

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



MEMOIRE

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

En : Télécommunications
Spécialité : Systèmes et Télécommunications

Par : **GHANEMI Zakaria**

Thème

**Etude et conception d'antennes reconfigurables en
fréquence pour le standard 5G**

Soutenu, le **08/ 07 / 2021**, devant le jury composé de :

Mr S.M. MERIAH	Professeur à l'université de Tlemcen	Président
Mr S.M. BAHRI	MCB à l'université de Tlemcen	Examineur
Mr M. BOUSAHLA	MCB à l'université de Tlemcen	Encadreur

Dédicaces

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

Je dédie ce travail

A mes très chers parents qui m'ont toujours poussé et motivé dans mes études.

*A mes chères sœurs **Asmaa, Nadjet, Latifa, Sarah.***

A mes oncles et mes tantes.

A mes cousins et cousines.

*A mon ami **RACHID***

A mes professeurs et enseignants.

A tous mes amis et ceux que j'aime.

Remerciement

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

C'est avec une profonde reconnaissance et considération particulière que je remercie mon encadreur, qui sans lui, ce projet de fin d'étude n'aurait pas été possible. Il s'agit particulièrement de M. BOUSAHLA MILOUD, maitre de conférences à la faculté de technologie de l'université de Tlemcen

Mes remerciements vont également à M. MERIAH SIDI MOHAMMED, professeur à la faculté de technologie de l'université de Tlemcen, qui a aimablement accepté de présider ce jury composé de :

Monsieur BAHRI SIDI MOHAMMED, maitre de conférences à la faculté de technologie de l'université de Tlemcen

Je vous remercie sincèrement pour le temps consacré à l'examinassions de ce travail et pour l'ensemble des remarques et suggestions proposées.

Enfin je tiens à adresser un remerciement à ma très chère famille et aussi à mes enseignants du département de Télécommunications qui ont été toujours présents pour nous encourager et nous soutenir.

Résumé

Une nouvelle révolution s'annonce avec un nouveau standard des systèmes de télécommunications mobiles, dénommé **5G**. Ce standard ouvre des perspectives pour répondre aux besoins actuels.

En changeant dynamiquement leurs propriétés, les antennes reconfigurables offrent plusieurs fonctions. Leur agilité, en fréquence de résonance, en diagramme de rayonnement ou en polarisation, créent de nouvelles possibilités d'applications pour les systèmes de télécommunication.

Ce projet de fin d'étude vise alors à étudier et concevoir des antennes reconfigurables dédiées pour le standard 5G, en utilisant le logiciel de simulation HFSS (High Frequency Structure Simulation). Le type de reconfiguration étudié concerne la fréquence de résonance. Il s'agit alors de concevoir des antennes capables de s'adapter à des conditions changeantes en ajustant leurs fréquences de fonctionnement pour une application 5G.

Mots-clés : Conception, Simulation, Antenne 5G, Reconfigurable, HFSS

Abstract

Consumer mobile communications, video downloads and mobile application use represent the bulk of current radio resource usage in 4G networks; but to greatly expand the spectrum of uses and user diversity, many research efforts and proposals are beginning to emerge for a new standard called 5G.

By dynamically changing their properties, reconfigurable antennas offer several functions. Their agility, in resonant frequency, radiation pattern or polarization, create new possibilities of applications for telecommunication systems.

This end of study project aims at designing reconfigurable antennas, using the HFSS (High Frequency Structure Simulation) software.

This work is part of this context, with the main objective to design and simulate a reconfigurable antenna working in the millimeter frequency bands for a 5G application.

Keywords : design, simulation, 5G antenna, reconfigurability, HFSS

ملخص

تمثل الاتصالات المتنقلة للمستهلكين وتنزيلات الفيديو واستخدام تطبيقات الهاتف المحمول الجزء الأكبر من استخدام موارد الراديو الحالية في شبكات 4G.

ولكن لتوسيع نطاق الاستخدامات وتنوع المستخدمين بشكل كبير، بدأت جهود بحثية عديدة والعديد من المقترحات في الظهور لتنفيذ معيار جديد يسمى 5G.

من خلال تغيير خصائصها ديناميكياً، توفر الهوائيات القابلة لإعادة التكوين عدة وظائف. خفة الحركة، في تردد الرنين أو نمط الإشعاع أو الاستقطاب، تخلق إمكانيات تطبيق جديدة لأنظمة الاتصالات.

. لذلك يهدف مشروع نهاية الدراسة هذا إلى تصميم هوائيات قابلة لإعادة التشكيل، باستخدام برنامج محاكاة

HFSS محاكاة البنية عالية التردد.

يتلاءم هذا العمل مع هذا السياق، مع الهدف الرئيسي لتصميم ومحاكاة هوائي قابل لإعادة التشكيل يعمل في نطاقات تردد مليمترية لتطبيق 5G.

الكلمات المفتاحية: تصميم، محاكاة، هوائي 5G، قابل لإعادة التشكيل، HFSS

Table des matières

<i>Dédicaces</i>	I
<i>Remerciement</i>	II
<i>Résumé</i>	III
<i>Abstract</i>	IV
ملخص	V
<i>Liste des figures</i>	VIII
<i>Liste des tables</i>	IX
<i>Liste des abréviations</i>	X
<i>Introduction générale</i>	1
Chapitre I	La technologie 5G
I.1 Introduction	3
I.2 Evolution des différentes générations de technologie de communication mobile	3
I.3 Techniques utilisées dans la 5G	4
I.3.1 Choix des ondes millimétriques	5
I.3.2 Déploiement de micros-cellules	6
I.3.3 Massive MIMO	7
I.3.4 Le beamforming	8
I.3.5 Le mode Full-duplex	9
I.4 La normalisation.....	9
I.5 Les fréquences retenues	10
I.6 Architecture globale de la 5G.....	11
I.7 Les domaines d'utilisations de la 5G	11
I.8 Les défis soulevés par la 5G.....	13
I.9 Conclusion.....	13
Chapitre II	Les antennes reconfigurables
II.1 Introduction	14
II.2 L'antenne imprimée	14
II.3 Les techniques d'alimentation des antennes imprimées	14
II.3.1 Alimentation par câble coaxial	15
II.3.2 Alimentation par ligne micro-ruban.....	15
II.3.3 Alimentation par couplage électromagnétique	16

II.3.4	Alimentation par couplage de fente ou d'ouverture	16
II.4	Les caractéristiques des antennes imprimées	17
II.4.1	La directivité	17
II.4.2	Coefficient de réflexion	17
II.4.3	Impédance d'entrée de l'antenne	18
II.4.4	Rendement de l'antenne.....	18
II.4.5	Le gain	19
II.4.6	Polarisation de l'antenne.....	19
II.6	Les antennes reconfigurables	19
II.6.1	Définition	19
II.6.2	La nécessité de la reconfigurabilité.....	20
II.6.3	Techniques de reconfigurabilité.....	20
II.6.4	Classification des antennes reconfigurables	21
II.6.4.1	Antennes reconfigurables en fréquence.....	21
II.6.4.2	Principe de la reconfiguration de fréquence	22
II.6.4.3	Antennes reconfigurables en diagramme de rayonnement.....	22
II.6.4.4	Antenne reconfigurable en polarisation.....	23
II.7	Avantages et inconvénients d'une antenne reconfigurable	23
II.8	Conclusion.....	24
Chapitre III		
Étude et conception des antennes reconfigurables		
III.1	Introduction	25
III.2	Conception des antennes	25
III.3	Outil de simulation	25
III.4	Présentation du logiciel HFSS.....	25
III.5	Etapas de conception.....	26
III.6	Antenne simulée.....	27
III.7	Résultat de simulation	29
III.8	Antenne proposée.....	34
III.9	Résultats de simulation de l'antenne proposée	35
III.10	Conclusion.....	41
Conclusion générale		41
Bibliographie		42

Liste des figures

Figure I- 1: Principe et techniques utilisés dans la technologie 5G [4].....	5
Figure I- 2: Le spectre électromagnétique [4]	6
Figure I- 3: Station de base sous forme de Microcellules par Ericsson [5]	7
Figure I- 4: Massive MIMO [6]	8
Figure I- 5: Technologie full duplex [3].....	9
Figure I- 6: Spectre des fréquences 5G [9]	10
Figure I- 7: Architecture de réseau 5G [10]	11
Figure I- 8: Répartition des applications 5G en trois domaines d'utilisation [12}	12
Figure II- 1: Une antenne imprimée avec un patch de forme rectangulaire [14]	14
Figure II- 2: Alimentation par sonde coaxiale d'une antenne patch	15
Figure II- 3: Alimentation par ligne microbande	15
Figure II- 4: Alimentation par proximité.....	16
Figure II- 5: Alimentation au travers d'une ouverture dans le plan de masse	17
Figure II- 6: Schéma équivalent du dispositif à l'émission.....	18
Figure II- 7: L'évolution du champ électrique pour la polarisation linéaire, circulaire et elliptique de gauche à droite, respectivement. Les courbes bleues montrent l'évolution de vecteur champ électrique. Les courbes rouges et vertes montrent les composantes corres.	19
Figure II- 8: Les différentes techniques de reconfigurabilité	21
Figure II- 9: Illustration de l'agilité fréquentielle [19].....	22
Figure II- 10: La reconfigurabilité de fréquence en utilisant une antenne rectangulaire vue du dessus (a) et du dessous (b) [20]	22
Figure II- 11: La reconfigurabilité du rayonnement en utilisant une antenne filaire à spirale carrée [21]	23
Figure III- 1: L'interface graphique du logiciel HFSS.....	26
Figure III- 2: Paramètres de l'antenne reconfigurable simulée	27
Figure III- 3: Antenne reconfigurable simulée avec plaque métallique (état 1) et sans plaque métallique (état 2). [24].....	28
Figure III- 4: Coefficient de réflexion de l'antenne à l'état 1 (application Wi-Fi)	29
Figure III- 5: VSWR de l'antenne à l'état 1 (application Wi-Fi).....	30
Figure III- 6: Diagramme de rayonnement en 3D (directivité) à l'état 1 (application Wi-Fi)..	30
Figure III- 7: Diagramme de rayonnement en 2D ($\phi=0^\circ, 90^\circ$) à l'état 1 (application Wi-Fi).	31
Figure III- 8: Distribution de courant à l'état 1 (application Wi-Fi).....	31
Figure III- 9: Coefficient de réflexion de l'antenne à l'état 2 (application 5G)	32

Figure III- 10: VSWR de l'antenne à l'état 2 (application 5G).....	32
Figure III- 11: Diagramme de rayonnement en 3D (Gain) pour l'état 2 (application 5G).	33
Figure III- 12: Diagramme de rayonnement en 2D ($\phi=0^\circ,90^\circ$) pour l'état 2 (application 5G).	33
Figure III- 13: Distribution de courant à l'état 2 (application 5G).	34
Figure III- 14: Antenne reconfigurable proposée.....	34
Figure III- 15: Antenne reconfigurable proposée avec plaque métallique (état 1) et sans plaque métallique (état 2).....	35
Figure III- 16: Coefficient de réflexion de l'antenne proposée à l'état 1.	36
Figure III- 17: VSWR de l'antenne à l'état 1.	36
Figure III- 18: Distribution de courant de l'antenne proposée à l'état 1	37
Figure III- 19: Diagramme de rayonnement de l'antenne proposée en 3D (Gain) à l'état 1....	37
Figure III- 20: Diagramme de rayonnement en 2D (directivité) à l'état 1.....	38
Figure III- 21: Coefficient de réflexion de l'antenne proposée à l'état 2.	39
Figure III- 22: Distribution de courant à l'état 2.....	39
Figure III- 23: VSWR de l'antenne proposée à l'état 2.	40
Figure III- 24: Diagramme de rayonnement en 3D (Gain) de l'antenne proposée à l'état 2. ...	41
Figure III- 25: Diagramme de rayonnement en 2D de l'antenne proposée à l'état 2.	41

Liste des tables

Tableau I- 1: Évolution de la téléphonie au fil des générations	4
Tableau I- 2: Principales caractéristiques des domaines d'utilisations de la 5G [11].....	12
Tableau III- 1: Les dimensions de l'antenne reconfigurable simulée.....	28
Tableau III- 2: Dimensions de l'antenne reconfigurable proposée.....	35

Liste des équations

Equation II- 1: Equation de directivité	17
Equation II- 2: Equation de coefficient de réflexion.....	17
Equation II- 3: Equation d'impédance d'entrée.....	18
Equation II- 4: Equation de rendement d'antenne	18
Equation II- 5: Equation du gain	19

Liste des abréviations

3GPP : 3rd Generation Partnership Project

5G : Cinquième Génération

AN : Access Network

CDMA : Code Division Multiple Access

DR : Diagramme de Rayonnement

EDGE : Enhanced Data Rate for GSM Evolution

eMBB : Enhanced Mobile Broadband

FDD : Frequency Division Duplex

FET : les transistors à effet de champs

gNB : Next generation NodeB

GSM : Global System for Mobile Communications

HFSS : high frequency structure simulator

HSPA : High Speed Packet Access

IOT : Internet Of Things

LAN : Local Area Network

LTE : Long Term Evolution

MEMS : Micro Electro Mechanical Systems.

MIMO : Multiple Input Multiple Output

mMTC : massive Machine-Type Communication

MU-MIMO : Multi User MIMO

NG-RAN : Next Generation Radio Access Network

NR : New Radio

OFDM : Orthogonal Frequency Division Multiplexing

PDU : Protocol Data Unit

PDU : Protocol Data Unit

PIN : Positive Intrinsic Negative.

RF-MEMS : microsystèmes radiofréquences.

SMS : Short Message Service

SU-MIMO : Single User MIMO

UIT : Union International Telecommunication

URLLC : Ultra Reliable Low Latency Communication

Wi-Fi : Wireless Fidelity

WIMAX : Worldwide Interoperability for Microwave Access

WLAN : Wireless Local Area Network

Introduction générale

Une nouvelle révolution s'annonce avec un nouveau standard des systèmes de télécommunications mobiles, dénommé 5G. Ce standard ouvre des perspectives pour répondre aux besoins actuels.

Les antennes reconfigurables (en fréquence, en polarisation et en diagramme de rayonnement) ont reçu beaucoup d'attention ces dernières décennies en particulier dans le domaine des télécommunications grâce à leur flexibilité.

En effet, l'utilisation des antennes agiles en fréquence, par exemple, permet de s'adapter facilement à un environnement évolutif en basculant entre différentes normes telles que GSM850, GSM900, LTE, GSM1800, GSM1900, Wi-Fi, WLAN, WiMAX... Afin de produire l'agilité en fréquence, plusieurs techniques sont utilisées comme par exemple les diodes PIN, les diodes varicap et les MEMS (Micro-Electro-Mechanical-Systems).

Le travail présenté dans ce mémoire a pour objectif l'étude et la conception d'antennes reconfigurables en fréquence. Il s'agit alors de concevoir une antenne capable de s'adapter à des conditions changeantes en ajustant sa fréquence de fonctionnement, pour atteindre cet objectif, nous avons divisé ce mémoire en trois chapitres :

Le premier chapitre de ce projet est dédié à l'étude générale de la nouvelle technologie radio mobile 5G. Dans ce contexte nous présenterons un historique de l'évolution des réseaux mobile jusqu'à l'arrivée de la 5G, puis une présentation de son principe, les différentes techniques qu'elle utilise et son architecture globale.

Dans le deuxième chapitre, nous allons dans un premier temps définir les antennes imprimées, les différentes techniques d'alimentation de ces antennes et leurs caractéristiques. Ensuite nous allons définir les antennes reconfigurables ainsi que leurs types (en fréquence, du rayonnement et en polarisation), en faisant ressortir leurs avantages et inconvénients et leurs principes.

Le dernier chapitre de ce mémoire de master s'intéresse à la conception d'antennes reconfigurables en fréquence pour les applications 5G. Dans la première partie de ce chapitre nous présenterons la conception d'une antenne reconfigurable qui fonctionne dans deux

bandes de fréquences : 2,45 GHz, la fréquence attribuée à l'application Wi-Fi, et la bande de fréquences de 28 GHz pour les applications 5G.

Dans la deuxième partie de ce chapitre nous présenterons la conception et la simulation d'une antenne reconfigurable qui fonctionne dans deux bandes de fréquences : 3.07 GHz et la bande de fréquences de 21 GHz pour les applications 5G.

Nous terminons ce mémoire par une conclusion générale.

Chapitre I : LA TECHNOLOGIE 5G

1.1 Introduction

Ce chapitre va représenter une introduction à la 5G en commençant par un bref historique sur l'évolution de la téléphonie mobile, une explication du principe de fonctionnement de cette nouvelle technique avant de découvrir son architecture réseau, son domaine d'utilisation et ses objectifs.

1.2 Evolution des différentes générations de technologie de communication mobile

La technologie dans le domaine de la téléphonie mobile n'a pas cessé de se développer depuis ces 10 dernières années. En effet, en quelques décennies, la qualité des signaux a connu de grands changements en passant de la 1G à la 5G. Afin de comprendre les différences entre les générations, il serait intéressant de suivre l'évolution du téléphone portable à travers l'histoire. Tout à fait au début, le réseau de première génération 1G a été mis en place dans les années 70 aux États-Unis, en Europe et en Asie. Ce réseau qui fonctionne sur un système de communication analogique n'a pas connu le succès espéré à cause de certains problèmes de communication et de la qualité des téléphones mobiles de l'époque. L'arrivée du réseau 2G dans les années 80 a sonné la révolution de la téléphonie mobile.

Cette technologie repose sur l'utilisation d'un système numérique par onde électromagnétique, une innovation qui a amélioré la qualité des communications tout en permettant l'intégration de nouveaux moyens de communication comme les SMS dans les années 90.

L'an 2000 a marqué le basculement des téléphones mobiles GSM vers les smartphones. Le déploiement de la 3G a permis aux terminaux mobiles de se connecter à internet. Cette évolution a été accentuée par l'arrivée du premier iPhone d'Apple en 2007. La 3G, toujours d'actualité, utilise une bande passante d'une fréquence variant de 1,6 à 2 GHz.

