

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** : Télécommunications Optiques

**Par** : BOUAZZA Amina

**Sujet**

**Conception des antennes reconfigurables pour les applications 5G et IoT**

Soutenu publiquement, le **18 / 06 / 2025**, devant le jury composé de :

M KARIM Fethallah	Professeur	Université de Tlemcen	Président
M BARKAT Abdellatif	MCA	Université de Tlemcen	Examineur
M MERIAH Sidi Mohammed	Professeur	Université de Tlemcen	Encadreur

Année universitaire : 2024 / 2025

# Dédicace :

*"L'amour d'une famille, le centre autour duquel tout gravite et tout brille. "*

*Victor Hugo*

## *Je dédie ce travail*

*A tous ceux qui me sont les plus chers : ma mère, mon père et ma sœur Nawel et Ismahene.*

*A ma grand-mère Zohra.*

*A mon cher oncle Diden.*

*A mes chères tantes : Nacera, Tedjania.*

*A ma chère cousine Hanane.*

*A toute ma famille, petits et grands.*

*A toutes mes amies : Wafaa, Besma, Radja, Achwak, Ghizlene, Ghozlène.*

*Merci d'être toujours là pour moi*

*Amina*

# Remerciement :

*Je tiens avant tout à remercier Dieu Tout-Puissant de m'avoir donné la force et la volonté pour achever ce modeste travail.*

*Je voudrais dans un premier temps remercier, mon encadrant Pr. **MERIAH SIDI MOHAMMED** pour sa patience, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter ma réflexion.*

*Je remercie également les membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à ma recherche en acceptant d'examiner mon travail et de l'enrichir par leurs propositions.*

*Je tiens également à témoigner ma gratitude et mes remerciements à tous les collaborateurs du Département Télécommunications et les membres du laboratoire TTL pour leur aide dans la réalisation de ce mémoire.*

*Enfin, je remercie toute personne ayant intervenue de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.*

## ***Résumé :***

Lorsque 5G est combinée avec l'Internet des objets (IoT), elle représente une avancée significative dans les systèmes de télécommunications. Ces nouveaux points de vue s'accompagnent d'exigences de performance accrues, telles qu'une connectivité élevée, une faible latence et une large bande passante. Pour résoudre ces problèmes, les dispositifs d'émission et de réception doivent devenir plus intelligents et adaptables.

La capacité des antennes reconfigurables à modifier dynamiquement certaines de leurs caractéristiques électriques en fait une solution prometteuse. Leur agilité en fréquence de résonance, diagramme de rayonnement et polarisation, en particulier, ouvre la porte à une large gamme d'applications avancées dans les systèmes filaires de nouvelle génération. Ils offrent une réponse technique unique aux contraintes d'adaptabilité imposées par des environnements complexes et changeants.

Ce mémoire met l'accent sur la recherche et la conception d'antennes adaptables destinées aux applications 5G et IoT, en faisant appel au logiciel de simulation CST Microwave Studio. Les principaux domaines d'étude pour ce type de reconfiguration sont la fréquence de résonance et la polarisation. Pour s'adapter en continu aux conditions changeantes, l'objectif est de concevoir des antennes capables de modifier leurs fréquences de fonctionnement et la direction de leur champ électrique.

**Mots clés :** Antenne imprimée, Antenne Reconfigurable, 5G, IoT, Fréquence de résonance, Polarisation circulaire, Efficacité énergétique.

## ***Abstract :***

When 5G is combined with the Internet of Things (IoT), it represents a significant advancement in telecommunications systems. These new perspectives come with increased performance requirements, such as high connectivity, low latency, and wide bandwidth. To solve these problems, transmission and reception devices must become smarter and more adaptable.

The ability of reconfigurable antennas to dynamically modify certain of their electrical characteristics makes them a promising solution. Their agility in resonance frequency, radiation pattern, and polarisation, in particular, opens the door to a wide range of advanced applications in next-generation wired systems. They offer a unique technical response to the adaptability constraints imposed by complex and changing environments.

This thesis focusses on the research and design of adaptable antennas for 5G and IoT applications, utilising the CST Microwave Studio simulation software. The main areas of study for this type of reconfiguration are the resonance frequency and polarisation. To continuously adapt to changing conditions, the goal is to design antennas capable of modifying their operating frequencies and the direction of their electric field.

**Keywords :** Printed Antenna, Reconfigurable Antenna, 5G, IoT, Resonance Frequency, Circular Polarisation, Energy Efficiency.

## ملخص:

عند دمج الجيل الخامس (5G) مع إنترنت الأشياء (IoT)، فإنه يمثل تطورًا كبيرًا في أنظمة الاتصالات. وتأتي هذه الآفاق الجديدة مع متطلبات أداء متزايدة، مثل الاتصال العالي، وانخفاض زمن الاستجابة، والنطاق الترددي الواسع. ولمعالجة هذه التحديات، يجب أن تصبح أجهزة الإرسال والاستقبال أكثر ذكاءً وتكيفًا.

تُعدّ الهوائيات القابلة لإعادة التهيئة حلاً واعدًا بفضل قدرتها على تعديل بعض خصائصها الكهربائية ديناميكيًا. وتُتيح مرونتها في تردد الرنين، ونمط الإشعاع، والاستقطاب، إمكانية استخدامها في مجموعة واسعة من التطبيقات المتقدمة في أنظمة الاتصالات الحديثة. فهي تقدّم استجابة تقنية فريدة لمتطلبات التكيف التي تفرضها البيئات المعقدة والمتغيرة.

تركّز هذه الرسالة على دراسة وتصميم هوائيات قابلة للتكيف لتطبيقات الجيل الخامس وإنترنت الأشياء، باستخدام برنامج المحاكاة CST Microwave Studio. وتشمل المحاور الأساسية لهذا النوع من إعادة التهيئة تردد الرنين والاستقطاب، بهدف تصميم هوائيات يمكنها تعديل تردداتها التشغيلية واتجاه مجالها الكهربائي باستمرار لتتكيف مع الظروف المتغيرة.

**الكلمات المفتاحية:** هوائي مطبوع، هوائي قابل لإعادة التكوين، الجيل الخامس، إنترنت الأشياء، تردد الرنين، الاستقطاب الدائري، الكفاءة الطاقية.

## *Liste Des Abréviations :*

**5G:** Cinquième Génération

**AMPS:** Advanced Mobile Phone System

**AMQP:** Advanced Message Queuing Protocol

**BBU:** Baseband Unit

**BDMA:** Beam Division Multiple Access

**CoAP:** Constrained Application Protocol

**CPRI:** Common Public Radio Interface

**CU:** Central Unit

**DU:** Distributed Unit

**ECPRI:** CPRI Amélioré

**EF:** Expedited Forwarding

**EVDO:** Evolution-Data Optimized

**FBMC:** Filter Bank Multicarrier

**FDMA:** Frequency Division Multiple Access

**FET:** les transistors à effet de champs

**FTP:** File Transfer Protocol

**FTTA:** Fiber To The Antenna

**GPRS:** General Packet Radio Service

**GSM:** Global System for Mobile Communications

**HSDPA:** High Speed Downlink Packet Access

**HSPA:** High Speed Packet Access

**HSUPA:** High Speed Uplink Packet Access

**HTTP:** HyperText Transfer Protocol

**IA:** Intelligence artificielle

**IMAP:** Internet Message Access Protocol

**IoT:** Internet des objets

**IPv4:** Internet Protocol version 4

**IPv6:** Internet Protocol version 6

**LHCP:** Polarisation Circulaire Gauche

**LoRA:** Long Range

**LPWAN:** Low Power Wide Area Network

**LTE:** Long Term Evolution

**MBAN:** Medical Body Area Network

**MEMS:** Micro Electro Mechanical Systems

**MQTT:** Message Queuing Telemetry Transport

**NB-IoT:** Narrowband IoT

**NFV:** Network Function Virtualization

**OFDMA:** Orthogonal Frequency Division Multiple Access

**RAN:** Filter Bank Multicarrier

**RFID:** Radio Frequency Identification

**RF-MEMS:** microsystèmes radiofréquences

**RHCP:** Polarisation Circulaire Droite

**RRH:** Remote Radio Head

**RU:** Radio Unit

**SBA:** Service-Based Architecture

**SC-FDMA:** Single Carrier Frequency Division Multiple Access

**SDN:** Software Defined Networking

**SMTP:** Simple Mail Transfer Protocol

**SOFDMA:** Version évolutive d'OFDMA

**TCP/IP:** Transmission Control Protocol/Internet Protocol

**TDMA:** Time Division Multiple Access

**UA:** User Agent

**UDP:** User Datagram Protocol

**UMTS:** Universal Mobile Telecommunications Systems

**WBAN:** Wireless Body Area Network

**W-CDMA:** Wideband Code Division Multiple Access

**WiFi:** Wireless Fidelity

**WiMax:** Worldwide Interoperability for Microwave Access

**WLAN:** Wireless Local Area Network

## *Table Des Matières :*

DÉDICACE.....	II
REMERCIEMENT.....	III
INTRODUCTION GENERALE .....	XIV
CHAPITRE I.....	XVI
I.1 INTRODUCTION : .....	17
I.2 LA 5 <sup>EME</sup> GENERATION : .....	17
I.2.1 Historique : .....	17
I.2.2 Objectifs de la 5G :.....	19
I.2.2.1 Efficacité Energétique : .....	20
I.2.3 Architecture du réseau 5G et ses services :.....	20
I.2.4 Intégration du Network Slicing dans l'Architecture 5G : .....	23
I.2.5 Fréquences utilisées pour la 5G : .....	23
I.2.6 Technologies clés de 5G : .....	24
I.2.6.1 Les ondes millimétriques : .....	24
I.2.6.2 Small Cells : .....	25
I.2.6.3 Massive MIMO :.....	26
I.2.6.4 Beamforming : .....	26
I.2.6.5 Full duplex : .....	27
I.3 INTERNET OF THINGS (IoT) : .....	27
I.3.1 Comparaison entre IoT et le réseau traditionnel : .....	27
I.3.2 Architecture de l'IoT : .....	28
I.3.3 Communication des objets connectés :.....	30
I.3.4 Bandes de fréquences utilisées pour IoT :.....	30
I.4 CONCLUSION :.....	31
CHAPITRE II.....	32
II.1 INTRODUCTION : .....	33
II.2 GENERALITE SUR LES ANTENNES : .....	33
II.2.1 Définition d'une antenne : .....	33
II.2.2 Paramètres et caractéristiques des antennes : .....	33
II.2.2.1 Impédance d'entrée de l'antenne : .....	33
II.2.2.2 Diagramme de rayonnement :.....	34
II.2.2.3 Rendement : .....	35
II.2.2.4 Directivité :.....	35
II.2.2.5 Gain d'une antenne :.....	35
II.2.2.6 Coefficient de réflexion :.....	35
II.2.2.7 Rapport d'onde stationnaire ROS :.....	36
II.2.2.8 Bande Passante : .....	36

II.2.2.9	Polarisation d'une antenne :.....	36
II.3	ANTENNE MICRO-RUBAN (IMPRIMEE) :.....	37
II.3.1	Techniques d'alimentation des antennes imprimées :.....	38
II.3.1.1	Alimentation par ligne micro-ruban : .....	38
II.3.1.2	Alimentation par sonde coaxiale :.....	38
II.3.1.3	Alimentation par proximité :.....	39
II.3.1.4	Alimentation par fente :.....	39
II.4	ANTENNES RECONFIGURABLES :.....	40
II.4.1.1	Définition des antennes reconfigurables :.....	40
II.4.1.2	Types des antennes reconfigurables : .....	40
II.4.1.3	Techniques de reconfigurabilité :.....	41
II.4.1.3.1	Diode PIN :.....	42
II.4.1.3.2	Varactors :.....	42
II.4.1.3.3	RF-MEMS : .....	43
II.5	DEFINITION DES ANTENNES RECONFIGURABLES EN FREQUENCE : .....	43
II.5.1	Principe de la reconfiguration : .....	44
II.5.2	Techniques de reconfiguration en fréquence :.....	44
II.5.2.1	Diode PIN :.....	44
II.5.2.2	MEMS : .....	45
II.5.2.3	Varactor : .....	45
II.5.2.4	Avantages et inconvénients de antennes reconfigurables :.....	46
II.5.3	Simulation d'une antenne reconfigurable en fréquence :.....	46
II.5.3.1	Outil de simulation :.....	46
II.5.3.2	Conception d'une antenne pour les applications Wi-Fi et 5G : .....	47
II.5.3.2.1	Géométrie de l'antenne :.....	47
II.5.3.2.2	Résultats de simulation :.....	48
II.5.3.3	Conception d'une antenne pour les réseaux IoT indoor et les communications sans fil à très haut débit :.....	52
II.5.3.3.1	Géométrie de l'antenne :.....	52
II.5.3.3.2	Résultats de simulation :.....	53
II.6	CONCLUSION :.....	59
CHAPITRE III	.....	60
III.1	INTRODUCTION :.....	61
III.2	DEFINITION DE LA POLARISATION :.....	61
III.2.1	Rapport axial en fonction de la fréquence :.....	65
III.3	SIMULATION D'ANTENNE RECONFIGURABLE EN POLARISATION : .....	66
III.3.1	Géométrie de l'antenne :.....	66
III.3.2	Résultats de simulation :.....	67
III.4	CONCLUSION :.....	71
CONCLUSION GENERALE	.....	72
BIBLIOGRAPHIE	.....	73

## *Liste Des Figures :*

Figure I-1: Vue schématique de l'histoire des réseaux cellulaires .....	19	
Figure I-2: Objectif de la technologie 5G .....	19	
Figure I-3: Architecture xhaul de la 5G .....	20	
Figure I-4: RRH 4G typique	Figure I-5: RU 5G typique .....	21
Figure I-6: L'Architecture fonctionnelle du cœur de 5G .....	22	
Figure I-7: Vue schématique sur le concept Network Slicing .....	23	
Figure I-8: Fréquences utilisées pour la 5G .....	24	
Figure I-9: Technologies utilisées pour la 5G .....	24	
Figure I-10: Bandes de fréquences pour les réseaux .....	25	
Figure I-11: Vue schématique sur les types des cellules .....	26	
Figure I-12: Massive MIMO .....	26	
Figure I-13 : Vue Schématique sur les applications de la technologie IoT .....	27	
Figure I-14: Vue schématique sur l'architecture de l'IoT .....	29	
Figure I-15: Les protocoles de IoT et l'Internet selon modèle OSI .....	29	
Figure II-1 : Antenne en mode émetteur .....	34	
Figure II-2 : Diagramme de rayonnement : (a) en 3D ; (b) en coordonnées polaires .....	34	
Figure II-3: Diagramme de rayonnement en coordonnées cartésiennes .....	34	
Figure II-4 : Présentation de la bande passante à partir de coefficient de réflexion .....	36	
Figure II-5: Polarisation du champ électromagnétique .....	37	
Figure II-6: Présentation de la structure d'une antenne imprimée (patch) .....	37	
Figure II-7: Alimentation par ligne micro-ruban .....	38	
Figure II-8: Alimentation par sonde coaxiale .....	39	
Figure II-9: Alimentation par proximité .....	39	
Figure II-10: Alimentation par fente .....	40	
Figure II-11: Schéma représentatif des types d'antennes reconfigurables .....	41	
Figure II-12: Techniques de reconfigurabilité [35] .....	41	
Figure II-13: Schéma équivalent de l'état ON et OFF de diode PIN .....	42	
Figure II-14: Schéma équivalent d'une diode varicap .....	42	
Figure II-15: Schéma équivalent de commutateur RF-MEMS .....	43	
Figure II-16: Géométrie d'antenne R-TSM .....	44	
Figure II-17: Antenne reconfigurable en fréquence à fente en L (a) Stéréogramme ; (b) Vue de face (c) Vue de côté .....	45	
Figure II-18: Antenne quasi-Yagi reconfigurable en fréquence par trois varactors .....	45	
Figure II-19: Présentation de l'antenne reconfigurable simulée .....	47	
Figure II-20: Coefficient de réflexion de l'antenne à l'état (a) (application Wi-Fi) .....	49	
Figure II-21: Rapport d'onde stationnaire de l'antenne simulée .....	49	
Figure II-22: Distribution de courant à l'état 1 .....	50	
Figure II-23: Diagramme de rayonnement en 2D .....	50	
Figure II-24: Coefficient de réflexion de l'antenne à l'état (b) (application 5G) .....	51	
Figure II-25: Rapport d'onde stationnaire de l'antenne simulée à l'état b .....	51	
Figure II-26: Diagramme de rayonnement de l'antenne à l'état (b) .....	52	

<b>Figure II-27: Présentation de l'antenne reconfigurable simulée : a- Face avant et b- Face arrière .....</b>	<b>52</b>
<b>Figure II-28: Antenne simulée à l'état 1 .....</b>	<b>53</b>
<b>Figure II-29: Coefficient de réflexion de l'antenne à l'état 1 .....</b>	<b>54</b>
<b>Figure II-30: Rapport d'onde stationnaire de l'antenne simulée à l'état 1 .....</b>	<b>54</b>
<b>Figure II-31: Diagramme de rayonnement de l'antenne à 25.5 GHz .....</b>	<b>55</b>
<b>Figure II-32: Antenne simulée à l'état 2 .....</b>	<b>55</b>
<b>Figure II-33: Coefficient de réflexion de l'antenne à l'état 2.....</b>	<b>56</b>
<b>Figure II-34: Rapport d'onde stationnaire de l'antenne simulée à l'état 2 .....</b>	<b>56</b>
<b>Figure II-35: Distribution de courant de l'antenne simulée à l'état 2 : a- pour 8 GHz, b- pour 14 GHz.....</b>	<b>57</b>
<b>Figure II-36: Diagramme de rayonnement d'antenne simulée : a- pour 8 GHz et b- pour 14 GHz.....</b>	<b>57</b>
<b>Figure II-37: Antenne simulée pour l'état 3 .....</b>	<b>58</b>
<b>Figure II-38: Coefficient de réflexion de l'antenne à l'état 3.....</b>	<b>58</b>
<b>Figure II-39: Rapport d'onde stationnaire pour l'antenne à l'état 3 .....</b>	<b>59</b>
<b>Figure III-1: Différents types de polarisation .....</b>	<b>61</b>
<b>Figure III-2: Types de polarisation linéaire .....</b>	<b>62</b>
<b>Figure III-3: Polarisation et la direction de propagation RHCP et LHCP .....</b>	<b>63</b>
<b>Figure III-4: Polarisation Elliptique.....</b>	<b>63</b>
<b>Figure III-5: Géométrie d'antenne reconfigurable en polarisation en utilisant diodes PIN .....</b>	<b>65</b>
<b>Figure III-6: Différents techniques de polarisation.....</b>	<b>65</b>
<b>Figure III-7: Géométrie de l'antenne simulée.....</b>	<b>66</b>
<b>Figure III-8: Coefficient de réflexion de l'antenne simulée .....</b>	<b>67</b>
<b>Figure III-9: Rapport d'onde stationnaire d'antenne simulée .....</b>	<b>68</b>
<b>Figure III-10: Distribution de courant des fréquence 1, 2,5 et 4 GHz pour polarisation LHCP.....</b>	<b>68</b>
<b>Figure III-11: Rapport Axial de l'antenne simulée.....</b>	<b>69</b>
<b>Figure III-12: Diagramme de rayonnement de l'antenne à 2.5 GHz : (a) simulée, (b) résultat d'après l'article .....</b>	<b>69</b>
<b>Figure III-13: Distribution de courant des fréquence 1, 2,5 et 4 GHz pour polarisation RHCP.....</b>	<b>70</b>
<b>Figure III-14: Diagramme de rayonnement de l'antenne à 2.5 GHz : simulée vs résultat d'après l'article .....</b>	<b>70</b>

## *Liste Des Tables :*

Tableau I-1: Evolution des technologies sans fil .....	18
Tableau I-2: Description des fonctions du réseau 5G.....	22
Tableau I-3 : La différence entre l'Internet et la technologie IoT .....	28
Tableau I-4:Les bandes de fréquences et les applications de IoT .....	30
Tableau II-1 : Comparaison entre les techniques d'alimentation.....	40
Tableau II-2: Les dimensions de l'antenne reconfigurable simulée.....	48
Tableau II-3 : Les dimensions de l'antenne reconfigurable simulée.....	53
Tableau III-1: Dimensions de l'antenne simulée.....	67

## *Liste Des Equations :*

(Équation I-1).....	25
(Équation II-1).....	33
(Équation II-2).....	35
(Équation II-3).....	35
(Équation II-4).....	35
(Équation II-5).....	35
(Équation II-6).....	36
(Équation II-7).....	36
(Équation II-8).....	36
(Équation II-9).....	37
Équation II-10).....	37
(Équation II-11).....	38
( Équation II-12).....	38
(Équation III-1).....	64
(Équation III-2).....	64
(Équation III-3).....	66

## *Introduction Générale :*

Dans un monde où la demande de connectivité ne cesse de croître, l'innovation dans le domaine des antennes est devenue essentielle. Avec les technologies émergentes telles que 5G et l'Internet des objets IoT qui exigent des systèmes de communications plus flexibles, plus performants et capables de s'adapter dynamiquement à des environnements variés, les antennes traditionnelles fixes n'étaient jamais une solution proposée pour réaliser ses réseaux. C'est dans ce cadre que s'inscrit l'intérêt croissant pour les antennes reconfigurables.

Les antennes reconfigurables (en fréquence, en polarisation et en diagramme de rayonnement) ont reçu beaucoup d'attention ces dernières années surtout dans le domaine de télécommunication grâce à leur capacité d'adapter ses caractéristiques électromagnétiques dynamiquement en fonction des besoins du système. Cette flexibilité offre non seulement une meilleure gestion du spectre et des ressources radio, mais aussi une optimisation de la consommation énergétique.

L'utilisation des antennes reconfigurables en fréquence permet de s'adapter à un environnement évolutif, en facilitant la transition entre différentes normes telles que GSM, LTE, WI-FI, WLAN, WiMax..., sans aucune modification à la structure physique, plusieurs techniques sont utilisées parmi eux Diodes PIN, Diodes Varicap, MEMS ou bien des changements du matériaux.

Par ailleurs, les antennes reconfigurables en polarisation offrent un changement de la direction de champ électrique (linéaire, circulaire, elliptique, horizontale, etc. ...) d'une onde magnétique émise ou reçue de manière dynamique et contrôlée. Cette capacité est fondamentale dans les communications modernes (5G, IoT et satellite), permettant d'améliorer la diversité et aussi de réduire les interférences.

Le travail présenté dans ce mémoire a pour objectif l'étude et la conception d'antennes reconfigurables en fréquence et en polarisation. Il s'agit alors de concevoir une antenne capable de s'adapter à des conditions changeantes en ajustant sa fréquence de fonctionnement et la direction du champ électrique. Notre mémoire est structuré en trois chapitres :

Le premier chapitre est consacré à l'étude générale des technologies modernes 5G et l'Internet des objets IoT. Dans ce contexte, une définition sur l'Internet des objets est présentée avec une comparaison entre l'IoT et l'Internet traditionnel, en indiquant aussi les plages fréquentielles utilisées dans des applications IoT. Puis, une petite abréviation sur l'historique de l'évolution des réseaux mobiles 5G, son principe, ses différentes techniques, et son architecture globale sont introduites.

Le deuxième chapitre est dirigé pour définir les antennes imprimées, ainsi les antennes reconfigurables en fréquence, en donnant le principe et les techniques des reconfigurations (Diodes PIN, Diodes varicap, MEMS, Photodétecteurs) suivis par des exemples. Puis, je vais présenter une simulation d'une antenne reconfigurable qui fonctionne dans deux bandes de fréquences : 2,4 GHz, la fréquence attribuée à l'application Wi-Fi et Zigbee, et la bande de

fréquence de 28 GHz pour les applications 5G, réseaux privés industriels et applications militaires et radar avancé, et d'autre antenne qui fonctionne sur plages : 3.1- 10.6 GHz pour les communications sans fil à très haut débit et les réseaux IoT indoor et 22-29 GHz pour les applications automobiles et radar courte portée.

Le dernier chapitre de ce mémoire de master s'intéresse aux antennes reconfigurables en polarisation, en donnant le principe et les techniques des reconfigurations suivis par des exemples. Ensuite, je vais présenter une conception d'une antenne reconfigurable en polarisation, en observant les différences entre la polarisation (RHCP) et (LHCP), qui fonctionne pour les applications WLAN et WiMax.

