الجـــــــــــــــــــمـهـوريـــــة الجـــــــــــــزائـريـة الديمـــــــقـراطيـة الـشـــــــــعبيـة

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التـــــــــــــــــــــــــعـليـم العـــــــالي والبـــــــــحث العـــلـمـــي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جـــــــــــــامعة أبي بكـــر بـلـقـايد – تـلمســـــــــــــان –

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE

MEMOIRE

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

En : TÉLÉCOMMUNICATIONS

Spécialité : Systèmes des Télécommunications

Par : AZEDOUZ MOHAMMED REDA

Sujet

Conception d'Antennes Reconfigurables Compactes pour l'Internet des Objets Médicaux (IoMT) dans un Environnement Radio Cognitif.

Soutenu publiquement, le **15 / 06 / 2026**, devant le jury composé de :

Mme. BENOSMAN Hayat	MCA	Université de Tlemcen	Présidente
Mme. SELADJI Nawel	MCB	Université de Tlemcen	Examinatrice
Mme. BOUSALAH Fayza	MCA	Université de Tlemcen	Encadrante
M.BABA-AHMED Mohammed Zakarya	Professeur	Université de Tlemcen	Co-encadrant

Année universitaire : 2025/2026

Remerciement

Je rends grâce à ALLAH le Tout-Puissant pour m'avoir guidé et soutenu tout au long de ce parcours, et pour m'avoir donné la volonté, la patience et le courage nécessaires pour mener ce modeste travail à bout.

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements et ma profonde gratitude à Madame BOUSALAH Fayza, Maître de conférences classe A, pour avoir accepté de diriger ce travail. Votre disponibilité sans faille, vos encouragements constants, votre rigueur scientifique et votre bienveillance ont été pour moi une source d'inspiration inestimable. Vos précieux conseils et votre encadrement attentif ont grandement contribué à l'aboutissement de ce mémoire. Je vous exprime toute ma reconnaissance et mon profond respect.

Mes remerciements les plus vifs et ma sincère gratitude s'adressent à Monsieur BABA-AHMED Mohammed Zakarya, Professeur à Tlemcen, mon Co-encadreur Votre expertise reconnue, vos orientations pertinentes et votre soutien constant ont été essentiels à la réalisation de ce travail. Votre générosité dans le partage du savoir et votre disponibilité aux moments les plus critiques ont joué un rôle déterminant dans la réussite de ce mémoire. Je vous en suis sincèrement reconnaissante.

Je remercie vivement Madame BENOSMAN Hayat, Maître de conférences classe A à l'université de Tlemcen, pour l'honneur qu'elle m'a fait en présidant le jury de ce travail.

Mes remerciements les plus sincères vont également à Madame SELADJI Nawel, , Maître de conférences classe B pour avoir accepté d'examiner ce travail. Je lui exprime toute ma reconnaissance et mon profond respect.

J'adresse mes sincères remerciements à Mademoiselle TALEB Rahma Djaouda, Docteure à Tlemcen, ainsi qu'à Mademoiselle BELLAHCENE Hayat, diplômée de la promotion précédente, pour leur aide précieuse, leur disponibilité et leur contribution à la réalisation de ce travail

Dédicace

À mon père, que Dieu ait son âme

Tu es parti avant de voir ce jour, mais je sais que de là-haut, tu me regardes avec fierté. Chaque fois que je me suis retrouvé face à une difficulté, c'est ton souvenir qui m'a redonné la force de continuer. Que de fois j'ai souhaité que tu sois là, assis à mes côtés, pour voir le fruit de mes efforts. Tu me manques à chaque instant, à chaque succès, à chaque moment où j'aurais voulu entendre ta voix et sentir ta présence. Ce diplôme, je l'aurais voulu dans tes mains avant les miennes. Repose en paix, papa, ce travail est avant tout le tien.

À ma mère, mon héroïne

Les mots sont trop faibles pour exprimer ce que tu représentes pour moi. Tu as porté seule un fardeau qui aurait brisé bien des gens, mais tu as tenu debout avec une force et une dignité admirables. Tu as été à la fois ma mère et mon père, tu m'as donné l'amour de deux parents en même temps, sans jamais te plaindre, sans jamais fléchir. Chaque sacrifice que tu as consenti, chaque nuit que tu as passée à veiller, chaque larme que tu as retenue pour ne pas me peiner, tout cela a contribué à faire de moi ce que je suis aujourd'hui. Si je suis arrivé jusqu'ici, c'est uniquement grâce à toi. Ce diplôme est ta récompense avant d'être la mienne.

À mes très chères sœurs et leurs chers enfants

Votre amour et votre soutien ont illuminé mon chemin tout au long de ce parcours. Et à ces petits anges qui ont apporté la joie et la bonne humeur dans notre foyer, votre innocence et vos sourires ont été pour moi une source de bonheur et d'énergie incomparable.

À mes grands-parents

Votre tendresse et votre bienveillance m'ont entouré d'une chaleur incomparable. Vous avez toujours été pour moi bien plus que des grands-parents.

À mon oncle

Tu as toujours été présent à chaque étape de ma vie, offrant ton aide et tes conseils sans jamais hésiter. Je te dois une grande part de ce que je suis aujourd'hui.

À mon autre oncle, mes tantes et toute la famille

Je remercie Allah pour la bénédiction que représente votre présence dans ma vie. Votre affection sincère et vos encouragements discrets ont été pour moi un soutien moral précieux tout au long de ce parcours.

À mes amis

À chacun d'entre vous selon sa place dans ma vie et dans mon cœur. Vous avez partagé avec moi les moments de joie et de difficulté, les longues nuits de révision et les instants de doute. Votre présence, vos encouragements et votre amitié sincère ont rendu ce parcours bien plus léger et inoubliable. Je vous dédie ce travail en témoignage de mon amour et de ma fidélité.

Résumé

L'intégration croissante des technologies sans fil dans le domaine médical nécessite le développement de solutions de communication performantes, compactes et capables de s'adapter aux contraintes d'un environnement radio en constante évolution. Dans ce contexte, ce projet de fin d'études porte sur la conception et la simulation d'une antenne patch reconfigurable compacte destinée aux applications de l'Internet des Objets Médicaux (IoMT) dans un environnement de radio cognitive.

L'objectif principal est de développer une antenne multi-bande fonctionnant sur les fréquences de 2,4 GHz, 5,8 GHz et la bande X, tout en offrant une reconfigurabilité fréquentielle grâce à l'intégration de diodes varactors. Une étude comparative de différents substrats a également été menée afin d'identifier la solution la plus adaptée aux exigences des dispositifs médicaux connectés.

Les simulations réalisées sous CST Studio Suite ont permis d'évaluer les performances de l'antenne en termes d'adaptation, de bande passante, de gain et de diagramme de rayonnement. Les résultats obtenus montrent que la structure proposée constitue une solution prometteuse pour les futures applications IoMT reposant sur une gestion intelligente et efficace du spectre radio.

Mots-clés : IoMT ; Radio Cognitive ; Antenne Patch Reconfigurable ; Diodes Varactors ; Bande X ; Substrat ; Gestion Dynamique du Spectre ; CST Studio Suite.

Abstract

The increasing integration of wireless technologies into the healthcare sector requires the development of communication solutions that are efficient, compact, and capable of adapting to the constraints of a continuously evolving radio environment. In this context, this final-year project focuses on the design and simulation of a compact reconfigurable patch antenna intended for Internet of Medical Things (IoMT) applications operating within a Cognitive Radio environment.

The main objective is to develop a multiband antenna capable of operating at 2.4 GHz, 5.8 GHz, and the X-band, while providing frequency reconfigurability through the integration of varactor diodes. A comparative study of different substrate materials was also conducted to identify the most suitable solution for the requirements of connected medical devices.

The simulations performed using CST Studio Suite enabled the evaluation of the antenna's performance in terms of impedance matching, bandwidth, gain, and radiation pattern. The obtained results demonstrate that the proposed structure represents a promising solution for future IoMT applications based on intelligent and efficient radio spectrum management.

Keywords : IoMT; Cognitive Radio; Reconfigurable Patch Antenna; Varactor Diodes; X-Band; Substrate; Dynamic Spectrum Management; CST Studio Suite.

الملخص

إن التزايد المستمر في دمج التقنيات اللاسلكية ضمن قطاع الرعاية الصحية يتطلب تطوير حلول اتصال فعّالة، مدمجة، وقادرة على التكيف مع قيود البيئة الراديوية التي تشهد تطورًا مستمرًا. في هذا السياق، يركز مشروع التخرج هذا على تصميم ومحاكاة هوائي رقعي مدمج وقابل لإعادة التشكيل، مخصص لتطبيقات إنترنت الأشياء الطبية العاملة ضمن بيئة الراديو المعرفي.

يتمثل الهدف الرئيسي في تطوير هوائي متعدد النطاقات قادر على العمل عند الترددات 2.4 غيغاهرتز و5.8 غيغاهرتز ونطاقX ، مع توفير إمكانية إعادة تشكيل التردد من خلال دمج ثنائيات الفاراكتور .كما أُجريت دراسة مقارنة لمختلف مواد الركيزة من أجل تحديد الحل الأكثر ملاءمة لمتطلبات الأجهزة الطبية المتصلة.

وقد مكّنت عمليات المحاكاة المنجزة باستخدام برنامج CST Studio Suite من تقييم أداء الهوائي من حيث مطابقة الممانعة، وعرض النطاق الترددي، والكسب، ونمط الإشعاع. وتُظهر النتائج المتحصل عليها أن البنية المقترحة تمثل حلاً واعدًا لتطبيقات إنترنت الأشياء الطبية المستقبلية القائمة على الإدارة الذكية والفعّالة للطيف الراديوي.

الكلمات المفتاحية إنترنت الأشياء الطبية؛ الراديو المعرفي ؛ هوائي رقعي قابل لإعادة التشكيل؛ ثنائيات الفاراكتور؛ نطاق X؛ الركيزة؛ الإدارة الديناميكية للطيف الترددي؛ .CST Studio Suite

Table des matières

Remerciement I

Dédicaces II

Résumé IV

Table des matières VII

Liste des figures.....XI

Liste des tableaux XVI

Acronymes et abréviations XVII

Introduction générale 1

Chapitre I : Internet des Objets Médicaux et la Radio Cognitive

I. Introduction.....6

II. Internet des Objets Médicaux (IoMT).....6

II.1 Définition et concepts fondamentaux.....6

II.1.1 Définition d'internet des Objets (IoT).....6

II.1.2 Définition est spécificités de l'internet des Objets Médicaux (IoMT).....8

II.1.3 Différence entre IoT et IoMT.....9

II.2 Architecture en couches de l'IoMT.....9

II.2.1 Couche perception.....11

II.2.2 Couche réseau.....11

II.2.3 Couche application.....12

II.3 Exigences techniques des systèmes IoMT.....12

II.4 Défis et limitations.....14

II.4.1 Les défis en la mise en œuvre de L'IOMT.....14

II.4.2 Les limites de l'IoMT.....14

III. La radio logicielle.....15

III.1 La radio logicielle restreinte (SDR).....16

III.2 De l'idée de la radio logicielle à la radio cognitive.....16

IV. Réseaux Radio Cognitifs.....16

IV.1 Fondements de la radio cognitive 16
IV.1.1 Historique 16
IV.1.2 Définition 17
IV.1.3 La relation entre la RC et la SDR 17
IV 1.4 Cycle de cognition 18
IV.2 Architecture d'un réseau radio cognitif 19
IV.3 Fonctions de la radio cognitive 21
IV.3.2 Gestion du spectre 22
V. Intégration des Réseaux Cognitifs dans l'IoMT 23
V.1 Motivation de l'intégration 23
V.1.1 Congestion des bandes ISM (2,4 GHz, 5,8 GHz et bande X) 23
V.1.2 Besoin d'adaptation dynamique 24
V.2 Apports des réseaux cognitifs pour l'IoMT 24
V 2.1 Amélioration de la fiabilité 24
V.2.2 Optimisation énergétique : 24
V.2.3 Gestion intelligente des interférences : 25
V.2.4 Priorisation des données médicales critiques : 25
VI. Conclusion 25

Chapitre II : Généralités sur les Antennes et la Reconfigurabilité

I. Introduction 28
II. Fondements Théoriques des Antennes 28
II.1. Définition et principe de fonctionnement 28
II.2 Paramètres caractéristiques des antennes 29
III. Types d'antennes 33
III.1 Antenne slot (à fente) 33
III.2 Antenne filaire 34
III.3 Antenne cornet 34
III.4 Antenne omnidirectionnelle 35

III.5 Le dipôle demi-onde....35
III.6 Antenne parabolique....35
IV. Les antennes imprimés (Patch)....36
IV.1 Structure d'une antenne imprimée....36
IV.2 Techniques d'adaptation....37
IV.3 Méthodes d'excitation....39
IV.4 La miniaturisation des antennes imprimées....41
IV.4.1 Techniques de miniaturisation des antennes....42
V. Les antennes reconfigurables....43
V.1 Historique....43
V.2 Définition....44
V.3 Classification des antennes reconfigurables....44
V.4 Les techniques de reconfiguration....47
VI. Contribution des antennes reconfigurables à la radio cognitive....50
VII. Domaines d'application des antennes reconfigurables....51
VIII. Avantages et les inconvénients d'une antenne reconfigurable....52
IX. Conclusion....53

Chapitre III : Conception d'antenne Reconfigurable pour I'IoMT

I. Introduction....57
II. Description du logiciel de simulation CST Studio Suite....57
III. Conception d'une antenne patch en forme rectangulaire....58
III.1 Cahier des charges....58
III.2 Géométrie de l'antenne simulée....59
III.3 Conception d'une antenne patch rectangulaire sur FR4....60
III.3.1 Antenne initiale FR4....60
III.3.2 Antenne initiale adaptée FR4....61
III.3.3 Antenne multi-résonance FR4....62

III.4 Conception d'une antenne patch rectangulaire sur Roger 65
III.4.1 Antenne initiale Roger 65
III.4.2 Antenne initiale adaptée Roger 67
III.4.3 Antenne multi-résonance Roger 68
III.5 Conception d'une antenne patch rectangulaire sur silicone 71
III.5.1 Antenne initiale silicone 71
III.5.2 Antenne initiale adaptée silicone 73
III.5.3 Antenne multi-résonance silicone 74
III.5.4 Antenne multi-résonance en silicone avec h = 1,9 77
IV. L'antenne patch reconfigurable multibande 80
IV.1 Modélisation de la diode vacator 80
IV.1.1 À l'antenne multi-résonance silicone 80
V. Étude comparative 82
V.1 Etudes comparative entre antenne avec substrat en Roger et en Silicone 82
V.2 Tableau récapitulatif et critères de la bande IoMT 83
V.3 Choix des substrats pour l'IoMT 84
VI. Conclusion 85
Conclusion générale 86
Bibliographie 89

Liste des figures

Chapitre I : Internet des Objets Médicaux et la Radio Cognitive

Figure I.1 : L'IoT, des dispositifs de connexion à la valeur humaine..... 7

Figure 1.2 : Internet des objets médicaux 8

Figure 1.3 : Architecture des différentes couches et application dans I'IoMT (3 couches) ... 10

Figure 1.4 : (a) Cycle de cognition de Mitola, (b) Cycle de cognition simplifié 18

Figure 1.5 : Les composants de l'architecture de la radio cognitive..... 19

Figure I.6 : Les protocoles adoptés par la radio cognitive..... 20

Figure I.7 : Les différentes tâches d'un système de radio cognitive..... 21

Figure I.8 : Les différentes approches de la RC : (a) Underlay ; (b) Overlay..... 22

Chapitre II : Généralités sur les Antennes et la Reconfigurabilité

Figure II.1: Propagation d'une onde électromagnétique entre un émetteur et un récepteur via des antennes..... 30

Figure II.2: Visualisation du diagramme de rayonnement d'une antenne 31

Figure II.3 : Les trois types de polarisation 32

Figure II.4: La bande passante..... 34

Figure II.5 : Antenne slot (à fente) 34

Figure II.6 : Antenne filaire 35

Figure II.7 : Antenne cornet..... 35

Figure II.8 : Antenne omnidirectionnelle 36

Figure II.9 : Le dipôle demi-onde..... 36

Figure II.10 : Antenne parabolique 37

Figure II.11 : Structure de l'antenne patch 37

Figure II.12 : Formes de l'élément rayonnant de l'antenne patch 38

Figure II.13 : Adaptation avec encoche 39

Figure II.14 : Adaptation par ligne quart d'onde 39

Figure II.15 : Configuration de l'adaptation d'un stub unique (a)parallèle/(b)série 40