À partir de 2010, la 3G s'est vue bousculée par la 4G qui est actuellement le réseau standard dans les grandes villes. Il s'agit d'un réseau qui utilise une fréquence allant de 2 à 8 GHz et qui offre un débit pouvant atteindre les 100 Mb/s à 1 Gb/s. Les opérateurs de téléphonie mobile sont actuellement en train de mettre en place le réseau 5G. Cette technologie permettra de profiter d'une vitesse de connexion de 5 Go/s sur une fréquence de 28 GHz. Grâce à une telle performance, la 5G sera utilisée dans différents domaines comme l'automobile, la domotique, les objets connectés ainsi que pour le visionnage de vidéo 4K.

Le tableau ci-dessous donne une comparaison entre les générations précédemment décrites [1].

Tableau I- 1: Évolution de la téléphonie au fil des générations

Génération	Vitesse Théorique	La technologie	Caractéristiques
2G	9.6/14.4kbps	TDMA, CDMA	Les téléphones compatibles 2G étaient utilisés pour passer des appels et transférer des données.
3G	3.1 Mbps	CDMA 2000 (UMST, EDGE)	La 3G a permis une navigation rapide des données sur un appareil mobile et a ouvert la voie à la vidéoconférence et au streaming.
3.5G	14,4 Mbps	HSPA	Transfert de données encore plus rapide.
4G	100-300Mbps	WiMax LTE	Des vitesses de téléchargement incroyablement rapides, ouvrant la voie au streaming HD.
5G	10-30 Gbps	Développement	Internet ultra-rapide, faible latence et fiabilité améliorée.

1.3 Techniques utilisées dans la 5G

Le réseau 5G englobe un ensemble de technologies correspondant à la 5G du standard pour la téléphonie mobile. Il est validé par l'ITU (l'International Télécommunications Union) et le consortium 3GPP (3rd Generation Partnership Project). Il s'agit d'un ensemble de protocoles et méthodes de transmission de l'information qui doit offrir à la fois de la rapidité et un temps de latence extrêmement faible qui permettra de développer de nouveaux services et aidera à l'amélioration des systèmes existants. La 5G doit également permettre l'arrivée de nombreuses nouvelles innovations, supporter la connexion de l'ensemble des véhicules autonomes et connectés et permettre un développement dans le domaine de la santé. [3]

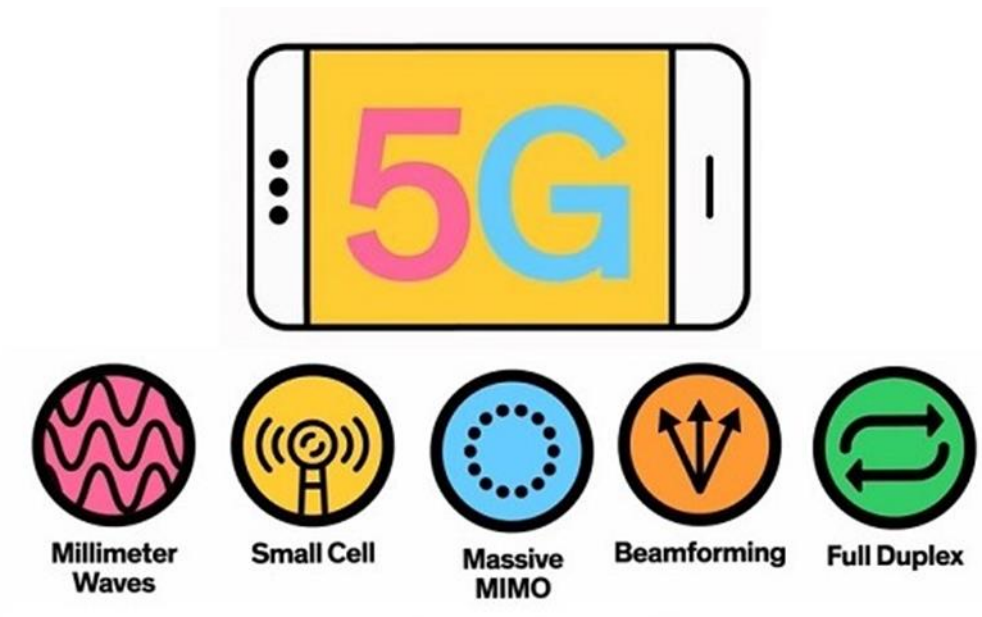


Figure I- 1: Principe et techniques utilisés dans la technologie 5G [4]

I.3.1 Choix des ondes millimétriques

Au paravent, une fréquence inférieure à 6 GHz est utilisée pour la communication cellulaire, et une fréquence supérieure à celle-ci est principalement utilisée pour d'autres services comme l'imagerie médicale, la télédétection micro-ondes, la radio amateur, l'informatique terra hertz et la radio astronomie. Cependant, l'augmentation massive du trafic de données a congestionné le spectre des fréquences radio. Le résultat est que la bande passante est limitée pour un utilisateur, ce qui entraîne une connexion plus lente et peu fiable. Une façon de résoudre ce problème consiste à utiliser une bande de fréquences, qui n'a pas été utilisée précédemment et qui est supérieure à 6 GHz pour les communications sans fil. Le choix fut alors porté sur les ondes millimétriques et dont les fréquences sont comprises entre 30 GHz et 300 GHz. Les ondes millimétriques peuvent fournir une bande passante dix fois supérieure à celle de toute la bande cellulaire 4G. Ces ondes hautes fréquence sont utilisées dans certaines applications satellitaires, mais elles n'ont jamais été utilisées pour le haut débit mobile. Cependant les longueurs d'ondes millimétriques ne conviennent pas aux applications à longue portée. De plus, elles ne peuvent pas pénétrer dans les bâtiments et les obstacles, et ont tendance à être absorbées par la pluie. [3]

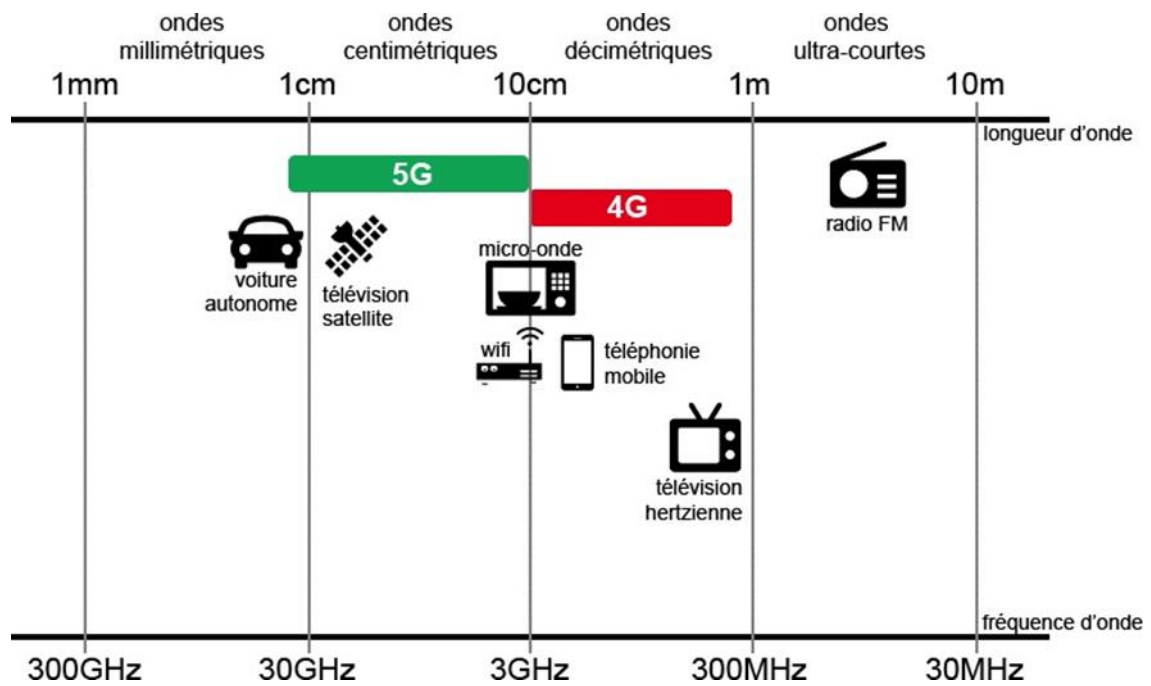


Figure I- 2: Le spectre électromagnétique [4]

I.3.2 Déploiement de micros-cellules

La technique consiste à mettre en place de minuscules cellules formant des stations de base à faible puissance à 100 m d'intervalles pour couvrir de petites zones géographiques. Ces stations de base empêchent le signal de s'affaiblir dans les zones à forte demande de débit. Les petites cellules sont très légères et petites ; ainsi, elles peuvent être disposées aisément. Si nous utilisons des ondes millimétriques au lieu du spectre traditionnel inférieur à 6 GHz, la petite cellule peut devenir encore plus petite et peut être installée dans de minuscules endroits. Les petites cellules joueront un rôle important dans la fourniture du haut débit mobile et de la latence ultra faible pour la 5G. Les petites cellules peuvent être divisées en microcellules, femto-cellules et pico-cellules en fonction de la zone de couverture et du nombre d'utilisateurs qu'elle peut prendre en charge [3].

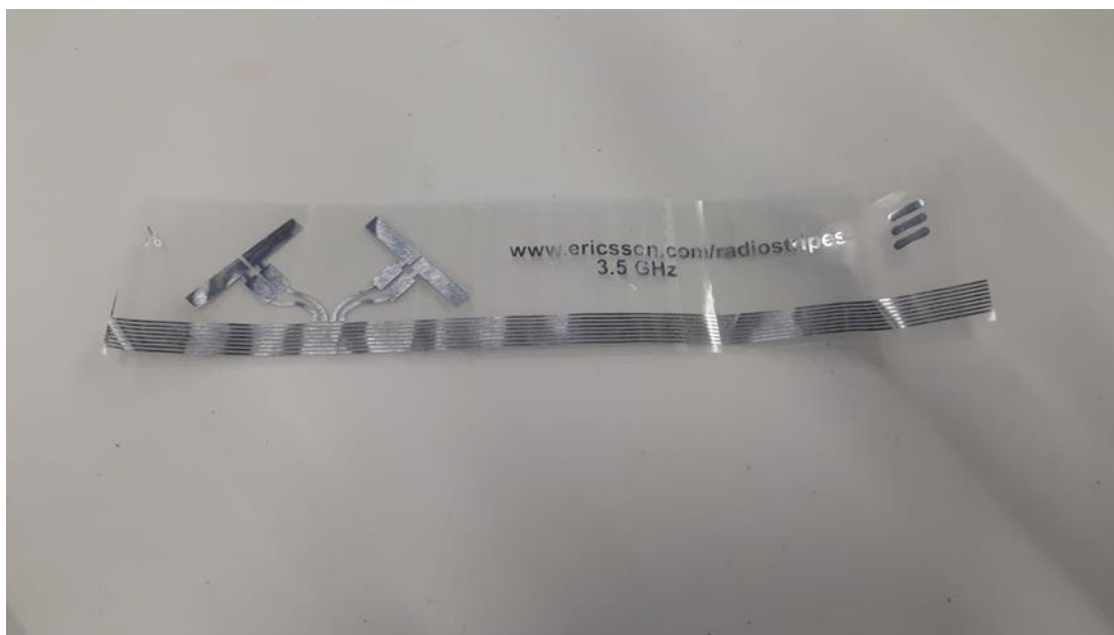


Figure I- 3: Station de base sous forme de Microcellules par Ericsson [5]

I.3.3 Massive MIMO

Les systèmes MIMO font partie intégrante des systèmes sans fil actuels, et ces dernières années, ils ont été largement utilisés pour obtenir une efficacité spectrale et une efficacité énergétique élevées. Cette technique a permis de répondre à la demande accrue en débit pour un nombre d'utilisateurs très important. Pour ce faire, diverses nouvelles technologies MIMO comme le MIMO mono-utilisateur (SU-MIMO), le MIMO multi-utilisateur (MU-MIMO) ont été développés. Cependant, ces nouvelles technologies ne suffisent pas non plus à répondre à la demande toujours croissante. Les utilisateurs sans fil ont augmenté de façon exponentielle au cours des dernières années en produisant des milliards de données qui doivent être traitées efficacement et fiabilisées.

Massive MIMO est la technologie la plus captivante pour la 5G et au-delà de l'ère de l'accès sans fil. Massive MIMO est l'avancement des systèmes MIMO contemporains utilisés dans les réseaux sans fil actuels, qui regroupent des centaines voire des milliers d'antennes à la station de base et desservent des dizaines d'utilisateurs simultanément. Les antennes supplémentaires que le Massive MIMO utilise aideront à concentrer l'énergie dans une plus petite région de l'espace pour fournir une meilleure efficacité spectrale et un meilleur débit [3].

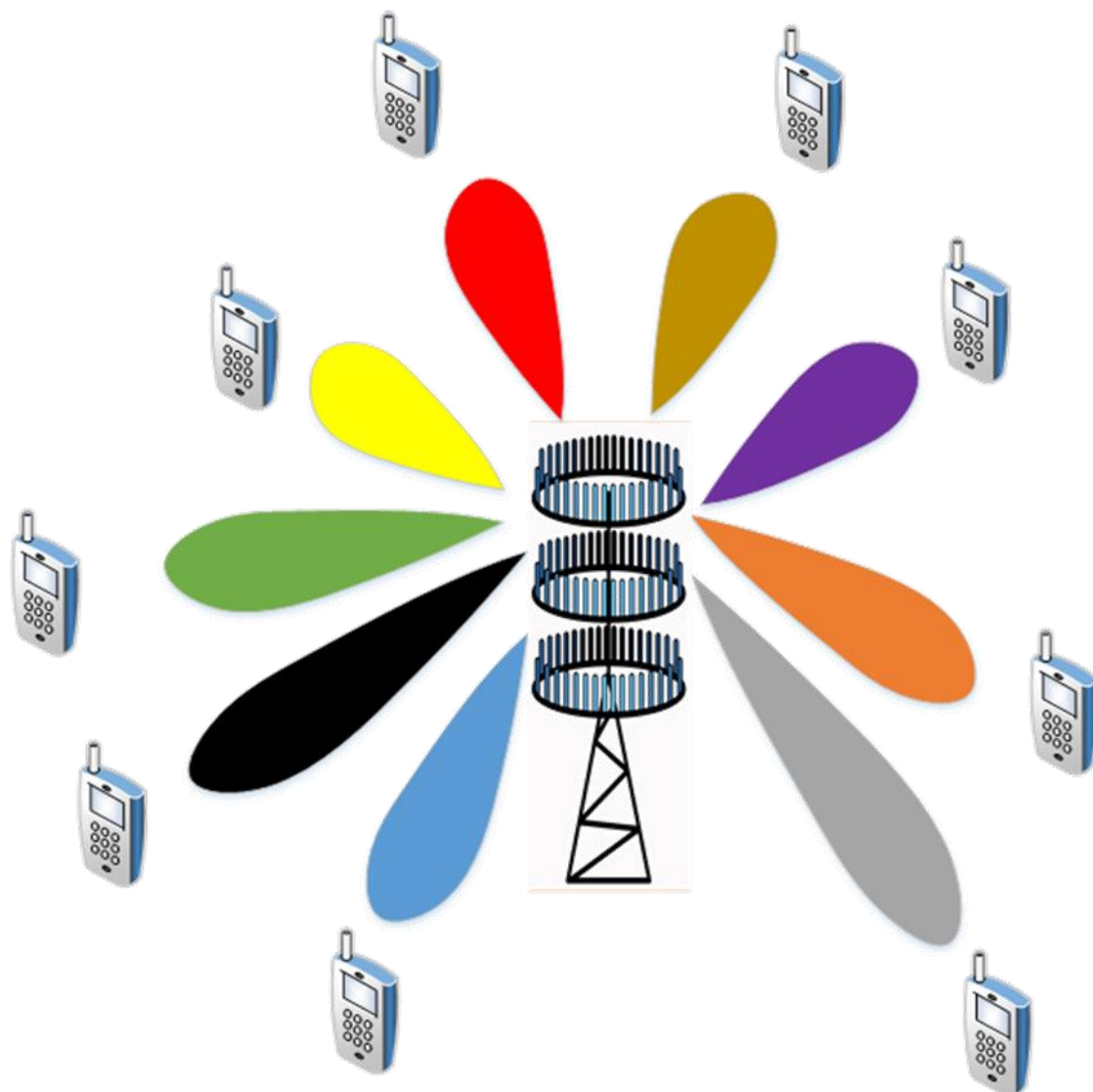


Figure I- 4: Massive MIMO [6]

I.3.4 Le beamforming

C'est la capacité de la station de base à adapter le diagramme de rayonnement de l'antenne. Le beamforming aide la station de base à trouver un itinéraire approprié pour fournir des données à l'utilisateur, et elle réduit également les interférences avec les utilisateurs à proximité le long de l'itinéraire. Le beamforming présente plusieurs avantages pour les réseaux 5G et même plus. En effet, selon la situation, la technologie de beamforming peut être mise en œuvre de plusieurs manières différentes dans les futurs réseaux. Pour les systèmes massive MIMO, le beamforming aide à augmenter l'efficacité spectrale, et pour les ondes millimétriques, il aide à augmenter le débit de données. Dans les systèmes massive MIMO la station de base peut envoyer des données à l'utilisateur selon divers trajets, massive MIMO permet de synchroniser l'échange des paquets de données et l'instant d'arrivée permettant à plusieurs utilisateurs d'envoyer des données simultanément. Étant donné que les

ondes millimétriques ne peuvent pas pénétrer à travers les obstacles et ne se propagent pas sur de plus longues distances en raison d'une longueur d'onde très courte, le beamforming aide ici à envoyer des faisceaux directs vers les utilisateurs. Cette technologie aide l'utilisateur à recevoir un signal fort sans interférences avec d'autres utilisateurs [3].