# *Chapitre I*

## *Généralité Sur Les Technologies De La Nouvelle Génération 5G et IoT*

## I.1 Introduction :

La révolution des objets connectés et l'orientation de la population vers la modernisation de la vie quotidienne impose au réseau cellulaire des changements radicaux sur les architectures et les caractéristiques pour répondre aux besoins et l'exigence du futur, ce qui constitue un défi pour la 5<sup>ème</sup> génération.

Ce chapitre va représenter une introduction sur la 5G et l'IoT, 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, puis une généralité sur l'IoT, ses protocoles, son architecture et ses plages de fréquences.

## I.2 La 5<sup>ème</sup> Génération :

Avec l'augmentation du nombre d'utilisateurs des réseaux mobiles et de la quantité de données échangées et l'amélioration des objets connectés, le réseau cellulaire souffre d'une saturation qui limite ses performances. Cela conduit à l'apparition d'une nouvelle technologie, la 5G.

La 5G, ou cinquième génération, c'est la dernière évolution en ingénierie en communication sans fil. Elle promet des vitesses de téléchargement et de transfert de données nettement supérieures avec une latence plus faible à celles des générations précédentes, permettant ainsi des connexions ultra-rapides.

Cela ouvre la porte à des nombreuses applications innovantes telles que l'Internet des objets (IoT) avec des dispositifs connectés plus intelligents en supportant un plus grand nombre d'appareils connectés simultanément.

### I.2.1 Historique :

Les réseaux mobiles ont connu plusieurs développements au fil du temps. En ce moment, on démarque 4 générations :

- **1<sup>ère</sup> Génération :** On a jeté l'œil à cette technologie dans les années 1980s en Japan, qui a été basée sur un système mobile de service vocal analogique.
- **2<sup>ème</sup> Génération (GSM) :** A été développé dans les années 1990s, est le premier système mobile vocal numérique en utilisant l'accès multiple par répartition dans le temps (TDMA).
- **3<sup>ème</sup> Génération :** Cette technologie a été connue dans 2000s. Elle utilise les normes UMTS et HSPA pour garantir des services de données à haut débit et l'accès à une multitude de services multimédias les appels vidéo avec la technique d'accès W-CDMA
- **4<sup>ème</sup> Génération :** A l'année 2010, on a la chance d'observer la technologie LTE, qu'elle a un objectif d'optimisation des réseaux pour des services de données à haut débit avec des vitesses de téléchargement rapides, ouvrant la voie au streaming HD en utilisant la technologie WiMax et la technique d'accès OFDMA.

Le tableau suivant résume les technologies utilisées avec leurs commutation et applications du chaque générations des réseaux cellulaire.

Il sera suivi avec une figure qui indique l'évolution des ces générations avec le temps.

Génération	Technologie d'accès	Débit de données	Bande de Fréquence	Bande Passante par canal	Commutation	Application
1G	AMPS (FDMA)	2.4 Kbps	800 MHz	30 KHz	Circuit	Voix
2G	GSM (TDMA)	10 Kbps	850/900/1800/1900 MHz	200 KHz	Circuit	Voix + Données
	CDMA			1.25 MHz		
2.5G	GPRS	50 Kbps		200 KHz	Circuit / Packet	Voix + Données
	EDGE	200 Kbps				
3G	(WCDMA) / UMTS	384 Kbps	800/850/900/1800/1900/2100 MHz	5 MHz	Circuit / Packet	Voix + Données + Appels Vidéos
	(CDMA) 2000			1.25 MHz		
3.5G	High Speed Uplink / Downlink Packet Access (HSUPA / HSDPA)	5-30 Mbps		5 MHz	Packet	
	Evolution-Data Optimized (EVDO)			1.25 MHz		
3.75G	LTE (OFDMA / SC-FDMA)	100 – 200 Mbps	1.8 GHz, 2.6 GHz	1.4 MHz à 20 MHz	Packet	Jeux en ligne + télévision haute définition
	WiMax (SOFDMA), Fixed WiMax		3.5 GHz et 5.8 GHz initialement	3.5 MHz et 7 MHz à la bande 3.5GHz ; 10 MHz à la bande 5.8 GHz		
4G	LTE-A (OFDMA / SC-FDMA)	UL 1.5 Gbps DL 3Gbps	1.8 GHz, 2.6 GHz	1.4 MHz à 20 MHz	Packet	
	WiMax (SOFDMA), Mobile WiMax	100 – 200 Mbps	2.3 GHz, 2.5 GHz et 3.5 GHz initialement	3.5 MHz, 7 MHz, 5MHz, 10MHz et 8.75 MHz initialement		
5G	Beam Division Multiple Access (BDMA) et Filter Bank multi carrier (FBMC)	10-50 Gbps (attendue)	1.8, 2.6 GHz et 30-300 GHz attendue	60 GHz	Packet	Vidéo ultra haute définition + applications de réalité virtuelle

Tableau I-1: Evolution des technologies sans fil [1]

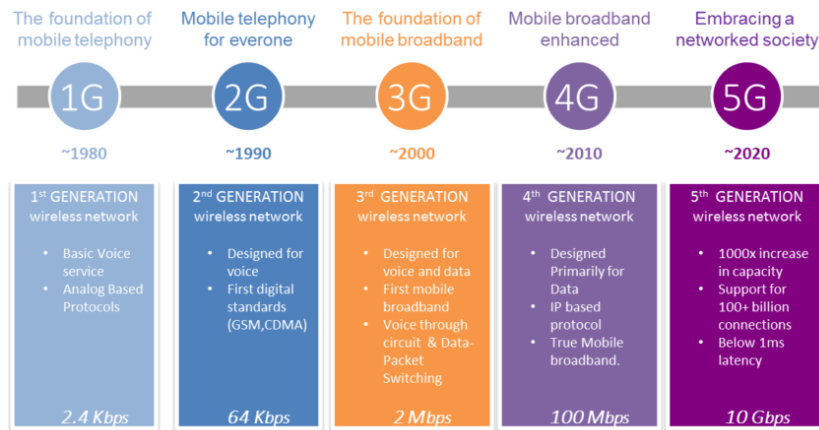


Figure I-1: Vue schématique de l'histoire des réseaux cellulaires [2]

### I.2.2 Objectifs de la 5G :

La 5G vise à améliorer les performances des réseaux cellulaires en offrant :

- Vitesse accrue avec des débits allant jusqu'à Gbps pour des téléchargements et streaming 4K/8K fluides.
- Latence ultra-basse moins de 1 ms pour des applications en temps réel (autonome, télémédecine)
- Nombre des objets connectés élevés allant jusqu'à un million par km<sup>2</sup>.
- Compression des interfaces en utilisant des techniques comme : MIMO et Beamforming.
- Création des réseaux virtuels spécifiques aux besoins des services à l'aide de Network Slicing.
- L'adaptation avec les nouvelles technologies et applications comme : IA et les services cloud.

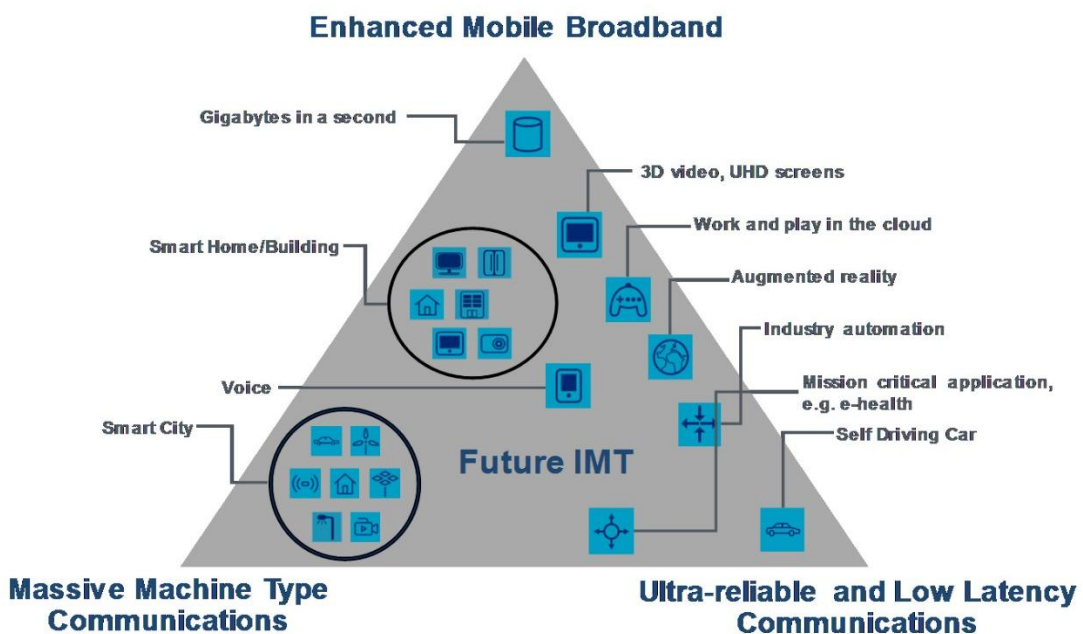


Figure I-2: Objectif de la technologie 5G [3]

### I.2.2.1 Efficacité Energétique :

L'efficacité énergétique signifie l'optimisation de la consommation d'énergie pour un service donné, visant à minimiser l'énergie utilisée sans saboter les résultats. Elle comporte deux aspects :

- Côté réseau, l'efficacité énergétique correspond à la quantité de bits d'information reçue ou transmise par les utilisateurs, par unité de consommation d'énergie du réseau d'accès radioélectrique (RAN) (en bit/joule).
- Côté dispositif, l'efficacité énergétique correspond à la quantité de bits d'information par unité de consommation d'énergie du module de communication (en bit/joule).[4]

La 5G est jusqu'à **90 % plus efficace** que la 4G en termes d'énergie consommée par Mégabit de données transmises (W/Mbps), grâce à des technologies comme les antennes intelligentes et la gestion dynamique des ressources.[5]

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

L'architecture de 5G s'appuie sur une conception cloud native, incluant un découpage du réseau (network slicing), est une architecture basée sur les services SBA, qui permettent de mieux gérer l'authentification, la sécurité, et la gestion des données. Elle se structure sur trois grandes parties :

- **User Equipment (UE) :** c'est le terminal de l'utilisateur (équipement électronique) qui se connecte avec le réseau via des ondes radio en prenant en charge les nouvelles bandes de fréquences 5G.
- **Next-Generation Radio Access Network (NG-RAN) :** le réseau d'accès de 5G, appelé NG-RAN, qui est le responsable de la connexion entre les dispositifs mobiles et le réseau par des stations de bases et antennes, ou la 5G introduit une nouvelle division de réseau d'accès en : Unité centralisée CU, l'Unité distribuée DU, et les points d'accès radio RU.

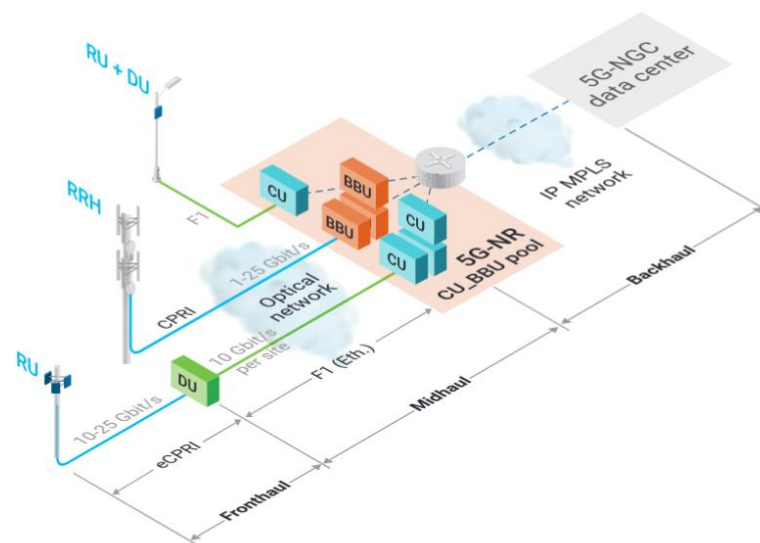


Figure I-3: Architecture xhaul de la 5G [6]

Pour améliorer le débit de la connexion fronthaul, la 5G introduit l'eCPRI, un nouveau protocole pour connecter l'UA à l'EF. L'eCPRI utilise Ethernet comme couche physique et fonctionne sur une connexion FTTH. Cela permet d'obtenir des débits de liaison plus rapides de 10 Gbit/s et 25 Gbit/s, et d'utiliser plus efficacement la bande passante du fronthaul.

La communication entre le CU et le DU est couverte par une autre pile de protocoles basée sur Ethernet appelée interface F1. Comme les fonctions RU, DU et même CU peuvent être regroupées dans un seul appareil, les sites cellulaires peuvent être connectés au reste de l'infrastructure par l'une ou l'autre de ces interfaces, en fonction de l'architecture de réseau choisie par l'opérateur. [6]

Cette liaison applique des changements sur les sites cellulaires entre la génération précédente 4G et 5G. Les têtes radio télécommandées 4G (RRH) sont généralement montées au sommet des tours ou sur les toits des bâtiments, opérant principalement des fréquences inférieures à 3Ghz, ce qui permet une couverture environ de 10 Km par site. [6]

Un secteur unique se compose d'un RRH connecté par l'intermédiaire d'un dispositif SFP (Small Form Factor Pluggable) à une liaison CPRI unique utilisant un câble optique entre le RRH et un autre dispositif SFP dans la BBU. Un court câble de liaison coaxial relie les ports de sortie RF du RRH à l'antenne.

En revanche, les sites cellulaires de 5G proposent des Dus reliés directement à des Ru avec des antennes intégrées via des liaisons CPRI améliorés.

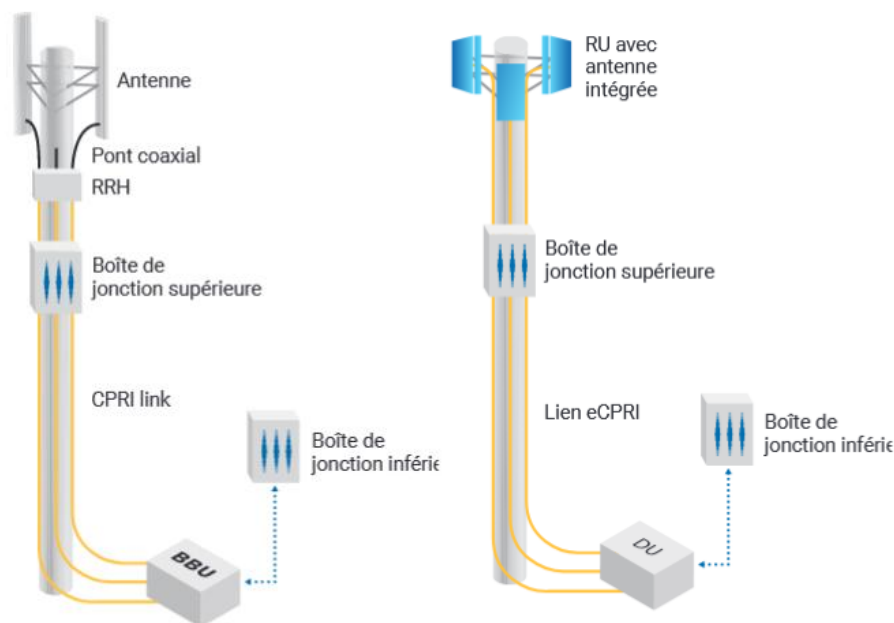


Figure I-4: RRH 4G typique

Figure I-5: RU 5G typique [6]

- **Core Network (5GC) :** le cœur de 5G utilise l'architecture SBA alignée sur le cloud pour soutenir ces fonctions avancées. Il est divisé en deux plans, plan utilisateur qui transmet les données d'utilisateur et plan de contrôle qui gère la signalisation et les fonctions de contrôles.

La figure suivante représente le cœur de l'architecture de 5G avec ces fonctions.

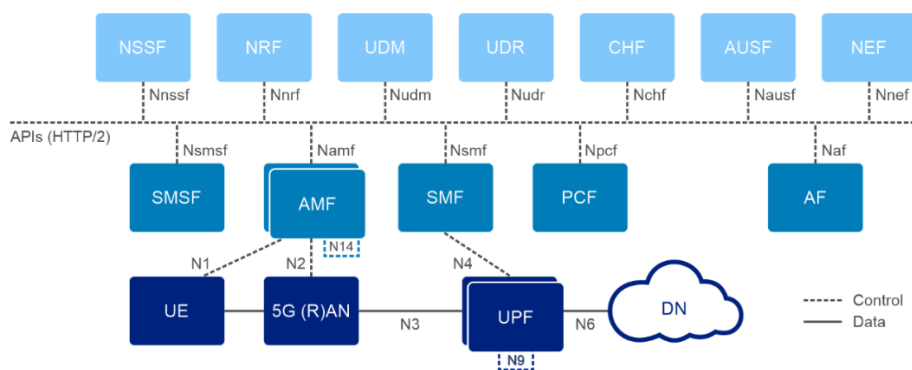


Figure I-6: L'Architecture fonctionnelle du cœur de 5G [7]

	Nom	Description
UE	User Equipment	L'équipement utilisateur, comme un smartphone.
5G (R)AN	5G Radio Access Network	Réseau d'accès radio qui connecte l'UE au réseau central.
UPF	User Plane Function	Assure le transfert des données utilisateur vers les réseaux externes
DN	Data Network	Gère l'interaction avec les réseaux de données externes
AMF	Access and Mobility Management Function	Gère l'accès et la mobilité des utilisateurs.
SMF	Session Management Function	Gère les sessions et attribue les adresses IP aux utilisateurs.
PCF	Policy Control Function	Applique les règles de gestion du trafic et de la qualité de service
SMSF	Short Message Service Function	Assure la gestion des SMS dans le réseau 5G
AUSF	Authentication Server Function	Assure l'authentification des abonnés
UDM	Unified Data Management	Gère les informations des abonnés.
UDR	Unified Data Repository	Stocke les données des abonnés.
CHF	Charging Function	Gère la facturation et le suivi de la consommation
NRF	Network Repository Function	Permet la découverte et l'enregistrement des services du réseau.
NSSF	Network Slice Selection Function	Sélectionne la tranche réseau la plus appropriée pour un utilisateur ou un service.
NEF	Network Exposure Function	Expose les capacités du réseau aux applications externes.
AF	Application Function	Interagit avec des applications spécifiques qui nécessitent des services réseau.

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

## I.2.4 Intégration du Network Slicing dans l'Architecture 5G :

Le concept de Network Slicing, également connu sous le nom de découpage de réseau, permet la création de plusieurs réseaux logiques (slices) pour une seule infrastructure physique. L'un des principaux avantages de la 5G est que chaque composant est optimisé et configuré pour répondre aux exigences uniques d'un cas d'utilisation particulier. Grâce en grande partie à la virtualisation du réseau, notamment en ce qui concerne les réseaux définis par logiciel (SDN) et la virtualisation des fonctions réseau (NFV). En plus d'optimiser l'utilisation des ressources disponibles, le découpage de réseau permet la flexibilité, la personnalisation et l'isolation fonctionnelle du service.[8]

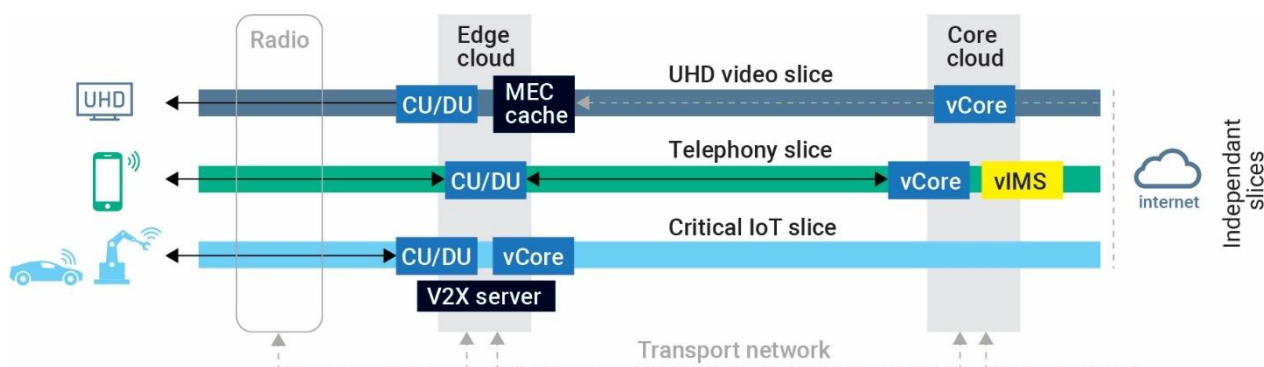


Figure I-7: Vue schématique sur le concept Network Slicing [9]

## I.2.5 Fréquences utilisées pour la 5G :

La 5G utilise plusieurs fréquences de différentes plages fréquentielles basses, moyennes ou hautes :

- **Bande Basse** : la bande des 1 GHz est largement utilisée pour 4G et elle peut être partagée pour 5G, car elle offre une bonne couverture géographique et une bonne pénétration à l'intérieur des bâtiments. Ainsi la bande 1,4 MHz est mentionnée pour des usages industriels ou spécifiques.
- **Bande Moyenne** : la bande 3,5 GHz est cœur de 5G, c'est la bande préférentielle du nouveau réseau mobile et surtout, la seule bande de fréquences qui permet une montée en débit vraiment significative. [10]
- **Bande Haute** : la bande 26 GHz, c'est ce que l'on appelle des ondes millimétriques, c'est-à-dire dont les longueurs d'onde sont de l'ordre du millimètre. Ces dernières ont la propriété de pouvoir fournir une plus grande largeur de bande, elle permet non seulement d'avoir un très large spectre mais aussi d'avoir des débits comparables à ceux de la fibre, bien que sur des distances plus courtes, mais sont en revanche confrontées à une problématique de taille : leur difficulté à "traverser" ce qui se trouve sur leur chemin. [11]

Les réseaux de téléphonie mobile recherchent donc un équilibre entre bandes basses pour bien couvrir l'ensemble des populations ; et bandes hautes pour assurer une bonne capacité dans les zones où les demandes de trafic sont les plus importantes.

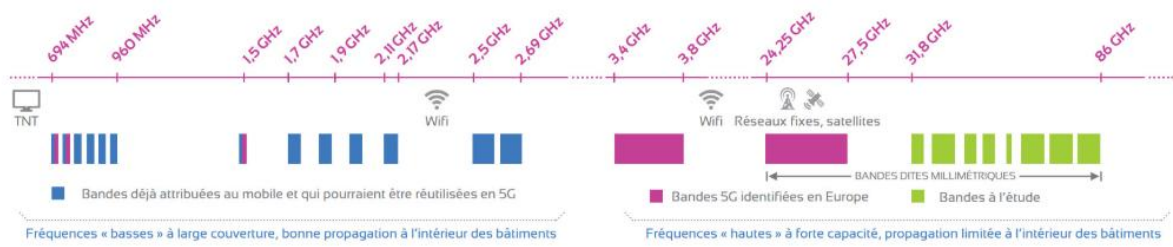


Figure I-8: Fréquences utilisées pour la 5G [12]

### I.2.6 Technologies clés de 5G :

Plus les technologies précédentes de la génération 4G LTE, la 5G propose des nouvelles technologies à fin d'améliorer ses performances comme : Massive MIMO, beamforming, ... etc.

Dans ce qui suit nous décrivons brièvement les principes de ces nouveaux critères :



Figure I-9: Technologies utilisées pour la 5G [13]

#### I.2.6.1 Les ondes millimétriques :

Les équipements électroniques utilisent une bande de fréquence spécifique, inférieure à 6 GHz, mais cette plage est très saturée. Au fur et à mesure que le nombre d'appareils augmente, la qualité de service dégrade et le temps de réponse s'allonge.

Pour garantir une réactivité quasi instantanée lors des commandes à distance et gérer un volume de données plus important, il est nécessaire d'utiliser des fréquences plus élevées et un spectre plus étendu. Ces deux améliorations contribuent à réduire la congestion du réseau.

Les ondes millimétriques sont des ondes électromagnétiques de très haute fréquence, situés dans le spectre de la radiofréquence. Elles occupent la bande de 30 à 300 GHz avec des longueurs d'ondes  $\lambda$  de l'ordre de 1 – 10 mm.