Figure II.16 : techniques d'alimentation des antennes 40

Figure II.17 : Alimentation par une ligne micro-ruban 41

Figure II.18 : Alimentation par câble coaxial 41

Figure II. 19 : Alimentation par ouverture 42

Figure II.20 : Alimentation par couplage électromagnétique 42

Figure II.21 : Les techniques de miniaturisation des antennes 44

Figure II.22 : Les types d'antennes reconfigurables 45

Figure II.23 : Coefficient de réflexion d'une antenne reconfigurable en fréquence 46

Figure II.24 : Antenne reconfigurable en polarisation 47

Figure II.25 : Les différents diagrammes de rayonnement d'une antenne reconfigurable 48

Figure II.26 : Diode varicap 48

Figure II.27 : Diode PIN 49

Figure II.28 : Commutateur MEMS 49

Figure II.29 : Structure de l'antenne en spirale carrée à base de Graphene 50

Figure II.30 : (a) Configuration de mesure du prototype fabriqué (b) différentes configurations 51

Figure II.31 : Organigramme de la radio cognitive 52

Chapitre III : Conception d'antenne Reconfigurable pour I'IoMT

Figure III.1 : Interface du logiciel de simulation CST Studio 2019 58

Figure III.2 : Structure d'une antenne patch rectangulaire initiale FR4 60

Figure III.3 : Coefficient de réflexion de l'antenne patch initiale FR4..... 60

Figure III.4 : Le taux d'ondes stationnaires (TOS) de l'antenne patch initiale FR4..... 61

Figure III.5 : Structure de l'antenne patch avec encoches FR4 61

Figure III.6 : Coefficient de réflexion de l'antenne patch avec encoches FR4..... 62

Figure III.7 : Le taux d'ondes stationnaires (TOS) de l'antenne patch avec encoches FR4 ... 62

Figure III.8 : Nouvelle structure de l'antenne FR4 63

Figure III.9 : Coefficient de réflexion de l'antenne patch de la nouvelle structure FR4 63

Figure III.10 : Le taux d'ondes stationnaires (TOS) de la nouvelle structure FR4 64

Figure III.11 : Diagramme de rayonnement de la nouvelle structure FR4 en 3D 64

Figure III.12 : Diagramme de rayonnement (phi = $\mathbf{0}\ °\boldsymbol{et}\ \mathbf{90}°$) de la nouvelle structure FR4 en2D 64

Figure III.13 : Gain de la nouvelle structure FR4..... 65

Figure III.14 : Structure d'une antenne patch rectangulaire initiale Roger..... 66

Figure III.15 : Coefficient de réflexion de la forme rectangulaire initiale Roger..... 66

Figure III.16 : Le taux d'ondes stationnaires (TOS) de l'antenne patch initiale Roger 67

Figure III.17 : Structure de l'antenne patch avec encoches Roger..... 67

Figure III.18 : Coefficient de réflexion de l'antenne patch avec encoches Roger 68

Figure III.19 : Le taux d'ondes stationnaires (TOS) de l'antenne patch avec encoches Roger 68

Figure III.20 : Nouvelle structure de l'antenne Roger 69

Figure III.21 : Coefficient de réflexion de l'antenne patch de la nouvelle structure Roger ... 69

Figure III.22 : Le taux d'ondes stationnaires (TOS) de la nouvelle structure Roger 70

Figure III.23 : Diagramme de rayonnement de la nouvelle structure Roger en 3D 70

Figure III.24 : Diagramme de rayonnement (phi = **0** et **90**°) de la nouvelle structure Roger en 2D 70

Figure III.25 : Gain de la nouvelle structure Roger..... 71

Figure III.26 : Structure d'une antenne patch rectangulaire initiale silicone..... 72

Figure III.27 : Coefficient de réflexion de la forme rectangulaire initiale silicone..... 72

Figure III.28 : Le taux d'ondes stationnaires (TOS) de l'antenne patch initiale silicone 73

Figure III.29 : Structure de l'antenne patch avec encoches silicone 73

Figure III.30 : Coefficient de réflexion de l'antenne patch avec encoches silicone 73

Figure III.31 : Le taux d'ondes stationnaires (TOS) de l'antenne patch avec encoches silicone 74

Figure III.32 : Nouvelle structure de l'antenne silicone 74

Figure III.33 : Coefficient de réflexion de l'antenne patch de la nouvelle structure silicone . 75

Figure III.34 : Le taux d'ondes stationnaires (TOS) de la nouvelle structure silicone..... 75

Figure III.35 : Diagramme de rayonnement de la nouvelle structure silicone en 3D..... 75

Figure III.36 : Diagramme de rayonnement (phi = **0** °$\boldsymbol{et}$ **90**°) de la nouvelle structure silicone en 2D..... 76

Figure III.37 : Gain de la nouvelle structure silicone 76

Figure III.38 : Nouvelle structure de l'antenne silicone h=1,9 77

Figure III.39 : Coefficient de réflexion de l'antenne patch de la nouvelle structure silicone h=1,9..... 77

Figure III.40 : Le taux d'ondes stationnaires (TOS) de la nouvelle structure silicone h=1,9 78

Figure III.41: Diagramme de rayonnement de la nouvelle structure silicone h=1,9 en 3D ... 78

Figure III.42 : Diagramme de rayonnement (phi = **0** °$\boldsymbol{et}$ **90**°) de la nouvelle structure silicone h=1,9 en 2D..... 79

Figure III.43 : Gain de la nouvelle structure silicone h = 1,9..... 79

Figure III.44 : Nouvelle structure de l'antenne silicone h=1,9 avec diodes varicap..... 80

Figure III.45 : Coefficient de réflexion de l'antenne patch de la nouvelle structure silicone h = 1,9..... 81

Figure III.46 : Gain de la nouvelle structure silicone h=1,9 avec diodes varicap 81

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Différence entre IoT et IoMT 9

Tableau I.2 : Synthèse des exigences techniques des systèmes IoMT avec exemples 13

Tableau II.1 : Comparaison des dimensions selon le substrat 43

Tableau II.2 : Avantages et inconvénients des antennes reconfigurables 54

Tableau III.1 : Les équations paramétriques d'un patch rectangulaire 59

Tableau III.2 : Dimensions de l'antenne patch rectangulaire résonant à 4 GHz sur FR4 60

Tableau III.3 : Dimensions de l'antenne patch rectangulaire roger résonant à 4 GHz 66

Tableau III.4 : Dimensions de l'antenne patch rectangulaire silicone résonant à 4 GHz 72

Tableau III.5 : l'ensemble des fréquences de résonance obtenues pour chaque substrat 82

Tableau III.6 : Tableau récapitulatif global 83

Tableau III.7 : Synthèse des choix de substrat pour l'IoMT 84

Acronymes et Abréviations

C

CP : Circular Polarization

CPS : Cyber-Physical System

CPS actifs : CPS capables de traiter et de transmettre de l'information

CPS Internet : CPS connectés directement au réseau Internet

CPS passifs : CPS qui ne génèrent pas de signal par eux-mêmes

CSRR : Complementary Split Ring Resonator

CST : Computer Simulation Technology (CST Microwave Studio)

E

ECG : Électrocardiogramme

EPC / EPCglobal : Electronic Product Code

F

FDA : Food and Drug Administration

FIT : Méthode des Intégrales Finies (Finite Integration Technique)

G

GDPR : General Data Protection Regulation

H

HIPAA : Health Insurance Portability and Accountability Act

I

IoMT : Internet of Medical Things

IoT : Internet of Things

IP : Internet Protocol

ISM : Industrial, Scientific and Medical (bandes de fréquences)

ISO : International Organization for Standardization

L

LC / CL : Liquid Crystal – Cristaux Liquides

LHCP : Left-Hand Circular Polarization

LP : Linear Polarization

M

M2M : Machine-to-Machine

MAC : Medium Access Control

MEMS : Microelectromechanical Systems

MFA : Multi-Factor Authentication

N

NFC : Near Field Communication

O

OSI : Open Systems Interconnection

P

PIN : Positive Intrinsic Negative (diode PIN)

PU : Primary User

Q

QoS : Quality of Service

R

RC : Radio Cognitive

RF : Radio Frequency

RF-MEMS : Radio-Frequency Microelectromechanical Systems

RFID : Radio Frequency Identification

RHCP : Right-Hand Circular Polarization

S

SAR : Specific Absorption Rate

SDR : Software Defined Radio

SP : Sensory Perception

SR : Software Radio

SRR : Split Ring Resonator

SU : Secondary User

T

TCP : Transmission Control Protocol

TOS : Taux d'Ondes Stationnaires

U

UDP : User Datagram Protocol

UWB : Ultra Wide Band

V

VSWR : Voltage Standing Wave Ratio

W

WSN : Wireless Sensor Networks

Introduction générale

Le domaine des télécommunications sans fil connaît aujourd'hui une transformation profonde, portée par l'essor fulgurant de l'Internet des Objets (IoT) et plus particulièrement de l'Internet des Objets Médicaux (IoMT). Ces technologies révolutionnent le secteur de la santé en permettant la surveillance continue des patients, le diagnostic à distance et la gestion intelligente des données médicales en temps réel. Cependant, le déploiement massif de ces dispositifs connectés engendre une congestion croissante du spectre radioélectrique, notamment dans les bandes ISM traditionnellement utilisées, soulevant ainsi des défis majeurs en matière de gestion des ressources spectrales.

Dans ce contexte, la Radio Cognitive (RC) émerge comme une solution technologique incontournable, offrant la capacité d'accéder dynamiquement au spectre de manière opportuniste et intelligente. En combinant les principes de la radio logicielle avec des algorithmes d'apprentissage et de décision autonome, la radio cognitive permet aux dispositifs IoMT de s'adapter en temps réel aux conditions du canal de propagation et à l'occupation du spectre, garantissant ainsi une communication fiable et efficace dans des environnements radiofréquences encombrés.

Au cœur de cette convergence entre l'IoMT et la radio cognitive se trouve un composant fondamental : l'antenne. Pour répondre aux exigences spécifiques de ces systèmes, notamment la compacité, la multifonctionnalité et la flexibilité spectrale, les antennes reconfigurables s'imposent comme la solution la plus adaptée. Grâce à leur capacité à modifier dynamiquement leurs paramètres électromagnétiques, telles que la fréquence de résonance, la polarisation et le diagramme de rayonnement, ces antennes permettent aux dispositifs médicaux connectés de fonctionner sur plusieurs bandes de fréquences tout en conservant des dimensions réduites compatibles avec les contraintes d'intégration des équipements médicaux portables.

C'est dans cette perspective que s'inscrit le présent mémoire, intitulé « Conception d'Antennes Reconfigurables Compactes pour l'Internet des Objets Médicaux (IoMT) dans un Environnement Radio Cognitive ». Ce travail vise à proposer, concevoir et valider par simulation une antenne reconfigurable compacte répondant aux exigences techniques et aux contraintes imposées par les applications médicales sans fil dans un contexte de radio cognitive.

Afin d'atteindre cet objectif, ce mémoire est structuré en trois chapitres complémentaires :

Le premier chapitre est dédié à l'Internet des Objets Médicaux (IoMT) et à la Radio Cognitive. Il présente les fondements théoriques de l'IoMT, son architecture en couches, ses exigences techniques ainsi que ses défis et limitations. Il expose ensuite les concepts de la radio logicielle

et de la radio cognitive, leur architecture et leurs fonctions, avant d'aborder l'intégration des réseaux cognitifs dans l'IoMT et les apports de cette convergence pour les applications médicales sans fil.

Le deuxième chapitre traite des généralités sur les antennes et la reconfigurabilité. Il couvre les fondements théoriques des antennes, leurs paramètres caractéristiques, les différents types d'antennes existants, avec un accent particulier sur les antennes imprimées et leurs techniques de miniaturisation. Il présente également les antennes reconfigurables, leur classification, leurs techniques de reconfiguration ainsi que leur contribution à la radio cognitive et leurs domaines d'application.

Le troisième chapitre est consacré à la conception et à la simulation de l'antenne reconfigurable compacte proposée. Il détaille la méthodologie de conception adoptée, les outils de simulation utilisés, les résultats obtenus et leur analyse comparative, permettant ainsi de valider les performances de la structure conçue vis-à-vis des exigences de l'IoMT en environnement radio cognitive.

Enfin, une conclusion générale clôture ce mémoire en synthétisant les principaux résultats obtenus, en mettant en lumière les contributions de ce travail et en ouvrant des perspectives pour de futurs axes de recherche dans ce domaine en pleine expansion

Chapitre I

Internet des Objets Médicaux et la Radio Cognitive

Table des matières

I. Introduction 6
II. Internet des Objets Médicaux (IoMT) 6
II.1 Définition et concepts fondamentaux 6
II.1.1 Définition d'internet des Objets (IoT) 6
II.1.2 Définition est spécificités de l'internet des Objets Médicaux (IoMT) 8
II.1.3 Différence entre IoT et IoMT 9
II.2 Architecture en couches de l'IoMT 9
II.2.1 Couche perception 11
II.2.2 Couche réseau 11
II.2.3 Couche application 12
II.3 Exigences techniques des systèmes IoMT 12
II.4 Défis et limitations 14
II.4.1 Les défis en la mise en œuvre de L'IOMT 14
II.4.2 Les limites de l'IoMT 14
III. La radio logicielle 15
III.1 La radio logicielle restreinte (SDR) 16
III.2 De l'idée de la radio logicielle à la radio cognitive 16
IV. Réseaux Radio Cognitifs 16
IV.1 Fondements de la radio cognitive 16
IV.1.1 Historique 16
IV.1.2 Définition 17
IV.1.3 La relation entre la RC et la SDR 17
IV.1.4 Cycle de cognition 18
IV.2 Architecture d'un réseau radio cognitif 19
IV.3 Fonctions de la radio cognitive 21
IV.3.2 Gestion du spectre 22
V. Intégration des Réseaux Cognitifs dans l'IoMT 23
V.1 Motivation de l'intégration 23
V.1.1 Congestion des bandes ISM (2,4 GHz, 5,8 GHz et bande X) 23
V.1.2 Besoin d'adaptation dynamique 24
V.2 Apports des réseaux cognitifs pour l'IoMT 24
V 2.1 Amélioration de la fiabilité 24
V.2.2 Optimisation énergétique : 24
V.2.3 Gestion intelligente des interférences : 25
V.2.4 Priorisation des données médicales critiques : 25
VI. Conclusion 25

I. Introduction

Aujourd'hui, le domaine de la santé connaît une véritable transformation grâce aux avancées technologiques. Parmi les innovations les plus marquantes, l'Internet des Objets Médicaux IoMT en anglais (Internet of Medical Things) qui occupe une place importante dans le service santé. Il s'agit d'un ensemble d'appareils médicaux connectés, comme les capteurs, les montres intelligentes ou encore les équipements hospitaliers, capables de collecter et d'échanger des données en temps réel. Grâce à ces technologies, il devient possible de surveiller les patients à distance, de détecter rapidement certains problèmes de santé et d'améliorer la qualité des soins.

Cependant, avec l'augmentation du nombre de ces dispositifs connectés, les réseaux de communication sont de plus en plus sollicités. Cette situation peut entraîner des problèmes comme la saturation du réseau, des retards dans la transmission des données ou encore des interférences. Or, dans le domaine médical, la rapidité et la fiabilité des informations sont primordiales.

C'est dans ce contexte que les réseaux radio cognitifs apparaissent comme une solution intéressante. Contrairement aux réseaux classiques, ils sont capables de s'adapter intelligemment à leur environnement. Ils peuvent détecter les fréquences disponibles et les utiliser de manière efficace, sans perturber les autres utilisateurs. Cela permet d'améliorer la communication entre les dispositifs, même lorsque le réseau est très chargé.

Ainsi, l'association entre l'IoMT et les réseaux radio cognitifs représente une piste prometteuse pour rendre les systèmes de santé plus performants, plus fiables et mieux adaptés aux besoins actuels. Ce qui va faire l'objet d'étude dans ce chapitre avec les différentes architectures et principes de ses deux technologies.

II. Internet des Objets Médicaux (IoMT)

II.1 Définition et concepts fondamentaux

II.1.1 Définition d'internet des Objets (IoT)

L'Internet des Objets, communément appelé IoT (Internet of Things), est apparu vers la fin des années 1990, notamment en 1999. Il désigne le principe consistant à connecter des objets physiques du quotidien à Internet afin de leur permettre de collecter, transmettre et partager des données, comme l'illustre la Figure 1.1 Ce processus repose sur plusieurs étapes essentielles permettant de transformer les données brutes collectées par les objets en informations exploitables et compréhensibles par les utilisateurs.