I.3.5 Le mode Full-duplex

Généralement, la transmission et la réception sans fil ne se font pas sur les mêmes bandes de fréquences pour éviter les interférences. Tout système bidirectionnel doit donc séparer le canal montant et le canal descendant en utilisant le domaine temporel TDD ou fréquentiel FDD pour obtenir des signaux orthogonaux sans interférences. Le full duplex fait référence à la transmission et à la réception simultanée sur la même bande de fréquences et en même temps, comme le montre **la figure I-5**. Les réseaux 5G utiliseront le full duplex pour la transmission des signaux afin de potentiellement doubler la capacité du réseau. L'un des inconvénients de la technologie full-duplex est qu'elle augmente les interférences du signal avec un écho. Ce dernier est facilement éliminé avec les techniques d'égalisation au niveau du récepteur [3].

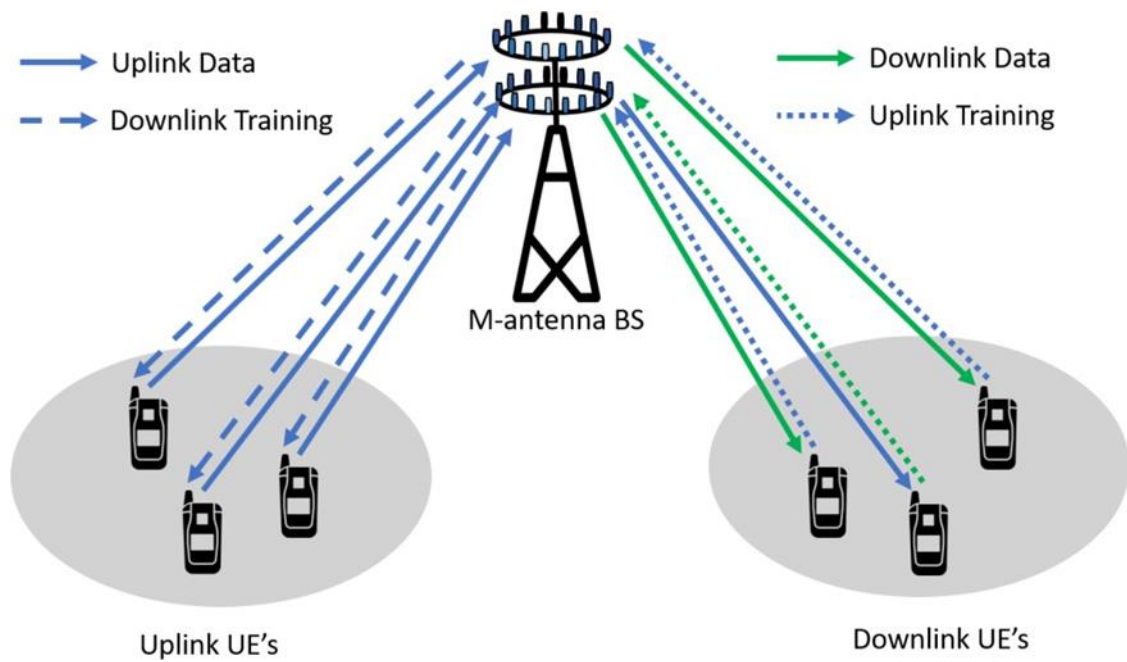


Figure I- 5: Technologie full duplex [3]

I.4 La normalisation

L'organisme de normalisation 3GPP élabore des spécifications et des normes pour les systèmes 5G. Il s'agit d'une coopération d'organisations de normalisation et de représentants de l'industrie. D'un point de vue organisationnel, le 3GPP fait partie de l'Institut européen des

normes de télécommunications (ETSI) situé dans le sud de la France. Contrairement aux systèmes de communication radio précédents, la 5G a été normalisée en fonction de domaines d'utilisation prédéterminés [7].

1.5 Les fréquences retenues

Le choix d'une bande de fréquence représente toujours un compromis entre couverture qui est définie par la taille de la zone où le service est accessible et la capacité qui est elle-même caractérisée par exemple par le débit obtenu. Les fréquences basses sont privilégiées pour assurer une bonne couverture car elles permettent d'avoir de bonnes conditions de propagation. Pour augmenter la capacité, des fréquences plus élevées sont préférables car les bandes passantes disponibles sont plus grandes, ce qui permet à plus de trafic de circuler. Cependant, les conditions de propagation sont plus difficiles à hautes fréquences car l'environnement perturbe alors fortement la propagation, notamment à l'intérieur des bâtiments en raison d'une forte atténuation par les murs, ce qui limite la couverture.

Les réseaux de téléphonie mobile recherchent donc un équilibre entre bandes basses pour bien couvrir l'ensemble des abonnés et bandes hautes pour assurer une bonne capacité dans les zones où les demandes de trafic sont les plus importantes. Dans ce contexte, la 5G disposera d'une portée étendue pour son déploiement : elle pourra réutiliser le spectre déjà alloué à la téléphonie mobile, en particulier les bandes basses autour de 1 GHz, pour assurer une bonne couverture et se verront également attribuer de nouvelles bandes de fréquences, en particulier dans les bandes millimétriques, utilisées pour la première fois pour des services grand public, qui permettront d'augmenter la capacité. **La Figure I-6** donne le spectre des fréquences allouées à la 5G. Du point de vue de l'exposition aux ondes radio fréquences, le recours à des largeurs de bandes plus grandes induira des puissances globales plus importantes. En effet, à densité spectrale de puissance égale (c'est-à-dire avec la même puissance par unité fréquentielle), si la 4G utilise typiquement 40 watts distribués sur 20 MHz, la 5G Dans les bandes de fréquences les plus récentes, la bande passante est généralement de l'ordre de 100 MHz et 200 watts seront émis [8].

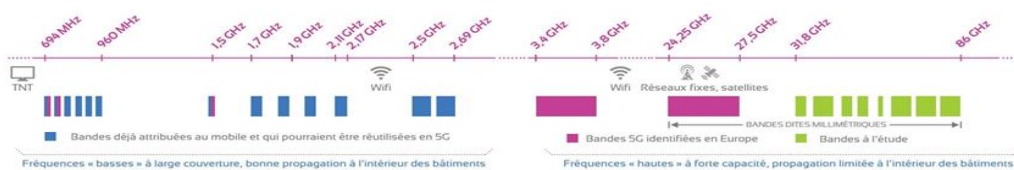


Figure I- 6: Spectre des fréquences 5G [9]

I.6 Architecture globale de la 5G

Un réseau 5G est composé d'un réseau d'accès 5G AN et d'un réseau central 5G. Le réseau d'accès lui-même se compose de la nouvelle génération de réseau d'accès radio NG-RAN, qui utilise la nouvelle interface radio 5G NR, et/ou un non 3GPP AN connecté au réseau cœur 5G. Les différentes entités du réseau sont connectées par un réseau de transport TCP/IP sous-jacents, qui prend en charge les fichiers QoS (Quality of Service). Comme dans les générations précédentes, un réseau 5G relie l'UE à des réseaux de données externes. Le service de connectivité 5G est nommé Session PDU. Du point de vue du transport, une session PDU est faite par une séquence de tunnels NG en 5GC (5G Core), et d'un ou plusieurs supports radio sur l'interface radio. Cet ensemble de tunnels connecte finalement l'UE à ses fonctions de contrôle et au réseau de données externes pour l'échange de trafic utilisateur (**figure I-7**). Une tâche majeure du réseau mobile est d'établir et de libérer dynamiquement les tunnels et les porteuses, afin de suivre les mouvements et les états des utilisateurs (inactifs, connectés, etc.) [10].

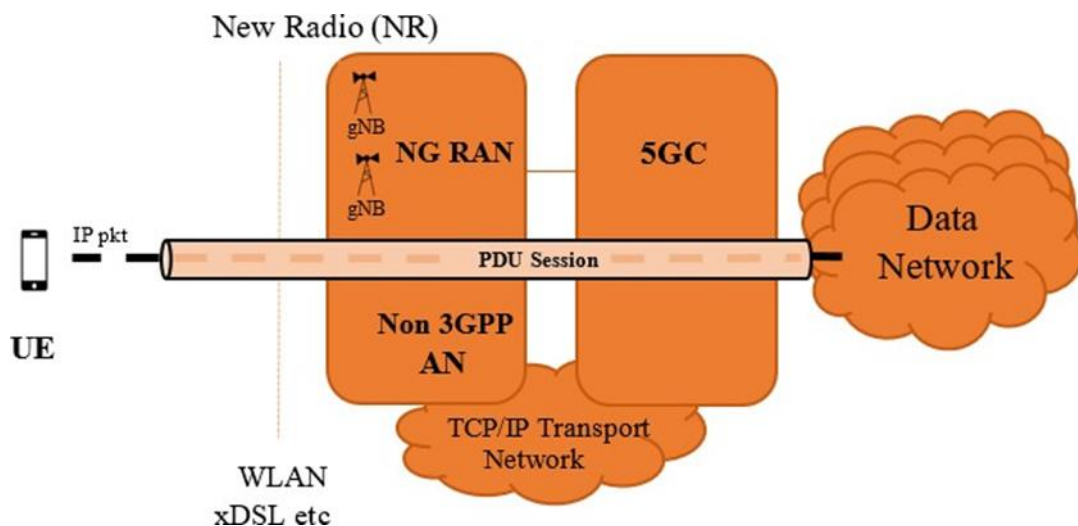


Figure I- 7: Architecture de réseau 5G [10]

I.7 Les domaines d'utilisations de la 5G

L'UIT prévoit trois objectifs d'utilisation pour la 5G répartis en domaines : le haut débit mobile amélioré (eMBB), la communication ultra-fiable avec un temps de latence faible (URLLC) et la communication de masse de type machine (mMTC) (**figure I-8**) [11]. Les principales caractéristiques des domaines d'utilisation sont décrites dans le **tableau 1.2**.

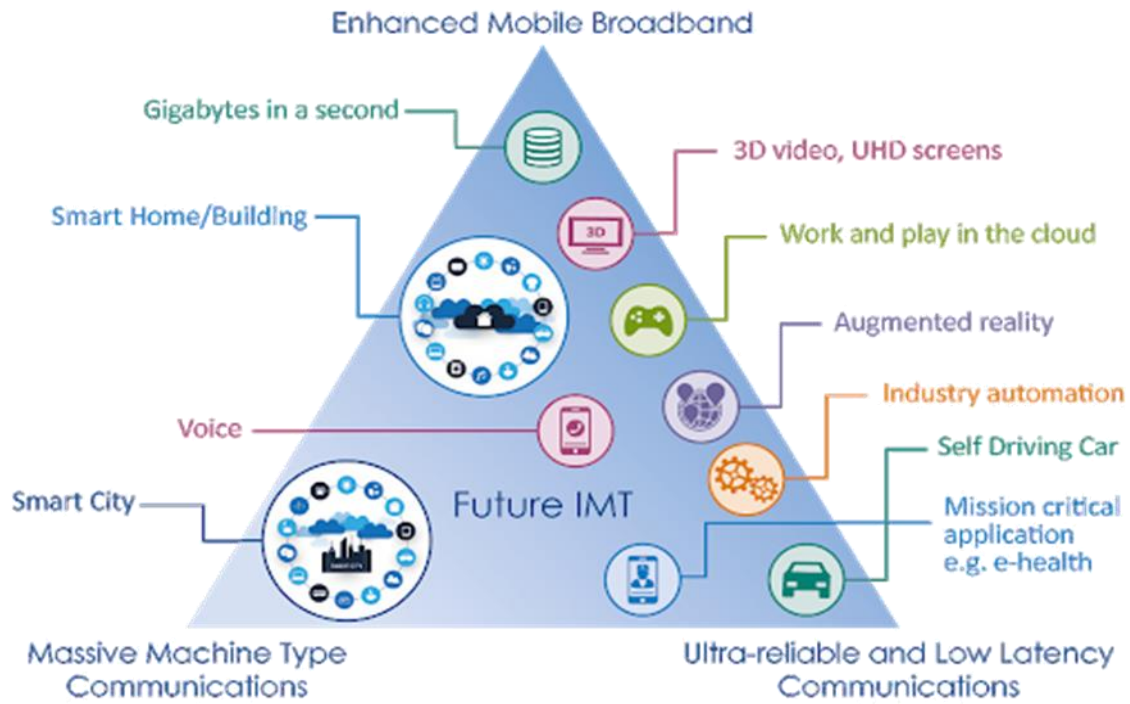


Figure I- 8: Répartition des applications 5G en trois domaines d'utilisation [12]

Enhanced Mobile Broadband (eMBB)	Massive Machine-Type Communication (mMTC)	Ultra-Reliable and Low Latency Communication (URLLC)
<p>Les principales caractéristiques de ce domaine d'utilisation sont : un débit de données élevé et variable (jusqu'à 20 Gbit/s), ainsi qu'une densité d'utilisateurs élevée et une grande mobilité (exemple TGV). L'accès mobile à haut débit amélioré assure une transition en douceur entre le réseau fixe et le réseau mobile.</p>	<p>Ce domaine d'utilisation se caractérise par un très grand nombre d'appareils connectés (Internet des objets (IoT)), qui transmettent généralement un faible volume (peu d'octets) de données et ne sont pas sensibles au temps. Les appareils doivent être avantageux et avoir une très grande autonomie (durée de vie des piles jusqu'à 10 ans).</p>	<p>Ce domaine est caractérisé par des connexions fiables et/ou sensibles au temps avec des vitesses de transmission garanties, des temps de latence assurés de quelques millisecondes et une probabilité de défaillance définie (exemples : commande à distance de machines, gestion de l'énergie dans les réseaux intelligents (smart grids) ou commande de véhicules autonomes).</p>

Tableau I- 2: Principales caractéristiques des domaines d'utilisations de la 5G [11]

1.8 Les défis soulevés par la 5G

Actuellement, les communications sans fil sont à une croisée de chemins. En effet, la demande de capacité toujours croissante et la prolifération d'appareils intelligents, avec des applications nécessitant des débits élevés, nécessitent de nouvelles générations de réseaux plus efficaces pour permettre une augmentation substantielle des performances. Les systèmes de communication mobile 5G émergent à grande vitesse pour répondre à un large éventail de défis apportés par la forte demande de nos sociétés actuelles et futures pour les communications sans fil. La 5G doit s'attaquer, en plus d'une augmentation du volume de trafic, au défi de connecter des milliards d'appareils avec des besoins de service hétérogènes [13].

L'objectif de la 5G est de fournir les améliorations suivantes [13]:

1. **10 fois plus de débits expérimentés** : l'ère des débits de pointe plus uniformes et multi Gbps.
2. **10 fois moins de temps de latence** : les niveaux de latence devraient être aussi bas que 1 ms.
3. **10 fois plus de densité de connexion** : activation de la connectivité IoT avec peu de complexité et de surcharge de signalisation.
4. **Augmentation de 3 fois dans l'efficacité spectrale** : une utilisation plus efficace de la bande passante.
5. **100 fois plus de capacité de trafic** : réseaux très densifiés avec plus de points d'accès partout.
6. **100 fois plus d'efficacité du réseau** : réseaux énergétiquement efficaces avec traitement de signal et matériel efficaces.

1.9 Conclusion

Nous avons supervisé dans ce chapitre la technologie mobile 5G, son principe, les différentes techniques qu'elle utilise et son architecture globale. Cette technologie ne cesse de changer notre monde ainsi que notre mode de vie personnel. Toujours dans ce sens, la 5G arrive à grand pas afin de répondre aux besoins de notre époque actuelle dont la rapidité et la haute disponibilité sont les plus grands critères.

Chapitre II : Les antennes reconfigurables

II.1 Introduction

Avec le développement technologique actuel et l'apparition des nouvelles applications sans fil, les ressources fréquentielles disponibles étant limitées et les puissances étant réglementées pour des questions de sécurité. Des solutions innovantes doivent être mises en place pour augmenter les performances de transmission en termes de débit et d'efficacité ; parmi ces derniers, les antennes reconfigurables font l'objet d'importantes recherches et devient un impératif très important dans des nombreuses communications sans fil. Ces antennes peuvent utiliser, plus efficacement, le spectre de radiofréquence.

Dans ce chapitre, nous présenterons, dans un premier temps les antennes imprimées et leurs caractéristiques. Nous aborderons, dans un deuxième temps, quelques notions de base sur les antennes reconfigurables.

II.2 L'antenne imprimée

L'antenne est un dispositif nécessaire dans tous les systèmes de communications sans fil. Elle permet de transmettre un signal porteur d'une information d'un émetteur vers le récepteur via un canal de transmission. L'antenne transforme le signal électrique en une onde électromagnétique et vice versa.

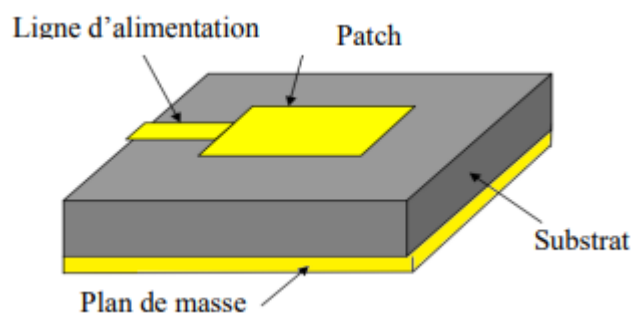


Figure II- 1: Une antenne imprimée avec un patch de forme rectangulaire [14]

II.3 Les techniques d'alimentation des antennes imprimées

Une antenne patch peut être excitée par plusieurs techniques qui sont catégorisées en deux types avec et sans contact. Dans le premier type, l'antenne est alimentée directement à l'aide d'une connexion comme la ligne micro ruban et le câble coaxial. Dans le deuxième type (sans contact), l'alimentation est assurée par un couplage par fente ou par proximité. Ces deux

dernières techniques permettent de transférer la puissance RF entre la ligne micro ruban et le patch rayonnant.