La 5G n'utilise qu'une petite partie de cette large gamme de fréquences.

La figure suivante représente le spectre des fréquences radio utilisées dans les communications sans fil, en mettant en relation : la fréquence, la longueur d'onde et les catégories des bandes de fréquences.

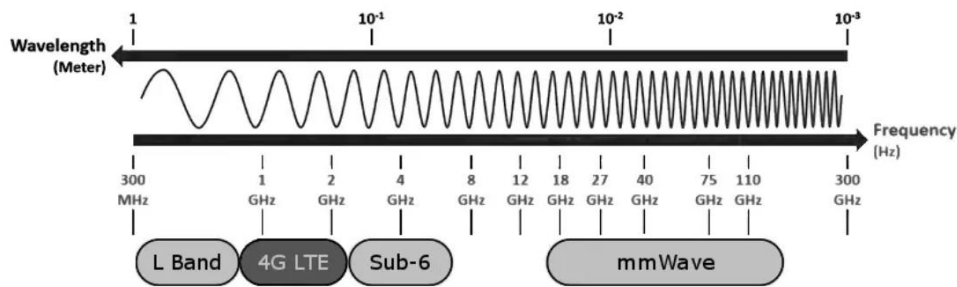


Figure I-10: Bandes de fréquences pour les réseaux [14]

Pour concevoir de manière optimale un système sans fil et connaître correctement les fréquences utilisées, il faut avant tout comprendre le canal radio aux fréquences de travail et les domaines d'application afin de mieux exploiter les avantages et de trouver une solution aux inconvénients.

En considérant l'espace libre, l'équation de Friis donne la puissance reçue en fonction de la puissance transmise, des gains d'émission et de réception, et de la distance entre les antennes d'émission et de réception.[15]

$$Prx = Ptx + Gtx + Grx + \left(\frac{c}{4\pi Lf}\right)^2 \quad (\text{Équation I-1})$$

Avec :

$P_{tx}$  et  $P_{rx}$  : sont respectivement la puissance transmise et reçue dans l'espace libre,

$G_{tx}$  et  $G_{rx}$  : sont respectivement des gains d'émetteur et de récepteur,

$L$  : représente la distance entre les antennes d'émission et de réception,

$c$  : représente la vitesse de la lumière et  $f$  la fréquence de travail.

La puissance reçue est inversement proportionnelle à la fréquence  $f$ , ce qui se traduit par le fait que les plus hautes fréquences présentent une forte atténuation par rapport aux basses fréquences. Ce qui implique que la technologie millimétrique n'est faite que pour les communications à courte distance.[16]

### I.2.6.2 Small Cells :

Le standard 5G vise à garantir une connectivité à haut débit à l'intérieur et l'extérieur des bâtiments. Pour assurer une couverture optimale avec une meilleure qualité de service, la communauté scientifique s'est orientée vers les Small Cells.

Cette nouvelle invention offre une efficacité spectrale et débit élevée par unité de surface, en diminuant la distance entre les points d'accès finaux du réseau et les utilisateurs. On distingue quatre types des cellules :



Figure I-11: Vue schématique sur les types des cellules [17]

**I.2.6.3 Massive MIMO :**

La technologie des entrées et sorties multiples (MIMO) peut être utilisée pour augmenter la capacité d’une tête radio et la fiabilité de la transmission sans fil. La technique la plus couramment utilisée est la diversité spatiale, qui permet aux ondes radio d’être transmises le long de plusieurs chemins vers plusieurs antennes, augmentant ainsi la probabilité qu’en cas de défaillance d’un chemin, les autres chemins puissent fournir un signal suffisant pour maintenir la connexion, ce qui accroît la fiabilité.[6]

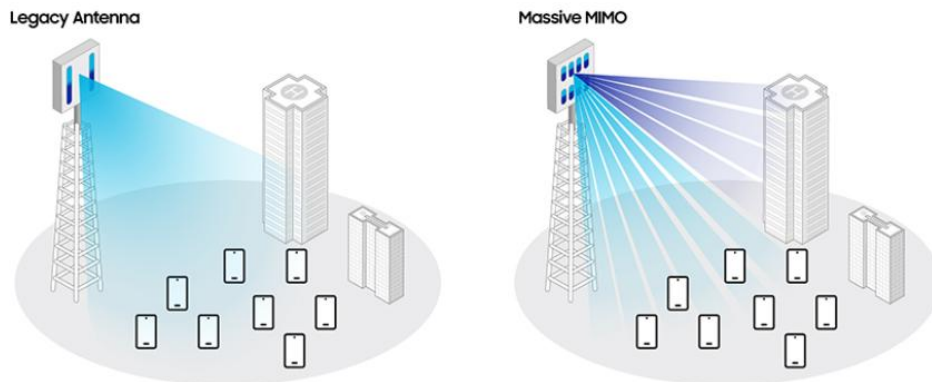


Figure I-12: Massive MIMO [18]

**I.2.6.4 Beamforming :**

Il s’agit d’une méthode de traitement de signal qui permet de focaliser précisément les ondes radio vers un utilisateur spécifique, plutôt que diffuser le signal dans toutes les directions. Dans un réseau sans fil traditionnel, une antenne émet des signaux dans toutes les directions, ce qui peut entraîner une perte d’énergie et des interférences entre les utilisateurs.



Internet est un réseau informatique globale qui permet aux ordinateurs et serveurs de communiquer et changer des informations à travers des protocoles standardisés tels que : FTP, HTTP, TCP/IP, utilisé pour accéder à des services en lignes comme navigation sur le web, l'envoi des courriels.

Cependant, IoT est un sous-ensemble de l'Internet d'un objectif de connecter des objets physiques (capteurs, dispositifs portables, véhicules) à l'aide des protocoles comme CoAP, WiFi, Bluetooth, Zigbee... etc. Il est principalement utilisé pour améliorer l'automatisation, la surveillance et la prise de décision dans divers domaines notamment la domotique, la santé et les villes intelligentes.

Les Caractéristiques	Internet	IoT
Définition	Réseau globale reliant des ordinateurs et serveurs	Réseau reliant des objets intelligents et capteurs
Type de périphériques	Ordinateurs, commutateurs, smartphones	Actionneurs, capteurs, objets connectés
Topologie	Étoile, maillage, hiérarchique	Étoile, maillage ou hybride
Architecture	Client-serveur, peer-to-peer, architecture centralisée	Architecture décentralisée et des plateformes cloud
Protocoles de Communication	Basés sur IP (HTTP, FTP, TCP/IP,)	Protocoles variés (MQTT, CoAP, LPWAN...)
Latence	Faible à modéré	Très faible pour application à temps réel
Nature de données	Trafic de données volumineux et varié (image, vidéo, audio...)	Trafic de données souvent de petite taille mais en grand quantité
Traitement de données	Centralisé (cloud, serveurs)	Distribué (edge, fog, cloud)
Interactivité	Principalement entre humain et ordinateurs	Principalement entre objets physiques intelligents
Objectif	Web, réseaux sociaux, courriels, streaming	Smart home, smart cities, industrie 4.0, santé

*Tableau I-3 : La différence entre l'Internet et la technologie IoT*

### I.3.2 Architecture de l'IoT :

Dans ce cadre les organisations internationales et des grandes entreprises technologiques, telles que l'**Union Internationale des Télécommunications (ITU)**, l'**Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)**, **Cisco**, **Google**, **Amazon**, et l'**European Telecommunications Standards Institute (ETSI)**, ont proposé différents architectures pour l'IoT basés sur les exigences des applications, la topologie des réseaux, les protocoles, les modèles économiques et les modèles de services, car cette technologie englobe une grande variété de concepts. [22] Mais on peut distinguer trois couches fonctionnelles majeures qui montrent une différence significative entre l'Internet et IoT.

- **Couche de perception** : ou bien la couche physique, regroupe les capteurs, actionneurs et RFID. Son objectif est de collecter des informations, de les transformer en données numériques, puis de les transmettre à une autre couche afin que des actions puissent être effectuées sur la base de ces informations. Elle agit comme un **pont** entre le monde numérique et le monde réel.
- **Couche de réseau** : fait le lien entre les dispositifs physiques et les serveurs ou le cloud en utilisant des technologies telles que Wi-Fi, GSM, LTE-M, LoRa ou NB-IoT. Elle repose sur des équipements intermédiaires comme des passerelles et routeurs.
- **Couche d'application** : est chargée d'analyser et de traiter les données d'information provenant des couches inférieures (Perception et Transmission). Plus précisément, elle transmet ces données aux applications afin qu'elles puissent être utilisées pour les actions souhaitées.

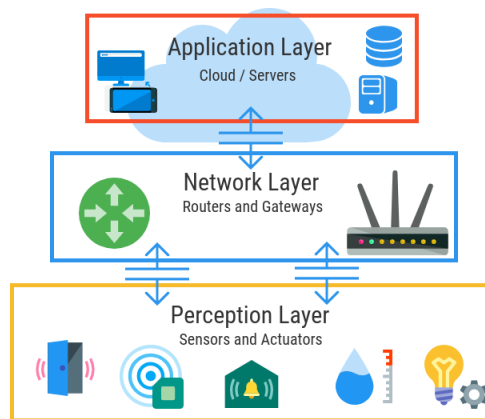


Figure I-14: Vue schématique sur l'architecture de l'IoT [23]

Ces changements arrivent avec des nouveaux protocoles de communications. Sur le plan des communications, l'IoT utilise des protocoles allégés par rapport à ceux de l'Internet classique afin de s'adapter aux contraintes de consommation, de bande passante et de traitement. Parmi ces protocoles :

Current Internet Protocols		Expected IOT Protocols
HTTP FTP,SMTP,IMAP	Application	MQTT COAP,AMQP
TCP and UDP	Transport	UDP and TCP
IPv4 and IPv6	Networking	IPv6 and IPv4
Ethernet,Wi-Fi, GSM	Data Link	Ethernet,Wi-Fi, GSM, LTE-M, Lora, SigFox
Protocol Level TCP/IP Model		

Figure I-15: Les protocoles de IoT et l'Internet selon modèle OSI

### I.3.3 Communication des objets connectés :

La communication IoT peut se faire de 3 façons :

- Par communication courte portée : L'échange de données se fait par contact physique entre l'émetteur et le récepteur (par exemple grâce à un port Ethernet ou à un port USB), par la technologie NFC (Near Field communication) ou RFID. [19]
- Par communication moyenne portée : pour connecter les objets à l'Internet dans le cas d'une distance de communication modérée, une solution consiste à utiliser un Hub qui fera office d'interface entre l'internet virtuel et vos objets connectés. Les objets communiqueront au Hub via les technologies Bluetooth, WI-FI, Zigbee, Z\_wave. Cette solution est adaptée pour les objets destinés à rester proche du Smartphone (faisant alors office de Hub) ou dans la maison connectée (Un box domotique ou Internet pouvant alors faire office de Hub).[19]
- Par communication longue portée : Dans le cas d'objets qui ont besoin de pouvoir communiquer sur de longue distance, ou de zones difficilement accessibles, la solution de la communication courte portée et la solution de la communication par Hub sont inefficaces. Il est donc nécessaire dans ce cas de s'appuyer sur un réseau qui permet une connexion en tout lieu couvert par les antennes. Les objets connectés peuvent s'appuyer sur les réseaux cellulaires couverts par les opérateurs de téléphonie (2G ,3G ,4G, LTE) pour transmettre leurs données mais ils sont conçus pour de très haut débit et consomment en contrepartie beaucoup d'énergie.[19]

### I.3.4 Bandes de fréquences utilisées pour IoT :

IoT est une technologie qui regroupe tous types de modules radio, capteurs/actionneurs, batteries, dispositifs MEMS, technologies de récupération d'énergie et, surtout, les dispositifs finaux qui utilisent des antennes.[24]

On peut classer les antennes de l'Internet des objets en fonction de leur portée de fonctionnement ou de leur domaine d'application.

Le tableau suivant représente les différents domaines de IoT ainsi leur fréquence fonctionnement :

Application	Technology	Frequency band
Smart homes	Wi-Fi	2.4 GHz
	Bluetooth	2.4 GHz
	GPS	1575.42 MHz, 1227.6 MHz, 1176.45 MHz
	Zigbee	915 MHz, 2.4 GHz
	Z-wave	2.4 GHz
Medical	MBAN/WBAN IEEE 802.15.6	400 MHz, 800 MHz, 900 MHz, 2.36 GHz, 2.4 GHz
Smart agriculture, smart cities	LoRa	433 MHz, 868 MHz, 915 MHz
	Sigfox	868 MHz, 902 MHz

*Tableau I-4: Les bandes de fréquences et les applications de IoT [24]*

## I.4 Conclusion :

En conclusion, ce chapitre a permis de présenter les fondements théoriques des technologies actuelles, telles que la 5G et l'Internet des objets, deux composants essentiels des systèmes de communication. Avec sa capacité à offrir des connexions rapides, larges et des débits de données élevés, ainsi que son déploiement lié à l'Internet des objets, la 5G transforme une variété d'industries et facilite la connexion de nombreux objets intelligents entre eux. De même, l'Internet des objets (IoT) change la communication en permettant la connexion d'objets physiques capables d'enregistrer, de transmettre et d'analyser des données en temps réel. Tout bien considéré, le développement de la 5G et de l'Internet des objets a introduit le monde à des systèmes de communication plus intelligents et adaptables.

Avec les défis liés aux l'environnements d'utilisation de ces technologies : grande diversité d'appareils, conditions de propagation complexes, et la nécessité d'opérer sur plusieurs bandes de fréquence. Dans ce contexte, les antennes reconfigurables apparaissent comme une solution pertinente. Le chapitre suivant s'intéressera donc aux antennes imprimées, en particulier à celles reconfigurables en fréquence, afin de répondre à la demande croissante de polyvalence spectrale.

## *Chapitre II*

# *Conception et Simulation d'Antennes Imprimées Reconfigurables en Fréquence*

## **II.1 Introduction :**

Depuis leur premier dévoilement en 1990, les antennes reconfigurables n'ont jamais arrêté d'évoluer. Elles sont dirigées initialement à des applications militaires ou aérospatiale, mais aujourd'hui elles sont la clé de divers domaines dans les secteurs civils grâce à le développement des matériaux.

Les avancées actuelles dans les communications modernes imposent des critères plus élevés sur la flexibilité, miniaturisation et multifonctionnalité des composants radiofréquences. Les antennes reconfigurables sont la solution pour répondre aux ces besoins, capable à adapter leurs caractéristiques et leur comportement électromagnétique à tous types d'environnement et des systèmes contrairement aux antennes conventionnelles.

Ce chapitre est consacré dans le cadre d'une étude et analyse approfondie des antennes imprimées avec une reconfigurabilité en fréquence, appliquées aux systèmes 5G et IoT.

## **II.2 Généralité sur les antennes :**

### **II.2.1 Définition d'une antenne :**

Une antenne est un transducteur qui convertit l'énergie électrique en énergie électromagnétique pour l'émission ou l'inversement pour la réception pour assurer la transmission sans fil de l'information.

Il existe une grande variété de techniques pour la réalisation d'une antenne. Chacune d'elles possède des caractéristiques spécifiques qui est destinée à des applications bien déterminées. Parmi eux, on peut citer :

Antennes filaires, antennes cornets, antennes paraboliques, à fentes et des antennes imprimées.

### **II.2.2 Paramètres et caractéristiques des antennes :**

#### **II.2.2.1 Impédance d'entrée de l'antenne :**

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

$$Z_e = \frac{V_e}{I_e} = R + jX \quad \text{(Équation II-1)}$$

Avec :

$Z_e$ =impédance d'entrée aux bornes a et b.

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

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

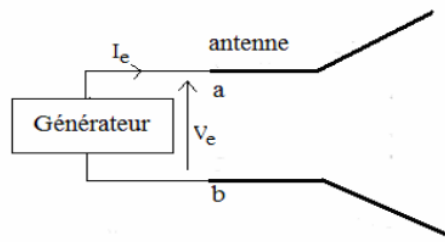


Figure II-1 : Antenne en mode émetteur

### II.2.2.2 Diagramme de rayonnement :

Diagramme de rayonnement est une représentation graphique en deux ou trois dimensions (2D ou 3D) de la distribution spatiale de l'énergie émise ou reçue en fonction de la direction angles  $(\theta, \varphi)$ .

Avec :

$\theta$  : angle polaire de 0 à 180°.

$\varphi$  ; angle azimutal de 0 à 360°.

Il existe trois présentations de diagramme de rayonnement :

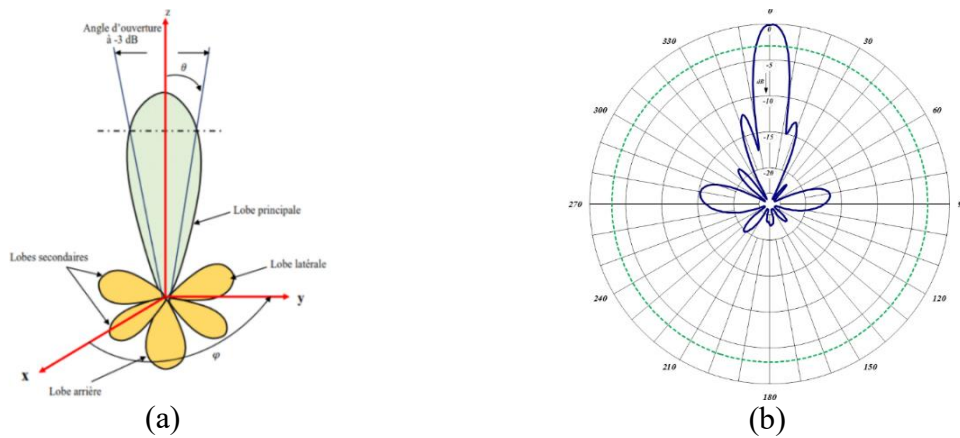


Figure II-2 : Diagramme de rayonnement : (a) en 3D ; (b) en coordonnées polaires [26]

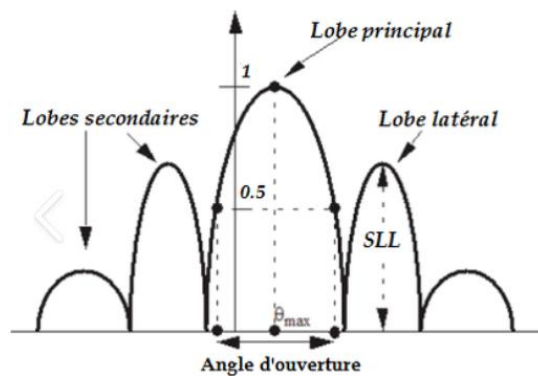


Figure II-3: Diagramme de rayonnement en coordonnées cartésiennes

### II.2.2.3 Rendement :

Le rendement  $\eta$  d'une antenne est le rapport entre la puissance totale rayonnée par l'antenne  $P_t$  et la puissance d'alimentation  $P_{in}$  fournis à l'antenne.

$$\eta = \frac{P_t}{P_{in}} \quad (\text{Équation II-2})$$

### II.2.2.4 Directivité :

La directivité montre la capacité d'une antenne de centraliser son rayonnement à une direction spécifique par rapport à une antenne isotrope qui rayonne uniformément dans toutes les directions.

Elle est définie comme le rapport entre l'intensité de rayonnement dans la direction  $(\theta, \varphi)$  et l'intensité moyenne :

$$D = \frac{U(\theta, \varphi)}{U_{moyenne}} = \frac{U(\theta, \varphi)}{\left(\frac{P_t}{4\pi}\right)} \quad (\text{Équation II-3})$$

La directivité en décibel est donnée :  $D_{dB} = 10 \times \log_{10} D$ .

### II.2.2.5 Gain d'une antenne :

Le gain a le même concept de la directivité, il est défini par le rapport entre l'intensité de rayonnement dans la direction  $(\theta, \varphi)$  et la puissance d'entrée fournie à l'antenne  $P_{in}$ .

$$G = \frac{U(\theta, \varphi)}{\left(\frac{P_{in}}{4\pi}\right)} = \eta \times D(\theta, \varphi) \quad (\text{Équation II-4})$$

Le gain en décibel est donné :  $G_{dB} = 10 \times \log_{10} G$ .

### II.2.2.6 Coefficient de réflexion :

Le coefficient de réflexion  $S_{11}$  est un paramètre qui permet de déterminer la quantité de puissance réfléchie à l'entrée d'une antenne en raison d'un mauvais transfert de l'énergie entre la source et l'antenne :

$$S_{11} = \frac{Z_e - Z_c}{Z_e + Z_c} \quad (\text{Équation II-5})$$

Avec :

$Z_e$  : l'impédance d'entrée de l'antenne.

$Z_c$  : l'impédance caractéristique généralement égale à  $50 \Omega$  dans les systèmes RF.

Le coefficient de réflexion en décibel est donné :  $S_{11}[dB] = 20 \times \log_{10}(S_{11})$

**II.2.2.7 Rapport d'onde stationnaire ROS :**

Le rapport d'onde stationnaire ROS est une mesure pour évaluer la qualité d'adaptation entre une ligne de transmission et la charge.

Lorsqu'une onde électromagnétique se propage dans une ligne de transmission, une partie de cette onde peut être réfléchié si l'impédance de l'antenne est différente de celle de la ligne de transmission, alors ROS est définie par :

$$ROS = \frac{(V^+) + (V^-)}{(V^+) - (V^-)} \quad \text{(Équation II-6)}$$

Il est lié au coefficient de réflexion  $S_{11}$  :

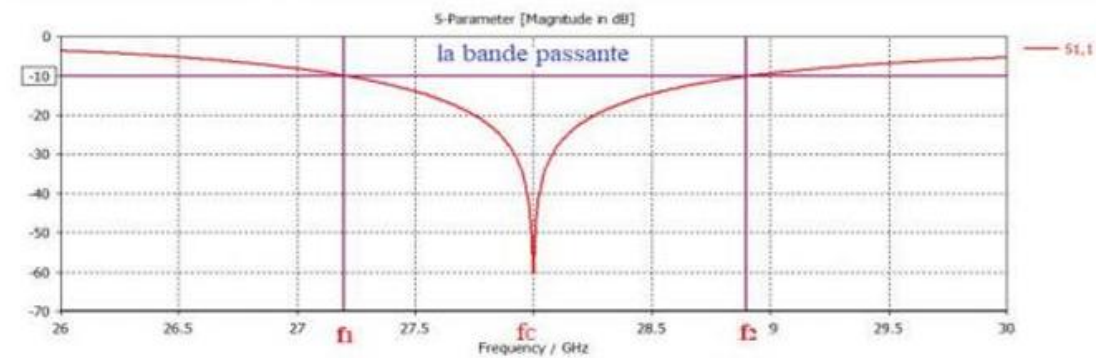
$$ROS = \frac{1 + S_{11}}{1 - S_{11}} \quad \text{(Équation II-7)}$$

**II.2.2.8 Bande Passante :**

La bande passante représente une plage de fréquence où l'antenne possède des capacités optimales pour émettre ou recevoir l'énergie électromagnétique correspondante.

Elle est définie comme la différence entre la fréquence maximale  $f_2$  et la fréquence minimale  $f_1$  de la plage.

$$BP = f_2 - f_1 \quad \text{(Équation II-8)}$$



*Figure II-4 : Présentation de la bande passante à partir de coefficient de réflexion*

**II.2.2.9 Polarisation d'une antenne :**

La polarisation du champ électromagnétique rayonné par une antenne est donnée par la direction du champ électrique  $\vec{E}$ .