Le fonctionnement de l'IoT s'appuie sur différentes technologies, notamment l'identification par radiofréquence (RFID) en anglais (Radio Frequency IDentification), citée dans [1], combinée à divers capteurs. Cette association permet une identification précise des objets ainsi qu'une gestion intelligente des dispositifs connectés. L'IoT prend également en charge de nombreux dispositifs d'entrée et de sortie, tels que les caméras, les microphones, les claviers, les haut-parleurs, les écrans, ainsi que des technologies de communication comme le NFC (Near Field Communication) et le Bluetooth. Toutefois, le système RFID demeure l'un des composants fondamentaux de cette technologie [2].

L'IoT peut être considéré comme un système structuré en réseau qui vise à collecter et centraliser les informations provenant d'un ensemble d'objets intelligents interconnectés via Internet [3]. Les dispositifs équipés de capteurs peuvent ainsi communiquer entre eux et transmettre leurs données vers des services de stockage et de traitement à distance, souvent basés sur le cloud [4]. Ces objets connectés peuvent prendre différentes formes, allant des appareils électroniques et électroménagers aux véhicules, dispositifs médicaux ou infrastructures urbaines. Grâce à l'intégration de capteurs et d'actionneurs, ils sont capables d'interagir avec leur environnement et de réagir en temps réel.

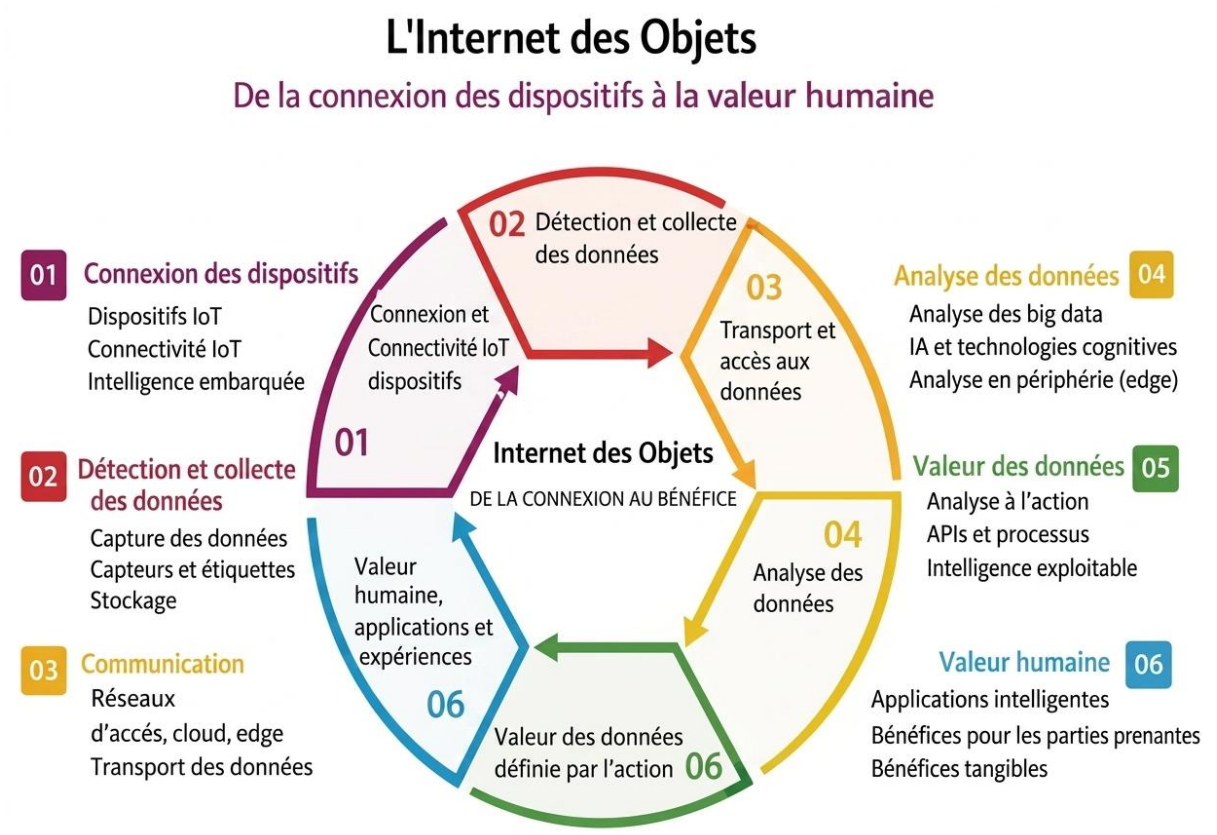


Figure I.1 : L'IoT, des dispositifs de connexion à la valeur humaine [5].

II.1.2 Définition et spécificités de l'internet des Objets Médicaux (IoMT)

L'Internet des Objets Médicaux (IoMT) désigne un ensemble de dispositifs médicaux connectés, d'applications logicielles et de technologies numériques interconnectées, utilisés dans le domaine de la santé. Ces systèmes permettent de collecter des données cliniques en temps réel à partir des patients, puis de les transmettre aux professionnels de santé afin de les intégrer dans les systèmes d'information hospitaliers. Cette interconnexion favorise un suivi médical continu et une gestion plus efficace des soins.

Le fonctionnement de l'IoMT repose sur plusieurs technologies avancées, notamment le cloud computing, qui permet de stocker, traiter et analyser de grandes quantités de données médicales en temps réel. Grâce à ces technologies, les informations recueillies peuvent être exploitées pour améliorer la qualité des soins, faciliter la prise de décision médicale basée sur les données, renforcer la surveillance des patients et optimiser l'efficacité des traitements tout en réduisant les coûts globaux du système de santé.

Au cours des dernières années, l'IoMT a connu un développement rapide et s'est progressivement imposé comme un élément clé de l'infrastructure des systèmes de santé modernes. Comme illustré dans la figure 1.2, ce système met en évidence l'interaction intelligente entre les patients et les dispositifs médicaux connectés, créant ainsi un environnement numérique intégré qui contribue activement à l'amélioration des services médicaux et à la modernisation des pratiques de soins [6].

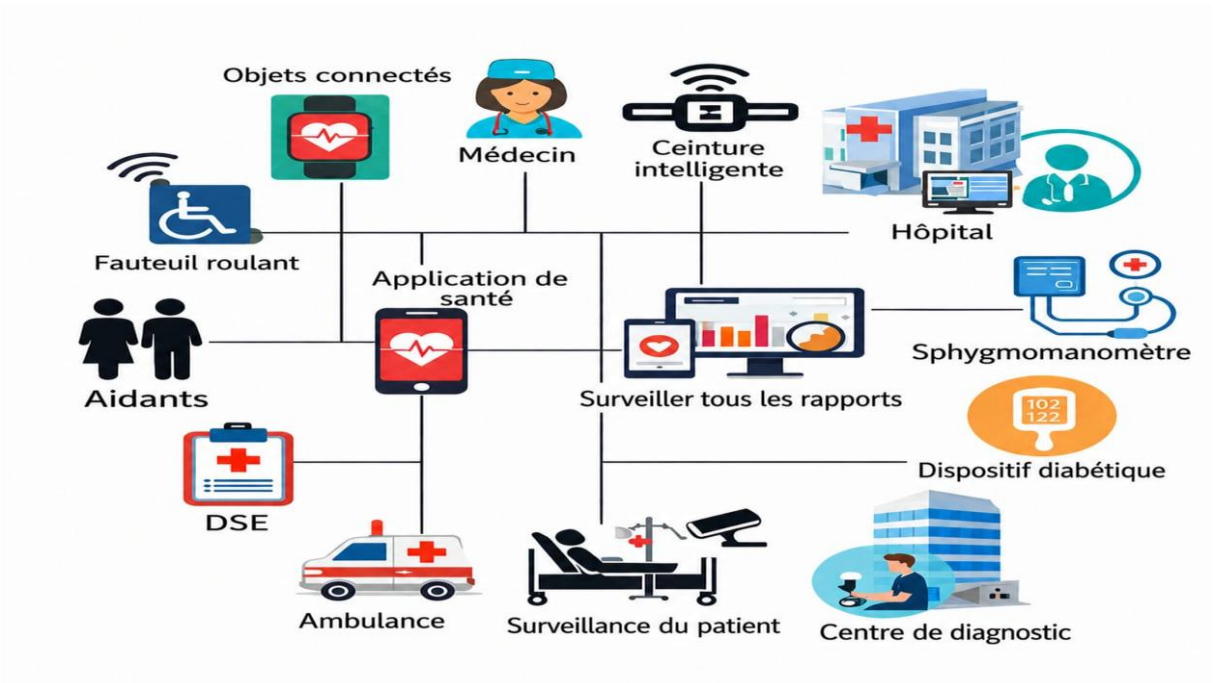


Figure.I.2 : Internet des objets médicaux [7].

Les spécificités de l'IoMT résident principalement dans son application au domaine médical, avec un accent particulier sur plusieurs aspects essentiels :

* Le suivi à distance des patients, grâce à l'utilisation de capteurs et de dispositifs médicaux connectés permettant une surveillance continue de l'état de santé.

* Le diagnostic précoce de certaines maladies, rendu possible par l'analyse des données collectées par ces dispositifs intelligents.

* L'intégration et la centralisation des données médicales au sein de plateformes numériques, facilitant ainsi l'analyse des informations et accélérant la prise de décision médicale.

II.1.3 Différence entre IoT et IoMT

Bien que l'IoMT soit considéré comme un sous-ensemble de l'IoT, certaines différences existent entre ces deux concepts. Le tableau 1 présente un résumé des principales distinctions entre l'IoT et l'IoMT. :

Aspeet	I'oT	I'oMT
Domaine d'application	General (industrie, transport, agriculture etc.)	Exclusivement médical (hôpitaux, télémédecine
Objectif principal	Optimisation des processus et amélioration du confort	Amélioration des soins de santé et de la qualité de vie de patients
Exemples	Montres connectées, capteurs, smart home	Glucomètre connecté, ECG, moniteur cardiaque
Réglementation	Standard (variable selon usage)	Très stricte (normes médicales comme FDA ,ISO,etc.)
Sécurité	Protection des données	Protection + sécurité du patient

Tableau I.1 : Différence entre IoT et IoMT.

II.2 Architecture en couches de l'IoMT

De nombreux travaux de recherche ont proposé différentes architectures destinées à l'Internet des Objets (IoT). Parmi les architectures les plus reconnues figurent l'architecture IoT

classique, l'architecture EPCglobal, (Electronic Product Code) l'architecture basée sur les réseaux de capteurs sans fil (Wireless Sensor Networks – WSN), l'architecture autonome ainsi que l'architecture Machine-to-Machine (M2M).

L'architecture M2M intègre certains concepts issus de l'architecture EPCglobal et des réseaux de capteurs sans fil. Grâce à sa capacité à permettre une communication directe entre les dispositifs connectés sans intervention humaine, elle est aujourd'hui considérée comme l'une des architectures les plus largement utilisées dans les systèmes IoT.

Dans le domaine médical, l'Internet des Objets adopte généralement une architecture centralisée composée de trois couches principales : la couche de perception, la couche réseau et la couche d'application. Cette architecture en couches constitue la base fonctionnelle de l'Internet des Objets Médicaux (IoMT). Elle permet d'assurer la collecte des données à partir des capteurs médicaux, leur transmission à travers les réseaux de communication, ainsi que leur traitement et leur exploitation au niveau des applications médicales destinées aux professionnels de santé [8].

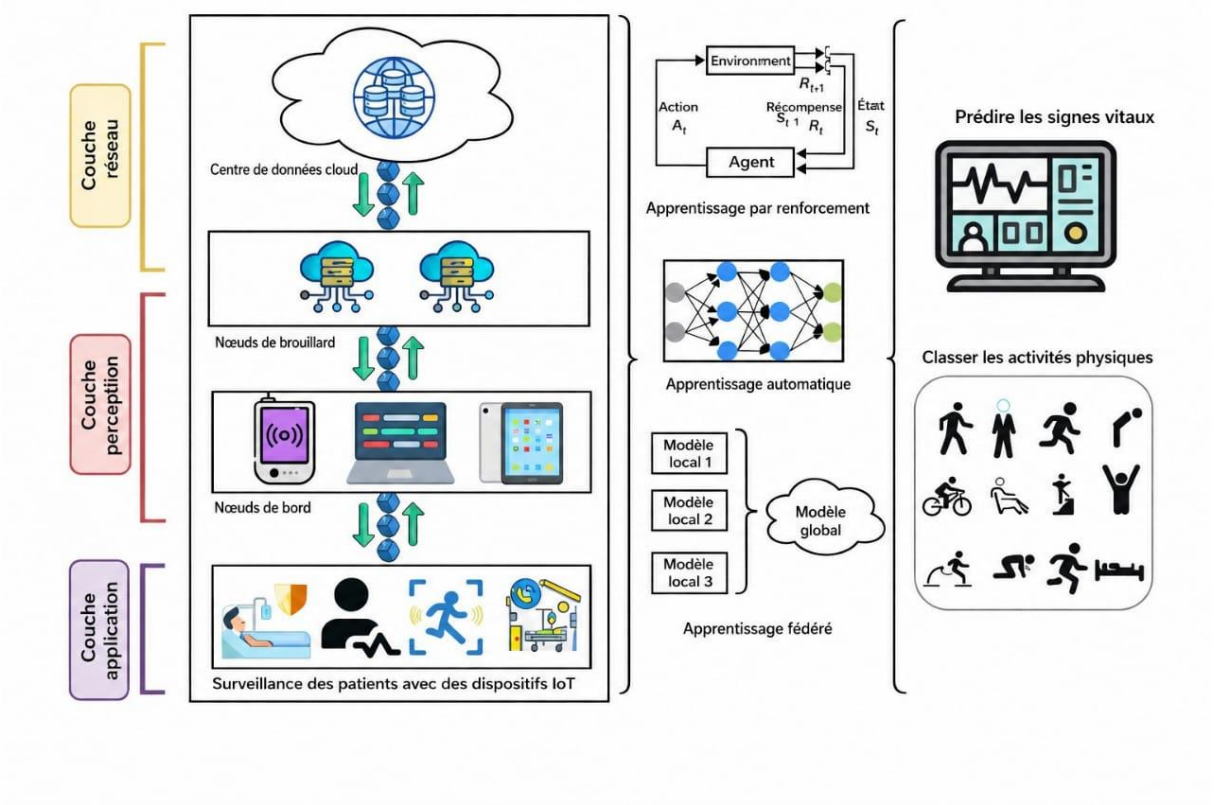


Figure. I.3 : Architecture des différentes couches et application dans I'IoMT (3 couches) [9].

II.2.1 Couche perception

La couche perception constitue la base fondamentale de l'IoMT. Elle a pour rôle de collecter les données médicales provenant de sources variées (capteurs, dispositifs médicaux, etc.) et de les transmettre aux couches supérieures pour traitement et analyse. Elle est structurée en deux sous-couches principales : la sous-couche de collecte des données et la sous-couche d'accès aux données.

1. **Couche de collecte des données**

Cette sous-couche repose sur un réseau de dispositifs intelligents et de capteurs spécialisés, tels que des capteurs physiologiques et chimiques, ainsi que sur des technologies comme la RFID et la reconnaissance d'images. Tous les appareils et les données identifiés dans le réseau sont intégrés dans des systèmes cyber-physiques (CPS de l'anglais Cyber-Physical System) intelligents, capables d'interagir de manière autonome avec leur environnement. Dans le contexte de l'IoT, on distingue essentiellement trois types de CPS : les CPS passifs (qui ne génèrent pas de signal par eux-mêmes), les CPS actifs (capables de traiter et de transmettre de l'information) et les CPS Internet (connectés directement au réseau Internet).

2. **Sous-couche d'accès aux données**

Cette deuxième sous-couche récupère les données issues des capteurs et les achemine vers la couche réseau à l'aide de technologies de communication sans fil, telles que Bluetooth, Wi-Fi ou ZigBee. Le choix de la technologie à utiliser dépend des caractéristiques environnementales des dispositifs médicaux (portée, consommation d'énergie, bande passante, etc.) ainsi que des besoins spécifiques de l'application IoMT envisagée.

II.2.2 Couche réseau

La couche réseau est divisée en deux sous-couches qui jouent chacune un rôle essentiel dans le bon fonctionnement de l'IoMT.

1. **Couche de transfert de données**

Son rôle ressemble un peu à celui du système nerveux chez l'être humain : elle transporte les données collectées dans la couche perception vers les couches supérieures, de manière rapide, précise et fiable. Elle s'appuie sur les réseaux de communication mobiles, Internet et des réseaux spécialisés pour assurer une transmission en temps réel et garantir une communication fluide entre les différents dispositifs et systèmes.

