les plus importantes des antennes conçues tels que le coefficient de réflexion, le diagramme de rayonnement, le gain et le taux d'ondes stationnaires (ROS) ont été présentés.

La première antenne conçue est une antenne tri-bandes. Ensuite, pour répondre à l'une des exigences de la 5G qui sera un gain élevé, une conception d'antennes MIMO à deux éléments puis à six éléments à partir de notre antenne proposée a été faite. Les résultats indiquent que l'antenne MIMO a des bonnes performances en termes de taux d'ondes

Chapitre 3 : étude et conception d'antennes MIMO pour les systèmes de communication 5G

stationnaires et d'efficacité avec une bonne amélioration du gain aux trois fréquences obtenus 1.8, 3.5 et 6 GHz.

Enfin, nous avons conçu une antenne reconfigurable en fréquence en insérant des diodes PIN. Cette antenne reconfigurable peut commuter entre la fréquence 4G, 5G et la bande [3.7-4.2] GHz qui est dédiée aux applications satellitaires.

Conclusion générale

Motivé par l'engouement avantageux que suscite la cinquième génération en tant que technologie primordiale et d'un intérêt attractif pour les télécommunications mobile, l'ensemble de la communauté scientifique s'active sans relâche aucune afin d'atteindre les meilleures performances possibles pour le bien être des utilisateurs dans le monde.

L'objectif de ce travail était l'étude et la conception d'antennes MIMO pour les applications 5G.

Dans le premier chapitre de ce mémoire des généralités sur la 5G avec ses technologies notamment le massif MIMO ont été présentées afin de comprendre et de se familiariser avec le concept de base de ces notions.

Dans le deuxième chapitre, nous avons présenté une vue d'ensemble sur les antennes imprimées, leurs caractéristiques fondamentales, leurs techniques d'alimentation et d'adaptation, et les différentes topologies de réseaux d'antennes. Nous avons terminé ce chapitre par la présentation des antennes reconfigurables.

Le troisième chapitre a été consacré à la conception d'antennes, de faible coût de réalisation et très facile à fabriquer, pour les applications 5G. Nous avons présenté dans ce chapitre les résultats de simulation, obtenus en utilisant comme outil de simulation le logiciel CST Studio, des caractéristiques les plus importantes des antennes conçues tels que le coefficient de réflexion, le diagramme de rayonnement, le gain et le taux d'ondes stationnaires (ROS).

Nous avons présenté dans la première partie de ce chapitre les étapes de conception d'une antenne tri-bandes fonctionnant aux fréquences 1.8, 3.5 et 6 GHz. Les résultats de simulations montrent que l'antenne possède de meilleures performances aux fréquences de fonctionnement. Ensuite, pour répondre à l'une des exigences de la 5G qui est un gain élevé, nous avons présenté la conception d'une antenne MIMO à deux éléments puis à six éléments à partir de notre antenne proposée.

Nous avons terminé ce chapitre par la présentation des résultats de simulation d'une antenne reconfigurable en fréquence en insérant des diodes PIN. Cette antenne reconfigurable peut commuter entre la fréquence 4G, 5G et la bande [3.7-4.2] GHz qui est dédiée aux applications satellitaires.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] N. Docomo « DOCOMO 5G White Paper » Juillet 2014.
- [2] R.Sapakal, S. Kadam « 5G Mobile Technology » Journal international de recherche avancée en génie informatique et technologie volume 2, p. 568–571, 2013.
- [3] A.Bouhafs, A.Ichou, Etude et conception d'un réseau d'antenne pour des applications 5G, Memeoire,L'Université De Tlemcen Faculté De Technologie Département De Telecommunication,2020.
- [4] A. Gohil, H. Modi, S. K. Patel « 5g Technology Of Mobile Communication : A Survey » Conférence Internationale Sur Les Systèmes Intelligents Et Le Traitement Du Signal 2013.
- [5] FEI Hu « Opportunities in 5g Networks a Research and development Perspective » Livre, 5 avril 2016.
- [6] M. Emmaeinna, S. Faci, A. Billabert, A. Kabalan, C. Algani and M. L. Diakité, "Performance Analysis of Radio-over-Fiber Based on Phase-Modulation and Direct-Detection for the Future 5G Network," 2018 20th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON), Bucharest, 2018, pp. 1-4.
- [7] Olivier Ezratty . «Opinions Libres» <https://www.oezratty.net>, 20 février 2018.
- [8] S.Sébastien, "Les Enjeux De La 5G, " ARCEP, 2017
- [9] www.lebigdata.fr/5g-tout-savoir.
- [10] J.Rodriguez« Fundamentals Of 5g Mobils Networks Livre,Institut des Télécommunications, Aveiro, Portugal, 2015.
- [11] 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
- [12] 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.
- [13] C. Shannon, A mathematical theory of communication, Bell system technical journal, 27, 379–423 and 623–56, 1948. Reprinted in Claude Elwood Shannon: collected papers, edited by N.J.A. Sloane and A.D. Wyner, IEEE Press, New York, ISBN 0-78-0304349, 1993.
- [14] HAJRI, Salah Eddine. "L'amélioration des performances des systèmes sans fil 5G par

groupements adaptatifs des utilisateurs. Université ParisSaclay". (Thèse de doctorat 2018).