Si  $\vec{E}$  garde une direction constante dans le temps, on dit que l'on a une polarisation rectiligne. Si la direction varie avec le temps de telle sorte que si en un point donné on schématise les positions successives de  $\vec{E}$ , l'extrémité du vecteur représentatif décrivant un

cerle ou une ellipse, on dit alors que le champ rayonné est à polarisation circulaire ou elliptique.[25]

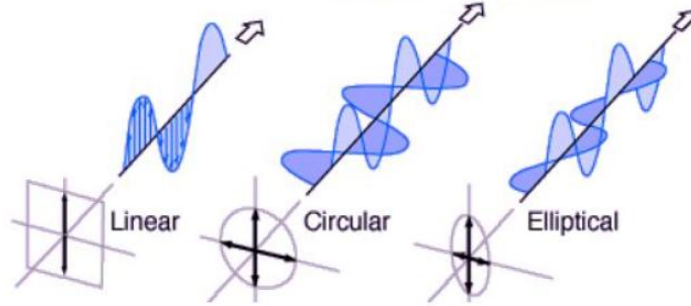


Figure II-5: Polarisation du champ électromagnétique [27]

### II.3 Antenne micro-ruban (imprimée) :

Antenne imprimée ou patch est une antenne plane généralement constituée d'un plan de masse, d'une ou de plusieurs couches de substrat qui peuvent avoir une permittivité ( $\epsilon_{ri}$ ) égaux ou différentes. Sur la surface, on a un élément rayonnant de géométrie quelconque (rectangle, cercle, carré,). Il existe plusieurs mécanismes d'excitations qui permettent d'avoir des diagrammes de rayonnements en polarisations linéaires ou circulaires.[28]

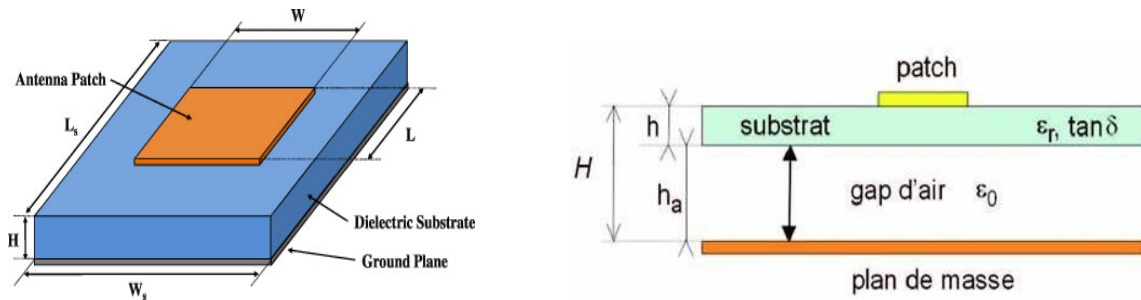


Figure II-6: Présentation de la structure d'une antenne imprimée (patch) [29]

Avec :

- La largeur de patch :

$$W = \frac{c}{2f_r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad \text{(Équation II-9)}$$

- La longueur de patch :

$$L = \frac{c}{2f_r \times \sqrt{\epsilon_{eff}}} - 2\Delta L \quad \text{(Équation II-10)}$$

Avec :

$$\Delta L = 0.412h \frac{\left(\frac{w}{h} + 0.268\right)(\epsilon_{eff} + 0.3)}{(\epsilon_{eff} - 0.3)\left(\frac{w}{h} + 0.8\right)} \quad (\text{Équation II-11})$$

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + 12 \frac{h}{w}\right)^{-\frac{1}{2}} \quad (\text{Équation II-12})$$

Le substrat diélectrique a généralement une faible permittivité  $\epsilon_r$  pour éviter le confinement des champs dans la cavité comprise entre l'élément imprimé et le plan de masse.

L'antenne patch prend différentes configurations et s'adapte à nombreuses applications selon sa fréquence de résonance : carré, rectangulaire, triangulaire, circulaire, elliptique ou d'autres formes plus complexes.

### II.3.1 Techniques d'alimentation des antennes imprimées :

Les techniques d'alimentation d'une antenne patch sont essentielles à fin d'assurer la transmission efficace de signal. Pour cela, on peut identifier deux catégories d'alimentation :

- Alimentations par contact :
  - Alimentation par une ligne micro-ruban.
  - Alimentation coaxiale directe.
- Alimentations sans contact :
  - Alimentation par couplage électromagnétique.
  - Alimentation par couplage d'ouverture (fente) dans le plan de masse.

#### II.3.1.1 Alimentation par ligne micro-ruban :

Cette alimentation consiste à connecter une ligne conductrice avec l'élément rayonnant de l'antenne, imprimée sur le même substrat diélectrique.

Cette méthode est couramment utilisée en raison de sa simplicité de fabrication et de son faible coût.

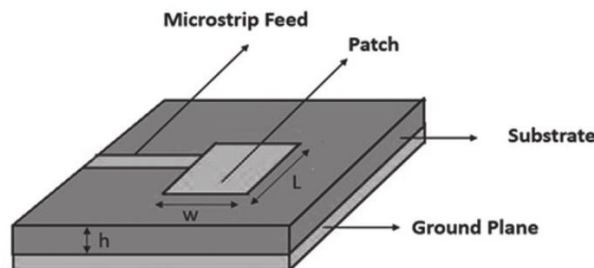


Figure II-7: Alimentation par ligne micro-ruban

#### II.3.1.2 Alimentation par sonde coaxiale :

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 intérieur 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.[30]

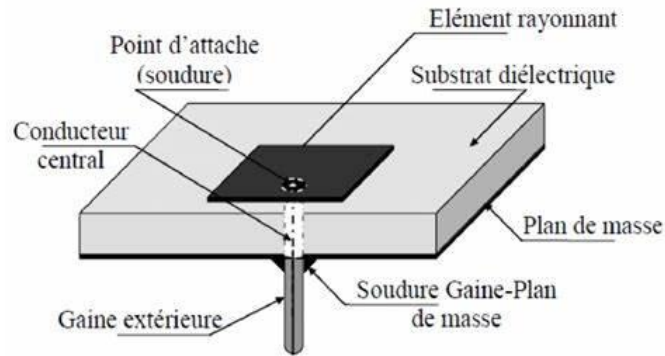


Figure II-8: Alimentation par sonde coaxiale

### II.3.1.3 Alimentation par proximité :

Cette technique repose sur un transfert d'énergie électromagnétique entre la ligne d'alimentation et l'élément rayonnant via un couplage capacitif ou inductif. Le principal avantage de cette technique d'alimentation est qu'elle élimine les rayonnements parasites et fournit une bande passante très élevée.

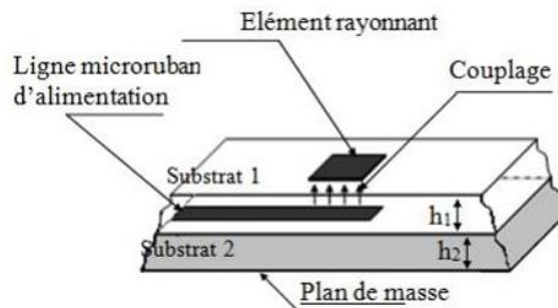


Figure II-9: Alimentation par proximité

### II.3.1.4 Alimentation par fente :

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 2.7). Cette méthode nécessite un positionnement précis de la fente.[31]

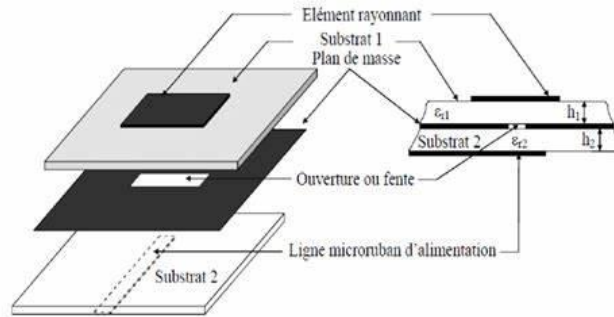


Figure II-10: Alimentation par fente

Le tableau suivant représente une comparaison entre les techniques d'alimentation d'un patch :

Caractéristiques	Alimentation par Ligne micro-ruban	Alimentation Coaxiale	Alimentation couplée par Ouverture	Alimentation couplée par Proximité
Rayonnement parasite de l'alimentation	Plus	Plus	Moins	Minimum
Fiabilité	Meilleure	Pauvre à cause de soudure	Bonne	Bonne
Facilité de fabrication	Facile	Soudure et forage requis	Alignement requis	Alignement requis
Adaptation d'Impédance	Facile	Facile	Facile	Facile
Bande passante (Réalisée avec adaptation d'impédance)	2-5%	2-5%	2-5%	2-5%

Tableau II-1 : Comparaison entre les techniques d'alimentation[32]

## II.4 Antennes reconfigurables :

### II.4.1.1 Définition des antennes reconfigurables :

Une antenne reconfigurable est un type d'antenne dont les caractéristiques électromagnétiques ((fréquence opérationnelle, bande passante, polarisation, diagramme de rayonnement) peuvent être modifier dynamiquement et même durant leur fonctionnement 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.

### II.4.1.2 Types des antennes reconfigurables :

On peut distinguer 03 types de reconfigurabilité des antennes qui sont résumés dans le schéma suivant :

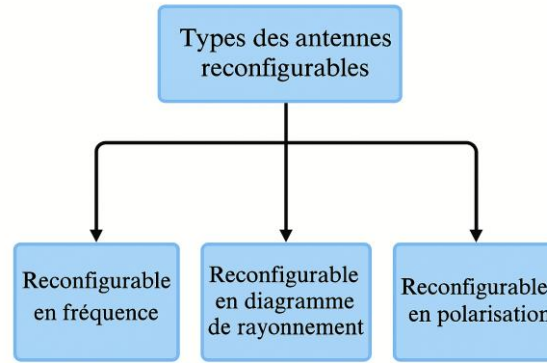


Figure II-11: Schéma représentatif des types d'antennes reconfigurables

- **Reconfigurabilité fréquentielle** : la reconfiguration en fréquence permet de modifier la ou les fréquences de fonctionnement d'une façon dynamique pour couvrir une bande fréquentielle déterminée sans aucun changement dans la structure physique.
- **Reconfigurabilité en polarisation** : Une antenne reconfigurable en polarisation est une solution innovante sert à changer la direction de champ électrique (linéaire, circulaire, elliptique, horizontale, etc. ...) d'une onde magnétique émise ou reçue de manière dynamique et contrôlée.
- **Reconfigurabilité en diagramme de rayonnement** : Les antennes reconfigurables en diagramme de rayonnement sont capables de modifier la forme, le pointage et le gain des diagrammes de rayonnement tout en gardant une fréquence de fonctionnement fixe.[33]

#### II.4.1.3 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 ou 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 cristaux liquides.[34]

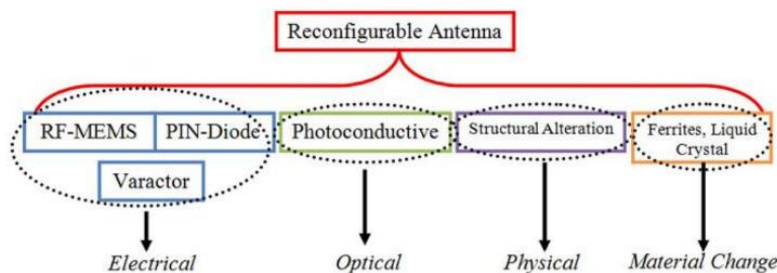


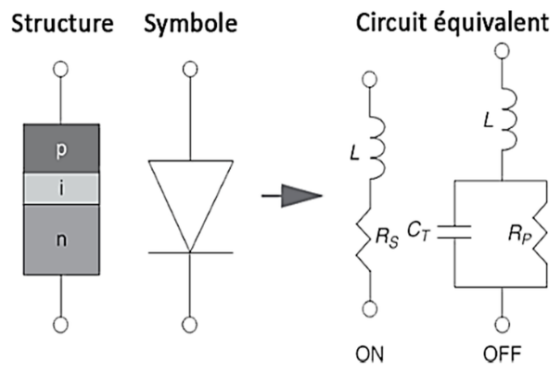
Figure II-12: Techniques de reconfigurabilité [35]

Cette partie s'intéresse sur les méthodes de réglages électriques ou les caractéristiques d'antenne sont modifiées à l'aide des composants tels que :

**II.4.1.3.1 Diode PIN :**

Diode PIN (Positive Intrinsic Negative) est un composant semi-conducteur composé de 03 couches : Une zone P, une zone intrinsèque non dopée I et une zone N utilisée comme un interrupteur RF dans les antennes reconfigurables modifiant le chemin du courant.

- **Etat ON :** lorsqu'elle est polarisée en directe, la diode représente une impédance relativement faible, et par conséquent, elle se comporte comme un circuit fermé.
- **Etat OFF :** lorsqu'elle est polarisée en inverse, elle offre une très grande impédance en parallèle, avec une très faible conductance, elle se comporte donc comme un circuit ouvert.



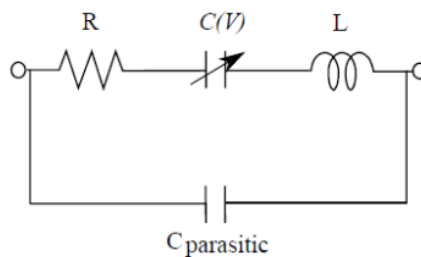
*Figure II-13: Schéma équivalent de l'état ON et OFF de diode PIN [36]*

**II.4.1.3.2 Varactors :**

Une diode varicap, nommée aussi une varactor ou encore une diode à capacité variable est une diode qui se comporte comme un condensateur dont la valeur de la capacité varie avec la tension inverse appliquée à ses bornes, lorsque l'on change sa tension de polarisation, on change la valeur de cette capacité.

Elle offre une variation continue contrairement aux diodes PIN qui offre une variation discrète.

$$C(V) = \frac{C_{j0}}{(1 + V / V_j)^M} + C_{par}$$



*Figure II-14: Schéma équivalent d'une diode varicap [37]*

Avec :

$C_{jo}$  : la capacité des jonctions hyperabruptes.

$V_j$  : la tension potentielle intégré.

$M$  : le paramètre de la jonction abrupte.

$C_{par}$  : la capacité parasite du varactor.

### II.4.1.3.3 RF-MEMS :

Un commutateur RF MEMS est un système de commutation mécanique standard basé sur des semi-conducteurs basé sur la technologie de fabrication de circuits VLSI. Ce commutateur peut être utilisé pour contrôler le flux de courant de surface soit par court-circuit soit en circuit ouvert. En outre, un commutateur RF MEMS peut être fabriqué directement sur la structure de l'antenne, c'est-à-dire imprimé sur un substrat diélectrique en verre ou en céramique. La figure II.10, montre un circuit équivalent au modèle et un exemple de commutateur RF MEMS. Le dispositif ayant une faible capacité à l'état haut, cela se traduit par des performances à large bande dans la conception de l'antenne. Les avantages typiques des commutateurs RF MEMS sont leur faible consommation d'énergie et leur vitesse de réglage élevée (de 1 à 100 ns), faible coût, isolation élevée et faible perte d'insertion. Cependant, le commutateur a une limitation dans un facteur de qualité médiocre, un comportement non linéaire, une accordable non continue et une exigence de courant de polarisation CC élevée dans l'état «ON».[37]

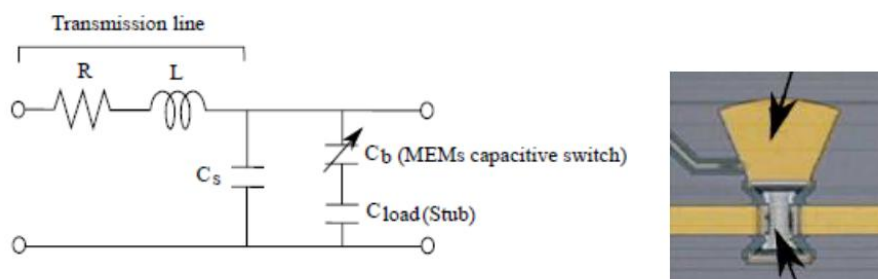


Figure II-15: Schéma équivalent de commutateur RF-MEMS [33]

## II.5 Définition des antennes reconfigurables en fréquence :

Dans la littérature consacrée à la technologie des micro-ondes, la reconfigurabilité en fréquence est définie comme l'accordable de la bande de fréquence d'exploitation avec correspondance acceptable, et est souvent décrite par la variation de la fréquence de résonance centrale. Cette fonctionnalité doit généralement être obtenue pour une ou plusieurs fréquences de résonance sans aucun changement substantiel du diagramme de rayonnement de l'antenne et des propriétés de polarisation dans la bande de fonctionnement.[33]

### II.5.1 Principe de la reconfiguration :

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).

### II.5.2 Techniques de reconfiguration en fréquence :

On distingue principalement trois types des techniques de reconfigurabilité en fréquence :

- **Reconfigurabilité par des composants actifs :** Cette méthode consiste à intégrer des composants électroniques à la structure rayonnante de l'antenne afin de modifier ses caractéristiques électriques (longueur électrique ou l'impédance...) en temps réel.
- **Reconfigurabilité par modification de la structure géométrique :** La fréquence de résonance dépend fortement des dimensions de l'antenne. En modifiant physiquement la géométrie (longueur, largeur, découpe), on peut ajuster sa fréquence.
- **Reconfigurabilité par changement de matériau :** Cette technique utilise des substrats actifs ou des matériaux intelligents pour changer les propriétés de propagation électromagnétique de l'antenne, modifiant ainsi sa fréquence.

Cette étude est basée sur la reconfigurabilité par des composants actifs. Parmi eux :

#### II.5.2.1 Diode PIN :

Un exemple d'antennes utilisant des diodes PIN exploitant la variation de la longueur électrique est illustré dans la figure suivante. Il s'agit d'une antenne monopole en forme de triangle de Reuleaux, alimentée par micro-ruban, intègre des diodes PIN pour basculer entre les bandes. Lorsque les diodes 1 et 2 sont à l'état OFF, l'antenne couvre la région UWB, en particulier, bande d'ISM (5.8 GHz), bande de WLAN (5.2 GHz) et bande X inférieure (8GHz). A l'état ON, l'antenne fonctionne dans la bande Ku (12.7-15.65 GHz).[38]

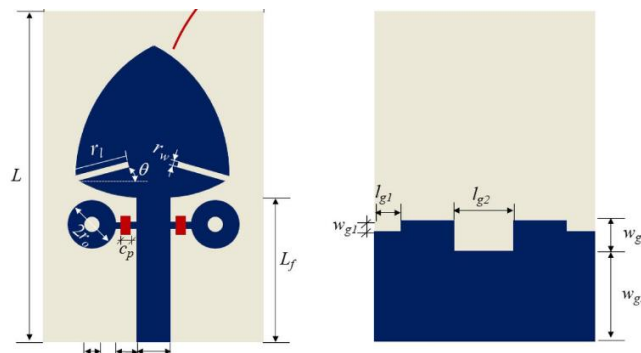


Figure II-16: Géométrie d'antenne R-TSM [38]

II.5.2.2 MEMS :

La structure proposée est contient une fente en L, utilise des MEMS afin de modifier la géométrie de l'antenne et offrir alors quatre bandes de fréquence réglables, 42,36, 47,65, 53,13 et 56,72 GHz .[39]

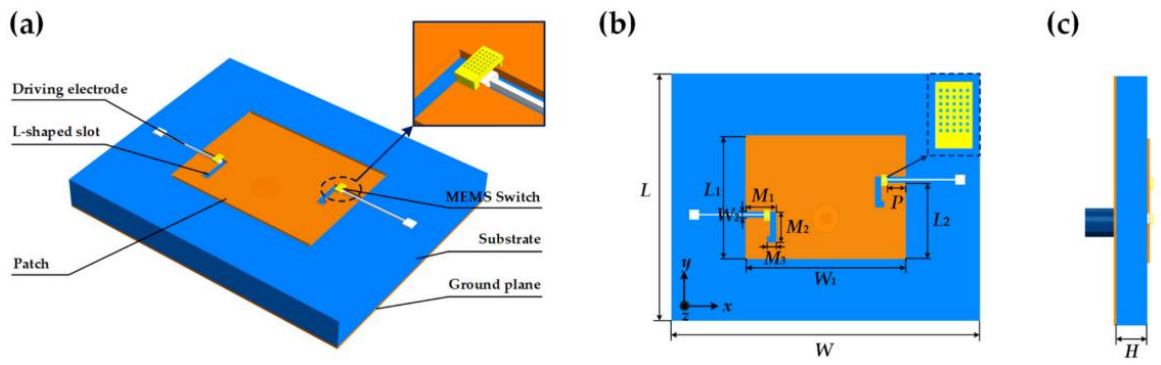


Figure II-17: Antenne reconfigurable en fréquence à fente en L (a) Stéréogramme ; (b) Vue de face (c) Vue de côté. [39]

II.5.2.3 Varactor :

Un exemple d'antenne reconfigurable en fréquence utilisant des varactors et exploitant la variation de la longueur électrique. L'antenne proposée est basée sur un dipôle quasi-Yagi. Trois varactors sont utilisés : deux sont placés dans les deux bras de l'élément alimenté, et un se situe au niveau de l'élément parasite. Un réglage, continu de la fréquence, est obtenu dans une bande allant de 1.80 à 2.45 GHz. L'élément directeur est également ajustable de sorte à maintenir un fort gain.[40]

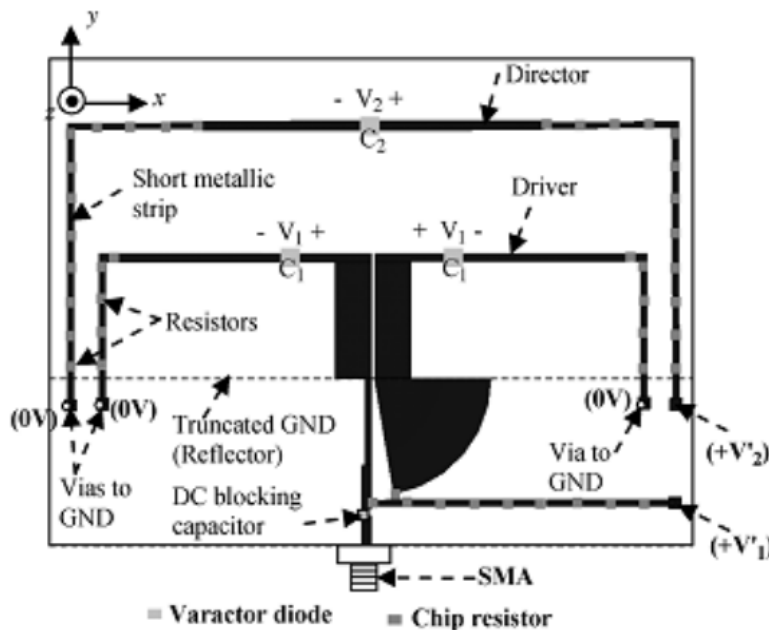


Figure II-18: Antenne quasi-Yagi reconfigurable en fréquence par trois varactors [40]

### II.5.2.4 Avantages et inconvénients de antennes reconfigurables :

- Avantages :
  - Adaptation avec les conditions opérationnelles, ce qui prolonge la durée de vie utile.
  - 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.
  - Reconfigurabilité de rayonnement permet d'avoir une diversité spatiale.
  - Reconfigurabilité en fréquence est utile à l'appui de nombreuses applications sans fil.
  - 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 :
  - Complexité de conception.
  - Coût de conception et fabrication des antennes reconfigurables est généralement élevé par rapport à les antennes traditionnelles.
  - Augmentation des pertes et réduction l'efficacité des antennes reconfigurables à cause des composants actifs utilisés.
  - Augmentation de la consommation d'énergie globale.

### II.5.3 Simulation d'une antenne reconfigurable en fréquence :

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.

Cette étude analyse les antennes reconfigurables avec le logiciel CST Studio Suite.