2. **Sous-couche de service**

Elle constitue une sorte de “cerveau intégrateur” du système. Elle permet de fédérer des réseaux hétérogènes, de normaliser les formats des données et leurs descriptions, et de rendre compatibles les systèmes existants avec les nouvelles technologies. Son objectif principal est de faciliter l’intégration efficace de ces solutions dans des environnements hospitaliers, tout en assurant une continuité de service et une interopérabilité optimale.

II.2.3 Couche application

La couche d’application est organisée en deux niveaux fonctionnels qui visent à exploiter concrètement les données collectées.

1. **Applications de gestion de l’information médicale**

Ce premier niveau prend en charge la gestion des informations liées aux équipements et aux fournitures médicales, ainsi que le suivi des données des patients. Il inclut aussi la gestion des informations relatives aux consultations dans les cliniques externes et aux soins prodigués à l’hôpital, afin de centraliser l’information clinique et opérationnelle.

2. **Applications de soutien à la décision médicale**

Ce second niveau sert d’aide à la décision pour les professionnels de santé. Il analyse les données des patients, évalue les informations sur les maladies, examine les traitements médicamenteux et interprète les données diagnostiques et thérapeutiques. L’objectif est de proposer des recommandations éclairées et de soutenir une prise de décision clinique plus rapide, précise et basée sur les données.

II.3 Exigences techniques des systèmes IoMT

Les systèmes IoMT (Internet of Medical Things) combinent dispositifs médicaux et technologies connectées pour surveiller et gérer la santé des patients. Leur efficacité repose sur des exigences techniques essentielles, résumées dans le tableau 2 suivant :

Exigence	Description	Exemple
Fiabilité et disponibilité	Les dispositifs doivent fonctionner de manière continue, même en cas de panne partielle, et permettre des mises à jour sécurisées sans interrompre les fonctions vitales.	Moniteurs cardiaques hospitaliers, pompes à insuline connectées avec redondance et alertes en cas de dysfonctionnement.
Faible latence	Transmission rapide et traitement quasi instantané des données pour permettre une intervention immédiate en cas d'urgence.	Patchs de suivi de rythme cardiaque transmettant en temps réel les anomalies au centre médical.
Faible consommation énergétique	Optimisation de l'usage de la batterie, modes veille intelligents, et éventuellement récupération d'énergie pour prolonger l'autonomie des dispositifs portables.	Montres connectées pour suivi de la fréquence cardiaque ou capteurs de glycémie implantables.
Sécurité et confidentialité des données	Protection des données sensibles par chiffrement, authentification forte, contrôle d'accès, audit et conformité aux normes (HIPAA, GDPR). Dossiers patients électroniques accessibles via dispositifs IoMT sécurisés, applications mobiles de santé avec MFA.	Dossiers patients électroniques accessibles via dispositifs IoMT sécurisés, applications mobiles de santé avec MFA.
Compacité et intégration	Miniaturisation des capteurs et composants pour les intégrer dans des dispositifs portables confortables et résistants aux conditions d'usage.	Patchs de surveillance de glucose, montres de suivi cardiaque, implants médicaux connectés (pacemakers).

Tableau I.2 : Synthèse des exigences techniques des systèmes IoMT avec exemples [10-13].

II.4 Défis et limitations

II.4.1 Les défis en la mise en œuvre de L'IOMT

L'intégration de l'Internet des objets médicaux (IoMT) dans les systèmes de santé fait face à plusieurs défis majeurs. Parmi les plus critiques, on note l'absence de standardisation, qui rend l'interopérabilité entre les appareils de différents fabricants particulièrement ardue et freine l'adoption de protocoles de sécurité solides [14].

La protection des données patients, échangées entre ces objets connectés et les clouds, reste une inquiétude primordiale. Par ailleurs, de nombreux établissements peinent à intégrer ces technologies complexes, souvent du fait d'une résistance organisationnelle ou de difficultés à suivre des réglementations en perpétuelle évolution. Sans résolution de ces obstacles, les avantages promis par l'IoMT risquent d'être fortement compromis [15].

Principaux défis techniques et organisationnels

- **Sécurité des données et gestion efficace :** les données sensibles des patients, transitant entre dispositifs comme la clarinette médicale et les clouds, exigent une protection renforcée via des mécanismes solides. Des technologies comme la blockchain s'avèrent particulièrement efficaces pour cela.
- **Interopérabilité des systèmes :** un échange fluide entre dispositifs hétérogènes passe par des protocoles standards et des architectures ouvertes, tout en maintenant une sécurité optimale.
- **Modernisation des infrastructures :** Intégrer l'IoMT implique de renouveler les technologies legacy dans les établissements de santé, accompagnée d'une formation continue du personnel.
- **Conformité réglementaire :** Respecter les normes en vigueur est essentiel, ce qui nécessite une veille réglementaire permanente et l'usage d'équipements certifiés.

II.4.2 Les limites de l'IoMT

Malgré les perspectives prometteuses de l'Internet des objets médicaux (IoMT), plusieurs limites persistent et risquent de freiner son efficacité dans le secteur de la santé, notamment :

- **La sécurité des données :** Le respect du secret médical, issu de la collecte automatique de données à distance, représente un enjeu majeur pour l'IoMT. Ce système implique la collecte et le transfert de données médicales sensibles, ce qui en fait une cible privilégiée pour les cyberattaques et menace directement la sécurité des patients. Les violations de données peuvent non seulement porter atteinte à la vie privée, mais aussi avoir des

conséquences graves sur la santé si des informations erronées guident les décisions médicales. Il est donc impératif de déployer des protocoles de sécurité robustes et un chiffrement avancé, même si cela génère des coûts supplémentaires [16] [17].

- **L'interopérabilité :** Un gros défi dans l'IoMT, c'est la capacité des systèmes et dispositifs connectés à bosser ensemble sans accroc. C'est crucial parce que les appareils médicaux doivent communiquer efficacement pour un suivi patient cohérent et précis. Mais avec la diversité des technologies, fabricants et protocoles, l'intégration pose souvent problème, compliquant la coordination des soins. Sans harmonisation, partager et exploiter les données entre différents outils de santé devient un vrai casse-tête.
- **La non-harmonisation des appareils constitue :** un frein majeur à l'adoption généralisée de l'IoMT dans les soins de santé. Les difficultés d'intégration, dues à la diversité des protocoles et dispositifs connectés, entravent le plein potentiel de cette technologie (Peerbits, s.d.) [18].
- **La surabondance des données :** Les médecins font face à une véritable avalanche de données en temps réel générée par l'IoMT, ce qui complique leur gestion au quotidien. Le vrai défi, c'est de trier, stocker, traiter et analyser ce flux pour en tirer des infos utiles, sans noyer les soignants [18].
- **Les coûts initiaux élevés :** Installer et intégrer des systèmes IoMT coûte une fortune à certains établissements, entre l'investissement de départ et les frais récurrents pour la maintenance, la sécurité et l'infrastructure [19] [20].

Des solutions à ces limites seront évoquer plus tard dans ce chapitre.

III. La radio logicielle

Le concept de radio logicielle, proposé par Joseph Mitola en 1991, désigne une technologie capable d'être reprogrammée et reconfigurée. Elle s'appuie sur des techniques numériques pour réaliser différentes fonctions radio comme la fréquence porteuse, la modulation ou encore l'accès au réseau directement par logiciel plutôt que par des composants matériels fixes. Les systèmes modernes de radio logicielle intègrent également des fonctions avancées telles que la cryptographie et le codage des données, qu'il s'agisse de la voix, de la vidéo ou d'autres types d'informations [21].

L'un des principaux avantages de la radio logicielle est sa grande flexibilité. Elle permet d'adapter facilement les interfaces radio selon les besoins, d'optimiser les performances et de garantir une bonne interopérabilité entre différents systèmes de communication [22].

Cependant, certaines limites subsistent, notamment en termes de puissance de calcul, de coût et de consommation d'énergie. Pour cette raison, on utilise souvent une solution intermédiaire appelée radio logicielle restreinte, qui combine des approches traditionnelles et modernes, en attendant d'atteindre une implémentation entièrement basée sur le logiciel.

III.1 La radio logicielle restreinte (SDR)

La radio logicielle restreinte (SDR – Software Defined Radio) est un système de communication radio capable de s'adapter automatiquement à différentes bandes de fréquences et types de modulation, en utilisant le même équipement matériel. Elle se caractérise par sa flexibilité et sa capacité à répondre aux problématiques liées à la gestion dynamique du spectre [23]. Grâce à cette technologie, il est possible d'ajouter de nouvelles fonctionnalités radio sans fil et hétérogènes aux systèmes existants, sans avoir besoin de modifier le matériel. Dans sa forme idéale, un équipement SDR peut s'ajuster de manière autonome à de nouvelles fréquences et modulations, ce qui lui permet de fonctionner efficacement dans des environnements de réseaux sans fil variés et hétérogènes [22].

III.2 De l'idée de la radio logicielle à la radio cognitive

Le concept de radio logicielle (Software Radio, SR) a été introduit par Joseph Mitola comme une innovation majeure dans le domaine des communications sans fil. Il permet aux équipements de s'adapter à différents standards radio sans nécessiter de modification matérielle, simplement en reconfigurant le logiciel embarqué. Bien que cette approche puisse paraître simple en apparence, elle présente à la fois de nombreux avantages et des défis technologiques non négligeables. Conscient de ces enjeux, Mitola a ensuite envisagé l'intégration d'une forme d'intelligence au sein des réseaux et des dispositifs, afin de mieux répondre aux besoins des utilisateurs tout en optimisant l'utilisation des ressources disponibles. Cette réflexion a conduit à l'émergence du concept de radio cognitive [24].

IV. Réseaux Radio Cognitifs

IV.1 Fondements de la radio cognitive

IV.1.1 Historique

L'idée de la radio cognitive a été officiellement introduite par Joseph Mitola III lors d'un séminaire organisé au KTH, l'Institut royal de technologie, en 1998. Elle a par la suite été développée dans plusieurs travaux, notamment dans un article coécrit avec Gerald Q. Maguire en 1999 ainsi que dans la thèse de doctorat de Mitola en 2000. Reconnu comme le « père de la radio logicielle » et l'un des chercheurs les plus cités dans ce domaine, Mitola a mis à profit

son expertise en radio logicielle, associée à son intérêt pour l'apprentissage automatique et l'intelligence artificielle, afin de concevoir la technologie de la radio cognitive [25].

IV.1.2 Définition

La radio cognitive (RC) est une technologie innovante fondée sur les systèmes de radio définis par logiciel, dont l'objectif est d'optimiser l'utilisation du spectre électromagnétique, une ressource naturelle limitée et précieuse [26]. Elle se caractérise par sa capacité à observer son environnement, à en tirer des connaissances et à s'adapter automatiquement aux changements du contexte d'utilisation. Grâce à une perception en temps réel de l'environnement spectral, spatial et du comportement des utilisateurs, elle peut identifier les bandes de fréquences disponibles, réduire les interférences et ajuster ses paramètres de fonctionnement, tels que la fréquence porteuse, la puissance d'émission et le débit de transmission, afin d'assurer une communication fiable et une utilisation efficace du spectre. Ces fonctionnalités lui permettent de coexister harmonieusement avec les utilisateurs primaires tout en garantissant une qualité de service satisfaisante aux utilisateurs secondaires. En intégrant des mécanismes d'analyse, de mémorisation et de décision, la radio cognitive peut également répondre à des besoins spécifiques, comme la reconnaissance vocale ou la détection de situations d'urgence [27]. Ainsi, elle représente une solution prometteuse pour relever les défis des systèmes de communication modernes, tout en améliorant l'efficacité et la durabilité des ressources spectrales.

IV.1.3 La relation entre la RC et la SDR

La SDR (Software Defined Radio) est une plateforme matérielle et logicielle clé pour la radio cognitive. Elle fournit une infrastructure flexible pour des fonctions adaptatives comme le balayage spectral (observation) et le changement dynamique de fréquence (action). En tant que technologie de base, elle assure la flexibilité, la reconfigurabilité et la portabilité pour ajuster en temps réel fréquence, puissance, modulation et bande passante à l'environnement radio.

Une SDR peut exister sans cognition, comme un système programmable statique. Mais la radio cognitive repose nécessairement sur la SDR pour ses capacités adaptatives, leur lien passe par le moteur cognitif, qui pilote la SDR en analysant l'environnement radio, le contexte utilisateur et l'état du réseau, pour un apprentissage et raisonnement dynamiques [29].

IV 1.4 Cycle de cognition

Afin de garantir des performances optimales, la radio cognitive doit intégrer des fonctions spécifiques, décrites par Mitola dans le cadre du cycle cognitif. Comme l'illustre la figure I.5, ce processus commence par une phase d'observation et se termine par une phase d'action, ce qui permet à la radio cognitive d'interagir de manière efficace avec son environnement. Ce cycle repose sur plusieurs étapes successives, à savoir l'observation, l'orientation, la planification, la prise de décision et l'action. Grâce à ce mécanisme, le système est capable de s'adapter en permanence à son environnement afin d'améliorer progressivement ses performances [28].

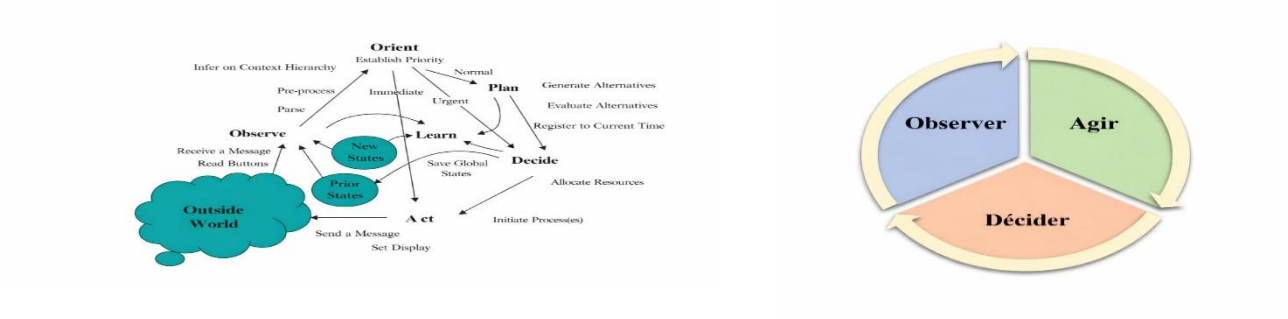


Figure I.4: (a) Cycle de cognition de Mitola, (b) Cycle de cognition simplifié [29].

- **Phase d'observation :** La radio cognitive commence par analyser son environnement en recueillant et en interprétant les stimuli reçus. À ce stade, elle prend en compte différents paramètres, tels que la localisation, la température ou encore le niveau de luminosité des capteurs, afin de mieux comprendre le contexte de communication. En mettant en relation ces informations avec des expériences antérieures, elle parvient à identifier des comportements récurrents et à enrichir progressivement sa base de connaissances [30].
- **Phase d'orientation :** Les données obtenues lors de la phase d'observation sont ensuite traitées et comparées à des situations de transmission déjà rencontrées. Cette étape permet à la radio cognitive de reconnaître des schémas de communication et de mieux situer la situation actuelle par rapport à son historique.
- **Phase de planification :** Lorsque le contexte devient plus complexe et nécessite une analyse plus approfondie, la composante cognitive du système intervient. Elle exploite des techniques d'apprentissage automatique afin d'améliorer ses capacités d'adaptation et de prise de décision. La radio cognitive peut ainsi ajuster ses paramètres de transmission de manière à satisfaire les exigences de qualité de service, tout en évitant toute interférence avec les utilisateurs primaires.

- **Phase de décision :** À ce niveau, le système sélectionne la meilleure option parmi les différentes alternatives disponibles. En fonction des indicateurs de qualité de l'information évalués, il peut, par exemple, notifier l'utilisateur d'un message entrant ou différer l'interruption à un moment plus opportun.
- **Phase d'action :** La stratégie retenue lors de la phase de décision est ensuite mise en œuvre. Cette étape repose sur l'interaction avec l'environnement externe, notamment l'état des transmissions des autres utilisateurs et la disponibilité des bandes de fréquences. Le schéma d'allocation peut alors être ajusté en temps réel selon les besoins de l'utilisateur et l'état interne de la radio cognitive.
- **Phase d'apprentissage :** L'apprentissage est une étape essentielle du cycle cognitif, car il permet à la radio cognitive d'améliorer progressivement ses décisions et ses actions.

  À partir des données issues de l'observation et des résultats obtenus, le système compare les situations présentes aux expériences passées afin d'ajuster ses stratégies et d'optimiser ses performances futures [31].