II.3.1 Alimentation par câble coaxial

L'alimentation par câble coaxial est très utilisée dans les antennes micro-ondes à cause de sa simplicité de mettre en œuvre et sa facilité d'adaptation d'impédance. Le câble coaxial se compose de deux conducteurs (externe et interne). Le conducteur externe est relié au plan de masse tandis que le conducteur interne est relié au patch rayonnant. Mais ce type d'alimentation présente une bande passante étroite et une grande difficulté de le modéliser, surtout pour des substrats épais.

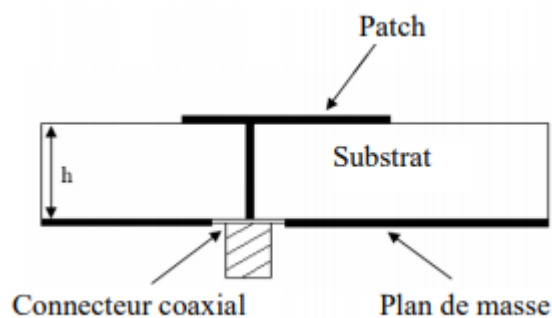


Figure II- 2: Alimentation par sonde coaxiale d'une antenne patch

II.3.2 Alimentation par ligne micro-ruban

Une ligne d'alimentation micro-ruban est une bande métallique dont sa largeur est très étroite par rapport à celle du patch. Cette technique est facile à fabriquer et facilement adaptée en agissant sur ses dimensions et sa position. De même que l'alimentation par câble, cette méthode présente une bande passante étroite et des rayonnements parasites.

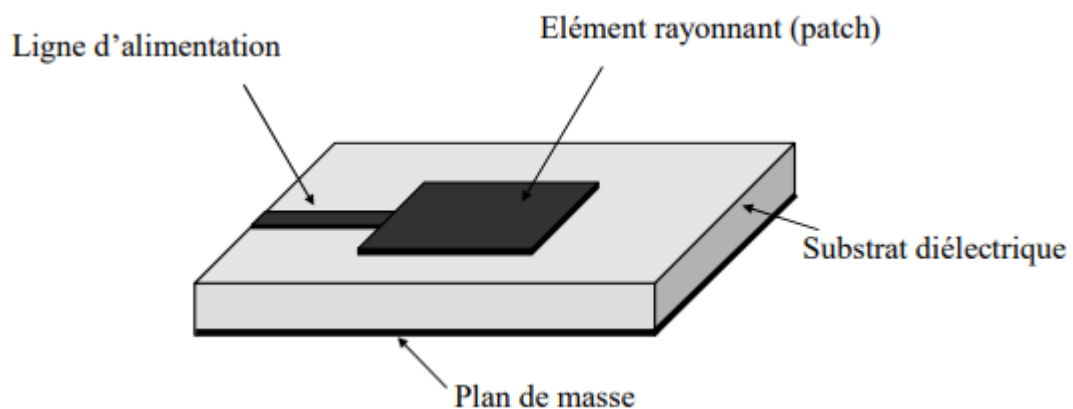


Figure II- 3: Alimentation par ligne microbande

II.3.3 Alimentation par couplage électromagnétique

L'antenne est constituée de deux substrats diélectriques entre lesquels est située la ligne d'alimentation. L'élément rayonnant est imprimé sur le substrat supérieur (**Figure II-4**). L'excitation se fait par couplage électromagnétique. Cette technique permet d'améliorer la bande passante mais elle est difficile à réaliser. [15]

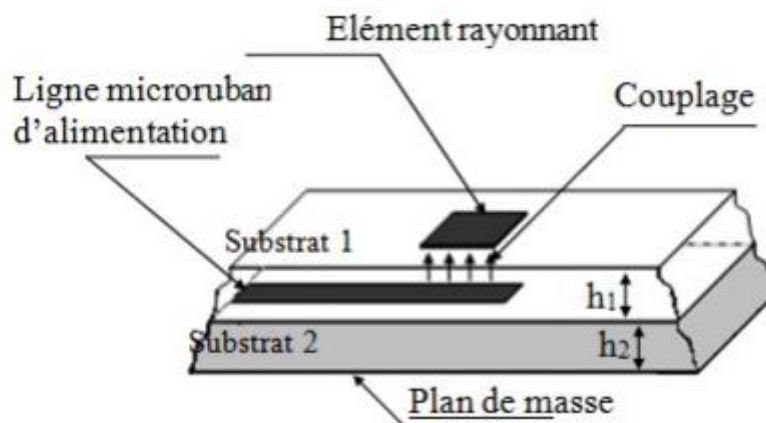


Figure II- 4: Alimentation par proximité

II.3.4 Alimentation par couplage de fente ou d'ouverture

L'élément rayonnant et la ligne micro-ruban d'alimentation sont placés de part et d'autre du plan de masse. La fente de couplage dans le plan de masse permet la circulation de l'énergie entre la ligne d'alimentation et l'élément rayonnant (**figure II-5**). Cette méthode nécessite un positionnement précis de la fente [16]. Elle apporte les avantages suivants :

- Isolation du circuit d'alimentation par l'intermédiaire du plan de masse. De ce fait, un rayonnement parasite faible, en fait ce rayonnement parasite se situe au-dessous du plan de masse, ce qui n'est pas la direction de propagation.
- Adaptation facile à réaliser en raison de grand nombre de paramètres comme la taille de l'ouverture et la longueur du stub de la ligne d'alimentation.

Mais cette technique présente quelques inconvénients, tels que :

- Faible bande passante, mais peut être amélioré en jouant sur l'épaisseur du diélectrique et en superposant plusieurs éléments rayonnants.
- Difficile à mettre en œuvre.

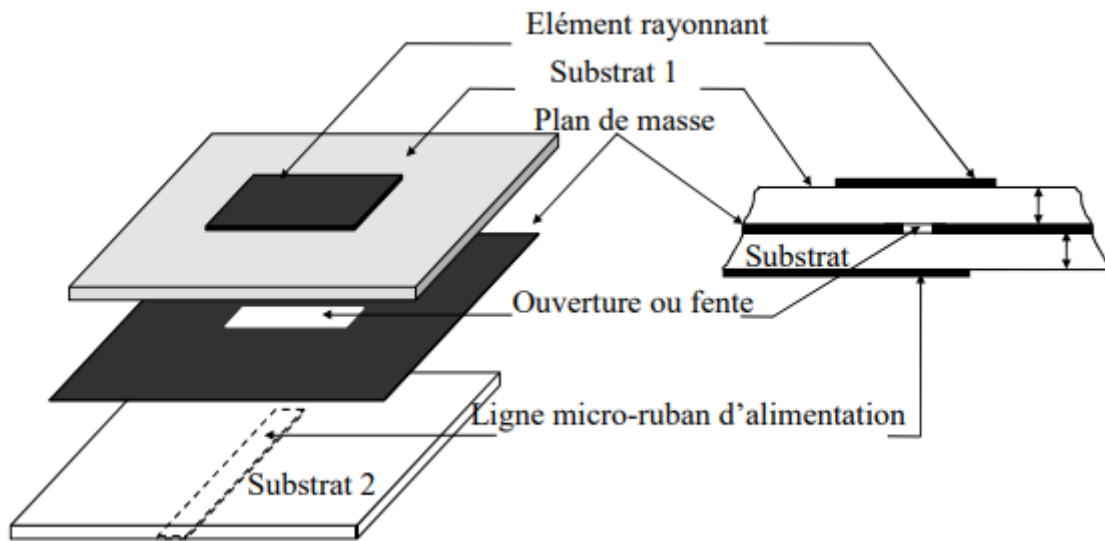


Figure II- 5: Alimentation au travers d'une ouverture dans le plan de masse

II.4 Les caractéristiques des antennes imprimées

Chaque antenne est caractérisée par plusieurs paramètres importants qui donnent une idée sur le fonctionnement et la performance de rayonnement d'antenne sous étude.

II.4.1 La directivité

La directivité est le rapport entre la puissance rayonnée par une antenne dans une direction donnée (U) et la puissance rayonnée par une antenne isotrope (U_0). Mathématiquement, elle s'exprime par :

$$D = \frac{U}{U_0} = \frac{U}{P_{rad/4\pi}}$$

Equation II- 1: Equation de directivité

II.4.2 Coefficient de réflexion

Le coefficient de réflexion **équation II-2** met en évidence l'absorption de l'énergie par l'antenne. C'est sur ce paramètre que l'on se base lors de l'optimisation. Il est souvent exprimé en décibel (dB).

$$S_{11} = -10 \log \left(\frac{P_{in}}{P_{ref}} \right) (dB)$$

Equation II- 2: Equation de coefficient de réflexion

II.4.3 Impédance d'entrée de l'antenne

En ce qui concerne l'émission et conformément à la théorie des circuits linéaires, l'antenne peut être représentée par un dipôle d'impédance d'entrée complexe $Z_e(f) = R_e(f) + jX_e(f)$ chargeant à la sortie du circuit émetteur, modélisé par une source d'impédance interne : $Z_s(f) = R_s(f) + jX_s(f)$. Précisons que f est la fréquence de résonance de l'antenne.

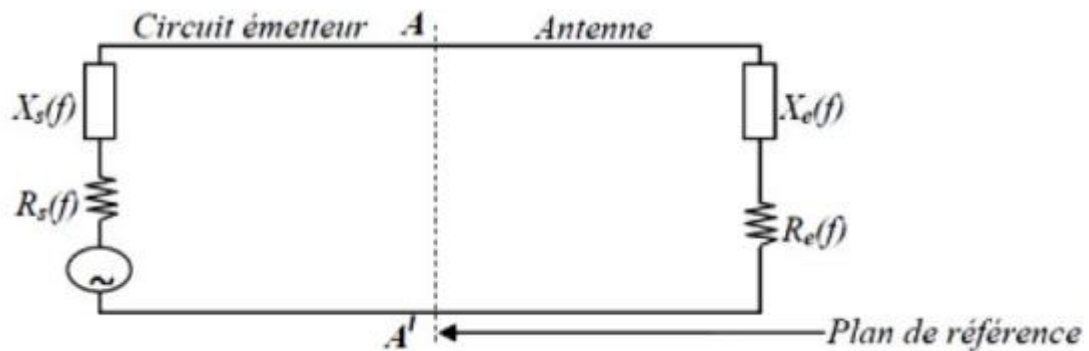


Figure II- 6: Schéma équivalent du dispositif à l'émission

D'une part, la partie réelle de l'impédance d'entrée $R_e(f)$ caractérise la puissance dissipée par l'antenne sous forme de rayonnement et de pertes diverses dans sa structure (effet Joule, onde de surface, etc.) et d'autre part, la partie imaginaire $X_e(f)$, d'interprétation plus délicate est liée à la puissance réactive concentrée au voisinage immédiat de l'antenne et au déphasage. L'impédance d'entrée de l'antenne est l'impédance vue de la part de la ligne d'alimentation au niveau de l'antenne. Cette impédance est donnée par l'expression :

$$Z_{in} = Z_0 \frac{(1 + S_{11})}{(1 - S_{11})}$$

Equation II- 3: Equation d'impédance d'entrée

Z_0 = impédance caractéristique de la ligne d'alimentation.

Où S_{11} est fonction de la fréquence, alors Z_{in} varie aussi avec la fréquence.

II.4.4 Rendement de l'antenne

Le rendement de l'antenne est le rapport entre la puissance rayonnée et la puissance fournie à l'antenne, soit :

$$\eta = \frac{P_r}{P_f}$$

Equation II- 4: Equation de rendement d'antenne

Ce rapport caractérise la perte à l'intérieur de l'antenne.

II.4.5 Le gain

Il est défini par

$$G(\theta, \varphi) = \eta \times D(\theta, \varphi)$$

Equation II- 5: Equation du gain

Où D = directivité de l'antenne.

II.4.6 Polarisation de l'antenne

Une antenne rayonne une onde qui, en champ lointain, présente localement les propriétés d'une onde plane. La polarisation de cette onde dans une direction donnée est, par définition, caractérisée par la projection dans le plan orthogonal à la direction de propagation, de la courbe décrite dans le temps par l'extrémité du vecteur du champ électrique, par convention, de l'onde rayonnée en zone lointaine. Ce paramètre permet de réutiliser la même fréquence en utilisant la diversité en polarisation.

Généralement, il existe trois types de polarisation : linéaire, circulaire et elliptique.

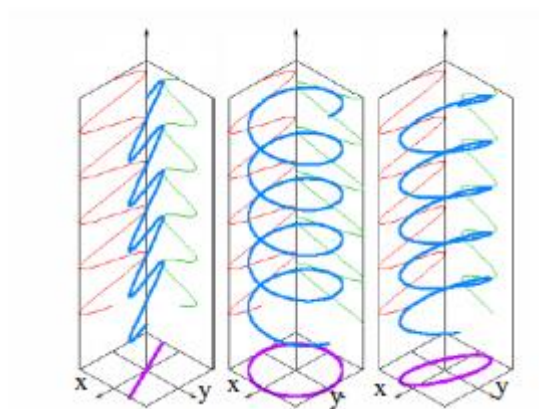


Figure II- 7: L'évolution du champ électrique pour la polarisation linéaire, circulaire et elliptique de gauche à droite, respectivement. Les courbes bleues montrent l'évolution de vecteur champ électrique. Les courbes rouges et vertes montrent les composantes cosinus.

II.6 Les antennes reconfigurables

II.6.1 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 après sa fabrication. Le changement dans l'un de ses paramètres électriques, optiques, physiques (modification mécanique) ou l'intégration de matériaux commandables (ferrites, cristaux liquides) permet de modifier les caractéristiques de l'antenne, même durant le fonctionnement de l'antenne 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 [17].

II.6.2 La nécessité de la reconfigurabilité

Le développement technologique touche plusieurs domaines surtout les télécommunications sans fil. L'antenne est considérée l'élément principal dans la communication, son rôle est de capter ou de recevoir les ondes électromagnétiques puis les transforme en ondes électriques ou inversement.

Les antennes imprimées sont largement utilisées dans le domaine de communications mobiles (téléphones mobiles, tablettes et des laptops). Ces antennes sont conçues et dédiées pour fonctionner sur une seule gamme de fréquence ce qui montre une grande limitation pour faire la diversité des services (WIFI, WLAN, GSM...). L'utilisation de plusieurs antennes pour un seul dispositif n'est pas faisable. La solution est présentée dans l'utilisation des antennes capable de changer sa bande d'utilisation suivant le besoin de l'utilisateur. Alors, on parle à la notion de reconfigurabilité.

Les antennes reconfigurables donnent un degré de liberté plus que les antennes patch simple (leurs paramètres et caractéristiques sont fixe et interchangeable), car ces antennes reconfigurable ont la possibilité de changer la fréquence de fonctionnement, de changer la bande d'utilisation elle-même, de filtrer les signaux parasites et d'orienter le lobe principal vers la direction privilégiée ce qui augmente la capacité du réseau (mobile) grâce à la diversité spatiale fournie par ces types d'antennes.

II.6.3 Techniques de reconfigurabilité

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

Dans la première technique, on doit modifier les caractéristiques de l'antenne en utilisant des composants actifs tels que, les diodes PIN et les RF-MEMS et les Varactors pour les types électriques. Dans le domaine optique, on doit utiliser des éléments de commutations optiques tels que les photoconducteurs. De même, la reconfigurabilité peut être réalisée par une modification mécanique dans la structure de l'antenne. Ce type est connu par la reconfigurabilité physique. Il y a une autre technique de reconfigurabilité présenté dans l'utilisation des matériaux intelligents tels que les ferrites et les liquides cristaux.

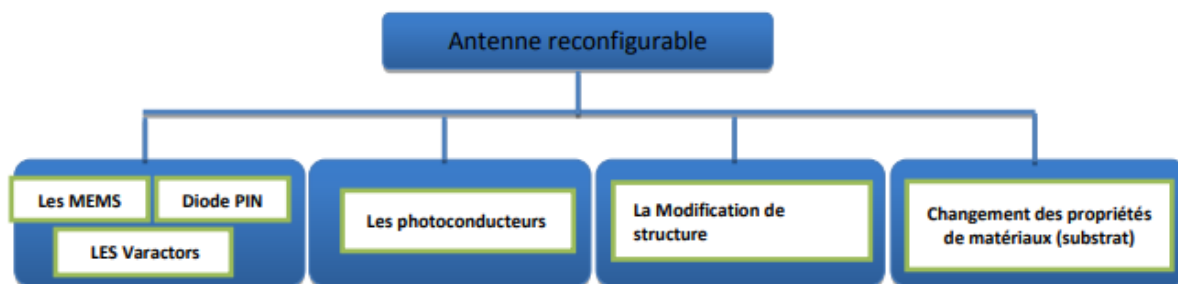


Figure II- 8: Les différentes techniques de reconfigurabilité

II.6.4 Classification des antennes reconfigurables

Quel que soit la technique de reconfigurabilité utilisée, on peut les classer suivant leur fonctionnalité sur les caractéristiques de l'antenne (fréquentielle, spatiale (de rayonnement) ou sur la polarisation).

II.6.4.1 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 [18].