#### II.5.3.1 Outil de simulation :

Le logiciel CST est une solution logicielle d'analyse électromagnétiques 3D hautes performances dédiée à la conception, à l'analyse et à l'optimisation des composants hyperfréquences tels que les antennes imprimées et les antennes filaires et systèmes électromagnétiques (EM). Il permet de réaliser des simulations dans de nombreux domaines d'applications telles que les performances et l'efficacité des antennes et des filtres, communications électroniques (Wi-Fi, 5 G, Satellite ...), transport (voitures connectées), performances des circuits imprimées. Il est basé sur la méthode d'intégration finie FIT (Finit Integration Technique) développé en 1977 par Weiland. Cette méthode offre une discrétisation

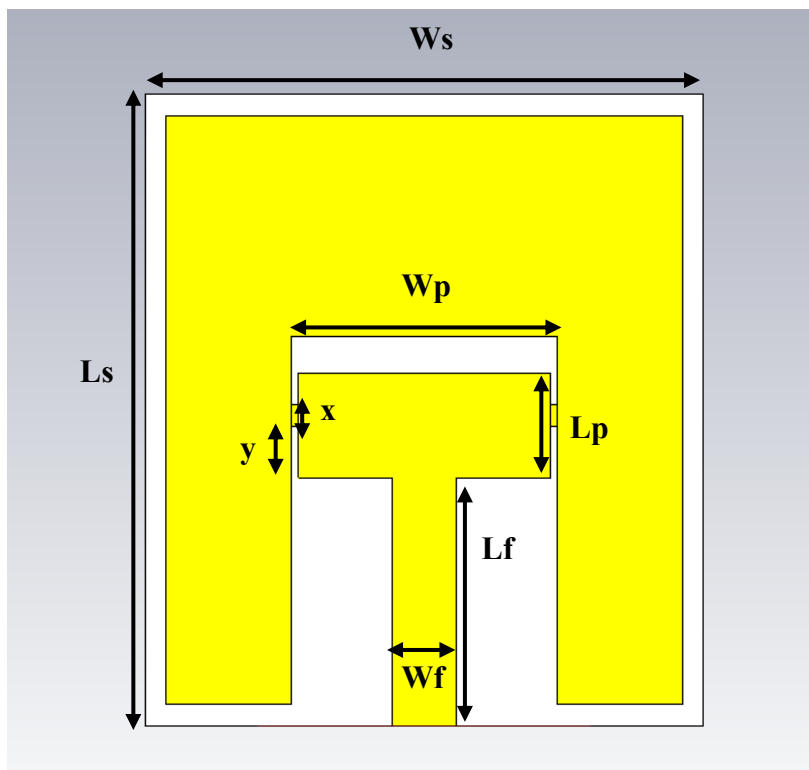
spatiale des équations de Maxwell sous leur forme intégrale sur un espace de grille. On peut effectuer une étude dans le domaine temporel ou fréquentiel à l'aide de cette méthode.[33]

**II.5.3.2 Conception d'une antenne pour les applications Wi-Fi et 5G :**

La première antenne simulée [41], est une antenne reconfigurable en fréquence qui fonctionne dans deux bandes de fréquences : 2.4 GHz qui est dédiée pour application Wi-Fi et 28 GHz pour 5G.

**II.5.3.2.1 Géométrie de l'antenne :**

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.

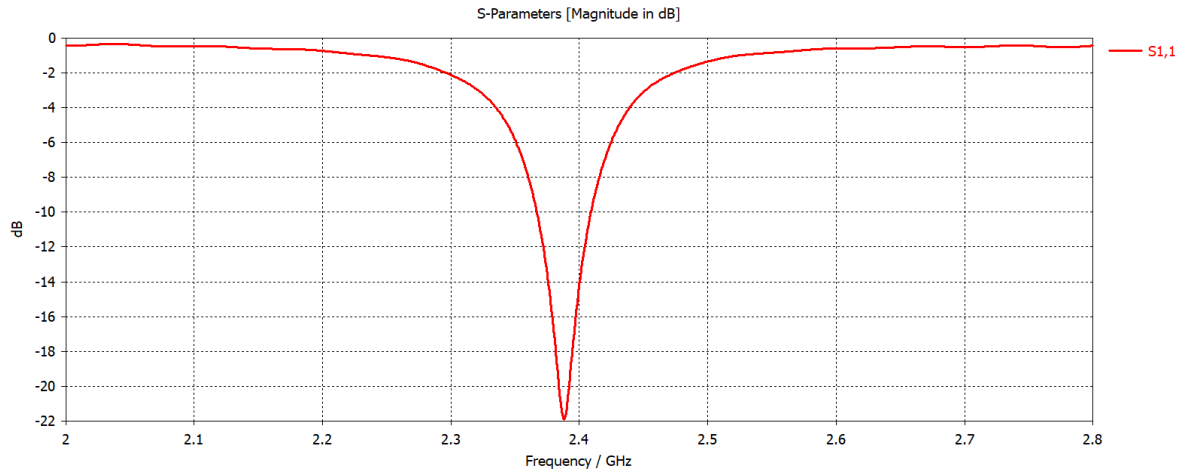


*Figure II-19: Présentation de l'antenne reconfigurable simulée*

Les dimensions de ces antennes sont présentées dans ce tableau suivant :

Paramètre	Valeur (mm)
Ws	26.5
Ls	30
Wp	12
Lp	5
Wf	3
Lf	11.75



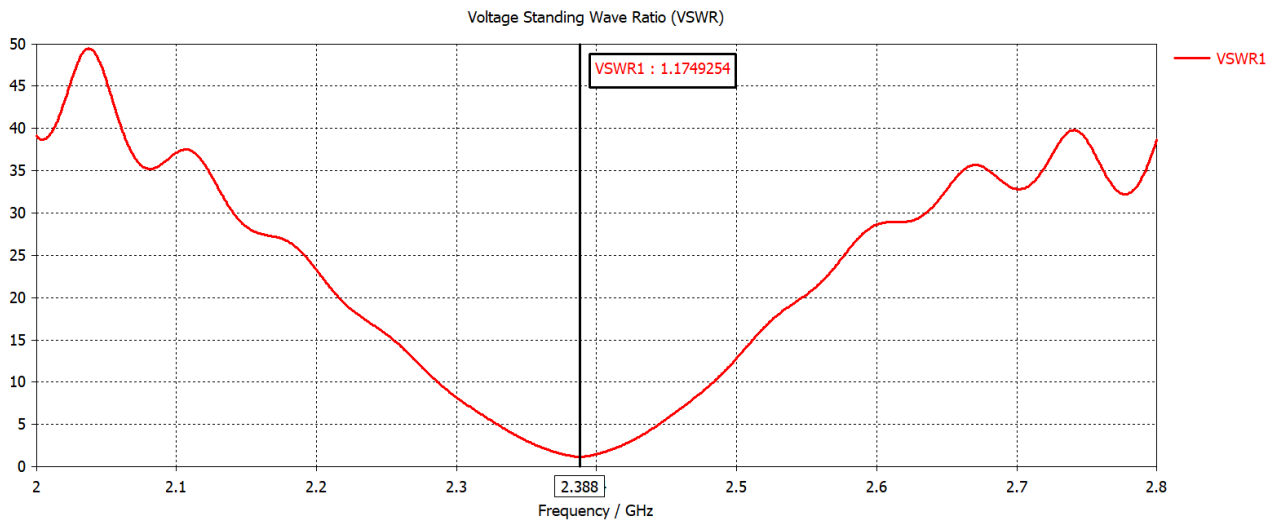


*Figure II-20: Coefficient de réflexion de l'antenne à l'état (a) (application Wi-Fi)*

On remarque une bonne adaptation dans cette bande où le coefficient de réflexion est inférieur à -20 dB.

- **Rapport d'onde stationnaire :**

La **Figure II-21** montre la variation de VSWR en fonction de fréquence. Ce paramètre consiste à avoir un VSWR inférieur à 2.



*Figure II-21: Rapport d'onde stationnaire de l'antenne simulée*

- **Distribution de courant :**

La **Figure II-22** montre la distribution de courant de l'antenne simulée à l'état (a), qui est dirigée vers l'application Wi-Fi.

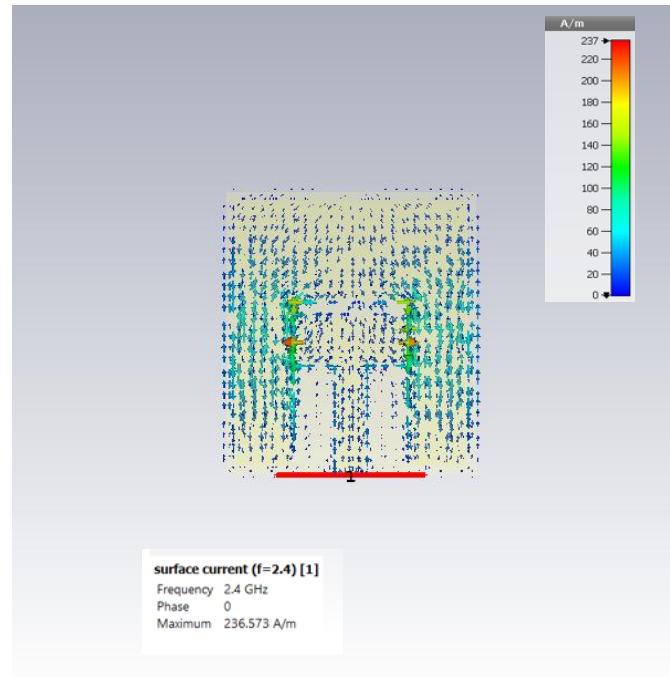


Figure II-22: Distribution de courant à l'état 1

- **Diagramme de rayonnement :**

La figure suivante *Figure II-23* représente le diagramme de rayonnement en 2D avec les coordonnées polaires.

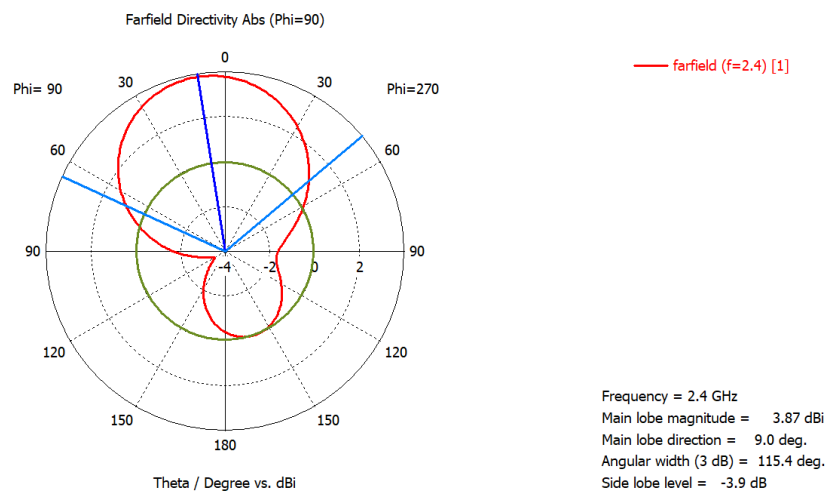


Figure II-23: Diagramme de rayonnement en 2D

➤ **Etat (b) :** illustre la simulation de l'antenne sans l'intégration des deux plaques métalliques, conçue pour fonctionner à 28 GHz.

- **Coefficient de réflexion :**

Le coefficient de réflexion de l'antenne reconfigurable avec plaquette métallique est montré dans la *Figure II-24*. Pendant l'état b, l'antenne fonctionne dans la bande 5G (28 GHz).

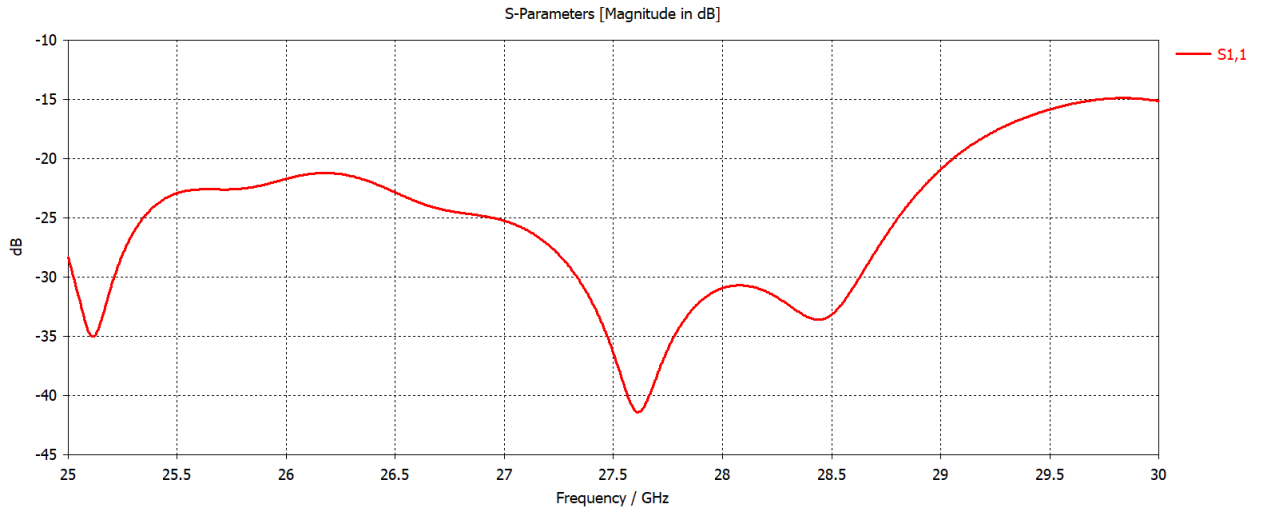


Figure II-24: Coefficient de réflexion de l'antenne à l'état (b) (application 5G)

On remarque une bonne adaptation dans cette bande, où le coefficient de réflexion est inférieur à -10 dB sur toute la plage de 25 à 30 GHz, avec un  $S_{11}$  de -41 dB autour de la fréquence de 27,5 GHz.

- **Rapport d'onde stationnaire VSWR :**

La Figure II-25 montre le rapport VSWR de l'antenne simulée à l'état (b), orientée pour les applications 5G.

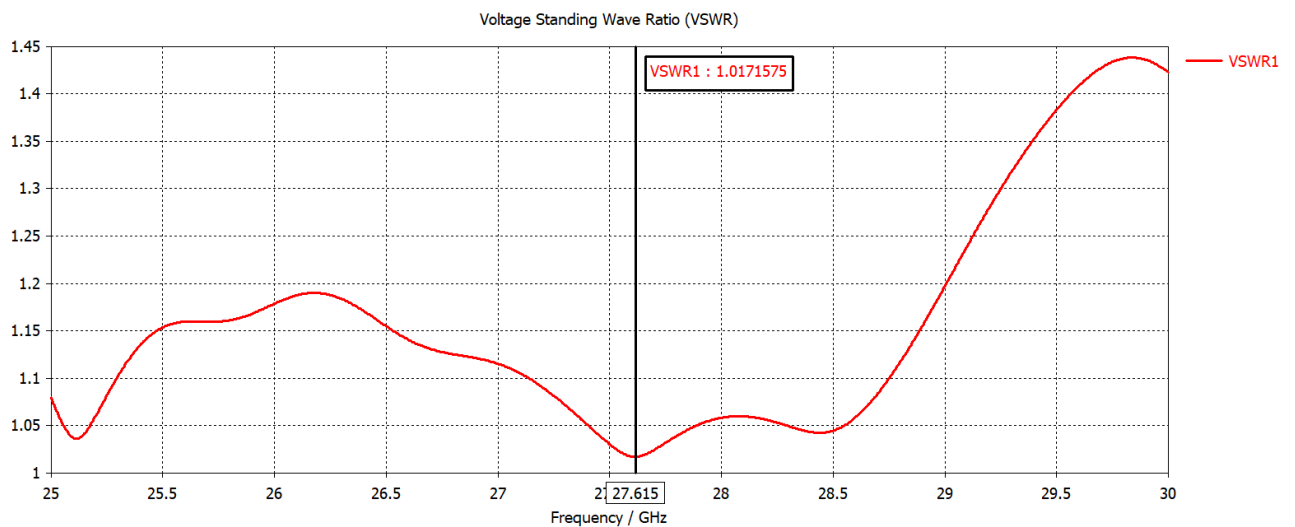


Figure II-25: Rapport d'onde stationnaire de l'antenne simulée à l'état b

On remarque, on a un VSWR inférieur à 2 sur toute la plage de 25 GHz à 30 GHz.

- **Diagramme de rayonnement :**

La Figure II-26 représente le diagramme de rayonnement de l'antenne simulée à l'état b pour la fréquence 27.5 GHz.

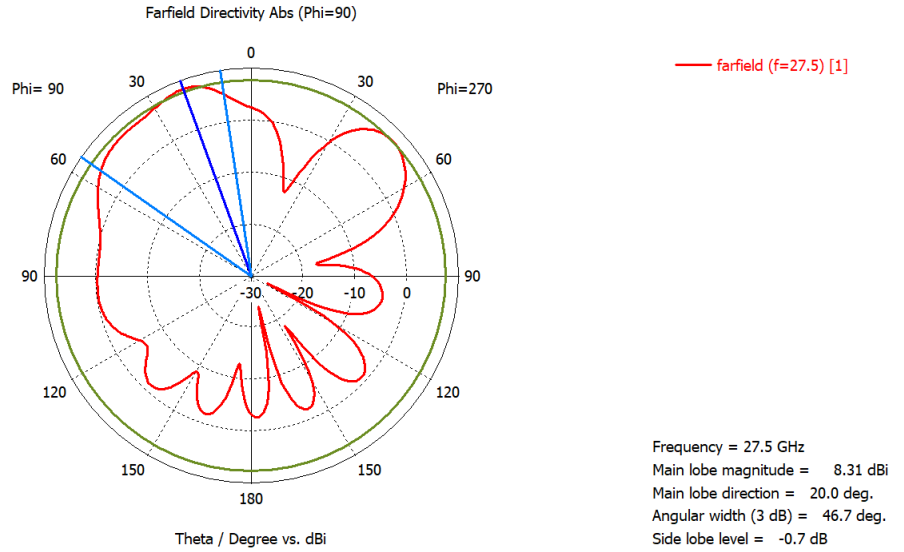


Figure II-26: Diagramme de rayonnement de l'antenne à l'état (b)

### II.5.3.3 Conception d'une antenne pour les réseaux IoT indoor et les communications sans fil à très haut débit :

La deuxième antenne simulée est une antenne reconfigurable en fréquence qui fonctionne dans deux bandes de fréquences : 3.1- 10.6 GHz pour les communications sans fil à très haut débit et les réseaux IoT indoor et 22-29 GHz pour les applications automobiles et radar courte portée.

#### II.5.3.3.1 Géométrie de l'antenne :

Le patch est imprimé sur un substrat FR4 avec une constante diélectrique de 4,4 et de tangente de perte 0.022 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 mm.

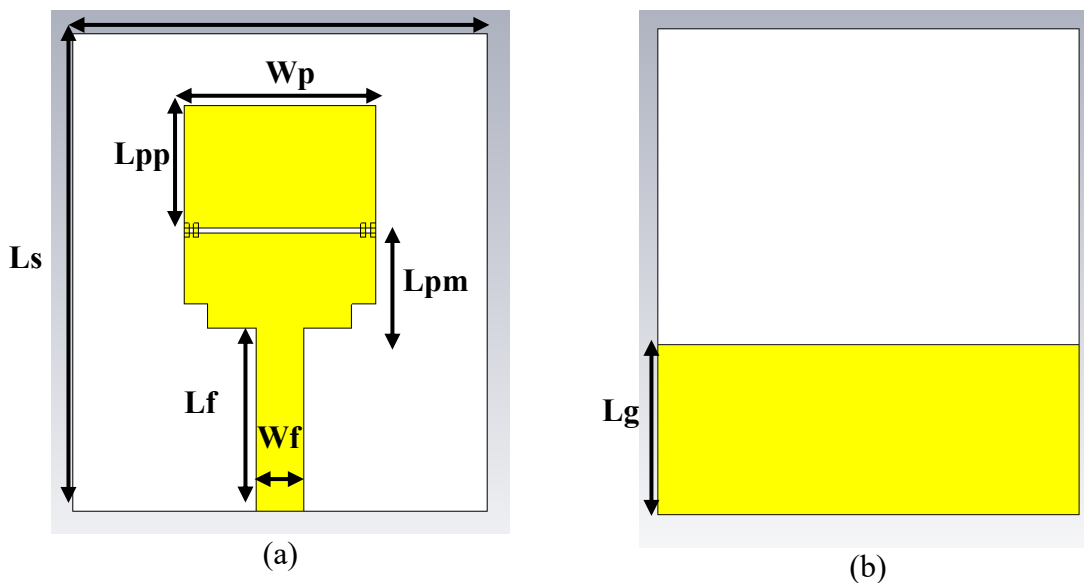


Figure II-27: Présentation de l'antenne reconfigurable simulée : a- Face avant et b- Face arrière

Les dimensions de cette antenne reconfigurable en fréquence sont présentées dans le tableau suivant :

Paramètres	Valeur (mm)
Ws	26
Ls	30
Wp	12
Lp	14
Wf	3
Lf	11.5
Lg	10.5
Lpp	7.7
Lpm	6
D	1.5

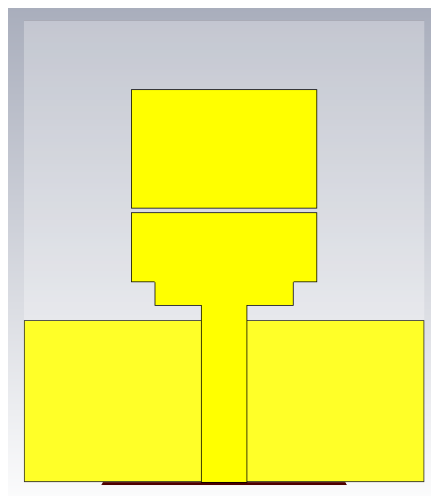
*Tableau II-3 : Les dimensions de l'antenne reconfigurable simulée*

Afin de commuter l'antenne entre deux bandes de fréquence, quatre plaques métalliques d'une longueur de 0.9 mm et d'une largeur de 0,3 mm sont introduite. Cette antenne a trois états :

- **Etat 1** : quand l'antenne ne contient aucune plaque métallique.
- **Etat 2** : quand les plaques métalliques sont aux bordures.
- **Etat 3** : quand les plaques métalliques sont à 0,6 mm de bordures.

### II.5.3.3.2 Résultats de simulation :

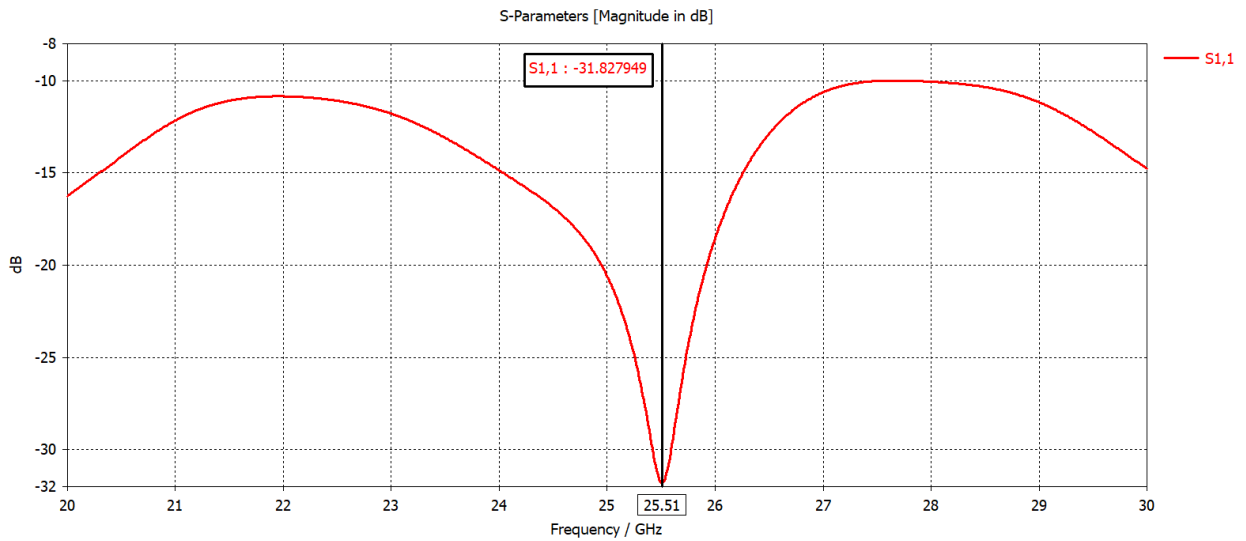
- **État 1** : montre la simulation de l'antenne sans aucun plaques métalliques, destinée à un usage dans les bandes 22-29 GHz.



*Figure II-28: Antenne simulée à l'état 1*

- **Coefficient de réflexion :**

La *Figure II-29* représente le coefficient de réflexion de l'antenne simulée à l'état 1.