IV.2 Architecture d'un réseau radio cognitif

Mitola a conçu l'architecture de la radio cognitive en prenant en compte trois dimensions essentielles : l'utilisateur, le réseau et l'environnement. Cette architecture s'appuie sur une structure intelligente composée de plusieurs éléments interconnectés, capables d'assurer différentes fonctions et services tout en respectant un ensemble cohérent de règles de conception [32]. La figure 1.5 met en évidence les six principales composantes fonctionnelles de cette architecture, illustrant ainsi l'équilibre recherché entre adaptabilité, efficacité du réseau et satisfaction des besoins de l'utilisateur.

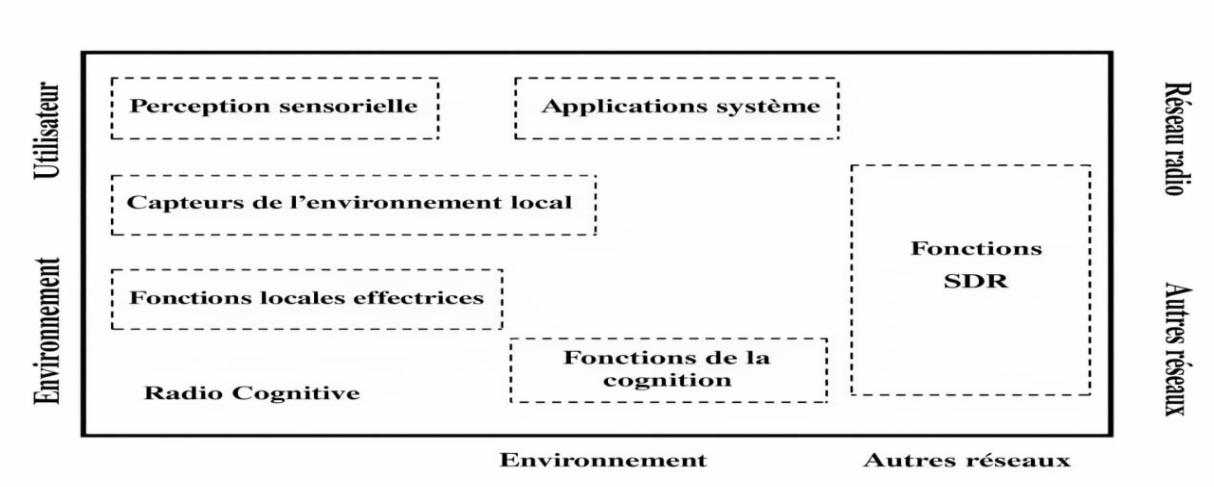


Figure I.5 : Les composants de l'architecture de la radio cognitive [32].

- La perception sensorielle (SP) de l'utilisateur : elle englobe les interfaces haptiques, acoustiques et vidéo, ainsi que les fonctions de détection et de perception.
- Les capteurs de l'environnement local : ils permettent de mesurer des paramètres tels que la localisation, la température ou l'accélération à l'aide d'un accéléromètre.
- Les applications système : elles regroupent les services multimédias indépendants, comme les jeux en réseau
- Les fonctions SDR (Software Defined Radio) : elles incluent la détection RF ainsi que les applications radio reposant sur la radio définie par logiciel.
- Les fonctions cognitives : elles sont consacrées aux mécanismes de contrôle, de planification et d'apprentissage.
- Les fonctions effectrices locales : elles comprennent la synthèse vocale, textuelle et graphique, ainsi que l'affichage de contenus multimédias [32].

L'architecture des protocoles de la radio cognitive, présentée à la figure I.6, repose sur le modèle OSI (Open Systems Interconnection). La couche physique est assurée par la SDR, tandis que les couches supérieures utilisent des protocoles adaptatifs, tels que TCP (Transmission Control Protocol), UDP (User Datagram Protocol) et IP (Internet Protocol), afin de gérer les besoins des utilisateurs et les variations du canal. Un système de contrôle intelligent relie la SDR aux applications et ajuste en temps réel les paramètres des protocoles selon l'environnement radio cognitif [33].

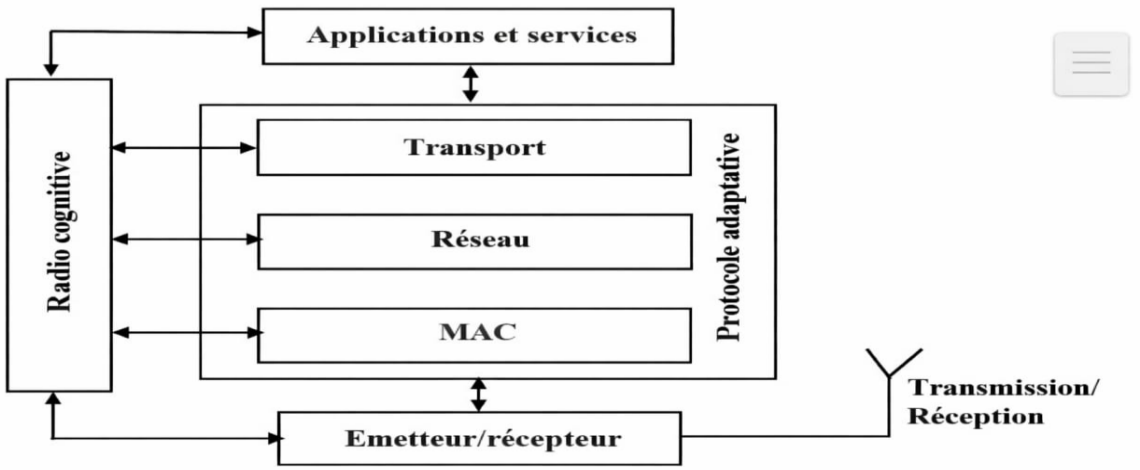


Figure I.6 : Les protocoles adoptés par la radio cognitive [33].

IV.3 Fonctions de la radio cognitive

Les fonctions d'une radio cognitive reposent sur un cycle dit « cognitif », qui lui permet de s'adapter intelligemment à son environnement. Concrètement, un système de radio cognitive réalise plusieurs tâches successives pour collecter et exploiter des informations sur le spectre radio. Grâce à ce processus, il peut identifier les bandes de fréquences disponibles et les utiliser efficacement sans perturber les utilisateurs déjà présents.

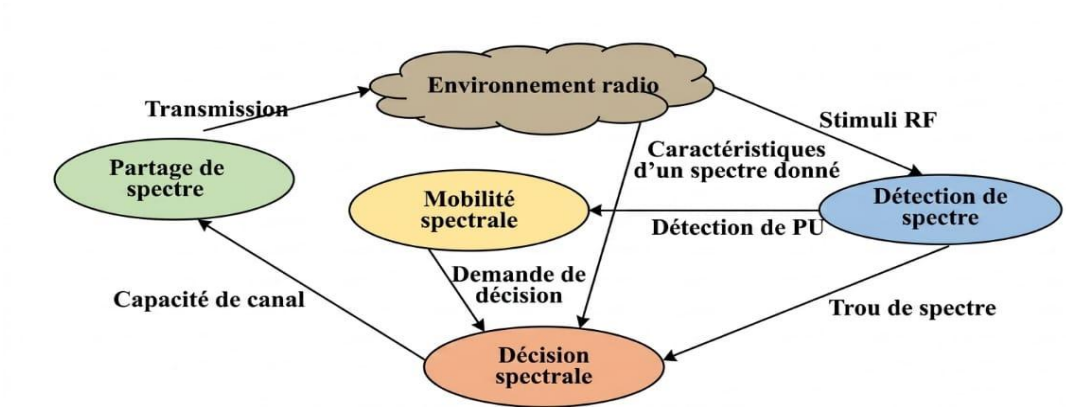


Figure I.7 : Les différentes tâches d'un système de radio cognitive [34].

La répartition de ces tâches ainsi que leur interaction (illustrée dans la figure I.7) peut être présentée de manière simplifiée comme suit :

IV.3.1 Détection du spectre

La détection du spectre constitue une étape essentielle dans le fonctionnement de la radio cognitive. Son objectif principal est d'évaluer l'état d'une bande de fréquence donnée et de repérer l'activité des utilisateurs primaires (PU). Pour cela, l'émetteur de la radio cognitive analyse le spectre afin d'identifier les opportunités disponibles et de déterminer les paramètres d'accès appropriés, comme la durée d'utilisation ou la puissance d'émission, tout en évitant toute interférence avec les utilisateurs prioritaires.

On distingue généralement deux types de détection du spectre [35] :

- **Détection centralisée :** dans ce cas, un contrôleur dédié est chargé d'analyser la bande de fréquence ciblée puis de diffuser les informations collectées aux différents nœuds du réseau.
- **Détection distribuée :** ici, la détection repose sur une approche coopérative entre les utilisateurs. Chaque nœud participe à l'analyse du spectre en tenant compte de sa propre stratégie ainsi que de celles des autres, sans recourir à un contrôleur central.

IV.3.2 Gestion du spectre

La radio cognitive doit choisir la bande de fréquences la plus adaptée afin de satisfaire les exigences de qualité de service parmi toutes les bandes disponibles. Pour cela, elle s'appuie sur un processus de gestion du spectre, qui comprend deux fonctions principales [35] :

- **Analyse du spectre** : les données obtenues lors de la détection du spectre sont exploitées pour mieux comprendre les opportunités disponibles. Cette analyse permet, par exemple, d'estimer le niveau d'interférence, la durée pendant laquelle une bande reste libre, ou encore le risque de collision avec un utilisateur primaire en cas d'erreur de détection. Sur la base de ces informations, la radio cognitive prend une décision d'accès au spectre visant à maximiser le débit de l'utilisateur secondaire tout en limitant les interférences envers l'utilisateur primaire.
- **Accès au spectre** : cette étape est assurée au niveau de la couche MAC (Medium Access Control). Elle a pour objectif d'organiser l'accès à la bande choisie de manière à éviter les collisions, que ce soit avec les utilisateurs primaires ou avec d'autres utilisateurs secondaires. Pour garantir une transmission correcte, il est également nécessaire que le récepteur soit synchronisé avec l'émetteur.

IV.3.3 Partage du spectre

Le partage du spectre permet à la radio cognitive d'attribuer une bande de fréquence libre (appelée trou de spectre) à un utilisateur secondaire lorsqu'elle n'est pas utilisée par un utilisateur primaire. Autrement dit, la radio cognitive exploite les ressources disponibles de manière opportuniste sans perturber les utilisateurs prioritaires.

Ce mécanisme de partage repose généralement sur deux méthodes principales, comme illustré dans la figure correspondante :

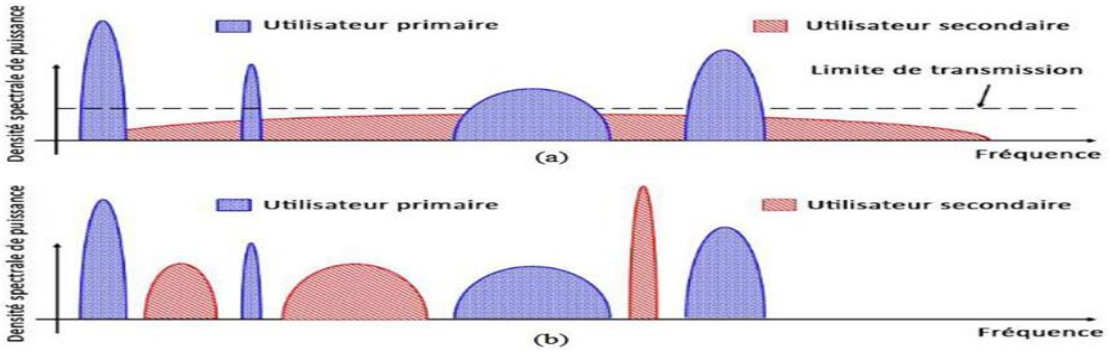


Figure I.8 : Les différentes approches de la RC : (a) Underlay ; (b) Overlay [29].

- **Partage du spectre sous-jacent (Underlay) :** cette approche consiste à autoriser l'accès au spectre avec une puissance d'émission très faible, afin de ne pas dépasser le niveau d'interférence toléré. L'objectif est de permettre aux utilisateurs secondaires de transmettre simultanément avec les utilisateurs primaires, tout en restant « invisibles » en termes d'interférences.
- **Partage du spectre par superposition (Overlay) :** dans cette méthode, les utilisateurs non licenciés exploitent la bande de fréquence uniquement pendant certaines périodes où elle n'est pas utilisée par les utilisateurs licenciés. L'accès au spectre se fait donc de manière temporelle, en profitant des intervalles de disponibilité.

IV.3.4 Mobilité spectrale

La mobilité spectrale désigne la capacité de la radio cognitive à changer de bande de fréquence lorsque celle qu'elle utilise devient occupée, notamment par un utilisateur primaire. Dans ce cas, l'utilisateur secondaire doit rapidement basculer vers une autre bande libre : ce processus est appelé « handoff ». Ce changement ne se limite pas uniquement à la fréquence, car il nécessite aussi l'adaptation des paramètres des protocoles à différents niveaux du système pour s'ajuster à la nouvelle bande. L'objectif est d'assurer une transition fluide, tout en maintenant la continuité de la transmission des données sans interruption [34].

V. Intégration des Réseaux Cognitifs dans l'IoMT

V.1 Motivation de l'intégration

V.1.1 Congestion des bandes ISM (2,4 GHz, 5,8 GHz et bande X)

L'Internet des objets médicaux (IoMT) repose principalement sur des technologies sans fil utilisant les bandes ISM (Industrial, Scientific and Medical), notamment à la fréquence de 2,4 GHz et 5,8 GHz [36]. Cependant, ces bandes sont non licenciées et fortement sollicitées, ce qui entraîne une congestion importante, particulièrement dans les environnements denses tels que les hôpitaux [37]. Cette congestion se traduit par :

- Une augmentation des interférences.
- Une dégradation de la qualité de service (QoS).
- Une perte de paquets critiques [38].

Par ailleurs, certaines bandes restent sous-utilisées, créant un déséquilibre dans l'exploitation du spectre radio [36]. La radio cognitive apparaît alors comme une solution permettant d'exploiter dynamiquement ces ressources inexploitées [37].

V.1.2 Besoin d'adaptation dynamique

Les applications IoMT exigent une faible latence, une haute fiabilité et une disponibilité permanente [39]. Or, les réseaux traditionnels ne s'adaptent pas dynamiquement aux conditions du spectre [40].

Les réseaux cognitifs permettent :

- L’ajustement automatique de la fréquence.
- Le contrôle de la puissance.
- L’adaptation au trafic et aux interférences.

Cette capacité d'adaptation dynamique est essentielle pour garantir la continuité des services médicaux critiques [41].

V.2 Apports des réseaux cognitifs pour l'IoMT

V 2.1 Amélioration de la fiabilité

Les réseaux radio cognitifs permettent une sélection intelligente des canaux disponibles, évitant les bandes encombrées [37]. Ils assurent :

- Une transmission plus stable.
- Une réduction des pertes de données.
- Une meilleure continuité des communications.

Dans le contexte IoMT, cela garantit la transmission fiable des données vitales des patients [36].

V.2.2 Optimisation énergétique :

Les dispositifs IoMT sont souvent limités en énergie (capteurs portables, implants). La radio-cognitive contribue à :

- Réduire la puissance de transmission inutile.
- Éviter les retransmissions dues aux collisions.
- Optimiser l'utilisation des ressources radio.

Ainsi, elle améliore la durée de vie des dispositifs médicaux connectés [39].

V.2.3 Gestion intelligente des interférences :

Un des principaux avantages des réseaux cognitifs est la gestion intelligente des interférences grâce à :

- La détection du spectre (spectrum sensing).
- L'évitement des utilisateurs primaires.
- L'adaptation en temps réel des paramètres radio.

Les utilisateurs secondaires peuvent exploiter les canaux libres sans perturber les utilisateurs prioritaires, ce qui réduit considérablement les interférences.

V.2.4 Priorisation des données médicales critiques :

Dans l'IoMT, toutes les données n'ont pas la même importance [36]. Les réseaux cognitifs permettent :

- La priorisation du trafic.
- La réservation dynamique du spectre.
- La garantie de QoS pour les applications vitales [38].

Des modèles intelligents permettent de favoriser la transmission des données médicales urgentes (alertes, monitoring en temps réel) [36].

VI. Conclusion

Au terme de ce premier chapitre, nous avons exploré les fondements de l'Internet des objets médicaux (IoMT), en mettant en évidence ses concepts clés, son architecture en couches ainsi que ses exigences techniques spécifiques. L'IoMT se distingue de l'IoT classique par ses contraintes strictes en matière de fiabilité, de sécurité et de latence, qui sont essentielles dans le contexte médical.