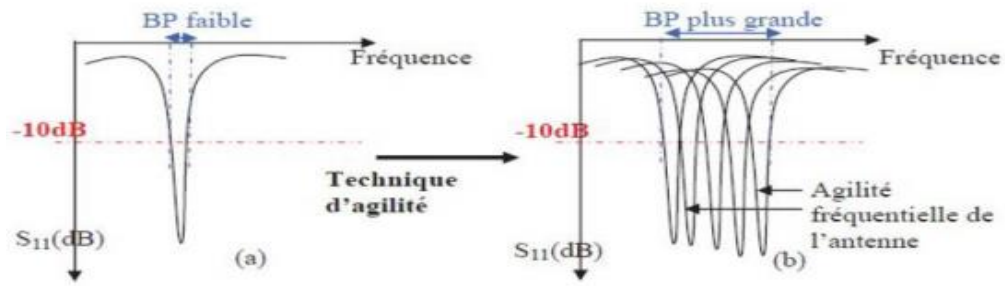


Figure II- 9: Illustration de l'agilité fréquentielle [19]

II.6.4.2 Principe de la reconfiguration de fréquence

Les antennes reconfigurables en fréquence permettent de régler la fréquence de fonctionnement de façon dynamique, Ils sont particulièrement utiles dans les cas où plusieurs systèmes de communications convergent, parce que les antennes multiples requis peuvent être remplacées par une seule antenne reconfigurable. L'agilité fréquentielle est obtenue en modifiant la longueur de résonance du résonateur. Pour cela, on charge l'antenne par des éléments actifs dont la réactance peut être contrôlée électroniquement (diode varicap), ou par des composants jouant le rôle d'un commutateur (diode PIN, FET ou MEMS). Ces composants actifs exigent des circuits de polarisation (biasing) pour faire la commutation (ON-OFF).

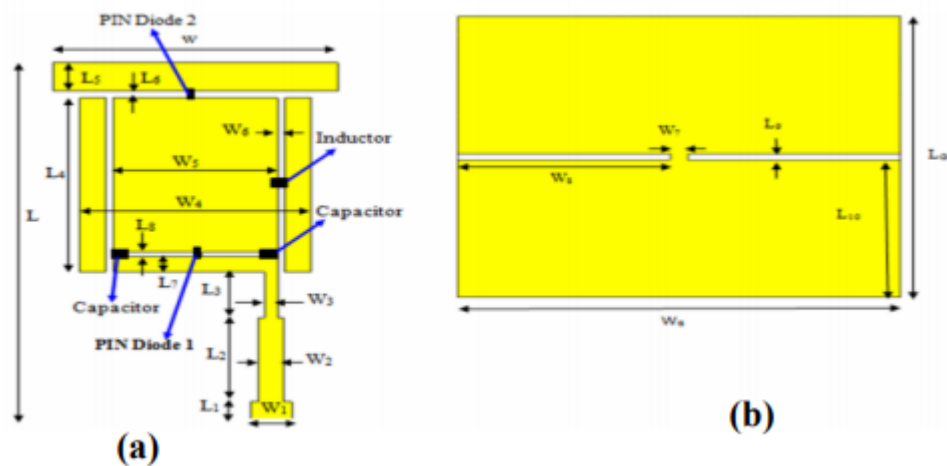


Figure II- 10: La reconfigurabilité de fréquence en utilisant une antenne rectangulaire vue du dessus (a) et du dessous (b) [20]

II.6.4.3 Antennes reconfigurables en diagramme de rayonnement

La reconfigurabilité du rayonnement permet à l'antenne d'adapter son diagramme de rayonnement et de maintenir sa fréquence de fonctionnement. Ce type de configuration est utilisé pour orienter le lobe principal vers les directions utiles et annuler les rayonnements

dans les directions des interférences, ce qui permet d'améliorer la capacité du système. La reconfigurabilité du rayonnement permet l'antenne de modifier sa forme, sa direction et son gain afin de favoriser les directions privilégiées. Les réseaux d'antennes sont souvent utilisés pour remplir cette tâche [21].

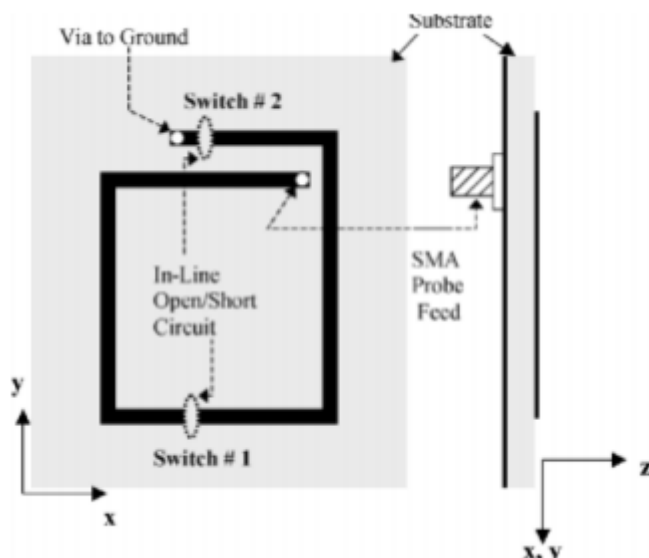


Figure II- 11: La reconfigurabilité du rayonnement en utilisant une antenne filaire à spirale carrée [21]

II.6.4.4 Antenne reconfigurable en polarisation

La reconfiguration en polarisation permet de changer la polarisation d'une antenne (horizontale/verticale, gauche ou droit de la polarisation circulaire, etc.). Ce type de configuration permet d'augmenter la fiabilité et la robustesse de la communication (immunité aux interférences) ainsi que de fournir un degré de liberté supplémentaire (diversité). Afin de maintenir les autres caractéristiques (fréquence, DR), on doit altérer la polarisation de l'antenne en agissant sur la phase et le sens du courant d'alimentation. On peut changer la polarisation de l'antenne en modifiant l'orientation vectorielle du champ E et cela sans altérer ni les fréquences résonantes, ni la forme du diagramme de rayonnement [22].

Les techniques utilisées pour les autres types de reconfigurabilité peuvent également s'appliquer ici. En effet, Il est possible de modifier la polarisation de l'antenne en ajoutant, par exemple, des fentes afin de perturber les lignes de courant.

II.7 Avantages et inconvénients d'une antenne reconfigurable

Une antenne reconfigurable, comme tous les autres types d'antennes classiques, a des avantages et des inconvénients.

▪ Avantage :

- ✓ La réallocation et la gestion dynamique du spectre
- ✓ Offre la flexibilité et répond aux exigences de plate-forme radio sans fil (des services multiples dans un seul appareil).
- ✓ Réduction du nombre d'antennes dans le système ce qui réduit la taille et le coût de l'appareil.
- ✓ Une bonne isolation entre les différentes normes sans fil et les bandes.
- ✓ La reconfigurabilité de rayonnement permet d'avoir une diversité spatiale.
- ✓ La reconfigurabilité en fréquence est utile à l'appui de nombreuses applications sans fil.
- ✓ La reconfigurabilité en polarisation permet de réduire divers problèmes tels que l'affaiblissement du signal dû à la propagation par trajets multiples, la sensibilité de l'émetteur-récepteur de signaux à l'orientation de l'antenne et la sécurité, etc.

▪ Inconvénients :

Bien que les antennes reconfigurables aient beaucoup d'avantages, elles ont aussi des méfaits. Parmi ces méfaits, on peut citer [23]

- ✓ Plus chers que les antennes classiques (introduire des composants actifs).
- ✓ Consommation énergétique élevée (composants actifs à polariser en continu).
- ✓ Difficultés de conception et de simulation à cause de l'intégration des composants actifs dans l'antenne (le besoin d'utiliser des packages, circuit de polarisation).
- ✓ Une efficacité réduite.

II.8 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre des généralités sur les antennes imprimées et les antennes reconfigurables et leur nécessité dans le domaine des télécommunications. Nous avons présenté aussi les paramètres et les caractéristiques qui affectent sur le comportement des antennes, ainsi que les techniques et les différents types de reconfigurabilité et enfin les avantages et inconvénients des antennes reconfigurables.

Chapitre III : Étude et conception d'antennes reconfigurables

III.1 Introduction

Ce chapitre est consacré à l'étude et à la conception d'antennes reconfigurables 5G en utilisant le logiciel HFSS. Nous allons présenter la méthodologie de conception que nous avons mise en place, puis exploitée toute au long de ce projet, ainsi que les résultats de simulation obtenus des différentes antennes 5G simulées et conçues.

Les résultats présentés dans ce mémoire sont obtenus avec la version 15 de HFSS (High Frequency Structure Simulation).

III.2 Conception des antennes

La phase de conception d'une antenne, à l'aide d'un logiciel adapté, est une étape incontournable dans un souci de gain de temps et d'optimisation de structure aux paramètres désirés. Pour cela, il faut choisir un outil de simulation électromagnétique adéquat.

III.3 Outil de simulation

Depuis quelques années, des logiciels de modélisation électromagnétique tel que HFSS (Ansoft) ou MicroWave Studio (CST) ont été commercialisés avec succès. Ces logiciels commerciaux, basés sur des techniques numériques éprouvées et validées, sont maintenant largement utilisés pour l'étude des antennes imprimées. La facilité d'utilisation de ces logiciels, grâce à des interfaces graphiques performantes et conviviales, permet un gain de temps considérable lors des phases de pré et post traitements.

Nous avons utilisé dans notre projet le logiciel d'Ansoft – HFSS qui est un logiciel puissant dédié à la simulation haute fréquence des circuits micro-ondes.

III.4 Présentation du logiciel HFSS

HFSS (High Frequency Structure Simulator) est un simulateur électromagnétique de haute performance qui calcule le comportement électromagnétique d'une structure tridimensionnels, tels que les paramètres S, les fréquences de résonance et les champs. Il effectue une modélisation électromagnétique par résolution des équations de Maxwell à l'aide de la méthode des éléments finis. Il intègre des simulations et des visualisations et permet d'obtenir des graphiques performants.

Le logiciel HFSS aide le concepteur à observer et analyser les diverses propriétés électromagnétiques de la structure tels que les caractéristiques de rayonnement et l'adaptation.

La figure suivante représente l'interface graphique de ce simulateur.

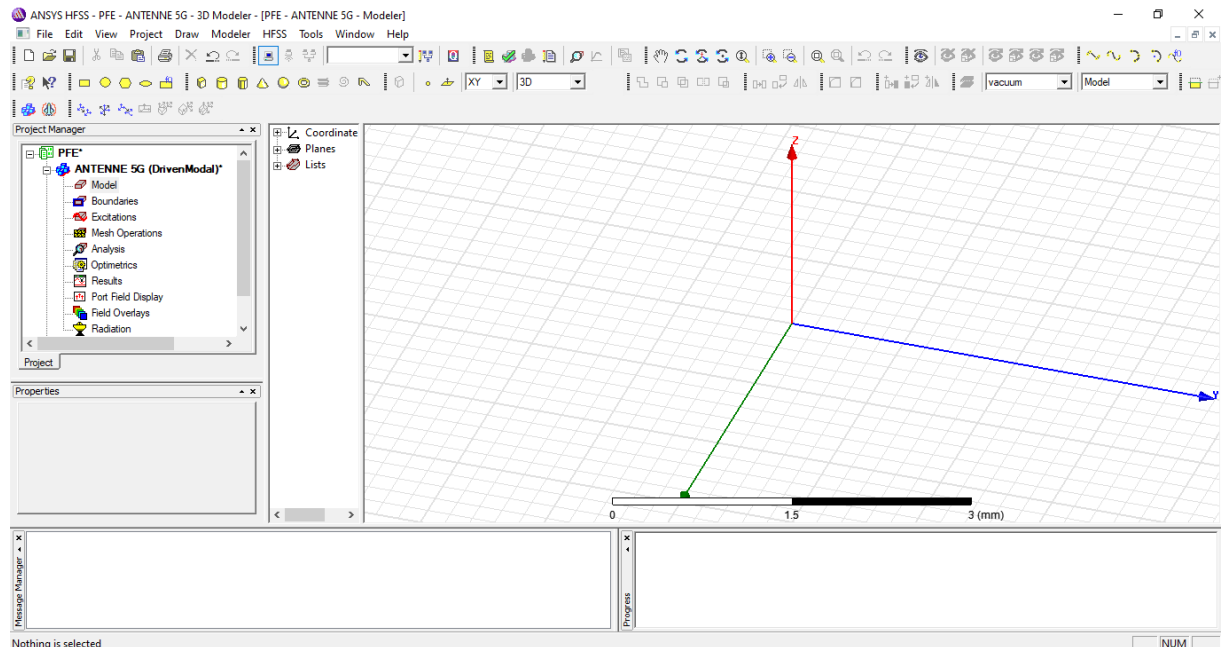


Figure III- 1: L'interface graphique du logiciel HFSS.

III.5 Etapes de conception

Pour créer une structure en 3D il suffit de la dessiner avec les outils mis à disposition par le logiciel. HFSS nous permet de définir les variables pour les associer à certains paramètres de la structure, comme les dimensions. L'utilisation des variables simplifie les éventuels changements des dimensions en changeant les valeurs des variables correspondantes.

La première étape dans une simulation est de déterminer le mode de solution qu'on souhaite réaliser. Les résultats obtenus dépendent du type de solution sélectionné. HFSS met à notre disposition trois différents types de solution, chacun optimisé pour un problème spécifique :

- **Driven Modal** : On utilise ce type quand on veut que HFSS calcule les paramètres S modal-based d'une structure passive en haute fréquence comme les lignes coplanaires, les guides d'ondes et les cavités résonnantes. Dans ce cas les paramètres S seront calculés en fonction des ondes incidente et réfléchie.

- **Driven Terminal** : On utilise ce type quand on veut que HFSS calcule les paramètres S modal-based de lignes de transmission à plusieurs conducteurs. Dans ce cas les paramètres S seront calculés en fonction de la tension et du courant aux accès.
- **Eigenmode** : On utilise ce type pour calculer les résonances d'une structure. Le logiciel trouvera la fréquence de résonance de la structure et les champs à ces fréquences.

Après avoir dessiner une structure, pour que le logiciel soit capable de faire la simulation, il faut exciter la structure. Il existe différents types d'excitation, le plus souvent, on utilise des Wave Ports et Lumped Port.

Dans le cas de la simulation d'antennes imprimées, un volume fictif doit être défini autour de l'antenne (pour limiter le maillage à base d'éléments finis). Le volume est conditionné par des frontières absorbantes, ce qui reflète mieux la réalité, du fait que l'antenne est conçue principalement pour rayonner et émettre de la puissance dans l'espace. Par conséquent, la réflexion des ondes émises est supposée absente.

III.6 Antenne simulée

La géométrie de l'antenne est présentée dans la **Figure III-2** [24]. Le patch est imprimé sur un substrat FR4 avec une constante diélectrique de 4,4 et de tangente de perte 0.02 et une épaisseur de 1,6 mm. Le plan de masse est composé d'un matériau en cuivre de 0,035 mm d'épaisseur, d'une longueur de 30 mm et d'une largeur de 26,5 mm.

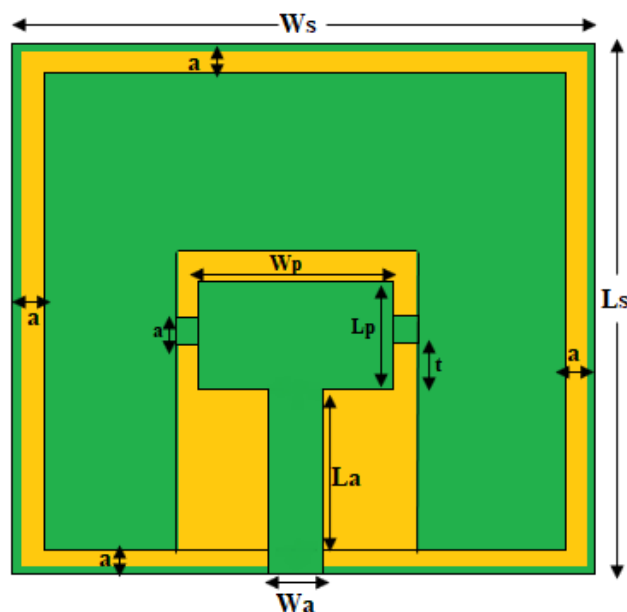


Figure III- 2: Paramètres de l'antenne reconfigurable simulée

Les dimensions de l'antenne sont présentées dans le **tableau III-1**

Paramètres	Valeur (mm)
W_s	26.5
L_s	30
W_p	12
L_p	5
W_a	3
L_a	11.75
a	1
t	2.5

Tableau III- 1: Les dimensions de l'antenne reconfigurable simulée.

Afin de commuter l'antenne entre deux bandes de fréquence, deux plaques métalliques d'une longueur de 1 mm et d'une largeur de 0,3 mm sont introduite.

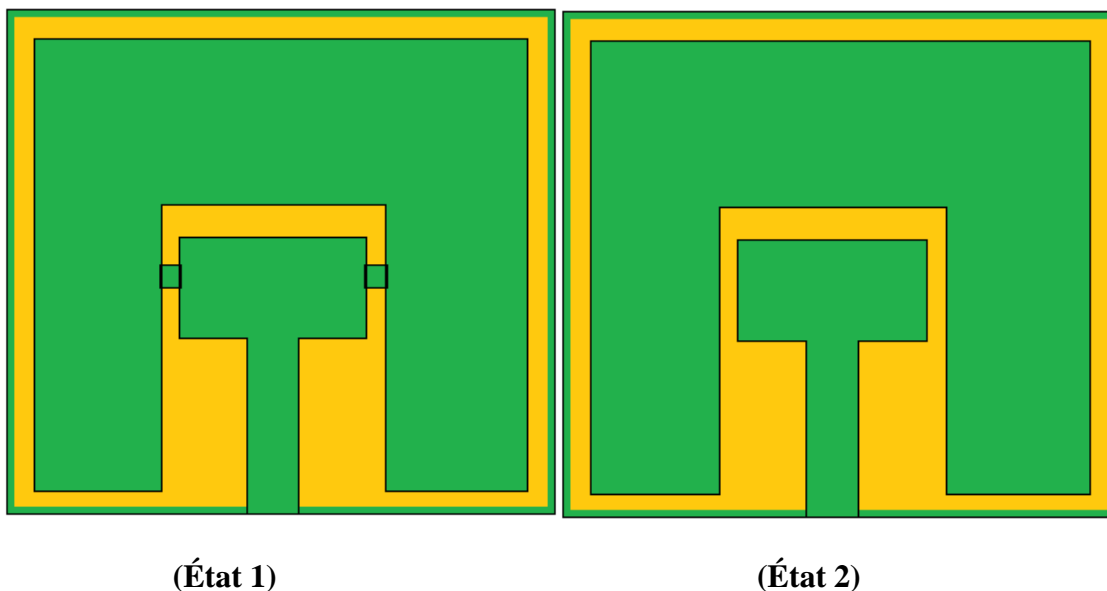


Figure III- 3: Antenne reconfigurable simulée avec plaque métallique (état 1) et sans plaque métallique (état 2).