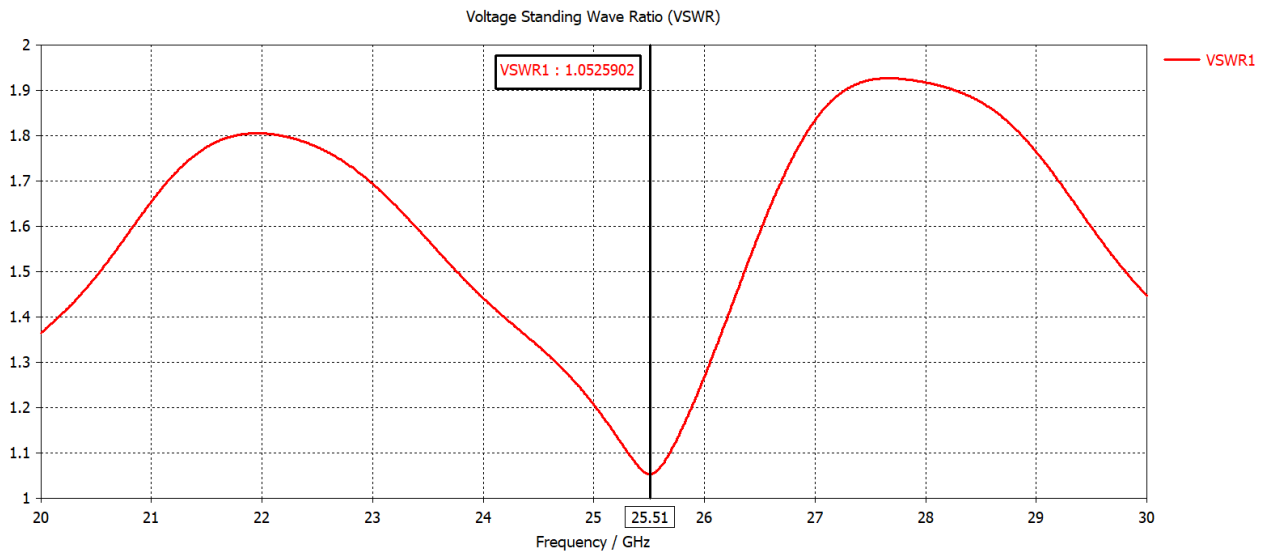


*Figure II-29: Coefficient de réflexion de l'antenne à l'état 1*

On observe qu'on a une bonne adaptation avec un rapport  $S_{1,1}$  de -31.82 dB à la fréquence 25.51 GHz dans la bande des applications automobiles et radar courte portée.

- **Rapport d'onde stationnaire :**

La *Figure II-30* représente le rapport VSWR de l'antenne simulée à l'état 1.

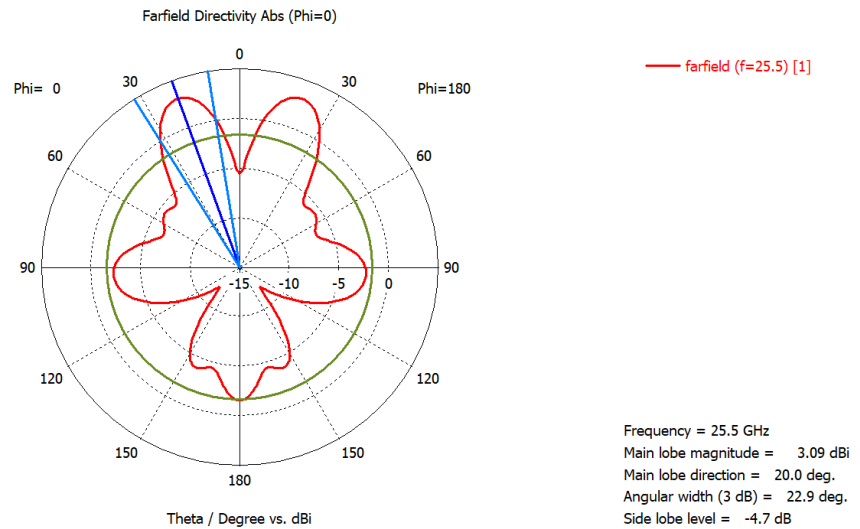


*Figure II-30: Rapport d'onde stationnaire de l'antenne simulée à l'état 1*

On remarque une bonne adaptation avec un VSWR inférieur à 2 sur toute la plage 20-30 GHz.

- **Diagramme de rayonnement :**

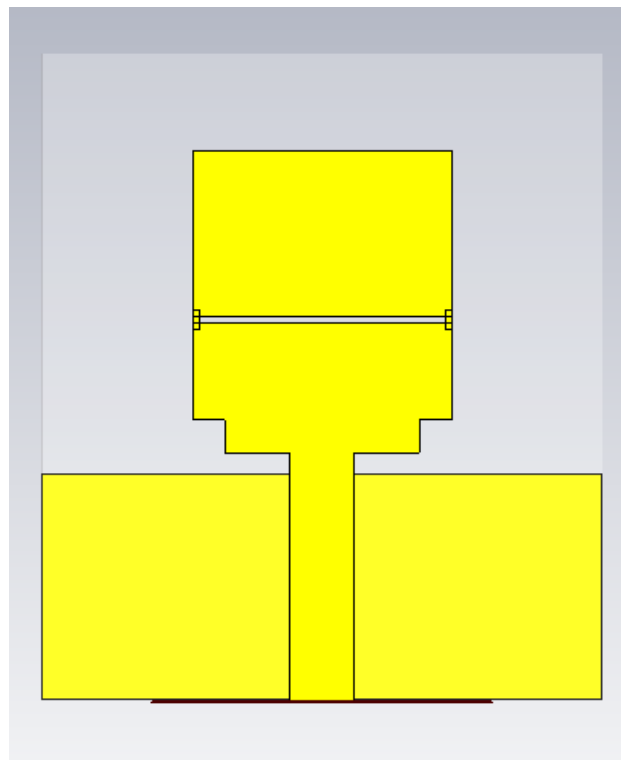
La **Figure II-31** représente le diagramme de rayonnement de l'antenne à la fréquence 25.5 GHz pour l'état 1.



**Figure II-31: Diagramme de rayonnement de l'antenne à 25.5 GHz**

➤ **Etat 2 :**

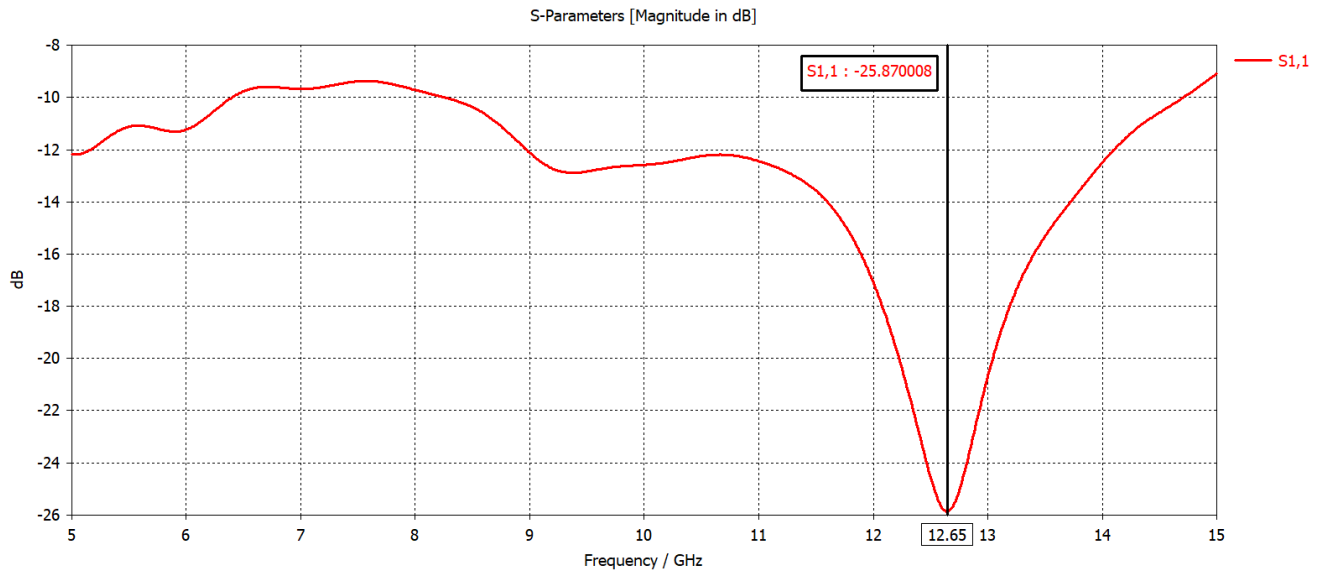
Dans cette étape, deux plaques métalliques sont ajoutées aux bordures de patch.



**Figure II-32: Antenne simulée à l'état 2**

- **Coefficient de réflexion :**

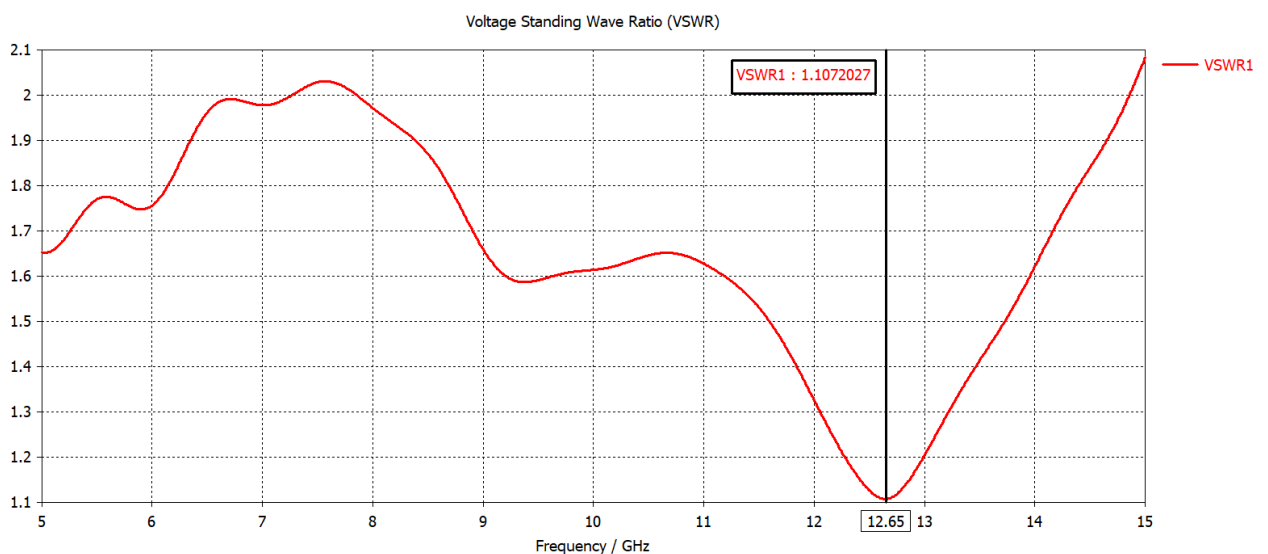
La **Figure II-33** représente le coefficient de réflexion de l'antenne simulée à l'état 2. On observe qu'on a une bonne adaptation avec un rapport  $S_{1,1}$  de -25.87 dB à la fréquence 12.65 GHz dans la bande des applications Internet et communication à haut débit et communication satellitaire.



*Figure II-33: Coefficient de réflexion de l'antenne à l'état 2*

- **Rapport VSWR :**

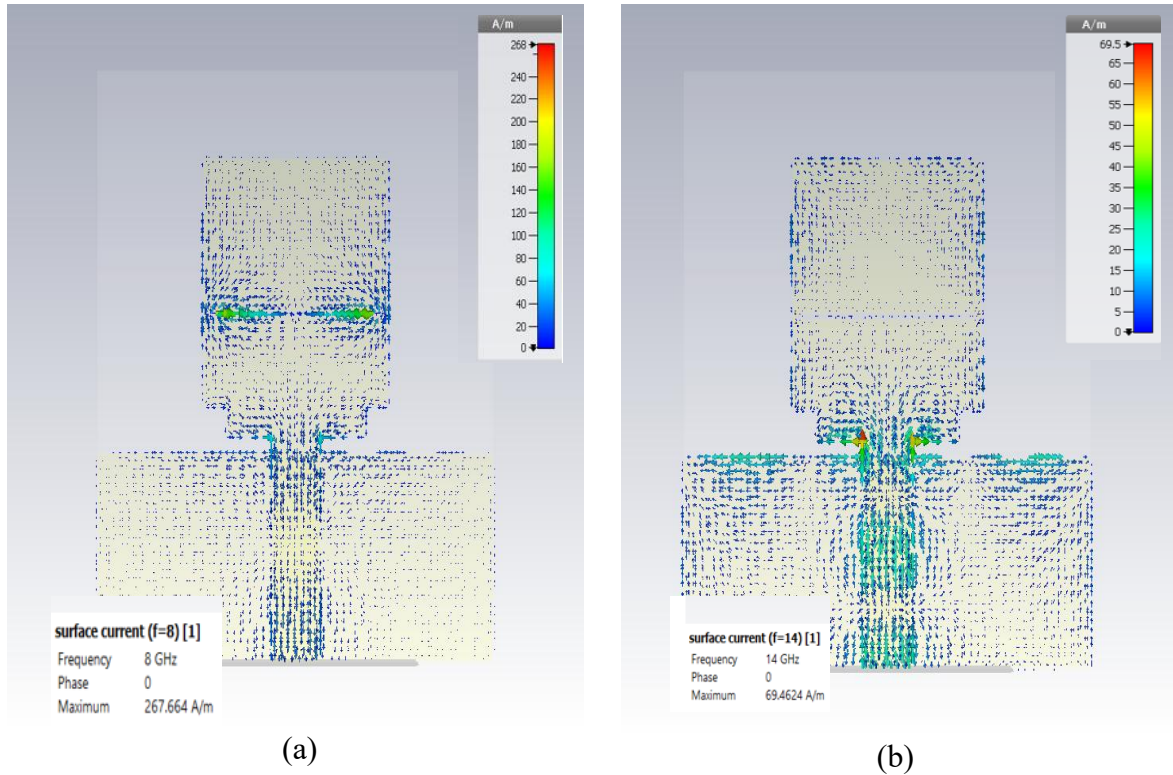
La **Figure II-34** représente le rapport d'onde stationnaire de l'antenne simulée, on observe un VSWR a une valeur 1.10 pour la fréquence 12.65 GHz, ce qui le rend acceptable par rapport à sa condition.



*Figure II-34: Rapport d'onde stationnaire de l'antenne simulée à l'état 2*

- **Distribution de courant :**

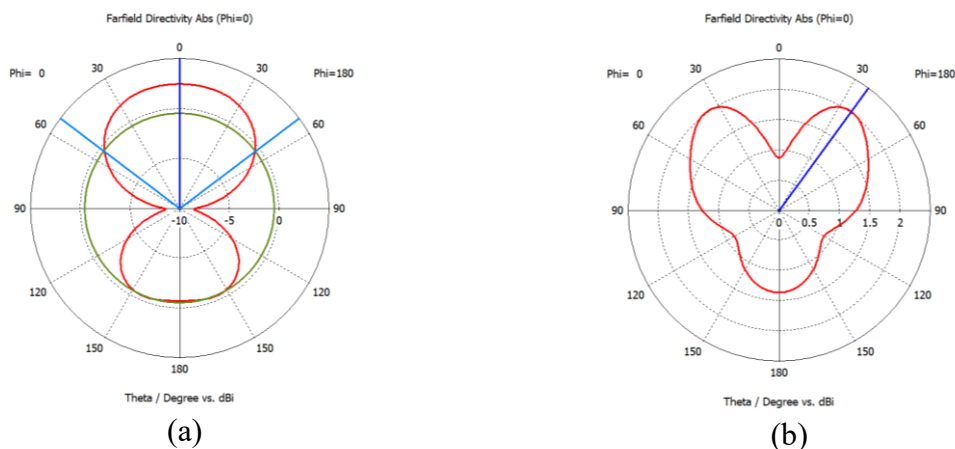
La *Figure II-35* montre une présentation de la distribution de courant de l'antenne simulée à l'état 2.



*Figure II-35: Distribution de courant de l'antenne simulée à l'état 2 : a- pour 8 GHz, b- pour 14 GHz*

- **Diagramme de rayonnement :**

La figure suivante représente le diagramme de rayonnement de l'antenne simulée dans les deux fréquences 8 GHz et 14 GHz, observé par les coordonnées polaires.



*Figure II-36: Diagramme de rayonnement d'antenne simulée : a- pour 8 GHz et b- pour 14 GHz*

- **Etat 3** : illustre la simulation de l'antenne intégrant deux plaques métalliques à 0.6 mm de bordures, conçue pour fonctionner à la plage de 3.1-10.6 GHz.

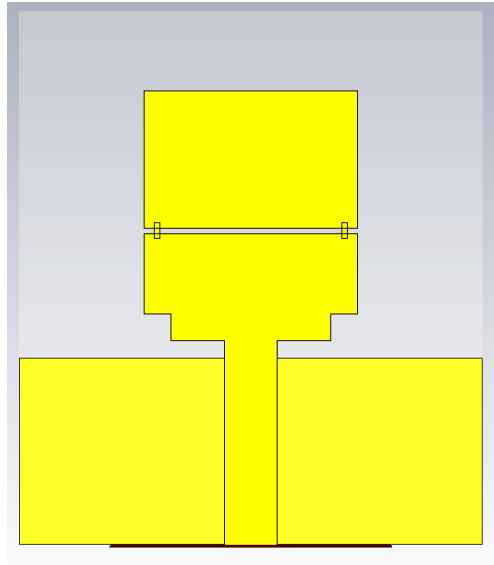


Figure II-37: Antenne simulée pour l'état 3

- **Coefficient de réflexion :**

La Figure II-38 représente le coefficient de réflexion de l'antenne simulée à l'état 3.

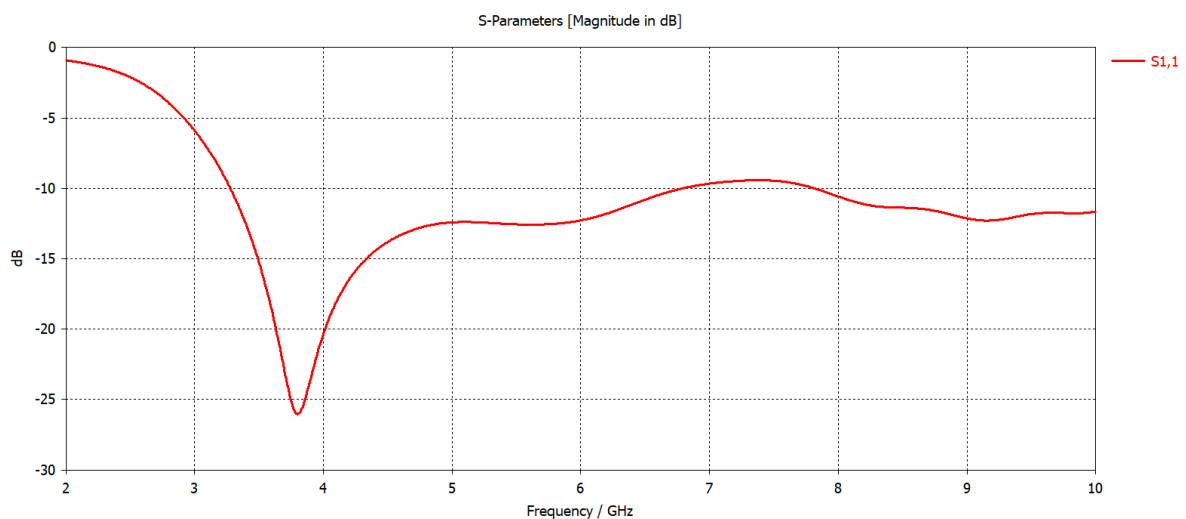
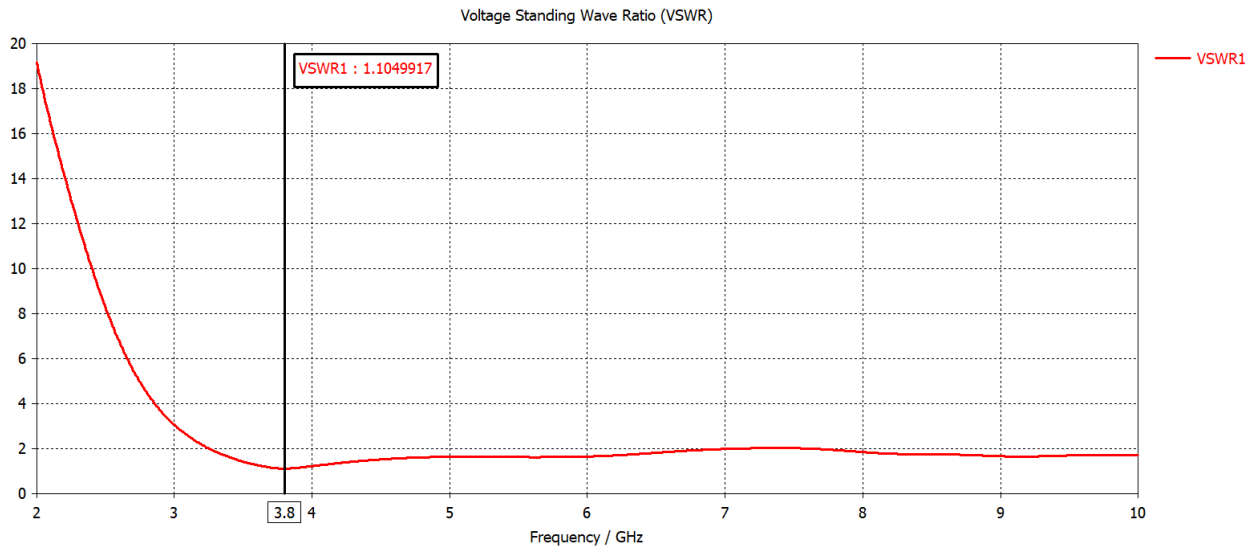


Figure II-38: Coefficient de réflexion de l'antenne à l'état 3

On observe qu'on a une acceptable adaptation avec un rapport S1,1 de -26 dB à la fréquence 3.8 GHz dans la bande des applications 5G, IoT indoor et communication à haut débit.

- **Rapport d'onde stationnaire :**

La Figure II-39 représente le rapport d'onde stationnaire VSWR pour l'antenne simulée à l'état 3.



*Figure II-39: Rapport d'onde stationnaire pour l'antenne à l'état 3*

La représentation du rapport d'onde stationnaire en fonction de la fréquence montre que l'antenne est bien adaptée à la fréquence 3.8 GHz, le VSWR est inférieur à 2 à cette fréquence.

### II.6 Conclusion :

La reconfiguration fréquentielle ouvre la voie à un nouvel aspect dans le domaine de communication. Ce critère est capable à répondre aux exigences de la flexibilité, d'intégration et de performance des réseaux 5G et des dispositifs IoT. La modification dynamique de fréquence de fonctionnement permet une utilisation plus rationnelle du spectre, une réduction du nombre d'antennes, et une adaptation aux environnements changeants.

Dans la suite de ce mémoire, nous allons élargir cette approche en abordant un autre degré de liberté tout aussi stratégique dans les systèmes 5G/IoT : la polarisation. Le prochain chapitre sera donc consacré à la conception d'antennes reconfigurables en polarisation.

## *Chapitre III*

### *Conception et Simulation d'une Antenne Imprimée Reconfigurable en Polarisation*

### III.1 Introduction :

Dans le contexte de l'étude et l'analyse des antennes reconfigurables, ce chapitre est consacré à la présentation et simulation d'une antenne reconfigurable en polarisation.

Les antennes reconfigurables en polarisation sont d'autres types des antennes qui assurent la flexibilité et s'adaptent au canal de transmission en changeant la direction de champ électrique dynamiquement.

Ce chapitre présente au premier temps la polarisation et les antennes reconfigurables en polarisation, puis détaille la conception et simulation d'une antenne reconfigurable capable de basculer entre deux états de polarisation, démontrant les bénéfices de cette technologie pour les réseaux 5G et IoT.

### III.2 Définition de la polarisation :

La polarisation d'une onde électromagnétique est définie comme l'orientation spatiale du vecteur champ électrique  $E$  dans un plan perpendiculaire à la direction de propagation de l'onde. Mathématiquement, pour une onde se propageant selon l'axe  $z$ , la polarisation est caractérisée par la trace du vecteur champ électrique dans le plan  $(x, y)$  en fonction du temps.

Les antennes reconfigurables à polarisation ont attiré de plus en plus d'attention car elles présentent certains avantages souhaitables pour les communications sans fil modernes, comme éviter la perte de fading causée par les effets de trajets multiples dans les réseaux locaux sans fil, utile pour créer des liaisons sans fil plus fiables et robustes, réaliser la réutilisation de la fréquence la capacité des systèmes de communication par satellite.