Par ailleurs, l'étude des réseaux radio cognitifs a permis de comprendre leur capacité à exploiter intelligemment le spectre radio, grâce à des mécanismes d'adaptation dynamique et de détection de l'environnement. Ces caractéristiques apparaissent particulièrement pertinentes pour répondre aux défis de congestion, d'interférences et d'efficacité énergétique rencontrés dans les systèmes IoMT.

L'intégration des réseaux cognitifs dans l'IoMT constitue ainsi une approche prometteuse, permettant d'améliorer la qualité de service, la robustesse des communications et la gestion des ressources spectrales, tout en assurant la transmission fiable des données médicales critiques.

Cependant, la mise en œuvre efficace de ces systèmes repose fortement sur les performances des éléments matériels sous-jacents, notamment les dispositifs de communication radio. Parmi ces éléments, les antennes jouent un rôle central, car elles conditionnent directement la qualité de transmission, l'adaptabilité et l'efficacité énergétique des systèmes sans fil.

Dans ce contexte, il devient essentiel d'étudier les antennes, en particulier les antennes reconfigurables, qui offrent des capacités d'adaptation en fréquence, en polarisation ou en diagramme de rayonnement. Ces caractéristiques les rendent particulièrement adaptées aux environnements dynamiques et contraints tels que ceux de l'IoMT.

Ainsi, le chapitre suivant sera consacré à une étude approfondie des antennes et des antennes reconfigurables, en mettant en lumière leur fonctionnement, leurs différentes architectures, ainsi que leur rôle clé dans l'amélioration des performances des systèmes de communication sans fil modernes.

Chapitre II

Généralités sur les Antennes et la Reconfigurabilité

Table des matières

I. Introduction 29
II. Fondements Théoriques des Antennes 29
II.1. Définition et principe de fonctionnement 29
II.2 Paramètres caractéristiques des antennes 30
III. Types d'antennes 34
III.1 Antenne slot (à fente) 34
III.2 Antenne filaire 35
III.3 Antenne cornet 35
III.4 Antenne omnidirectionnelle 36
III.5 Le dipôle demi-onde 36
III.6 Antenne parabolique 36
IV. Les antennes imprimés (Patch) 37
IV.1 Structure d'une antenne imprimée 37
IV.2 Techniques d'adaptation 38
IV.3 Méthodes d'excitation 40
IV.4 La miniaturisation des antennes imprimées 42
IV.4.1 Techniques de miniaturisation des antennes 43
V. Les antennes reconfigurables 44
V.1 Historique 44
V.2 Définition 45
V.3 Classification des antennes reconfigurables 45
V.4 Les techniques de reconfiguration 48
VI. Contribution des antennes reconfigurables à la radio cognitive 51
VII. Domaines d'application des antennes reconfigurables 52
VIII. Avantages et les inconvénients d'une antenne reconfigurable 53
IX. Conclusion 54

I. Introduction

L’essor des technologies sans fil a complètement révolutionné les communications modernes, surtout dans des secteurs critiques comme l'Internet des Objets Médicaux (IoMT). Au centre de tout ça, les antennes sont essentielles : elles gèrent l'envoi et la réception des ondes électromagnétiques, et leur design impacte directement les performances des appareils – portée, fiabilité, consommation d'énergie, qualité du signal, tout y passe.

Par ailleurs, l’évolution des applications vers des environnements dynamiques a favorisé l’émergence d’antennes reconfigurables, capables d’adapter leurs propriétés (fréquence, diagramme de rayonnement, polarisation) en fonction des besoins. Ces solutions offrent une grande flexibilité et trouvent un intérêt particulier dans des domaines avancés tels que la radio cognitive. De plus, dans le domaine médical, des contraintes spécifiques doivent être prises en compte, notamment en matière de sécurité, de biocompatibilité et de respect des normes telles que le SAR (Specific Absorption Rate, ou taux d’absorption spécifique).

Enfin, ce chapitre présente les concepts fondamentaux des antennes, leurs paramètres essentiels ainsi que les principales catégories existantes. Une attention particulière est accordée aux antennes patch, en raison de leur compacité, de leur faible coût et de leur facilité d’intégration dans les dispositifs IoMT, qu’ils soient portables ou implantables. Les techniques de reconfiguration, leurs avantages ainsi que leurs applications sont également étudiés, avant de conclure par une analyse des contraintes propres au domaine médical et des perspectives de recherche associées.

II. Fondements Théoriques des Antennes

II.1. Définition et principe de fonctionnement

Une antenne, c'est un appareil radio qui transforme des signaux électriques en ondes électromagnétiques quand on émet, et l'inverse quand on reçoit. Elle rend possible la transmission sans fil d'informations, et elle est indispensable dans les communications d'aujourd'hui : radio, Wi-Fi, satellites, téléphones mobiles, etc [1].

Les antennes jouent deux rôles clés dans les systèmes de communication sans fil :

- **Antenne d'émission :** Elle convertit les signaux électriques issus du dispositif émetteur en ondes électromagnétiques qui se propagent dans l'espace pour atteindre des antennes distantes. L'efficacité de cette conversion repose sur des paramètres essentiels comme la fréquence de fonctionnement, la polarisation et la directivité [1].

- **Antenne de réception :** Elle capte les ondes électromagnétiques ambiantes et les transforme en signaux électriques utilisables par le récepteur. C'est une étape critique pour garantir la qualité et la fiabilité du lien [2].

Ces fonctions assurent une transmission bidirectionnelle fluide et efficace, sans lien filaire entre les équipements.

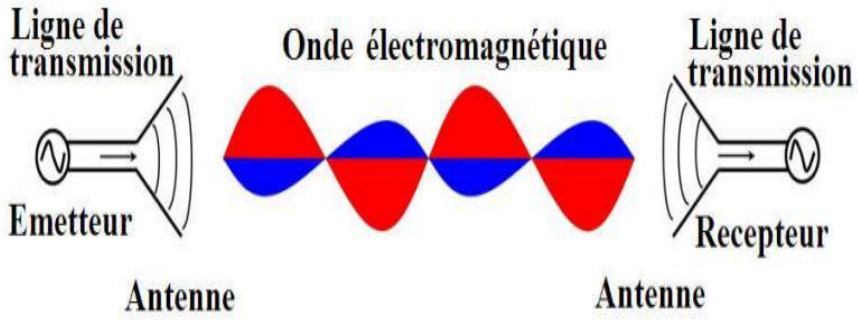


Figure II.1 : Propagation d'une onde électromagnétique entre un émetteur et un récepteur via des antennes [3].

II.2 Paramètres caractéristiques des antennes

Les antennes se définissent par un bouquet de paramètres clés, qui servent à évaluer leurs perfs et à comparer les différents designs. Les principaux, c'est :

II.2.1 Caractéristiques de rayonnement

- **Diagramme de rayonnement**

Le diagramme de rayonnement d'une antenne, c'est une vue graphique (2D ou 3D) qui montre comment la puissance, le gain ou le champ électrique se répartit selon les angles θ (élévation) et φ (azimut) [4]. On le trace souvent dans deux plans orthogonaux : le plan E (où le champ électrique est max) et le plan H (pour le magnétique) [5].

L'énergie rayonnée par une antenne n'est pas distribuée de manière isotrope dans l'espace ; elle présente des directions privilégiées formant les lobes de rayonnement [6]. Le lobe principal abrite le maximum d'énergie, tandis que l'angle d'ouverture est défini comme l'angle au-delà duquel la puissance diminue jusqu'à la moitié de ce maximum. Les lobes secondaires, incluant le lobe arrière (situé à 180° par rapport au lobe principal), constituent des directions parasites indésirables. La conception d'une antenne cherche ainsi à les minimiser [7].

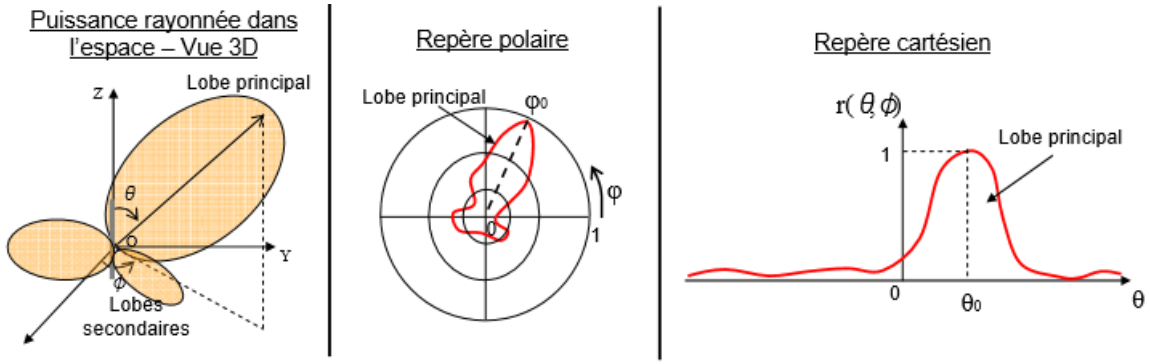


Figure II.2 : Visualisation du diagramme de rayonnement d'une antenne [8].

Les antennes directionnelles concentrent la puissance rayonnée dans des directions spécifiques, contrairement aux antennes omnidirectionnelles qui émettent de manière uniforme dans un plan unique [9].

- **Directivité**

La directivité d'une antenne mesure sa capacité à concentrer l'énergie rayonnée dans une direction spécifique lors de l'émission, ou à capter préférentiellement l'énergie incidente d'une direction donnée en réception [10]. Elle s'exprime par la relation suivante [11] :

$$D = \frac{4\pi U(\theta,\phi)}{P_{total}} \qquad \text{(II.1)}$$

Où :

U (θ, ϕ) : Intensité de rayonnement dans la direction (θ, ϕ).

*P*total : est la puissance totale rayonnée par l'antenne.

- **Efficacité**

L'efficacité d'une antenne, notée η, correspond au rapport entre la puissance rayonnée (Prayonnee) et la puissance totale admise à l'antenne en entrée (Pentrée). Elle intègre les pertes internes (dissipation thermique, pertes diélectriques) et impacte directement le gain de l'antenne [12]. Elle s'exprime par la formule suivante [13] :

$$\eta = \frac{P_{rayonnée}}{P_{entrée}} \qquad \text{(II.2)}$$

- **Gain**

Le gain d'une antenne intègre à la fois sa directivité et son efficacité, en tenant compte des pertes ohmiques et diélectriques. Il quantifie le rapport entre la puissance émise dans la direction principale et celle d'une antenne isotrope idéale. Il s'exprime en fonction de la directivité D et de l'efficacité η par la relation suivante [14] :

$$G = \eta . D \tag{II.3}$$

- **Polarisation**

La polarisation caractérise l'orientation du champ électrique E d'une onde électromagnétique, paramètre essentiel en antennes puisqu'elles ne captent efficacement qu'une polarisation donnée [15]. Elle se définit par la trajectoire temporelle du vecteur E :

- Polarisation rectiligne : le vecteur E maintient une direction constante dans le temps [16].
- Polarisation circulaire ou elliptique : le vecteur E décrit une hélice formant un cercle ou une ellipse au fil du temps [17].

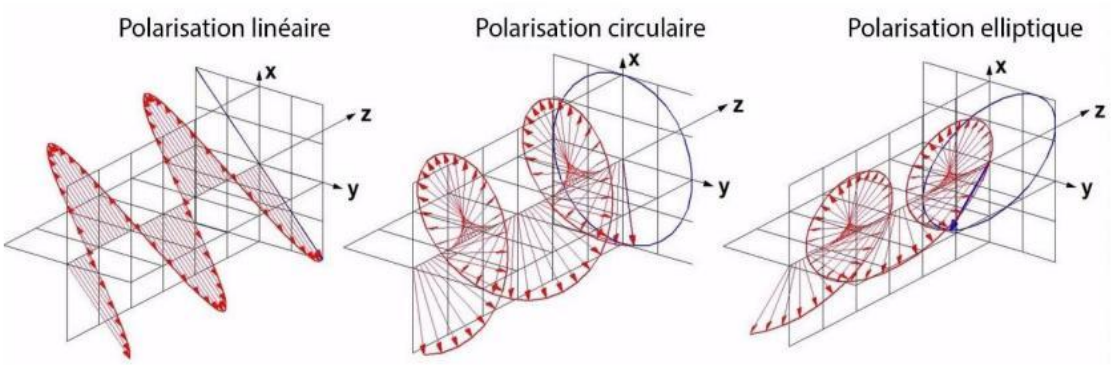


Figure II.3 : Les trois types de polarisation [18].

II.2.2 Caractéristiques électriques

- **L'impédance d'entrée**

Ze de l'antenne assure l'adaptation avec le générateur ou la source d'alimentation, optimisant ainsi le transfert de puissance. En mode émission, elle se détermine comme le rapport entre la tension d'entrée Vin et le courant d'entrée Iin aux bornes de l'antenne [19].

$$Z_e = \frac{V_{in}}{I_{in}} = R + j X \tag{II.4}$$

Où :

R : la résistance : la partie réelle (active) $R = Rr_{ayonnement} + Rp_{ertes}$.

X : la réactance : la partie imaginaire (réactive) exprimée par la relation :

$$X_j = L\omega - \frac{1}{C\omega} \quad \text{(II.5)}$$

Avec :

$\boldsymbol{\omega} = \mathbf{2\pi f}$: la pulsation (en rad/s),

L : l'inductance (H),

C : la capacité (F),

J : l'unité imaginaire.

- **Coefficient de réflexion**

Le coefficient de réflexion Γ se définit comme le rapport entre l'amplitude de l'onde réfléchie à l'entrée de l'antenne et celle de l'onde incidente [19]. Ce paramètre dépend étroitement de l'impédance d'entrée Ze et de l'impédance caractéristique de la ligne Zc, *selon* la relation suivante [20] :

$$\Gamma = S_{11} = \frac{Z_e - Z_c}{Z_e + Z_c} \quad \text{(II.6)}$$

- **Taux d'onde stationnaire**

Le VSWR (Voltage Standing Wave Ratio), ou rapport d'onde stationnaire de tension, quantifie l'adéquation entre l'impédance de l'antenne et celle de la ligne de transmission associée [21]. Il se définit comme le rapport entre les tensions maximale et minimale le long de la ligne, ou en fonction du coefficient de réflexion Γ (ou S11) par la relation suivante [22] :

$$TOS = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} \quad \text{(II.7)}$$

- **Bande passante**

La bande passante d'une antenne correspond à l'intervalle de fréquences assurant un transfert optimal d'énergie entre la source et l'antenne (ou inversement). Elle est généralement définie par le coefficient de réflexion S11, sous la condition d'un diagramme de rayonnement stable

dans cette plage fréquentielle. Bien que non strictement limité, |S11| est typiquement inférieur à -10 dB ou -15 dB [23].

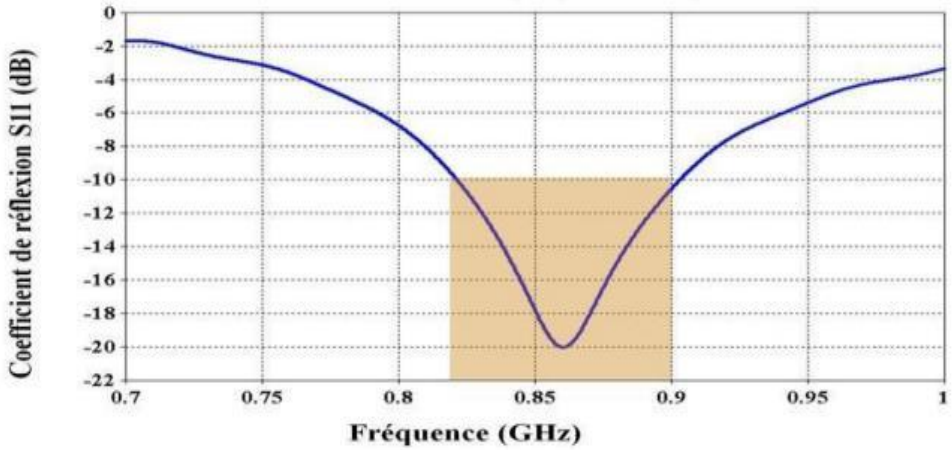


Figure II.4: La bande passante [23].

III. Types d'antennes

Les antennes sont des dispositifs essentiels dans les systèmes de communication. Elles permettent de transmettre et de recevoir des ondes électromagnétiques. Il existe plusieurs types d'antennes, chacun ayant des caractéristiques spécifiques selon leur utilisation.

III.1 Antenne slot (à fente)

L'antenne à fente est une antenne directrice qui exploite une ouverture rectangulaire (ou de forme similaire) pour émettre ou recevoir des ondes électromagnétiques. Elle est largement employée dans les antennes sectorielles pour les communications, offrant un gain élevé sur un large angle de couverture. En combinant trois ou quatre antennes à fente via un coupleur, il est possible de réaliser une couverture omnidirectionnelle à 360°. Ces antennes sont couramment utilisées en Wi-Fi et en radio amateur [24].