Où :

- L'état 1 correspond à l'antenne fonctionnant dans la bande Wi-Fi.
- L'état 2 correspond à l'antenne fonctionnant dans la bande 5G.

III.7 Résultat de simulation

■ État 1 : Antenne fonctionnant dans la bande Wi-Fi

○ Coefficient de réflexion

La figure III-4 présente le coefficient de réflexion en fonction de la fréquence de l'antenne à l'état 1 (application Wi-Fi)

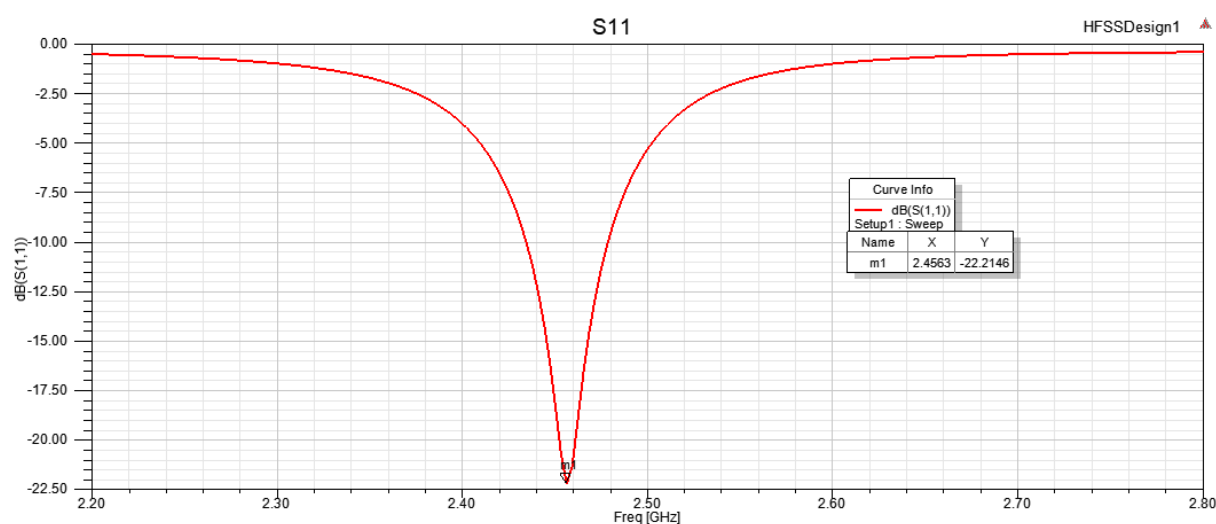


Figure III- 4: Coefficient de réflexion de l'antenne à l'état 1 (application Wi-Fi)

On remarque qu'on a une bonne adaptation à la fréquence 2.456 GHz, le coefficient de réflexion est inférieur à -22 dB.

La largeur de bande de l'antenne est de 44MHz autour de la fréquence de résonance 2.456 GHz dans l'intervalle 2.4344 – 2.4786 GHz.

○ Taux d'onde stationnaire (VSWR)

La figure III-5 montre la variation du VSWR en fonction de la fréquence.

Le rapport d'ondes stationnaires est inférieur à 2 à la fréquence de résonance 2.45 GHz, ce qui confirme que l'antenne est bien adaptée.

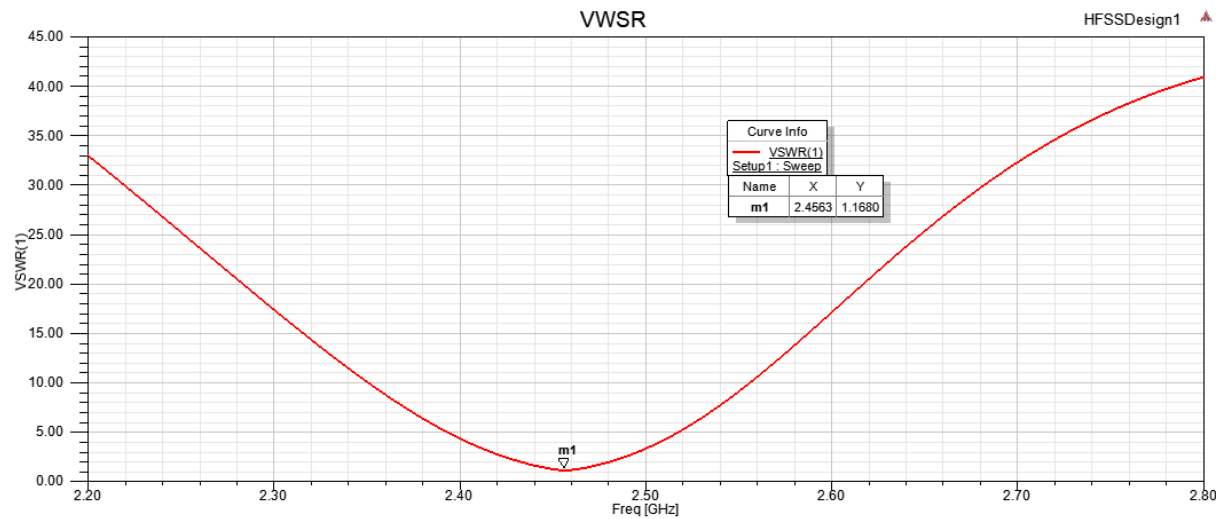


Figure III- 5: VSWR de l'antenne à l'état 1 (application Wi-Fi).

○ Diagrammes de rayonnement

Les figures III-6 et III-7 présentent le diagramme de rayonnement de l'antenne en 3D et en 2D à la fréquence 2.4 GHz à l'état1.

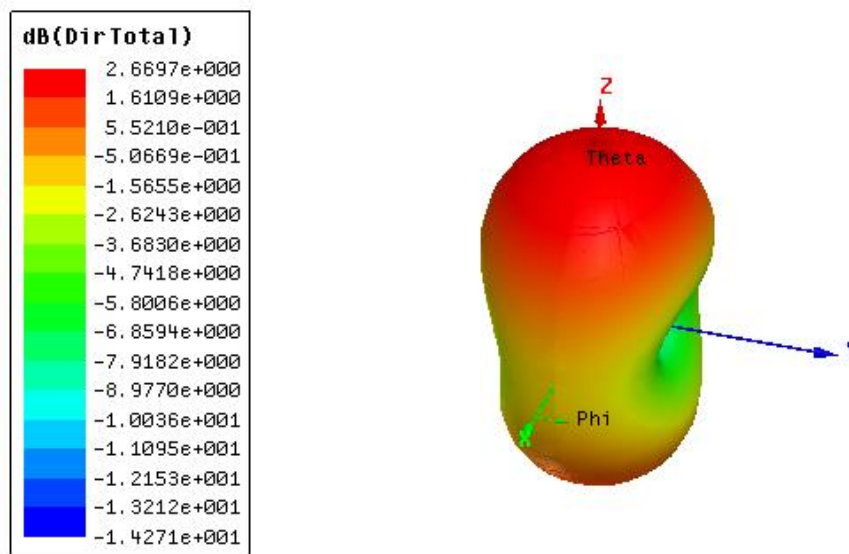


Figure III- 6: Diagramme de rayonnement en 3D (directivité) à l'état 1 (application Wi-Fi).

Le diagramme de rayonnement de l'antenne a une forme appropriée comme le montre la figure III-6 parce que le rayonnement est concentré dans la partie supérieure de l'antenne.

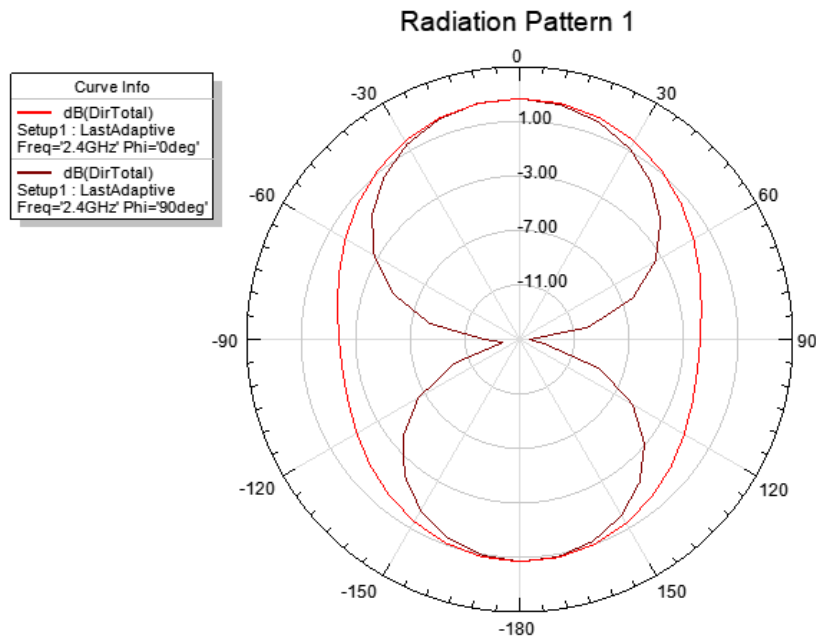


Figure III- 7 : Diagramme de rayonnement en 2D ($\phi=0^\circ, 90^\circ$) à l'état 1 (application Wi-Fi).

- **Distribution de courant à l'état 1**

La figure III-8 montre la distribution de courant à l'état 1. On remarque qu'un fort courant est localisé autour de la fente

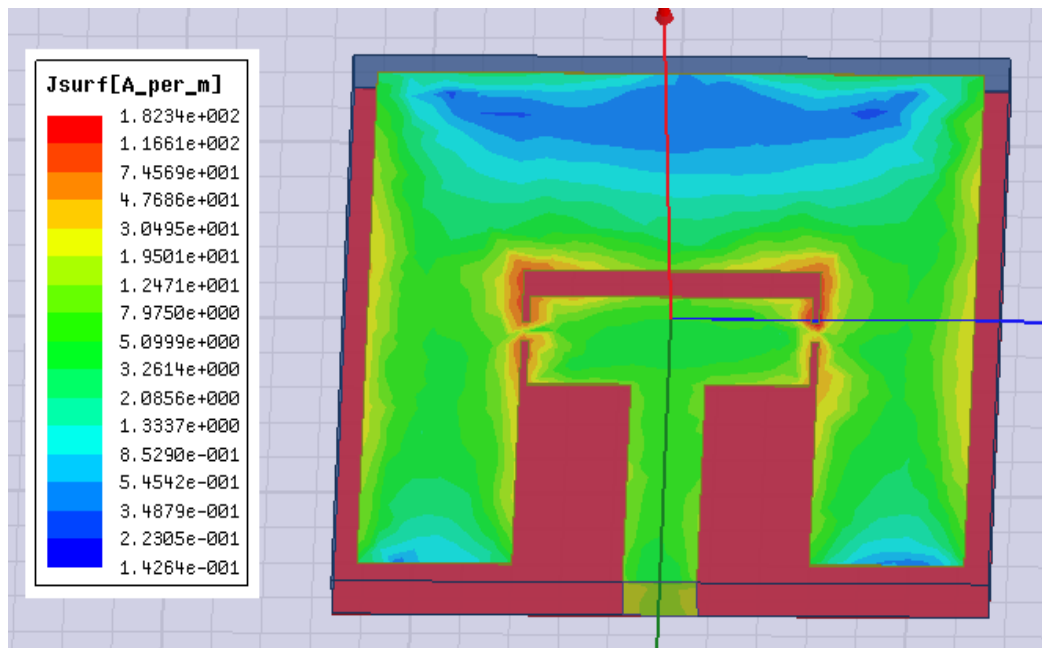


Figure III- 8: Distribution de courant à l'état 1 (application Wi-Fi).

■ État 2 : Antenne fonctionnant dans la bande 5G

- **Coefficient de réflexion**

La figure III-9 montre le coefficient de réflexion en fonction de la fréquence à l'état 2.

L'antenne a une bonne adaptation sur la gamme de fréquences [27.75 GHz - 29.77 GHz].

Nous pouvons voir que l'antenne fonctionne à 28.78 GHz avec un pic de -43.09 dB.

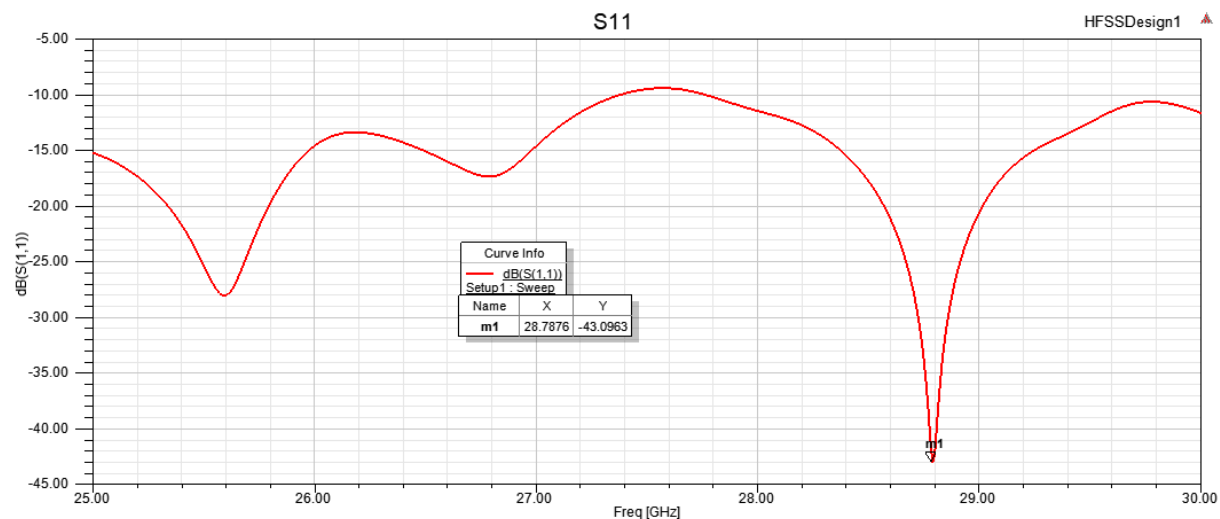


Figure III- 9: Coefficient de réflexion de l'antenne à l'état 2 (application 5G)

○ Taux d'onde stationnaire (VSWR)

La figure ci-dessous illustre le rapport des ondes stationnaires en fonction de la fréquence à l'état 2.

La valeur du rapport d'ondes stationnaires pour la fréquence de résonance 28.78 GHz est inférieure à 2, ce qui est la principale raison d'une bonne adaptation.

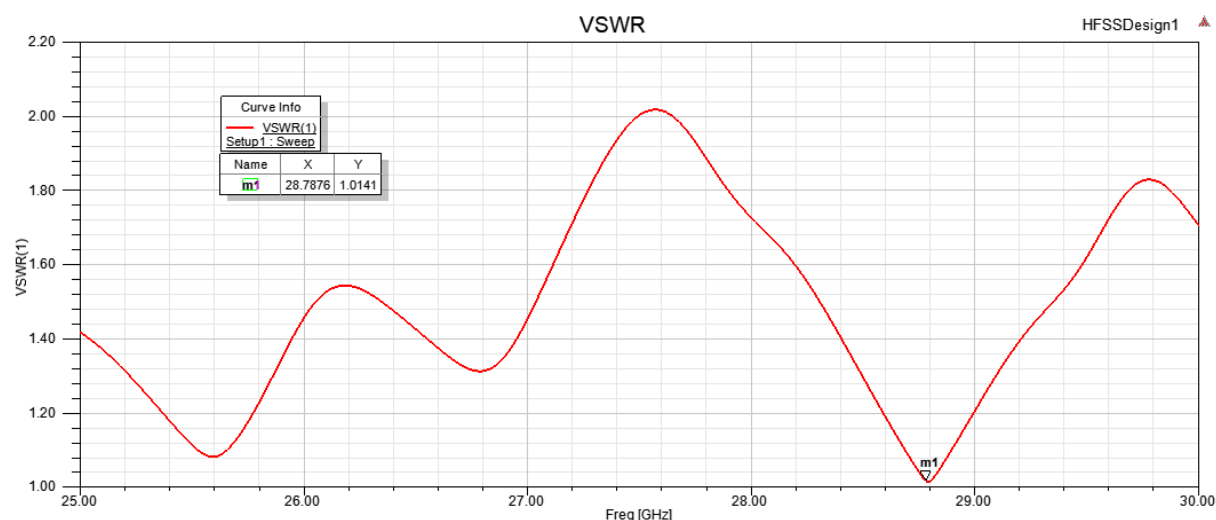


Figure III- 10: VSWR de l'antenne à l'état 2 (application 5G).

○ Diagrammes de rayonnement

Les figures III-11 et III-12 présentent le diagramme de rayonnement en 3D et en 2D à l'état 2.