La reconfiguration en polarisation de l'antenne correspond à la modification de sa polarisation, linéaire ou circulaire. Le but est de modifier l'orientation vectorielle du champ émis et cela sans altérer ni les fréquences résonantes, ni la forme du diagramme de rayonnement[40]. Elle permet de modifier dynamiquement l'état de polarisation du champ électromagnétique qu'elle émet ou reçoit par l'utilisation des composants actifs (diodes PIN, MEMS, switches optiques) ou des structures mécaniques pour reconfigurer la polarisation.

La polarisation peut être classifiée en trois catégories principales :

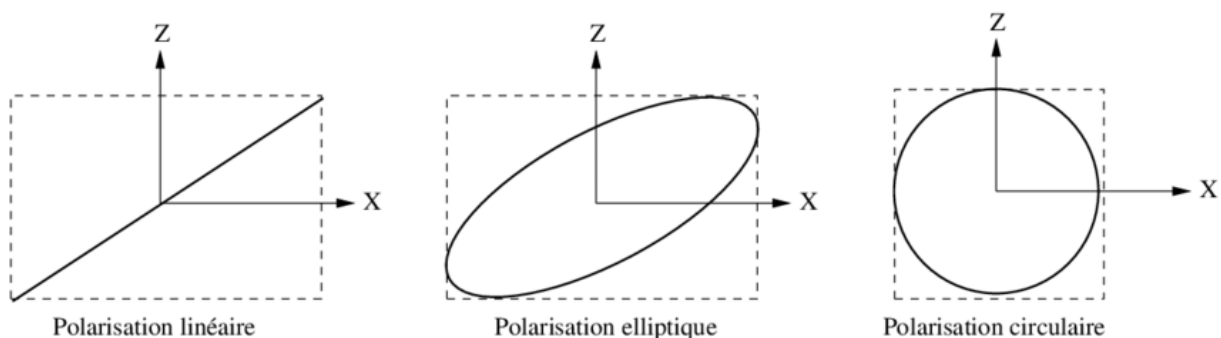


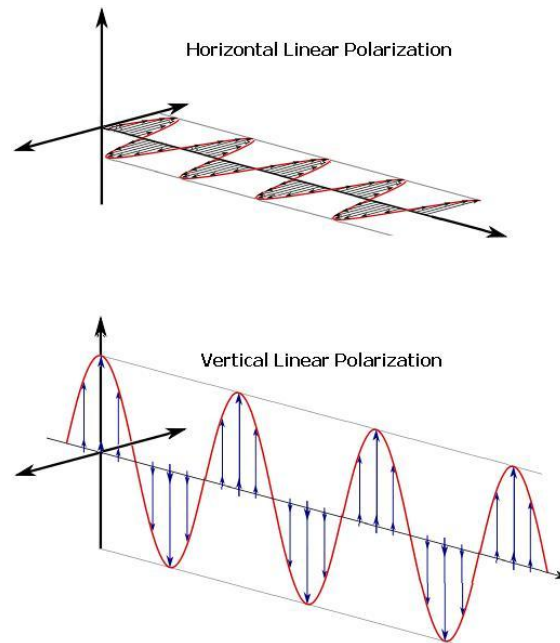
Figure III-1: Différents types de polarisation [42]

- **Polarisation linéaire :**

La polarisation linéaire est obtenue uniquement lorsque le champ électrique garde sa direction dans le temps. Le vecteur champ électrique oscille dans un plan fixe. Cette condition est satisfaite lorsque la différence de phase  $\Delta\varphi = \varphi_y - \varphi_x = n\pi$ .

Il existe deux types de polarisation linéaire :

- **Polarisation Linéaire Verticale**
- **Polarisation Linéaire Horizontale.**



*Figure III-2: Types de polarisation linéaire [43]*

- **Polarisation Circulaire :**

La polarisation est dite circulaire si l'extrémité du vecteur champ électrique en un point de l'espace décrit un cercle lorsque les ondes se propagent. Le vecteur champ électrique tourne avec une amplitude constante. Cette condition requiert  $|E_{0x}| = |E_{0y}|$  et  $\Delta\varphi = \pm\pi/2$ .

Elle contient deux types de CP RHCP et LHCP.

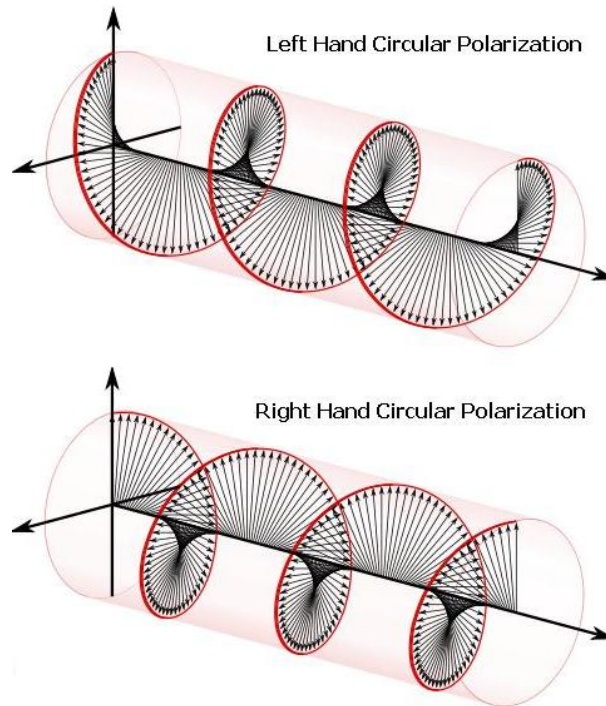


Figure III-3: Polarisation et la direction de propagation RHCP et LHCP [43]

- **Polarisation Elliptique :**

On dit qu'est polarisée elliptiquement si la pointe du vecteur de champ électrique trace un lieu elliptique dans l'espace.

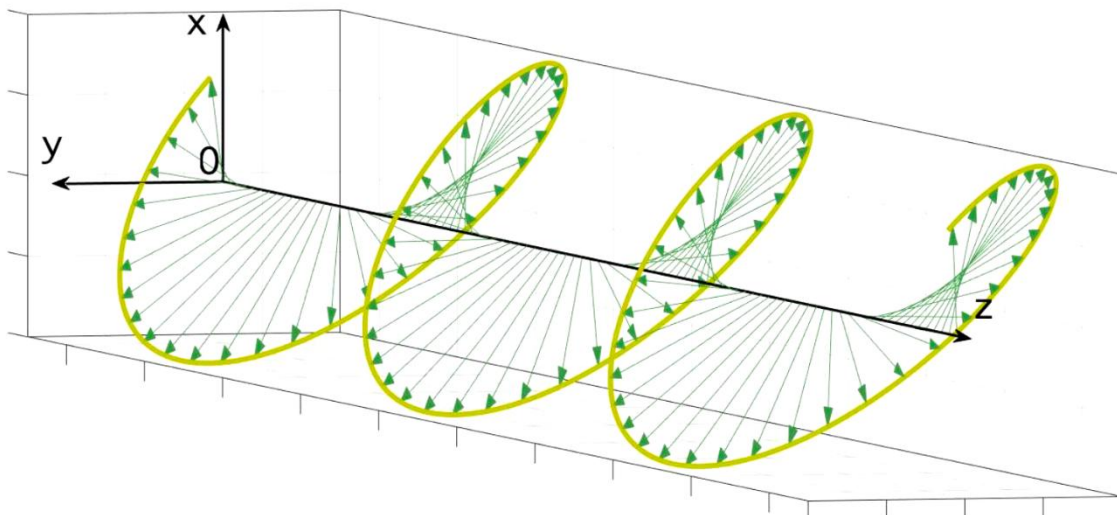


Figure III-4: Polarisation Elliptique [44]

Une antenne reconfigurable en polarisation elliptique est un système rayonnant électromagnétique sophistiqué capable de modifier dynamiquement et continûment les paramètres géométriques et temporels de son ellipse de polarisation par l'activation contrôlée d'éléments actifs intégrés dans sa structure, permettant ainsi l'adaptation en temps réel de

## Chapitre III Conception et Simulation d'une Antenne Imprimée Reconfigurable en Polarisation

---

l'orientation angulaire, du rapport axial, du sens de rotation et de l'ellipticité du vecteur champ électrique selon les conditions de propagation et les exigences de performance de la liaison radiofréquence.

L'état de polarisation elliptique est défini par l'équation paramétrique du champ électrique dans le plan transverse à la propagation :

$$E_x(t) = E_0x \cos(\omega t + \varphi_x) \quad (\text{Équation III-1})$$

$$E_y(t) = E_0y \cos(\omega t + \varphi_y) \quad (\text{Équation III-2})$$

où :

- $E_0x, E_0y$  : Amplitudes des composantes orthogonales
- $\varphi_x, \varphi_y$  : Phases respectives des composantes
- $\Delta\varphi = \varphi_y - \varphi_x$  : Déphasage relatif

Le principe de fonctionnement repose sur la décomposition orthogonale du champ électrique et le contrôle indépendant des composantes  $E_x$  et  $E_y$ . L'antenne comprend généralement :

- **Élément rayonnant principal** : Structure de base (patch, dipôle, fente)
- **Réseau d'alimentation reconfigurable** : Contrôle des amplitudes et phases
- **Éléments de commutation** : Diodes PIN, varactors, MEMS
- **Circuit de contrôle** : Génération des signaux de commande
- **Réseau de polarisation DC** : Alimentation des éléments actifs

Pour cette étude, la reconfigurabilité en polarisation est simulée à l'aide des diodes PIN.

- **Commutation par diode PIN** :

Cette technique utilise des diodes PIN comme éléments de commutation pour modifier les chemins de courant dans la structure de l'antenne. Les diodes PIN présentent une faible résistance en polarisation directe (état ON) et une forte impédance en polarisation inverse (état OFF), permettant de contrôler électriquement la géométrie effective de l'antenne.

Un exemple d'antenne reconfigurable en polarisation, utilisant des diodes PIN, est proposé dans[45]. Cette antenne est composée d'un patch circulaire alimenté par une ligne micro-ruban de 50  $\Omega$ . Pour changer le mode de polarisation de l'antenne, deux diodes PIN sont insérées, près du bord de la fente, permettant ainsi d'obtenir deux états en polarisation linéaire (Horizontale et verticale) et deux états en polarisation circulaire, droite et gauche. Sur la ligne d'alimentation, trois stubs commutables sont utilisés pour maintenir l'adaptation en fonction des états de polarisation.

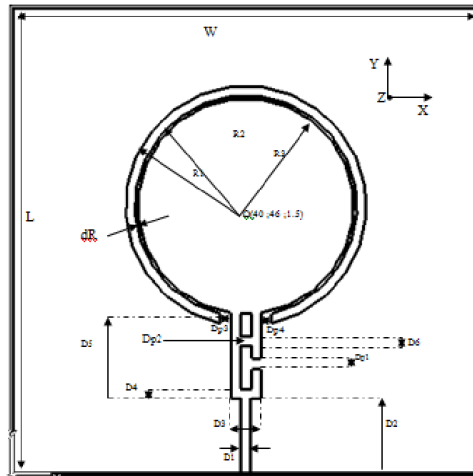


Figure III-5: Géométrie d'antenne reconfigurable en polarisation en utilisant diodes PIN

On peut simuler antenne reconfigurable en polarisation par d'autre méthode, parmi eux :

- **Reconfiguration par multi-feed** : les deux points excitent deux modes orthogonaux avec la même pondération en amplitude compte tenu de la symétrie de l'élément rayonnant, avec un contrôle de la phase entre les signaux.
- **Reconfiguration par des fentes ou structure asymétrique** : La polarisation peut être ajustée en intégrant des fentes sur le patch ou le plan de masse. L'activation de ces fentes modifie la distribution du courant et donc la polarisation.

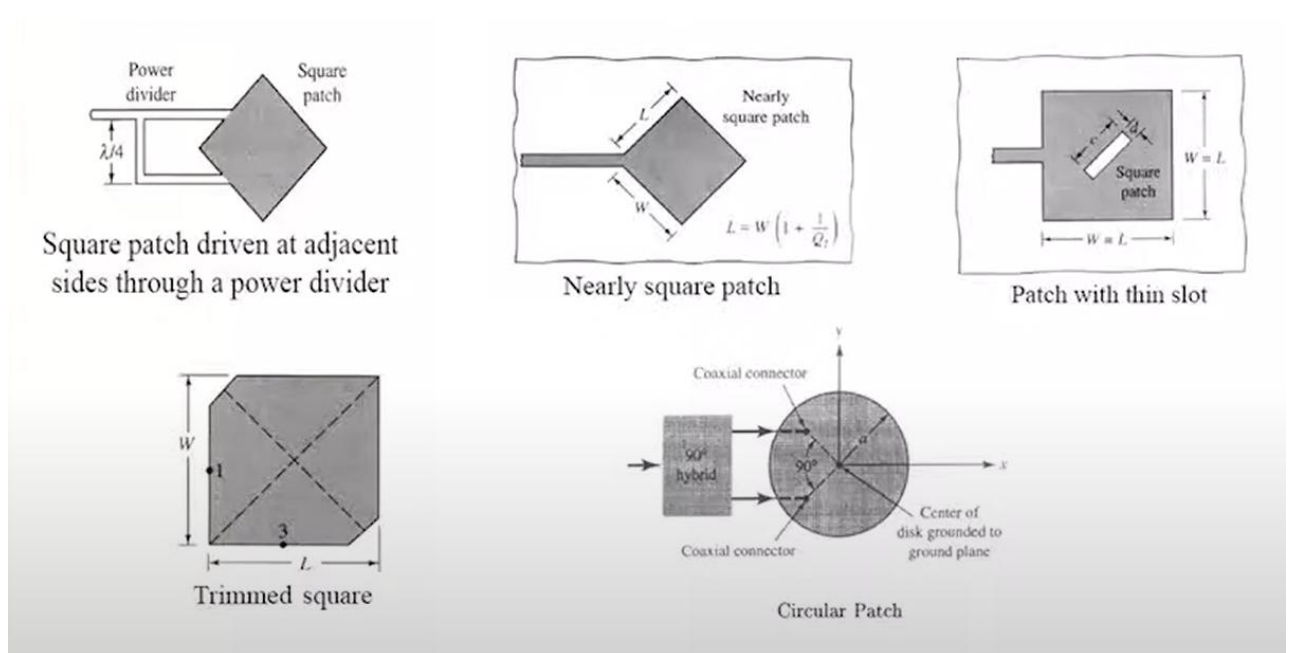


Figure III-6: Différents techniques de polarisation [46]

### III.2.1 Rapport axial en fonction de la fréquence :

Le rapport axial est un paramètre très important qui aide à quantifier la polarisation d'une antenne. Le rapport axial d'une onde elliptiquement polarisée, est la relation entre le grand et le petit axe de l'ellipse [47] :

$$AR = \frac{OA}{OB} \quad \text{avec } 1 \leq AR \leq \infty \quad (\text{Équation III-3})$$

Pour une antenne qui a une polarisation purement linéaire, le rapport axial tend vers l'infini car l'une des composantes du champ électrique est nulle.

Pour les antennes qui ont une polarisation circulaire parfaite, le rapport axial est entre 0 à 3 dB.

### III.3 Simulation d'antenne reconfigurable en polarisation :

Cette partie est réservée à simuler une antenne reconfigurable en polarisation circulaire RHCP et LHCP à l'aide des diodes PIN Microsemi MPP4203 avec deux états ON et OFF.

- **Etat ON** : ou  $R_s = 3.5 \Omega$ ,  $L_s = 0.45 \text{ nH}$  en série.
- **Etat OFF** :  $C_t = 0.08 \text{ pF}$ ,  $R_t = 3 \text{ k}\Omega$  en parallèle avec  $L_t = 0.45 \text{ nH}$  en série.

Cette antenne fonctionne dans différentes fréquences 2.5 GHz et 3.3 GHz pour les applications WLAN et WiMax et IoT.

#### III.3.1 Géométrie de l'antenne :

Le patch présenté dans [48], est imprimé sur un substrat Rogers RT5880 avec une constante diélectrique de 2,2 et de tangente de perte 0.0009 et une épaisseur de 1,57 mm. Le plan de masse est composé d'un matériau en cuivre de 0,035 mm d'épaisseur, d'une longueur de 70 mm et d'une largeur de 55 mm.

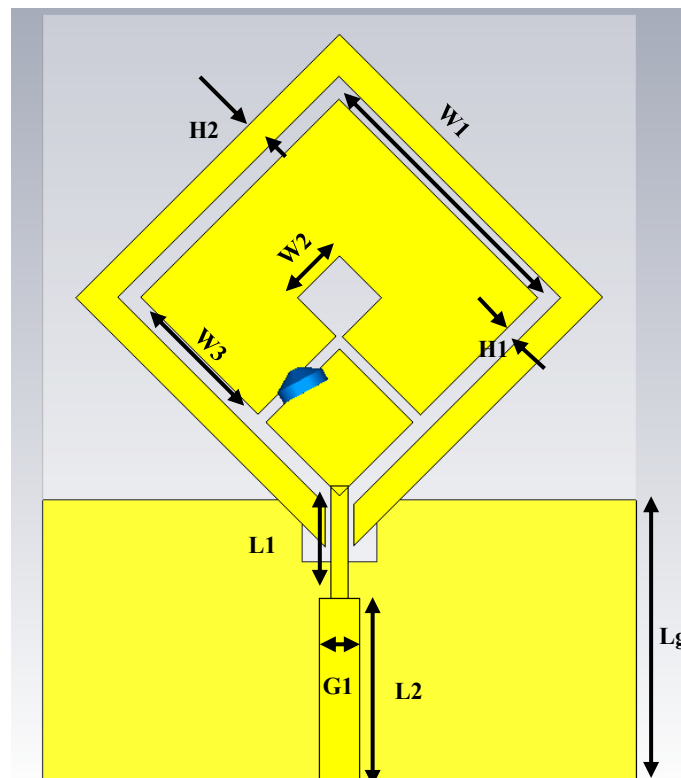


Figure III-7: Géométrie de l'antenne simulée

## Chapitre III Conception et Simulation d'une Antenne Imprimée Reconfigurable en Polarisation

Les dimensions de cette antenne sont présentées dans le tableau suivant :

Paramètres	Valeurs (mm)
Ws	55
Ls	70
W1	26
W2	5.5
W3	15.35
L1	10.4
L2	16.9
Lg	26
Wn	7
Ln	1
G1	3.8
G2	1.6
D	1
H1	1.5
H2	2.75

Tableau III-1: Dimensions de l'antenne simulée

### III.3.2 Résultats de simulation :

- Coefficient de Réflexion :

La *Figure III-8* représente le coefficient de réflexion de l'antenne simulée à Step 4 d'après l'article [48].

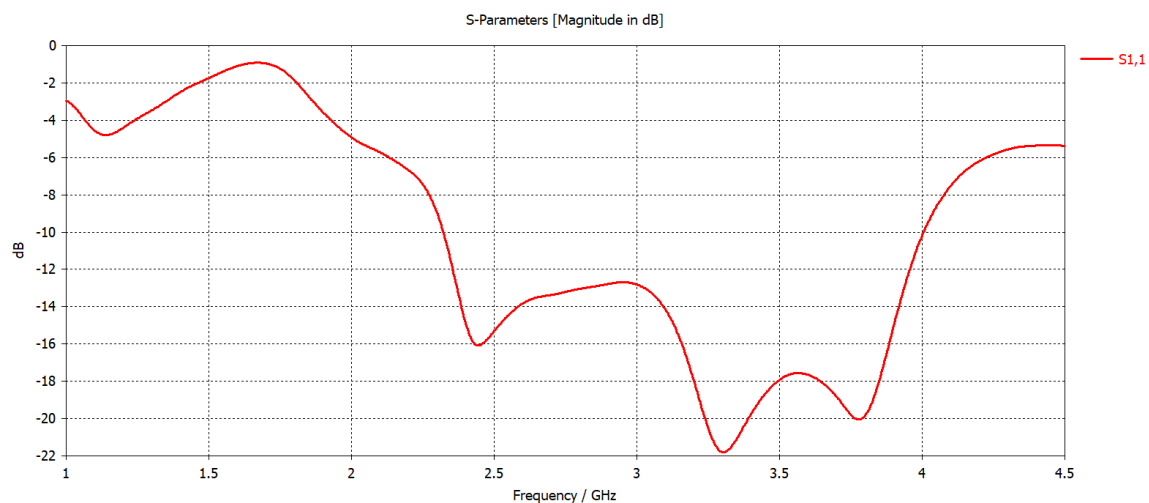


Figure III-8: Coefficient de réflexion de l'antenne simulée

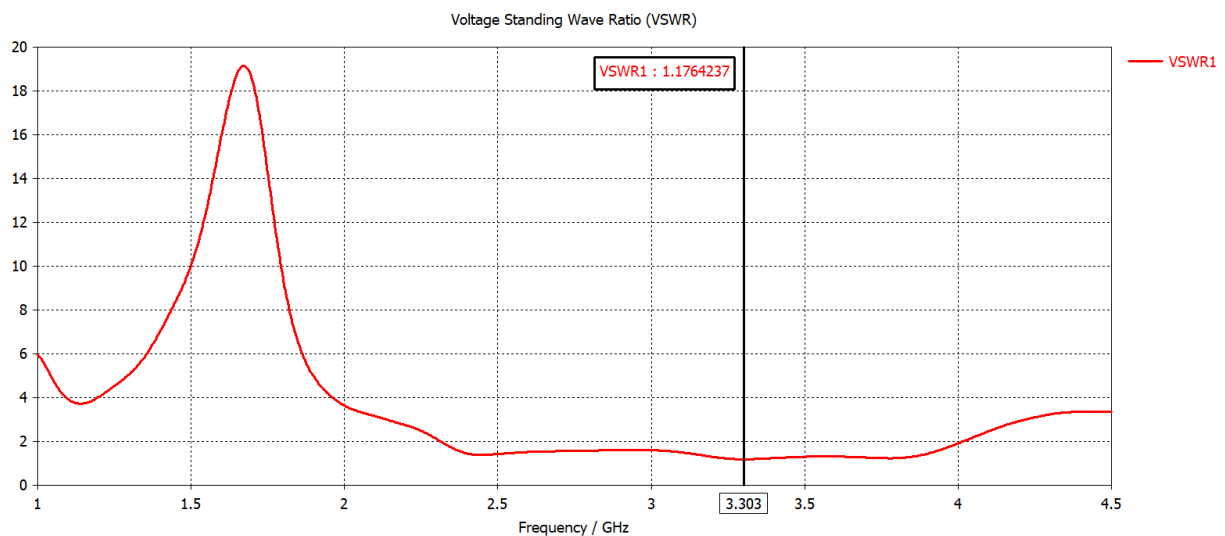
## Chapitre III Conception et Simulation d'une Antenne Imprimée Reconfigurable en Polarisation

On observe que l'antenne a une bonne adaptation vers la fréquence 3.3 GHz avec un S1,1 de -21.8 dB. Il convient de noter que l'antenne a atteint une bande passante de 1.678 GHz. Cette antenne est dirigée vers plusieurs applications telles que : Wi-Fi, IoT, WLAN, WiMax.

- **Rapport d'onde stationnaire VSWR :**

La *Figure III-9* représente le rapport d'onde stationnaire de l'antenne simulée.

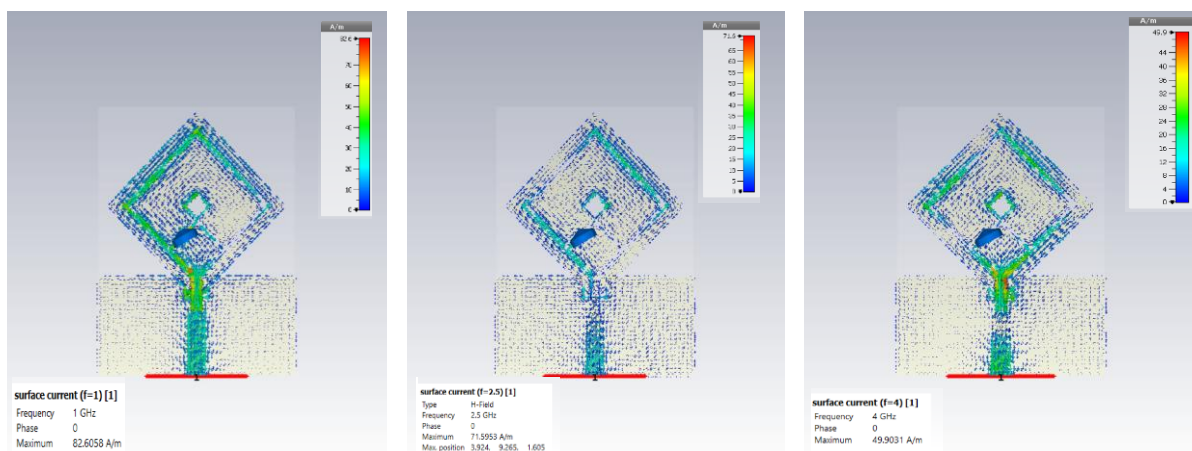
La représentation du rapport d'onde stationnaire en fonction de la fréquence montre que l'antenne est bien adaptée à la fréquence 3.3 GHz, le VSWR est inférieur à 2 à cette fréquence.