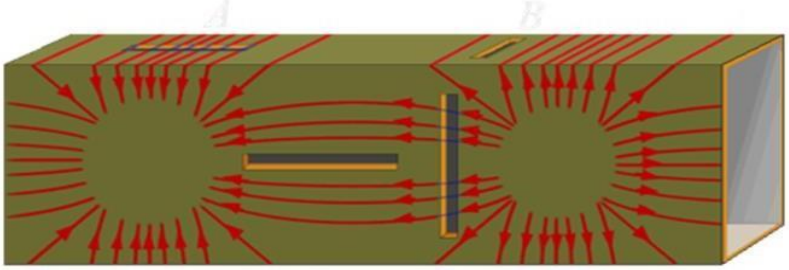


Figure II.5 : Antenne slot (à fente) [24].

III.2 Antenne filaire

Les antennes filaires sont omniprésentes dans la vie quotidienne, intégrées à des objets variés comme les voitures, bâtiments, navires, avions et engins spatiaux. Elles adoptent diverses formes, telles que le fil droit (dipôle), la boucle ou l'hélice [25].

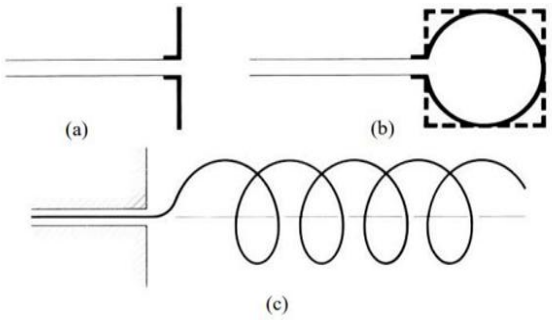


Figure II.6 : Antenne filaire [25].

III.3 Antenne cornet

L'antenne cornet se caractérise par sa forme distinctive en cône cylindrique, évoquant un large entonnoir ou une pyramide à base ouverte inclinée [26]. Elle est alimentée par un guide d'ondes rectangulaire ou circulaire qui se débouche progressivement en une section conique élargie, permettant une transition fluide entre le mode guidé et le rayonnement libre. Cette géométrie assure un diagramme de rayonnement bien défini, avec un gain élevé (typiquement 10-25 dBi), une largeur de faisceau étroite et une faible distorsion de phase, ce qui la rend idéale pour les applications en hyperfréquences (fréquences > 1 GHz), comme les mesures en chambre anéchoïque, les liens par satellite ou les radars. Ses dimensions sont proportionnelles à la longueur d'onde, et elle présente un excellent rapport signal/bruit grâce à sa directivité [27].

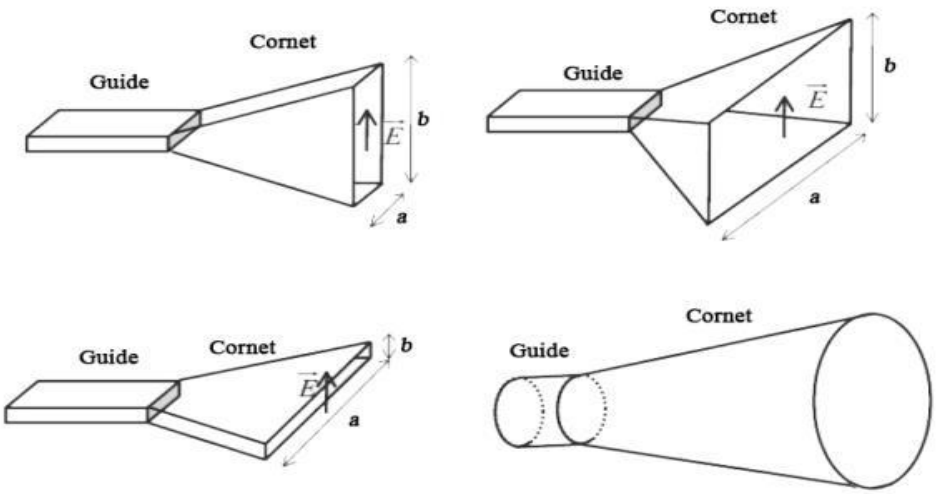


Figure II.7 : Antenne cornet [27].

III.4 Antenne omnidirectionnelle

Les antennes omnidirectionnelles rayonnent ou captent les ondes électromagnétiques uniformément dans toutes les directions horizontales, sans nécessiter d'orientation vers une source particulière. Elles sont largement employées en radiodiffusion, télécommunications, surveillance et navigation [28].



Figure II.8 : Antenne omnidirectionnelle [28].

III.5 Le dipôle demi-onde

Le dipôle demi-onde est une antenne de type doublet formée de deux brins chacun mesurant la moitié de la longueur d'onde du signal, alimentés au centre par un câble coaxial. Il constitue une référence étalon pour évaluer les performances d'autres antennes, grâce à ses caractéristiques bien établies : directivité, gain et résistance d'entrée normalisés. Ces propriétés en font un standard de comparaison incontournable [28].

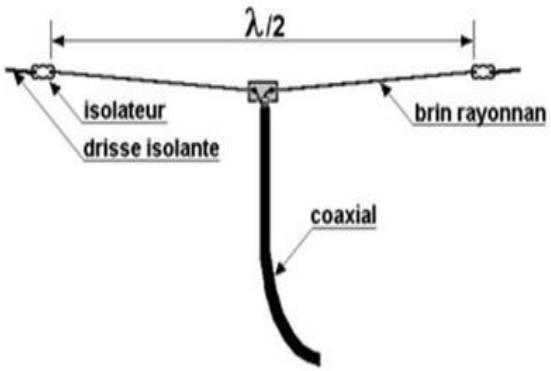


Figure II.9 : Le dipôle demi-onde [28].

III.6 Antenne parabolique

L'antenne parabolique est un type d'antenne haute directivité conçu pour capter les signaux de télévision, de radio et autres transmissions hyperfréquences. Elle joue un rôle essentiel dans la

réception des signaux audiovisuels et de communication, particulièrement dans les zones isolées ou à faible couverture [28].

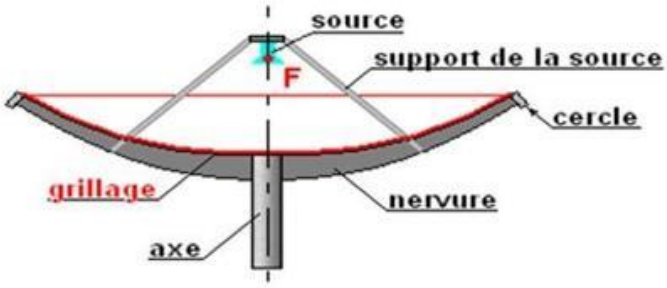


Figure II.10 : Antenne parabolique [28].

IV. Les antennes imprimées (Patch)

L'antenne patch, ou micro-ruban, est un dispositif compact conçu pour émettre et recevoir des ondes électromagnétiques [29]. Elle excelle dans les applications à forte intégration, comme les smartphones, avions, véhicules spatiaux et satellites, où les contraintes de taille, de poids, de performance et d'installation sont primordiales. Grâce à leurs caractéristiques, les antennes imprimées représentent l'une des meilleures solutions pour ces besoins. L'antenne patch s'adapte facilement à diverses fréquences et polarisations, et peut être optimisée par des techniques de reconfigurabilité, en faisant une option à la fois efficace et économique [30], [31].

IV.1 Structure d'une antenne imprimée

Une antenne imprimée est généralement réalisée par des techniques de gravure sur un substrat diélectrique, similaires à celles utilisées pour la fabrication des circuits imprimés.

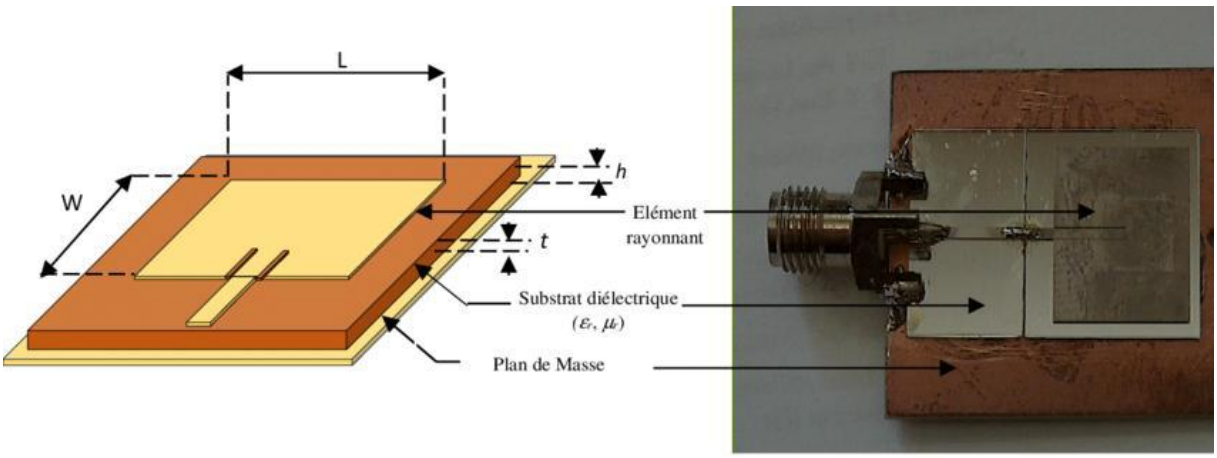


Figure II.11: Structure de l'antenne patch [32].

Voici les principaux éléments qui composent sa structure :

- **Patch rayonnant** : Il s'agit de la partie métallique de l'antenne responsable de l'émission et de la réception des ondes électromagnétiques. Généralement réalisé en cuivre ou un autre matériau conducteur, il peut adopter diverses formes, comme illustré dans la figure ci-dessous [33].

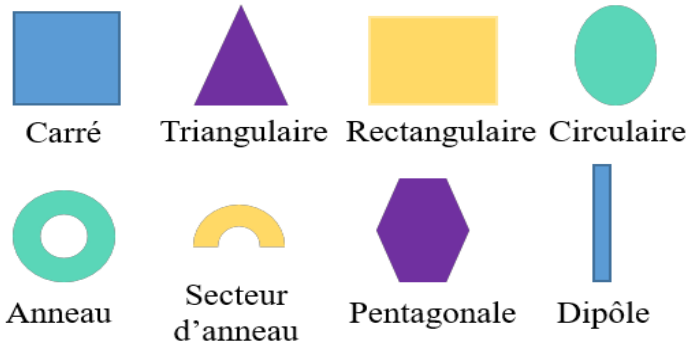


Figure II.12: Formes de l'élément rayonnant de l'antenne patch [33].

- **Substrat :** Couche diélectrique sur laquelle est imprimé le patch. Elle influence des propriétés clés comme la fréquence de résonance et l'efficacité de l'antenne. Les matériaux courants sont le Rogers, le FR4 ou le Téflon [34].
- **Plan de masse (ou réflecteur) :** Plaque métallique située sous le substrat, qui réfléchit les ondes électromagnétiques pour optimiser les performances de l'antenne [35].
- **Ligne d'alimentation :** Guide acheminant le signal vers l'antenne. Elle peut être de type micro-ruban ou sonde traversant le substrat pour se connecter au patch [34].

IV.2 Techniques d'adaptation

L'adaptation d'une antenne patch vise à égaler l'impédance de l'antenne à celle de la ligne de transmission, afin de maximiser le transfert de puissance, de minimiser les réflexions et d'optimiser les performances globales. Voici les principales techniques :

- **Adaptation par encoches** : Cette technique consiste à intégrer et optimiser des fentes ou ouvertures dans la structure de l'antenne pour assurer une adaptation d'impédance optimale à la fréquence cible. Appréciée pour sa compacité, son profil bas et sa large bande passante, elle est idéale pour les applications miniaturisées [36].

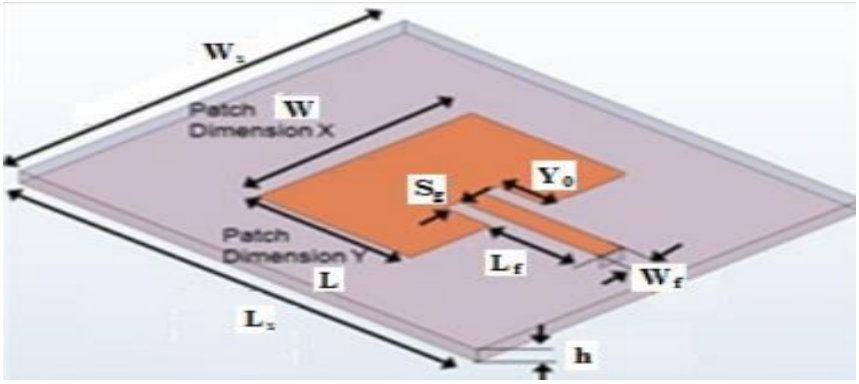


Figure II.13 : Adaptation avec encoche [37].

- **Adaptation par ligne quart d'onde** : Cette méthode utilise une ligne de transmission de longueur λ/4 et d'impédance caractéristique Z0 pour transformer l'impédance de charge ZL en une impédance d'entrée Zin, selon la relation :

$$Z_{in} = \frac{{Z_0}^2}{Z_L} \qquad \text{(II.8)}$$

Ainsi, Zin dépend directement de ZL et Z0. Pour une adaptation optimale à la fréquence de résonance, la longueur de la ligne doit être exactement λ/4 [38].

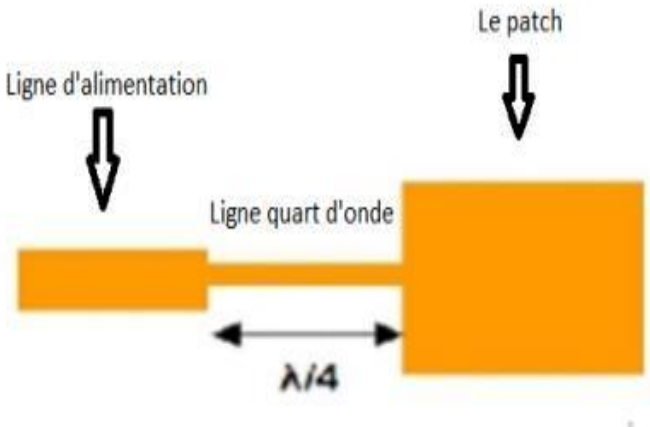


Figure II.14 : Adaptation par ligne quart d'onde [39].

- **Adaptation par stub** : Cette technique alternative utilise un stub (ouvert ou court-circuité, selon l'option la plus compacte) connecté en parallèle à la ligne principale, à une distance précise de la charge. Pour faciliter les calculs, on travaille généralement en admittances et on additionne les composantes parallèles normalisées [40]. Un stub est une section de ligne de longueur déterminée, shuntée sur la ligne principale [41].

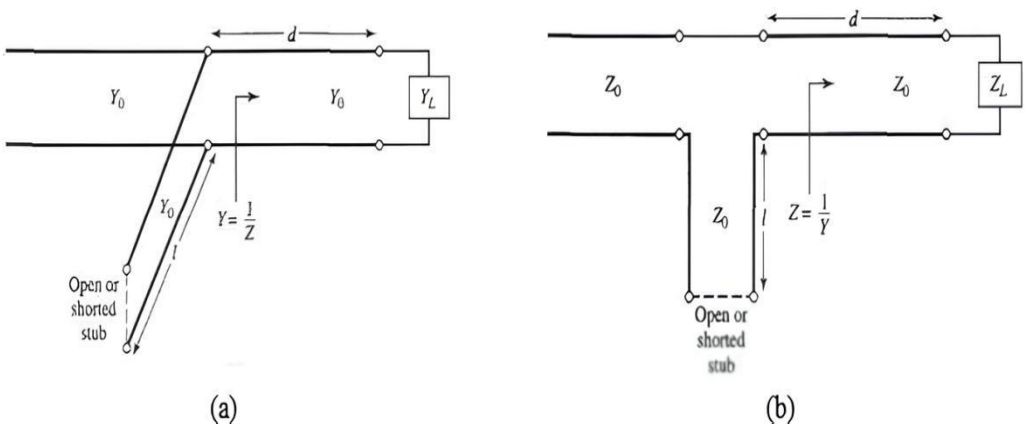


Figure II.15 : Configuration de l'adaptation d'un stub unique (a) parallèle/(b) série [42].