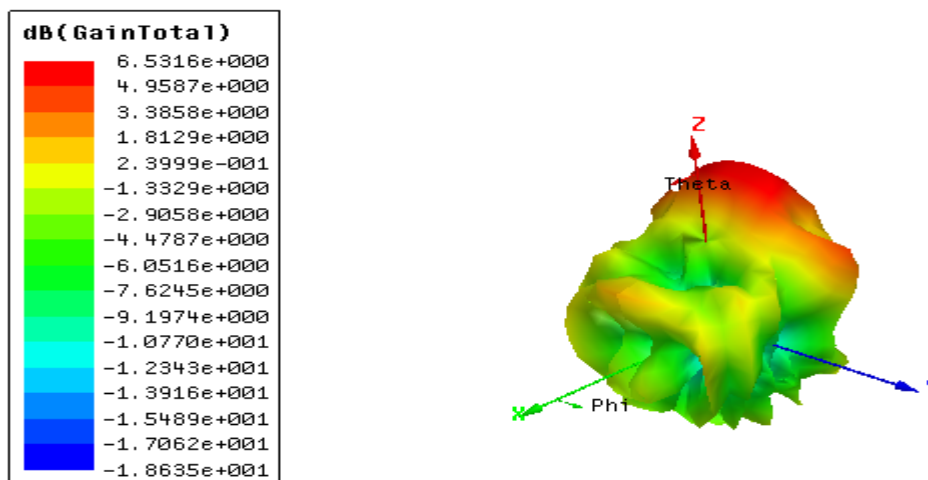


Figure III- 11: Diagramme de rayonnement en 3D (Gain) pour l'état 2 (application 5G).

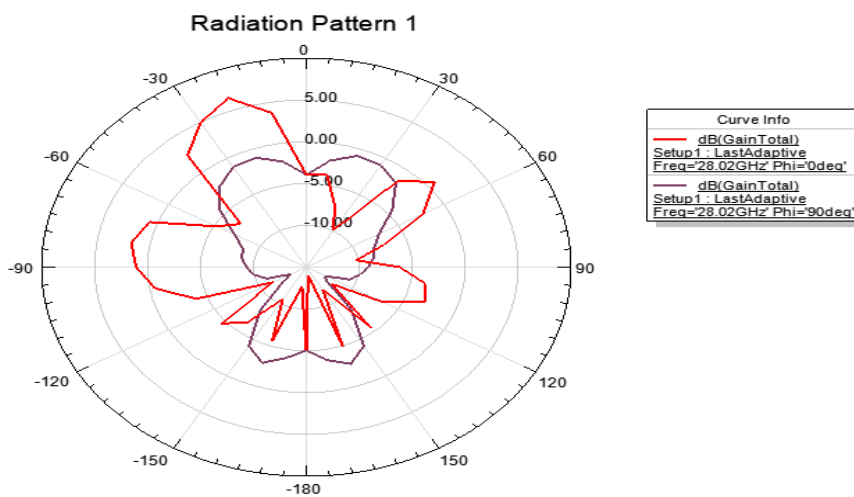


Figure III- 12: Diagramme de rayonnement en 2D (phi=0°,90°) pour l'état 2 (application 5G).

○ **Distribution de courant à l'état 2**

On remarque que la partie supérieure du patch n'est parcourue par aucun courant. Par contre les courants sont localisés dans la partie centrale du patch.

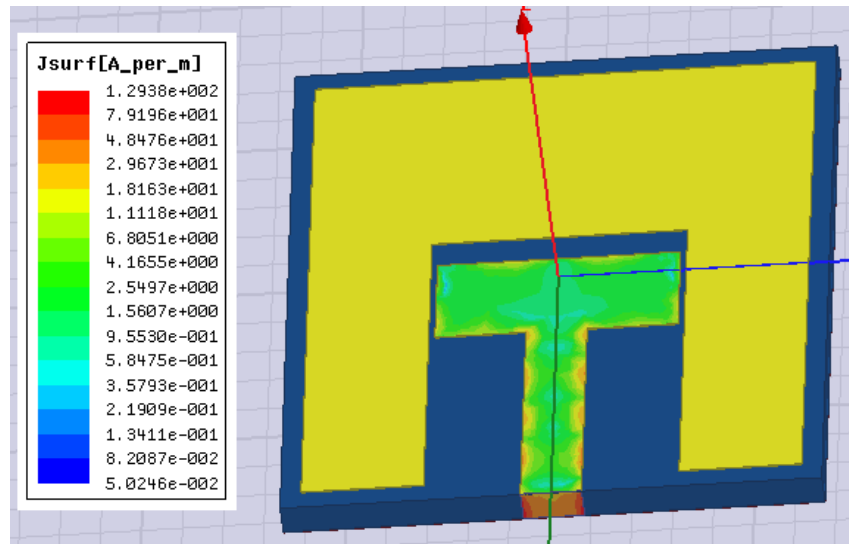


Figure III- 13: Distribution de courant à l'état 2 (application 5G).

III.8 Antenne proposée

La structure de l'antenne proposée est illustrée dans la **figure III-14**. Elle se compose d'un patch circulaire de rayon $r = 2.08$ mm gravé sur la face supérieure du substrat de type Durioid/Rogers 5880, d'épaisseur $h = 1.6$ mm, de longueur $L = 30$ mm, de largeur $W = 26.5$ mm, de permittivité $\epsilon_r = 2.2$ et de tangente de perte 0.0009 .

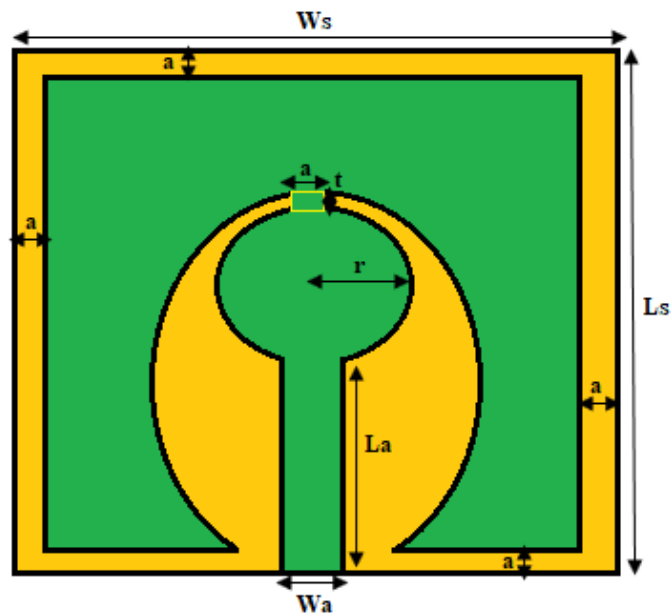


Figure III- 14: Antenne reconfigurable proposée.

Les dimensions de l'antenne proposée sont présentées dans le tableau suivant :

Paramètres	Valeur (mm)
W_s	26.5
L_s	30
r	2.08
L_a	9.1
W_a	3
a	1
t	0.6

Tableau III- 2: Dimensions de l'antenne reconfigurable proposée.

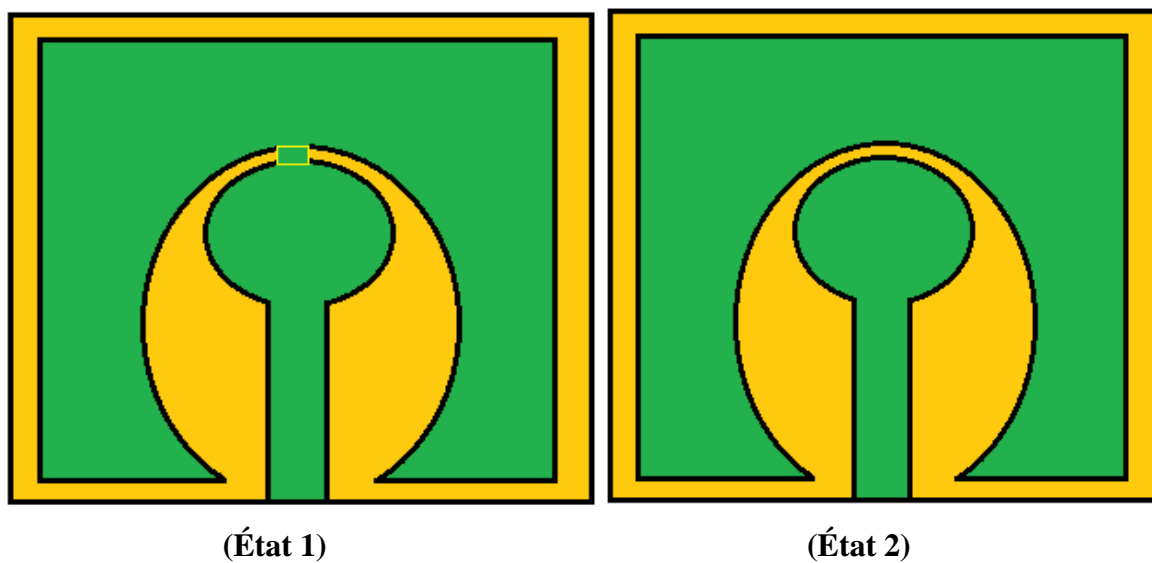


Figure III- 15: Antenne reconfigurable proposée avec plaque métallique (état 1) et sans plaque métallique (état 2).

Où :

- L'état 1 correspond à l'antenne fonctionnant dans la bande 5G (3 GHz).
- L'état 2 correspond à l'antenne fonctionnant dans la bande 5G (21 GHz).

III.9 Résultats de simulation de l'antenne proposée

- État 1 : Antenne fonctionnant à la fréquence 3 GHz.

○ Coefficient de réflexion

La figure III-16 présente le coefficient de réflexion, en fonction de la fréquence, de l'antenne proposée à l'état 1.

On observe que le coefficient de réflexion S11 est de -28.13 dB à la fréquence 3 GHz, ce qui montre que cette antenne est bien adaptée à cette fréquence.

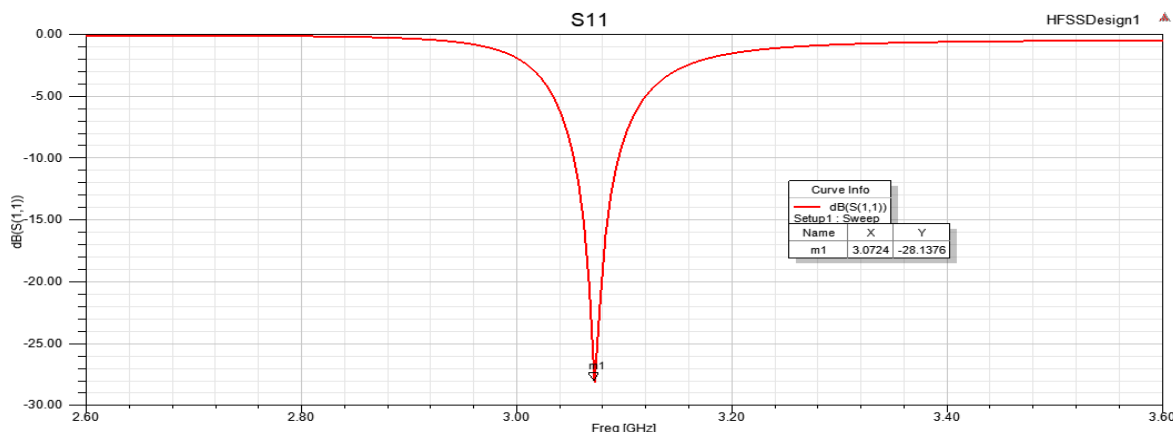


Figure III- 16: Coefficient de réflexion de l'antenne proposée à l'état 1.

On peut remarquer que la largeur de bande de l'antenne est de 41.8 MHz autour de la fréquence de résonance 3GHz dans l'intervalle (3.0529 – 3.0947) GHz.

○ Taux d'onde stationnaire (VSWR)

La figure III-17 montre la variation du VSWR en fonction de la fréquence. On remarque une bonne adaptation de l'antenne, le VSWR est inférieur à 2 à la fréquence 3 GHz.

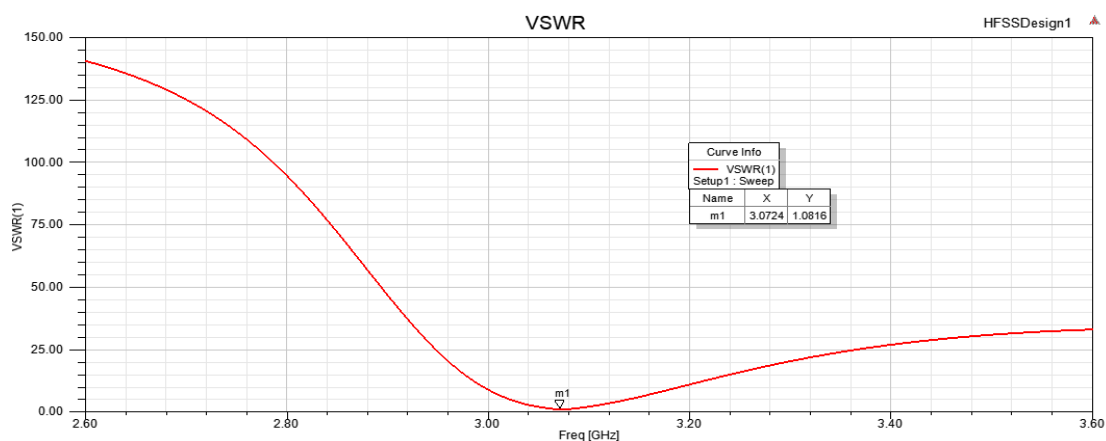


Figure III- 17: VSWR de l'antenne à l'état 1.

○ Distribution de courant

Nous observons la répartition des courants dans toute la géométrie du patch.

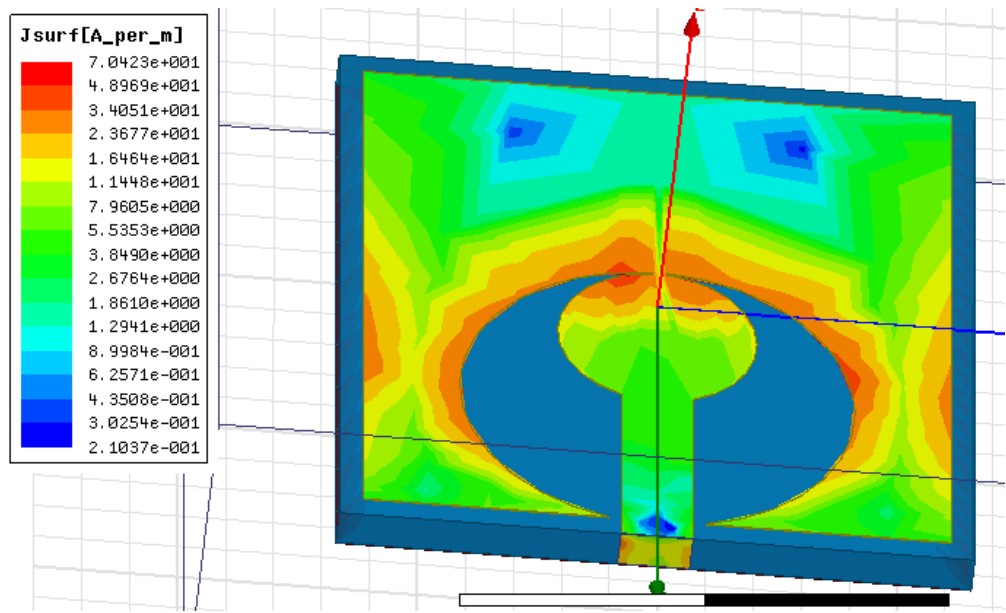


Figure III- 18: Distribution de courant de l'antenne proposée à l'état 1

○ Diagrammes de rayonnement

La figure III-19 montre le diagramme de rayonnement simulé en 3D et en 2D de l'antenne proposée à l'état 1. La valeur du gain est de 6.23 dB à la fréquence 3 GHz.

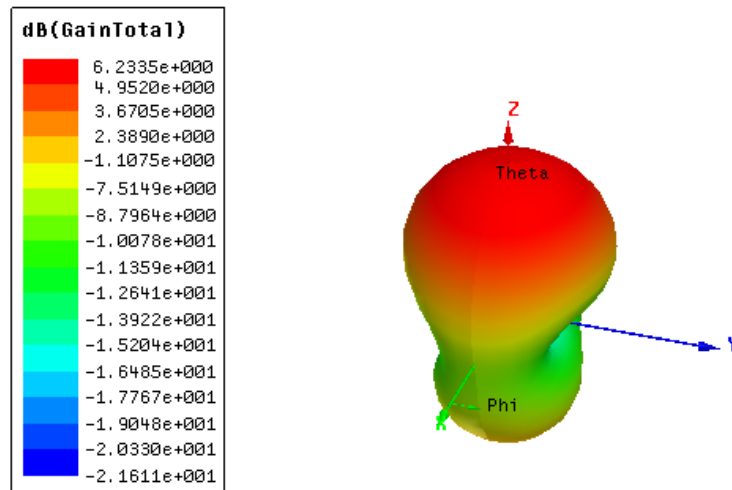


Figure III- 19: Diagramme de rayonnement de l'antenne proposée en 3D (Gain) à l'état 1.

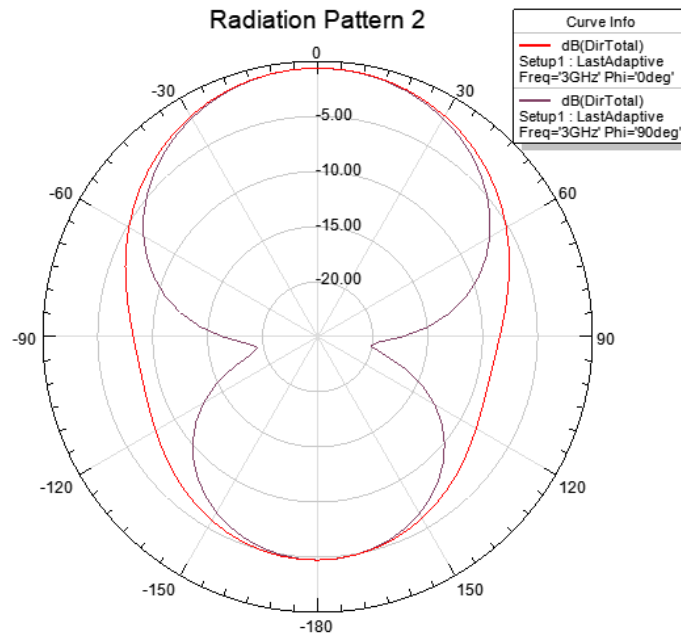


Figure III- 20: Diagramme de rayonnement en 2D (directivité) à l'état 1.