*Figure III-9: Rapport d'onde stationnaire d'antenne simulée*

- **Distribution de courant :**

La *Figure III-10* montre la distribution de courant de l'antenne pour une polarisation LHCP :

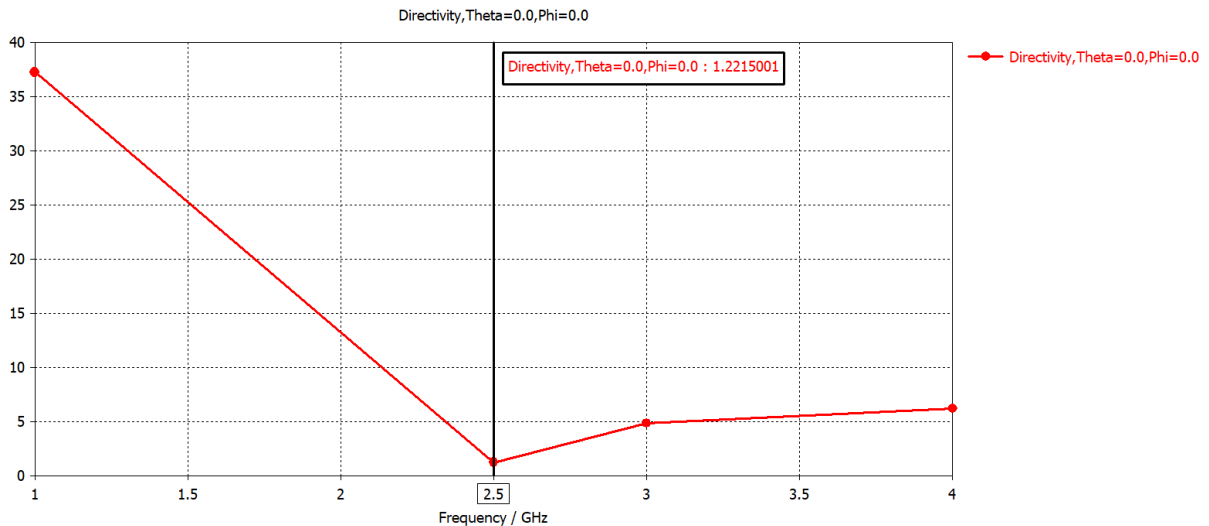


*Figure III-10: Distribution de courant des fréquences 1, 2,5 et 4 GHz pour polarisation LHCP*

- **Rapport Axial :**

La *Figure III-11* représente le rapport axial de l'antenne simulée en fonction de fréquence.

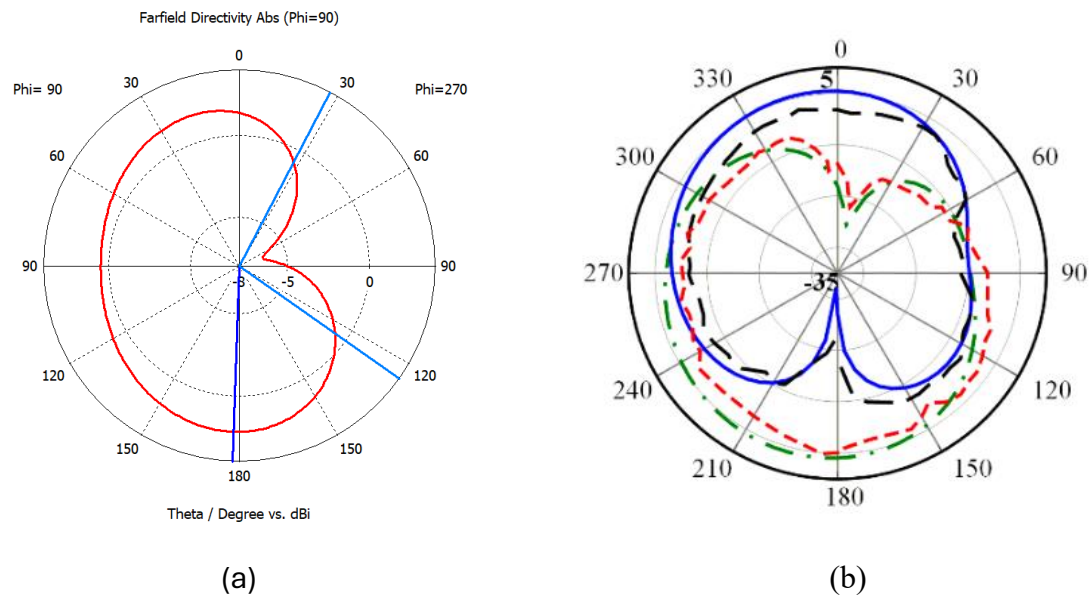
La polarisation circulaire est présentée avec un AR en fonction de fréquence inférieur de 3 à partir de 2.4256 GHz à 2.7456 GHz, ce qui la rend applicable pour Wi-Fi, IoT et 5G dans les bandes moyennes.



*Figure III-11: Rapport Axial de l'antenne simulée*

- **Diagramme de rayonnement :**

La *Figure III-12* représente le diagramme de rayonnement à  $\theta = 90^\circ$  de l'antenne simulée avec une polarisation LHCP pour la fréquence 2.5 GHz :



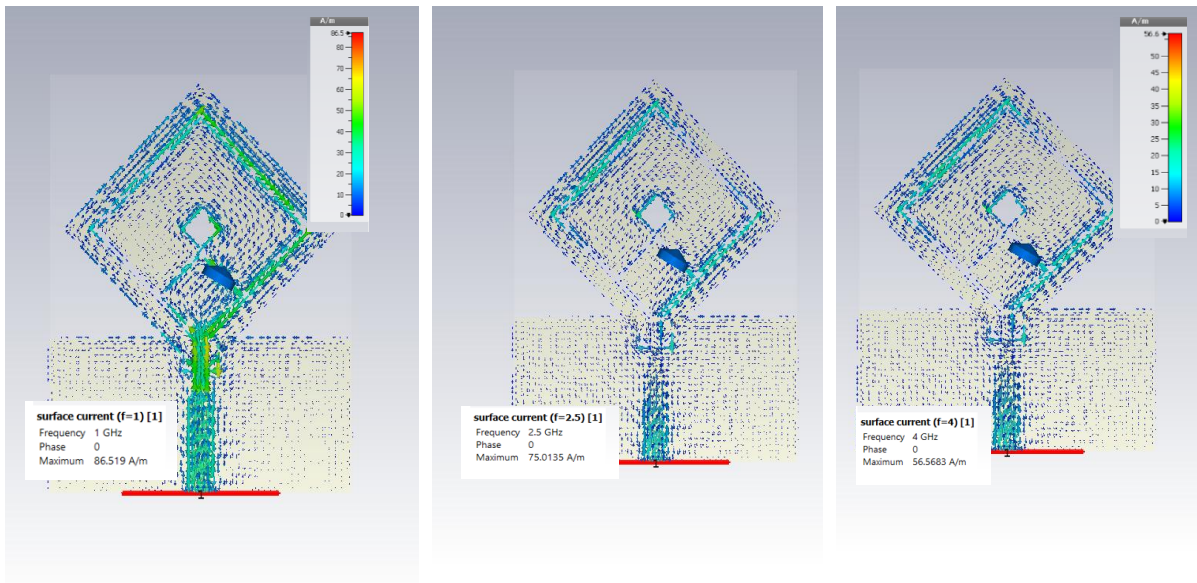
*Figure III-12: Diagramme de rayonnement de l'antenne à 2.5 GHz : (a) simulée, (b) résultat d'après l'article*

### Chapitre III Conception et Simulation d'une Antenne Imprimée Reconfigurable en Polarisation

On obtient ces résultats, quand D1 a l'état ON et diode D2 a l'état OFF. Pour changer la direction de champs électrique, on doit changer l'état des diodes ce qui rend D1 a l'état OFF et D2 a l'état ON.

- **Distribution de courant :**

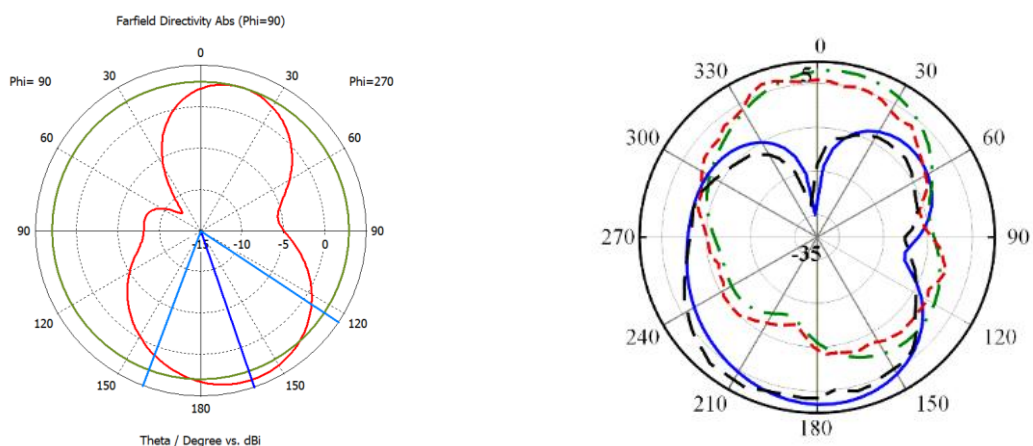
La *Figure III-13* montre la distribution de courant de l'antenne pour une polarisation RHCP :



*Figure III-13: Distribution de courant des fréquence 1, 2,5 et 4 GHz pour polarisation RHCP*

- **Diagramme de rayonnement :**

La figure suivante représente le diagramme de rayonnement de l'antenne simulée avec une polarisation RHCP pour la fréquence 3 GHz :



*Figure III-14: Diagramme de rayonnement de l'antenne à 2.5 GHz : simulée vs résultat d'après l'article*

### **III.4 Conclusion :**

Dans ce chapitre nous avons présenté les résultats de simulation et de réalisation d'une antenne triangulaire reconfigurable en polarisation en utilisant le simulateur CST.

Dans la première partie, une petite généralité a été donnée sur la polarisation et les antennes reconfigurables en polarisation avec leurs techniques de reconfigurabilité. Dans la dernière partie on a procédé à la simulation d'une antenne reconfigurable en polarisation RHCP et LHCP, indiquant les majeures différences entre les deux modes.

## *Conclusion Générale :*

Ce mémoire a exploré la conception d'antennes reconfigurables comme élément permettant le fondement des réseaux 5G et IoT. Ceci, démontre leur capacité à harmoniser les performances et l'adaptabilité de ces systèmes de télécommunications, et aussi de mettre en évidence la dualité des besoins : La 5G nécessite une agilité spectrale pour les applications consommatrices en données, tandis que l'IoT impose un minimalisme énergétique et une solidité dans des environnements hétérogènes. Ces exigences trouvent une réponse cohérente dans les architectures reconfigurables, capables de s'adapter aux contraintes en temps réel.

Notre étude des antennes reconfigurables en fréquence a démontré le potentiel considérable de cette approche pour répondre aux besoins de flexibilité spectrale des systèmes modernes. Les techniques de reconfiguration fréquentielle, qu'elles reposent sur des composants électroniques actifs, des matériaux à propriétés variables ou des architectures géométriques adaptatives, offrent des possibilités remarquables d'optimisation de l'utilisation du spectre radioélectrique. La simulation numérique que nous avons réalisée a validé la faisabilité technique de ces concepts.

L'exploration des antennes reconfigurables en polarisation a révélé aussi une dimension complémentaire de la reconfigurabilité, particulièrement pertinente pour les environnements de propagation complexes tels que le déploiement des réseaux 5G et IoT. La capacité d'adapter dynamiquement la polarisation de l'antenne en fonction des conditions de liaison ouvre des perspectives nouvelles pour l'amélioration de la robustesse et de l'efficacité des communications sans fil. Notre travail de simulation a assuré que ces techniques peuvent apporter des gains significatifs en termes de performances de liaison.

A travers les différentes simulations, la reconfigurabilité en fréquence, des antennes étudiées a atteint un ROS inférieur à 2 sur les bandes 2,4 GHz et 28 GHz. Ces résultats, obtenus via l'intégration de commutateurs PIN, illustrent comment une seule antenne peut remplacer plusieurs dispositifs, réduisant l'encombrement et les coûts matériels. Dans le domaine de la polarisation, nous avons validé par simulation une structure d'antenne avec double polarisation droite et gauche, avec un rapport axial inférieur à 3. Les résultats de simulation obtenus par le logiciel CST ont montré que l'ensemble des antennes simulées et conçues présentent de bonnes performances.

Les résultats obtenus sont très satisfaisants et ouvrent des perspectives de développement et d'amélioration de conception de nouvelles antennes qui peuvent répondre aux nouvelles exigences de développement des systèmes de télécommunications.

## Bibliographie :

- [1] A. Gupta et R. K. Jha, « A Survey of 5G Network: Architecture and Emerging Technologies », *IEEE Access*, vol. 3, p. 1206-1232, 2015, doi: 10.1109/ACCESS.2015.2461602.
- [2] « Motivation | MyWave ». Consulté le: 25 mai 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://mywave-project.eu/motivation/>
- [3] « The first non-cellular 5G standard: DECT NR+ - 5G Technology World ». Consulté le: 25 mai 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.5gtechnologyworld.com/the-first-non-cellular-5g-standard-dect-nr/>
- [4] « What Is Massive MIMO Technology? » Consulté le: 11 mars 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://5g.co.uk/guides/what-is-massive-mimo-technology/>
- [5] « Quelles sont les conséquences de la 5G sur l'environnement ? », Ariase. Consulté le: 11 mars 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.ariase.com/mobile/dossiers/5g-environnement>
- [6] « L'évolution des réseaux mobiles 5G, Livre blanc , EXFO, 2021 ». Consulté le: 26 février 2025. [En ligne]. Disponible sur: [https://www.exfo.com/contentassets/331b8bd3b1c442718e03927c77204338/exfo\\_wpaper130\\_v3\\_fr.pdf](https://www.exfo.com/contentassets/331b8bd3b1c442718e03927c77204338/exfo_wpaper130_v3_fr.pdf)
- [7] « The 5G Core Network Demystified | Dell Technologies Info Hub ». Consulté le: 25 mai 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://infohub.delltechnologies.com/fr-fr/p/the-5g-core-network-demystified/>
- [8] S. Wijethilaka et M. Liyanage, « Survey on Network Slicing for Internet of Things Realization in 5G Networks », *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. PP, mars 2021, doi: 10.1109/COMST.2021.3067807.
- [9] « What is 5G network slicing | EXFO ». Consulté le: 25 mai 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.exfo.com/en/resources/blog/what-is-5g-network-slicing/>
- [10] « La 5G », Arcep. Consulté le: 26 février 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.arcep.fr/la-regulation/grands-dossiers-reseaux-mobiles/la-5g.html>
- [11] « 5G : Pour qui ? Pour quoi ? Et pour quand ? | Inria ». Consulté le: 26 février 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.inria.fr/fr/5G-reseau-mobiles-IoT>
- [12] J. Lausson, « 5G : une toute nouvelle bande de fréquences sera bientôt réservée aux opérateurs », Numerama. Consulté le: 25 mai 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.numerama.com/tech/525705-5g-une-toute-nouvelle-bande-de-frequences-sera-bientot-reservee-aux-operateurs.html>
- [13] « Taking Advantage Of Outsourced Test Services ». Consulté le: 25 mai 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://semiengineering.com/taking-advantage-of-outsourced-test-services/>

- [14] M. Attaran, « The impact of 5G on the evolution of intelligent automation and industry digitization », *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, vol. 14, p. 5977-5993, févr. 2021, doi: 10.1007/s12652-020-02521-x.
- [15] H. T. FRIISt, « A Note. on a Simple Transmission Formula » , *Proceedings of the IRE*, vol. 34, no 5, p. 254-256, mai 1946.
- [16] « 5G Vision and Requirements for Next Generation Mobile Systems ». Consulté le: 11 mars 2025. [En ligne]. Disponible sur: [https://www.awtg.co.uk/wp-content/uploads/2021/10/WP\\_5G-Vision-and-Requirements-for-Next-Generation-Mobile-Systems.pdf](https://www.awtg.co.uk/wp-content/uploads/2021/10/WP_5G-Vision-and-Requirements-for-Next-Generation-Mobile-Systems.pdf)
- [17] R. and Markets, « Unlocking the Future of Mobile Communication: Exploring 5G Small Cells and Backhaul Solutions », *GlobeNewswire News Room*, November 10, 2023. Consulté le: 25 mai 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.globenewswire.com/news-release/2023/11/10/2778145/28124/en/Unlocking-the-Future-of-Mobile-Communication-Exploring-5G-Small-Cells-and-Backhaul-Solutions.html>
- [18] « Samsung Shares Massive MIMO Roadmap in New Whitepaper | Samsung Business Global Networks », *Samsung global\_nw*. Consulté le: 25 mai 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.samsung.com/global/business/networks/insights/press-release/1209-samsung-shares-massive-mimo-roadmap-in-new-whitepaper/>
- [19] S. Souai, « Réseaux d’antennes miniatures super-directifs reconfigurables basses fréquences pour l’IoT », mémoire de doctorat, Université de Tunis El-Manar, 2021.
- [20] « Medical technology Vectors, Clipart & Illustrations for Free Download - illustAC ». Consulté le: 21 juin 2025. [En ligne]. Disponible sur: [https://en.ac-illust.com/search/medical-technology?is\\_tag=true](https://en.ac-illust.com/search/medical-technology?is_tag=true)
- [21] Z. H. Ali, « Internet of Things (IoT): Definitions, Challenges and Recent Research Directions », *International Journal of Computer Applications*, vol. 128, 2023.
- [22] A. Gerodimos, L. Maglaras, M. A. Ferrag, N. Ayres, et I. Kantzavelou, « IoT: Communication protocols and security threats », *Internet of Things and Cyber-Physical Systems*, vol. 3, p. 1-13, 2023, doi: 10.1016/j.ioteps.2022.12.003.
- [23] M. Hassan et J. Li, « Demonstration of cyber security through Penetration testing on IP camera », févr. 2023, Article, Teesside University Middlesbrough, England.
- [24] A. Kumar, M. Aghwariya, et V. Singh, « Applications of Microstrip Antenna in IoT », 2022, p. 259-266. doi: 10.1007/978-3-030-76636-8\_20.
- [25] D. AMEZIANE, « Etude\_et\_Optimisation\_d’Antennes\_Fractales\_Plaquees. » , Mémoire de Magister de Télécommunications, UNIVERSITE ABOU-BEKR BELKAID-TLEMCEM, 2009.
- [26] Y. Braham Chaouche, « Conception d’Antennes Planaires Reconfigurables pour Opération Large Bande et Multi-Bande », 2019. doi: 10.13140/RG.2.2.33568.92163.
- [27] « Antenna Polarisation ». Consulté le: 25 mai 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.electronicsforu.com/technology-trends/learn-electronics/antenna-polarisation>

- [28] H. Chorfi, « Conception d'un nouveau système d'antenne réseau conforme en onde millimétrique », Mémoire comme exigence partielle de la maîtrise en ingénierie, UNIVERSITÉ DU QUÉBEC EN ABITIBI-TÉMISCAMINGUE, 2012.
- [29] S. Hage-Ali, « Ultrasoft reconfigurable millimeter-wave antennas and devices based on Magneto-Electro-Mechanical Microsystems (MMEMS): design, fabrication, measurements », thèse, ECOLE CENTRALE DE LILLE sept. 2011.
- [30] Z. GHANEMI , « Etude et conception d'antenne reconfigurable en fréquence pour le standard 5G », Mémoire de Master, Université Aboubakr Belkaïd– Tlemcen, 2021.
- [31] B. Maroua, « Antenne reconfigurable à base de Méta-matériaux », Mémoire de Master, Université SAAD DAHLAB de BLIDA, 2020.
- [32] G. L. BENDERRADJI. Houria Mihad et CHEBBARA .Fouad, « Étude D'une Antenne Microbande Rectangulaire Avec Une Couche Protectrice », Mémoire de Master, Université Kasdi Merbah OUARGLA, 2019.
- [33] D. GHERBI, « Etude et conception d'une antenne reconfigurable en utilisant des composants actifs », Mémoire de Master, Université 8 Mai 1945 Guelma, 2023.
- [34] Bentouati , Boublenza , « Etude et conception d'antenne MIMO pour les systèmes de communication 5G », Mémoire de Master, Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen, 2022.
- [35] « Reconfigurable Antennas for Wireless & Space Applications: Techniques & Trends - Studocu ». Consulté le: 25 mai 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.studocu.com/row/document/universite-des-sciences-et-de-la-technologie-houari-boumediene/propagation-dondes-et-antennes/reconfigurable-antennas-for-wireless-space-applications-techniques-trends/123471639>
- [36] Y. Braham Chaouche, I. Messaoudene, I. Benmabrouk, M. Nedit, et F. Bouttout, « Compact coplanar waveguide-fed reconfigurable fractal antenna for switchable multiband systems », *IET Microwaves Antennas & Propagation*, nov. 2018, doi: 10.1049/iet-map.2018.5005.
- [37] M. CHOUBANE, « Etude et Conception d'une antenne reconfigurable en fréquence et en diagramme de rayonnement », Mémoire de Master, Université 8 Mai 1945 Guelma, 2021.
- [38] S. E. Bayer Keskin, S. Koziel, et S. Szczepanski, « Frequency reconfigurable PIN diode-based Reuleaux-triangle-shaped monopole antenna for UWB/Ku band applications », *Sci Rep*, vol. 15, n° 1, p. 6555, févr. 2025, doi: 10.1038/s41598-025-91108-7.
- [39] Y. Chen *et al.*, « An L-Slot Frequency Reconfigurable Antenna Based on MEMS Technology », *Micromachines*, vol. 14, n° 10, Art. n° 10, oct. 2023, doi: 10.3390/mi14101945.
- [40] A. Mansoul, « Conception et réalisation d'antennes reconfigurables en fréquence », Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Polytechnique, 2016.
- [41] D. E. Hadri, A. Zakriti, et A. Zugari, « Reconfigurable Antenna for Wi-Fi and 5G Applications », *Procedia Manufacturing*, vol. 46, p. 793-799, 2020, doi: 10.1016/j.promfg.2020.04.007.

- [42] I. Schiessl et W. Wang, « Independent components of the haemodynamic response in intrinsic optical imaging », *NeuroImage*, vol. 39, p. 634-46, févr. 2008, doi: 10.1016/j.neuroimage.2007.09.022.
- [43] truong ba Luu, « Organisation tri-dimensionnelle des cellules myocardiques au cours du développement ventriculaire foetal et postnatal », Thèse de Doctorat, Université Grenoble Alpes, 2017.
- [44] « Simulations du phénomène de polarisation — Culture Sciences Physique ». Consulté le: 25 mai 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://culturesciencesphysique.ens-lyon.fr/ressource/simul-polarisation.xml>
- [45] Y. Karfabekali et M. Essaaidi, « A Novel Circular Microstrip Antenna with Reconfigurable Frequency Capability », PDF, e-ISSN: 2278-2834,p- ISSN: 2278-8735.Volume 11, Issue 2, Ver. I (Mar-Apr .2016), PP 52-59.
- [46] « PPT - Microstrip Antennas PowerPoint Presentation, free download - ID:6675421 ». Consulté le: 21 juin 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.slideserve.com/galvin-middleton/microstrip-antennas>
- [47] R. Guenineche et F. Krifif, « Conception d’antennes à polarisation circulaire CP », Mémoire de Master, Université Aboubakr Belkaïd– Tlemcen, 2022.
- [48] T. Lê, H.-Y. Park, et T.-Y. Yun, « Simple Reconfigurable Circularly Polarized Antenna at Three Bands », *Sensors*, vol. 19, p. 2316, mai 2019, doi: 10.3390/s19102316.