[15] R. F. Turner, "Wide-Angle Microwave Lens for Line Source Applications*," 1963.

[16] Y. J. Cheng *et al.*, "Substrate integrated waveguide (SIW) Rotman lens and its Ka-band multibeam array antenna applications," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 56, no. 8 II, pp. 2504–2513, 2008.

[17] H. Chorfi « Conception D'un Nouveau Système D'antenne Réseau Conforme En Onde Millimétrique » Mémoire de Master, Université Québec Abitibi-Témiscamingue 2012.

[18] F.A. Belainine, M.A. Salmi « Etude De La Miniaturisation Des Antennes Par Repliement Application Pour La Conception D'une Antenne 2.4ghz » Mémoire de Master, Université Houari Boumediene d'Alger 2013.

[19] D. Aissaoui, "Analyse à l'aide de modèles équivalents d'antennes imprimées alimentées par ligne adaptées", Mémoire de Magister, Université de Abou Baker Belkaid Tlemcen, 03/2007.

[20] Amel BOUFRIOUA, „*contribution à l'étude des antennes a patch résistif et parfaitement conducteur tenant compte d'une source d'excitation et des nouvelles formes asymptotiques de courant*“". Thèse de doctorat, Université Mentouri de Constantine, 2006.

[21] D. Ameziane « Etude Et Optimisation D'antennes Fractales Plaquées » Mémoire de Magister, Université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen 2008.

[22] W.ABDELLAOUI. F.CHERGUI, Etude de l'antenne patch rectangulaire par le modèle la cavité, mémoire fin d'étude, université de TIZI OUZOU, 2012.

[23] A. Boyer « Antennes, Support De Cours Enonce De Travaux Dirigés » Institut National Des Sciences Appliquées De Toulouse.

[24] Keit.R.Caver and James.W.Mink, « Microstrip antenna Technology », IEEE.1981.

[25] C. Hamid « Conception D'un Nouveau System D'antenne Réseau Conforme En Onde Millimétrique » Maitrise En Ingénierie, Université De Québec A Chicoutimi. Mai 2012.

[26] Guennach Mohamed « Conception d'une antenne "PIFA" multi-bandes pour applications sans fil » Mémoire d'Ingénieur présenté à l'Université Sidi Mohamed Ben Abdellah, 2016.

[27] J. Dauvignac, N. Fortino, S. Tourette, G. Kassivas, P. Ciais. « Miniaturisation Des Antennes UWB Planaires » Université De Nice-Sophia Antipolis. 25 OCT 2006.

[28] C. A. Balanis, "Antenna theory analysis and design," 2 edition John Wiley and Sons, 1997.

- [29] Choutti Leila ‘’ Contribution à l’étude d’antennes imprimées rectangulaires double bande et multi bandes tenant compte de l’effet de couplage ‘’ mémoire pour l’obtention de grade Magister, université de Constantine, 2009.
- [30] Par foued benamrane. « Conception d’une antenne patch microstrip ». mémoire online, université sidi Mohamed ben abedellah (Fès) maroc.2011.
- [31] G.Irankunda, E. Ufiteyezu « Etude Et Conception D’une Antenne Patch Rectangulaire Pour Les Réseaux Personnels Sans Fils Wpan A 60 GHz » Mémoire de Master, Université Houari Boumediene d’Alger 2011.
- [32] R. Ghayoula « Contribution A L’optimisation De La Synthèse Des Antennes Intelligentes Par Les Réseaux De Neurones » Thèse Doctorat, Université de Tunis El Manar 27 /12/ 2008.
- [33] C. Balanis « Antenna Theory, Analysis and Design » Livre, 1982.
- [34] B. Mekimah « Etude Du Fonctionnement en Mode Bifréquence Des Patches Microbandes Empilés Et Excentrés » Mémoire de Magister, Université Kasdi Merbah de Ouargla.
- [35] H.Oulad Mansour « Les Effets de l’anisotropie Uniaxiale et de la Tangente de Perte Sur La Résonance Des Antennes Microbandes » Mémoire de Master, Université Kasdi Merbah de Ouargla 2015.
- [36] C. G. Christodoulou, et al., “Reconfigurable Antennas for Wireless and Space Applications,” Proceedings of the IEEE, vol. 100, no. 7, pp. 2250–2261, Jul. 2012.
- [37] B. Allen, et al., “Ultra-Wideband Antennas and Propagation for Communications, Radar and Imaging” London, UK: Wiley, 2006.
- [38] L Douchet, M Sauzeix, S Tisserant, « Electronique MP», 2007.
- [39] www.macg.co/materiel/2021/07/le-wi-fi-6e-6-ghz-valide-par-la-commission-europeenne-122587 05/07/2021 à 18:39.
- [40] SURVEILLANCE ET LOCALISATION RADIO « le monde entre 3Ghz et 300 GHz, services et applications » actualités 199/09.