■ État 2 : Antenne fonctionnant à la fréquence 21 GHz

○ Coefficient de réflexion

La figure III-21 présente le module du coefficient de réflexion en fonction de la fréquence à l'état 2.

La courbe du coefficient de réflexion montre que l'antenne conçue résonne à 21.30 GHz avec une largeur de bande de 803 MHz (20.9354-21.7384 GHz). On remarque qu'on a une bonne adaptation du coefficient de réflexion de -28,20 dB.

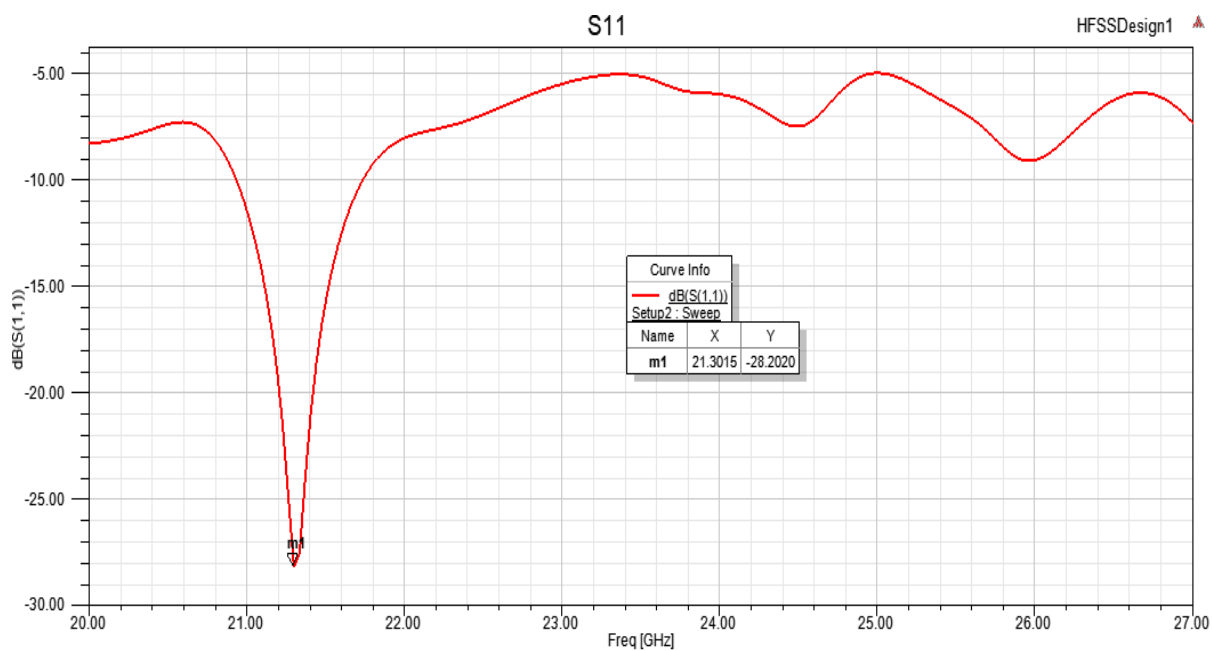


Figure III- 21: Coefficient de réflexion de l’antenne proposée à l’état 2.

- **Distribution de courant à l’état 2 de l’antenne proposée**

Nous observons une localisation des courants seulement dans le petit patch.

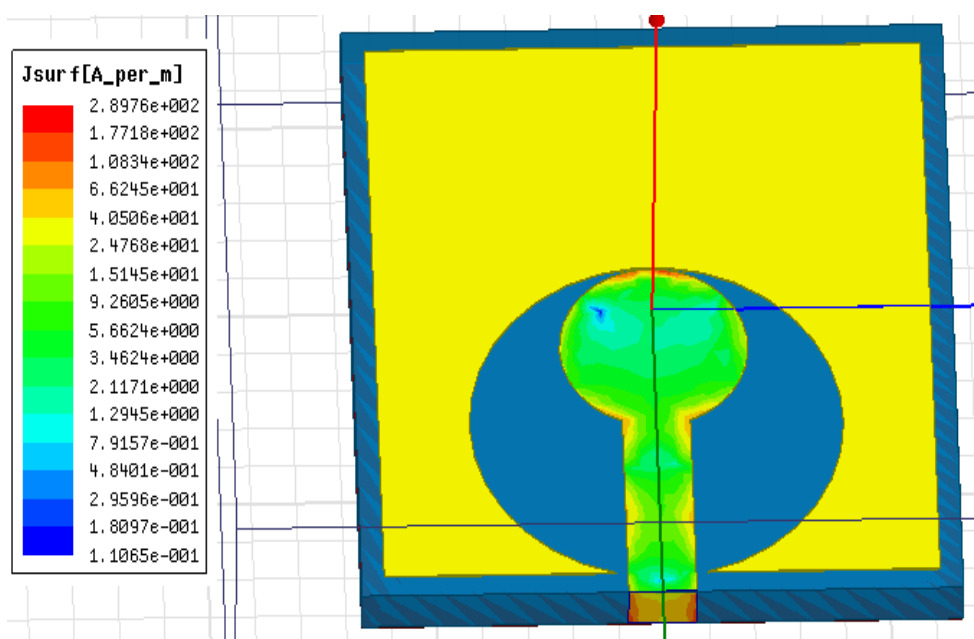


Figure III- 22: Distribution de courant à l’état 2

- **Taux d’onde stationnaire (VSWR)**

La figure III-23 montre le rapport d'onde stationnaire en fonction de la fréquence.

La représentation du rapport d'onde stationnaire en fonction de la fréquence montre que l'antenne est bien adaptée à la fréquence 21 GHz, le VSWR est inférieur à 2 à cette fréquence.

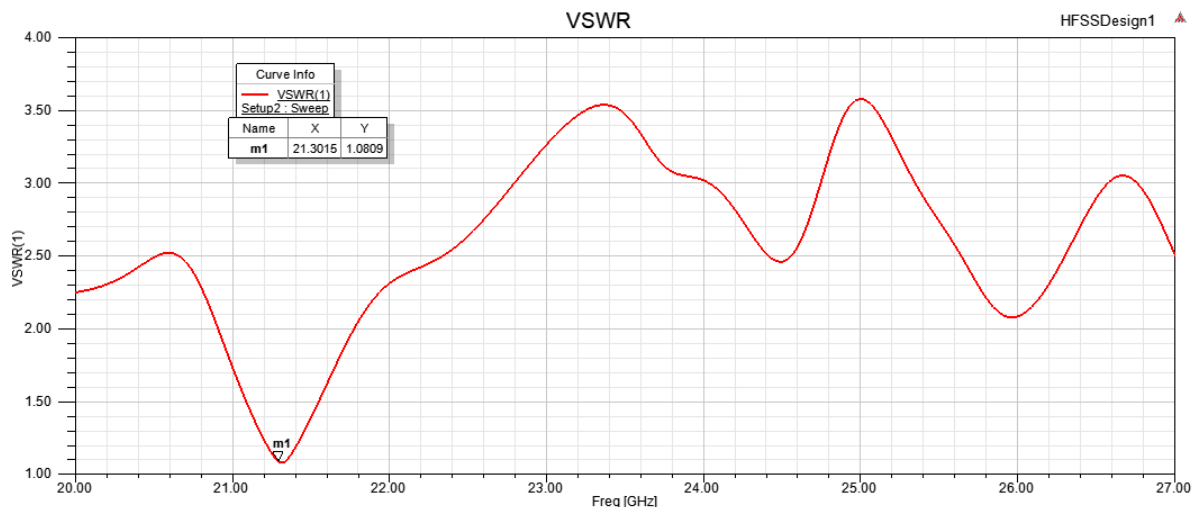


Figure III- 23: VSWR de l’antenne proposée à l’état 2.

On remarque que dans la courbe représentative, le VSWR est inférieur à 2.

○ Diagrammes de rayonnement

Les figures III-24 et III-25 présentent les diagrammes de rayonnement en 3D et en 2D à l’état 2 de l’antenne proposée.

L’antenne a un gain maximal de 9.65 dB à la fréquence de résonance, ce qui illustre une efficacité de rayonnement relativement élevée.

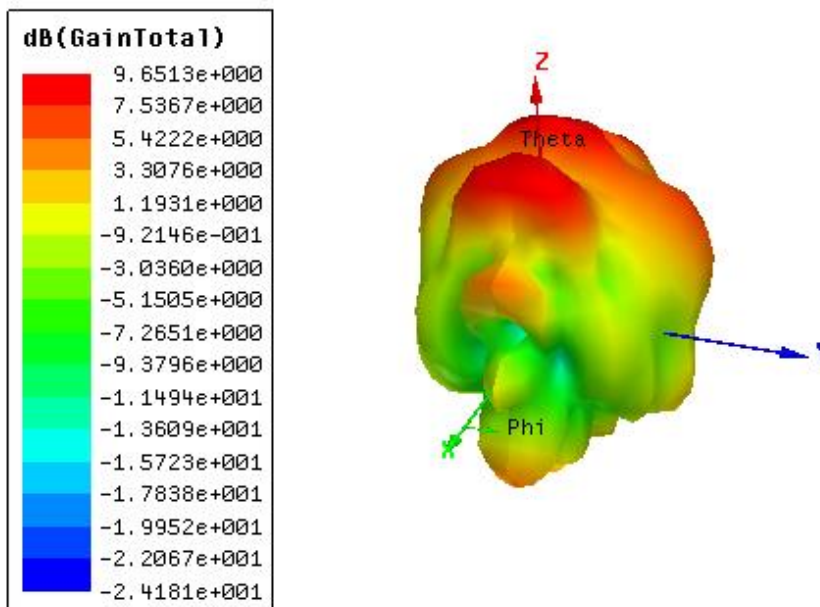


Figure III- 24: Diagramme de rayonnement en 3D (Gain) de l'antenne proposée à l'état 2.

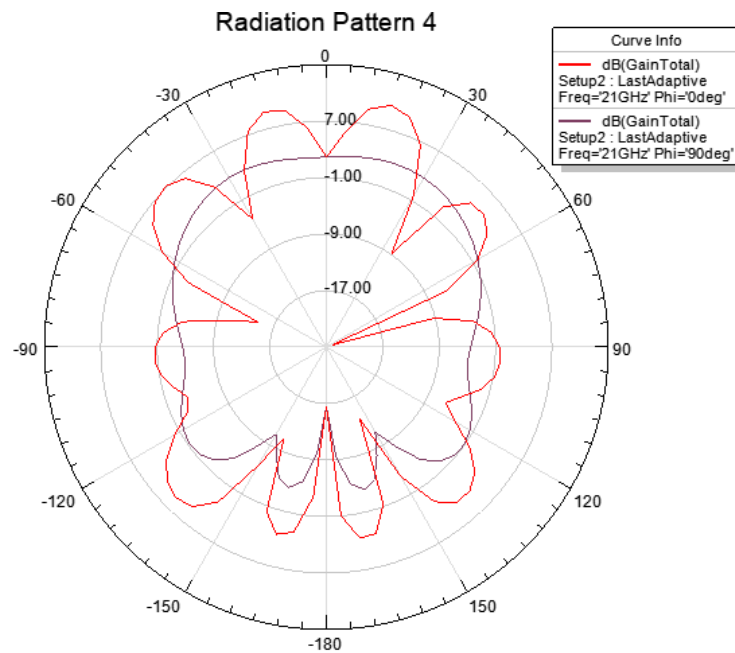


Figure III- 25: Diagramme de rayonnement en 2D de l'antenne proposée à l'état 2.

III.10 Conclusion

Les antennes imprimées exigent des études approfondies théoriques et numériques dans leur conception. L'utilisation d'un logiciel adéquat pour la caractérisation et la conception d'une antenne est une phase incontournable pour l'optimisation de la structure aux paramètres désirés.

Dans ce chapitre, nous avons présenté deux antennes reconfigurables en fréquence pour les applications 5G, de faible coût de réalisation et très facile à fabriquer. La conception de ces deux antennes a été faite en utilisant le logiciel HFSS. Les caractéristiques les plus importantes des deux antennes conçues, tels que le coefficient de réflexion, le diagramme de rayonnement, le gain et le rapport d'onde stationnaire (ROS) ont été présentés. Les résultats de simulation obtenus par le logiciel HFSS ont montré que les antennes conçues présentent de bonnes performances.

Conclusion générale

Avec l'émergence de nouvelles normes, les systèmes de télécommunication doivent pouvoir combiner plusieurs normes sur une même antenne. Les antennes reconfigurables se présentent alors comme des candidates pour répondre aux exigences imposées

Les antennes agiles ou reconfigurables, dont le développement est en plein essor, sont très intéressantes car leur fonctionnement peut être modifié dynamiquement, ce qui peut être très avantageux pour plusieurs applications.

Le travail présenté dans ce mémoire a porté sur les antennes reconfigurables. Le type de reconfiguration étudié concerne la fréquence. Nous nous sommes intéressés à l'optimisation et à la conception d'antennes reconfigurables en fréquence dédiées pour les systèmes de télécommunication multistandard.

Dans le premier chapitre nous avons présenté une généralité sur la nouvelle technologie 5G en donnant ses objectifs, les différentes techniques qu'elle utilise, son architecture globale et son domaine d'utilisation.

Dans le deuxième chapitre nous avons présenté des généralités sur les antennes imprimées et les antennes reconfigurables et leur nécessité dans le domaine des télécommunications en raison des nouvelles fonctionnalités qu'elles proposent. La définition, les différentes techniques d'obtention de la reconfigurabilité, une classification de ces antennes reconfigurables selon leurs fonctionnalités et enfin les avantages et inconvénients de ce type d'antennes ont alors été présentés.

Les antennes imprimées exigent des études approfondies théoriques et numériques dans leur conception. L'utilisation d'un logiciel adéquat pour la caractérisation et la conception d'une antenne est une phase incontournable pour l'optimisation de la structure aux paramètres désirés.

Dans le troisième chapitre, nous avons présenté deux antennes reconfigurables en fréquence pour les applications 5G, de faible coût de réalisation et très facile à fabriquer. La conception de ces deux antennes a été faite en utilisant le logiciel HFSS. Les caractéristiques les plus importantes des deux antennes conçues, tels que le coefficient de réflexion, le diagramme de rayonnement, le gain et le rapport d'onde stationnaire (ROS) ont été présentés.

Les résultats de simulation obtenus par le logiciel HFSS ont montré que les antennes conçues présentent de bonnes performances.

Bibliographie

- [1] Faure, L. (2018, 20 novembre). L'évolution des réseaux mobiles : de la 2G à la 5G. IT SOCIAL.
- [2] 5G Vs. 4G | What Is The Difference Between 5G 4G Networks ? (s. d.). iSelect.
- [3] Chataut, R. (s. d.). Massive MIMO Systems for 5G and beyond Networks Overview, Recent Trends, Challenges, and Future Research Direction. MDPI.
- [4] Purcher, J. (2018, 23 juillet). Qualcomm Claims 5G-Antenna Breakthrough-based-on Millimeter-Wave-Technology-could hit the Market-in 2019. Patently Apple.
- [5] Gaube, E. (2018, 26 octobre). INFOGRAPHIE – Comment fonctionnera le réseau mobile 5G ? BFMTV.
- [6] Ericsson Networks. (2019, 26 février). What are Ericsson Radio Stripes ? Twitter.
- [7] Bundesamt für Kommunikation BAKOM. (s. d.). Notice d'information 5G.
- [8] Agence Nationale des Fréquences. (juillet 2019). Evaluation de l'exposition du public aux ondes électromagnétiques 5G (PDF File).
- [9] Lausson, J. (2020, 25 juillet). 5G : tout comprendre au réseau mobile du futur en 10 questions. Numerama.
- [10] Detti, A. (s. d.). Fuctional Architecture [PDF File].
- [11] 5G Vs. 4G | What Is The DifferenceBetween 5G 4G Networks ? (s. d.). iSelect.
- [12] Muteau, S. (2017, 30 août). Les dessous de la 5G. Économie numérique.
- [13] Hajri, S-E. (2018, 9 avril). L'amélioration des performances des systèmes sans fil 5G par groupements adaptifs des utilisateurs.

[14] D. M. Pozar, "Microstrip Antenna Aperture Coupled to a Microstrip Line" *Elect Letters*, vol. 21, pp. 49-50, Jan.1985.

[15] B. Belentepe, "A Simple Equivalent Model for Electromagnetically Coupled Microstrip Patch Antenna", *Journée Internationale de Nice sur les antennes, France, Symposium proceeding*, pp. 91-94, Nov1994.

[16] D.M. Pozar, "Microstrip Antenna Aperture Coupled to a Microstrip Line" *Elect Letters*, vol. 21, pp. 49-50, Jan.1985.

[17] 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.

[18] B. Allen, et al., "Ultra-Wideband Antennas and Propagation for Communications, Radar and Imaging" London, UK: Wiley, 2006.

[19] Y. Zemmam, A. Foukia, " Etude et conception d'antennes reconfigurables par association d'éléments actifs,".

[20] Y. I. Abdulraheem et al., "Design of frequency reconfigurable multiband compact antenna using two PIN diodes for WLAN/WiMAX applications," *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, vol. 11, no. 8, pp. 1098–1105, Jun. 2017.

[21] T. Duc Nguyen, ,, "Conception d'antenne intelligente reconfigurable pour la radio cognitive", Université Grenoble Alpes, 2012.

[22] J. T. Bernhard, "Reconfigurable Antennas". San Rafael, CA: Morgan and Claypool, 2007.

[23] D. M. Pozar, "Microstrip Antenna Aperture Coupled to a Microstrip Line" *Elect Letters*, vol. 21, pp. 49-50, Jan.1985.

[24] Doae El Hadri, "Reconfigurable Antenna for Wi-Fi and 5G Applications", pp. 793-799 Jan.2020.