IV.3 Méthodes d'excitation

Les techniques d'alimentation des antennes, illustrées dans la figure ci-dessous, se répartissent en deux grandes catégories : les méthodes à contact direct avec l'antenne et celles basées sur un couplage électromagnétique. Voici un aperçu des principales méthodes, classées selon les techniques avec contact et sans contact :

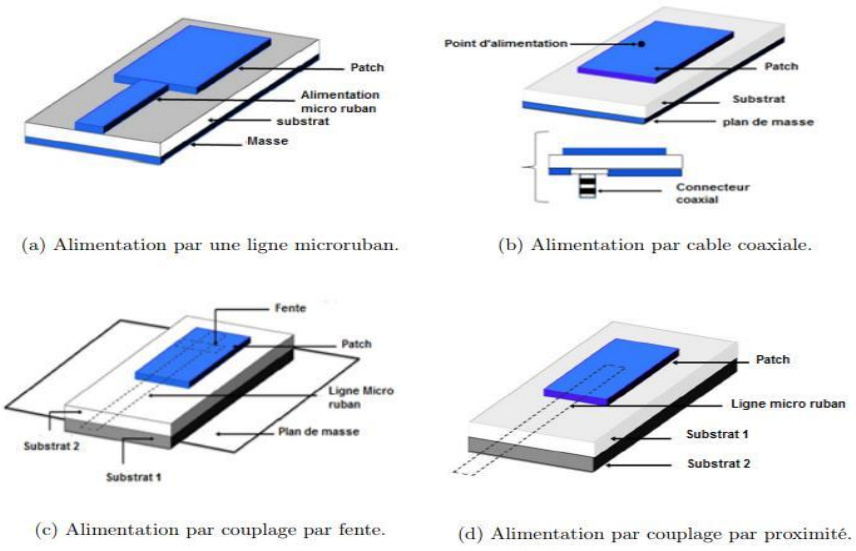


Figure II.16 : techniques d'alimentation des antennes [43].

IV.3.1 Alimentation avec contact

- **Alimentation par une ligne micro-ruban**

Pour optimiser l'alimentation d'un patch par micro-ruban, il est préférable de le relier directement au bord du patch, les deux étant sur un substrat commun. Cette méthode assure une

connexion efficace et un transfert d'énergie optimal pour le bon fonctionnement du dispositif [44].

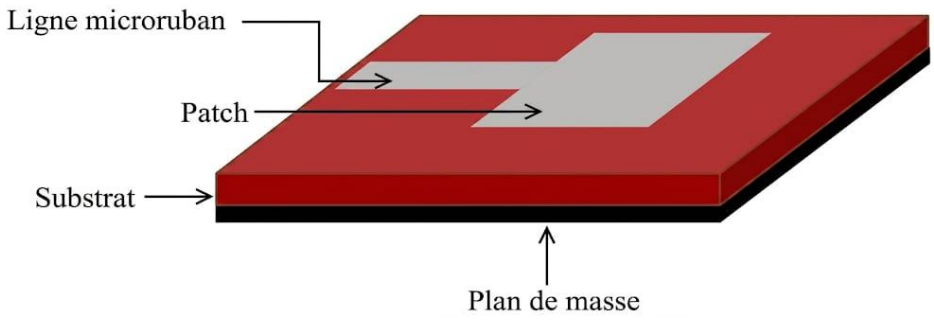


Figure II.17 : Alimentation par une ligne micro-ruban [45].

- **Alimentation par câble coaxial**

L'alimentation coaxiale (parfois appelée "de seconde génération") est l'une des méthodes les plus répandues. Le conducteur central du câble se connecte directement au patch émetteur, tandis que la tresse extérieure est reliée au plan de masse [46].

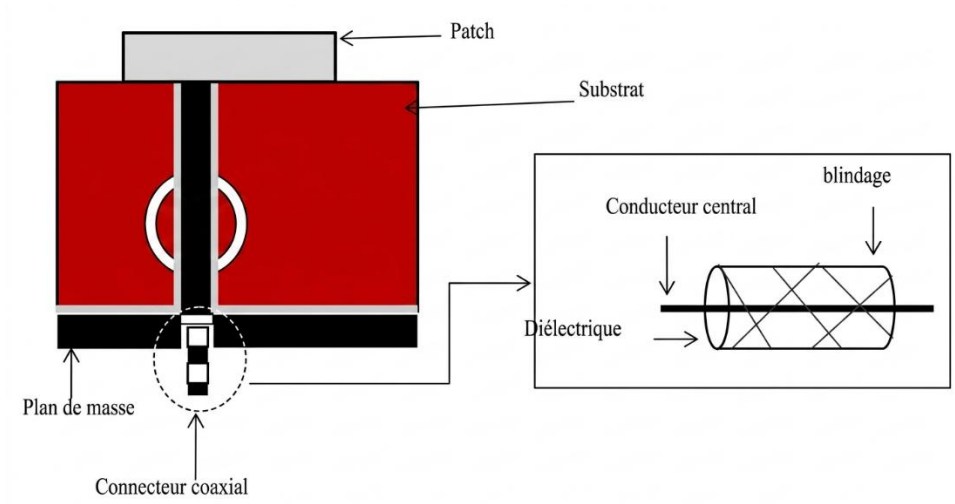


Figure II.18 : Alimentation par câble coaxial [45].

IV.3.2 Alimentation sans contact

- **Alimentation par couplage à travers une fente (ouverture)**

Dans cette technique, le patch et la ligne micro-ruban sont séparés par le plan de masse, reliés uniquement par une fente ou ouverture. Le substrat inférieur emploie des matériaux à haute permittivité, tandis que le supérieur utilise des matériaux à faible constante diélectrique, afin d'améliorer l'efficacité de rayonnement du patch [47].

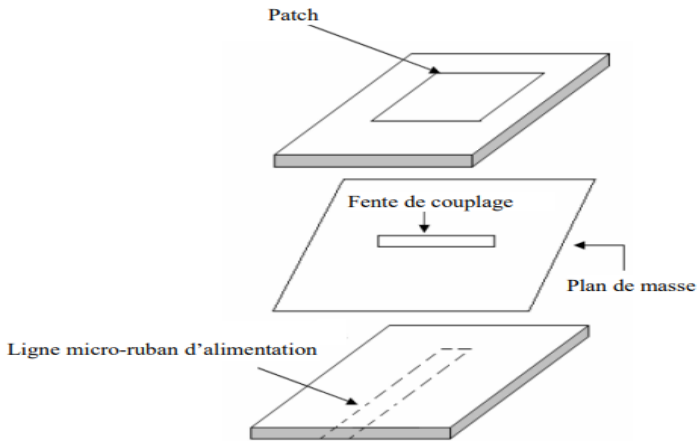


Figure II.19 : Alimentation par ouverture [48].

- **Alimentation par couplage par proximité**

Aussi appelé couplage électromagnétique, cette technique utilise deux substrats diélectriques : la ligne d'alimentation est placée entre eux, et le patch sur le substrat du haut. L'avantage ? On peut optimiser les performances de l'antenne en choisissant des matériaux diélectriques différents pour le patch et la ligne [49].

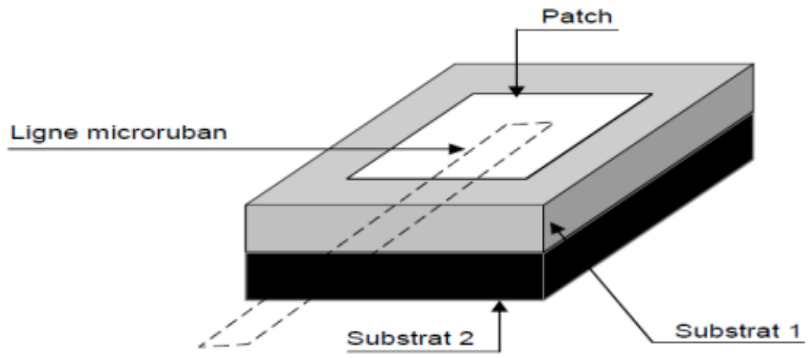


Figure II.20 : Alimentation par couplage électromagnétique [49].

IV.4 La miniaturisation des antennes imprimées

Ces dernières décennies, de nouvelles techniques ont permis de miniaturiser les appareils électroniques. Outre leur compacité, ces dispositifs communiquent sans fil [50], ce qui impose l'usage d'antennes. Aujourd'hui, l'antenne est un élément clé, et sa réduction de taille représente un défi majeur.

La miniaturisation d'une antenne vise à diminuer sa taille, sa surface et son volume, tout en préservant sa fréquence de résonance. Il faut aussi intégrer les circuits d'adaptation d'impédances directement à proximité pour assurer son bon fonctionnement.

IV.4.1 Techniques de miniaturisation des antennes

Les techniques de miniaturisation des antennes regroupent les méthodes permettant de réduire leurs dimensions physiques tout en préservant leurs performances de rayonnement [51].

- **Insertion de court-circuit**

Insertion d'une plaque de court-circuit entre l'élément rayonnant et le plan de masse, dans la zone où le champ électrique est nul pour le mode fondamental [52], [53].

- **Utilisation des matériaux**
  - Utilisation d'un diélectrique : La miniaturisation peut être obtenue par des substrats à forte permittivité réduisant la longueur d'onde guidée [54], [55].
  - Utilisation d'un matériau magnéto-électrique : les matériaux magnéto-diélectriques maintenant de bonnes performances [54], [56].

Dans ce travail, la miniaturisation est obtenue par l'utilisation du substrat silicone (ε_r = 11,9). Le tableau ci-dessous compare les surfaces des trois substrats étudiés selon la relation S = L*W.

Substrat	**L (mm)**	**W (mm)**	**Surface (mm²)**	**Variation**
Rogers RT5880 – Initial	59,072	39,006	2304,4	—
RogersRT5880 - Adaptée	63,96	39,26	2511,6	+9,0%
FR-4 – Initial	45,06	32,396	1459,7	—
FR-4 – Adaptée	44,71	32,439	1450,1	−0,7%
Silicone – Initial	30,76	24,125	742,1	—
Silicone – Adaptée	29,971	26,36	790,0	+6,4%

Tableau II.1 : Comparaison des dimensions selon le substrat.

Le substrat en silicium présente les plus petites dimensions. En configuration adaptée, sa surface est réduite de 68,6 % par rapport au Rogers RT5880 et de 45,5 % par rapport au FR-4, ce qui le rend adapté aux dispositifs médicaux portables ou implantables

- **Modification de la géométrie**
  - Insertion d'encoches ou de fentes : cette technique consiste à introduire des fentes dans l'élément rayonnant afin d'augmenter sa longueur électrique et de miniaturiser l'antenne [52].
  - Repliement et courbure : ces techniques consistent à plier ou courber l'élément rayonnant afin de réduire l'encombrement de l'antenne tout en conservant ses performances [57] [58].
- **Miniaturisation à l'aide de métamatériaux**

Les métamatériaux sont des structures artificielles aux propriétés électromagnétiques particulières. Leur intégration dans les antennes améliore les performances de rayonnement et

favorise la miniaturisation, notamment grâce à l'utilisation de cellules SRR et CSRR intégrées à l'élément rayonnant ou au plan de masse. [59].

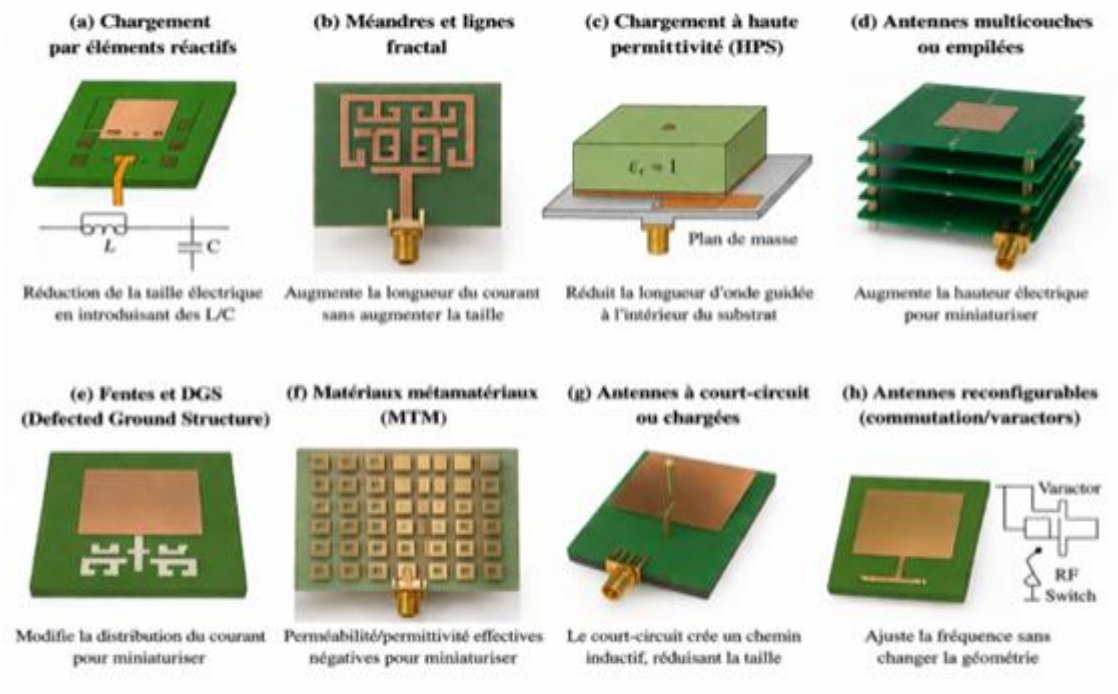


Figure II.21 : Les techniques de miniaturisation des antennes [60-62].

V. Les antennes reconfigurables

L'évolution des besoins en transmission rapide de données et en communication fiable a fortement stimulé le développement des technologies de pointe dans le domaine des communications par satellite. Néanmoins, les antennes conventionnelles demeurent limitées en termes de performances et de couverture fréquentielle, puisqu'elles opèrent généralement sur une bande de fréquences spécifique. Cette limitation justifie ainsi l'intérêt croissant accordé aux antennes reconfigurables [63].

V.1 Historique

Le concept d'antenne reconfigurable remonte aux années 1930, époque à laquelle les premières structures ont été étudiées afin d'orienter et d'adapter les signaux radio. Par la suite, des antennes à réseaux variables ont été développées pour améliorer la détection des directions d'ondes courtes et accroître la précision des systèmes radar, notamment avec le réseau Wullenweber durant la Seconde Guerre mondiale. Dans les années 1970, la notion de « reconfigurabilité » a été définie comme la capacité d'une antenne à modifier ses faisceaux en fonction des besoins [64].

V.2 Définition

Une antenne reconfigurable est capable de modifier sa configuration afin de s'adapter à l'environnement électromagnétique et d'améliorer les conditions de propagation. Elle peut également faire varier une ou plusieurs de ses caractéristiques fondamentales par des moyens électriques, mécaniques, numériques ou autres, selon les besoins et le contexte d'utilisation. Cette reconfiguration s'effectue en agissant sur la répartition du courant électrique, ce qui permet de modifier les propriétés du champ électromagnétique, l'impédance, la phase ou encore la polarisation, de manière discrète ou continue. L'agilité de ses paramètres repose généralement sur l'utilisation de composants électroniques commutables ou accordables [65].

V.3 Classification des antennes reconfigurables

Une représentation schématique des différents types d'antennes reconfigurables est présentée dans la figure suivante :

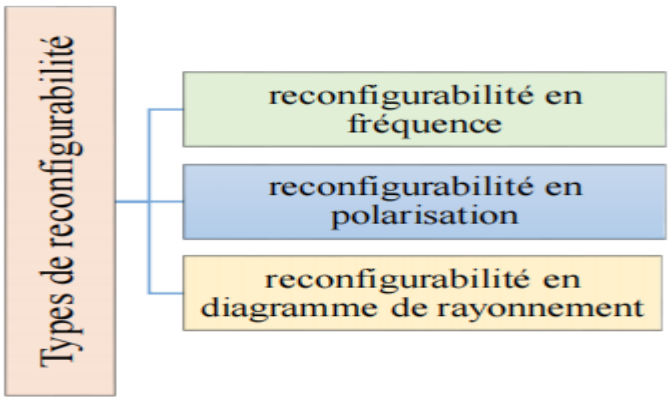


Figure II.22 : Les types d'antennes reconfigurables [66].

V.3.1 Antennes reconfigurables en fréquence

Les antennes reconfigurables en fréquence permettent de couvrir plusieurs bandes de fréquences, ce qui réduit le nombre d'antennes nécessaires pour assurer des communications multi bandes. Cette reconfigurabilité consiste à modifier la fréquence de fonctionnement de l'antenne, comme l'illustre la figure ci-dessous. Également appelées antennes accordables en fréquence, elles se répartissent en deux catégories : reconfiguration continue et reconfiguration discrète par commutation [67].

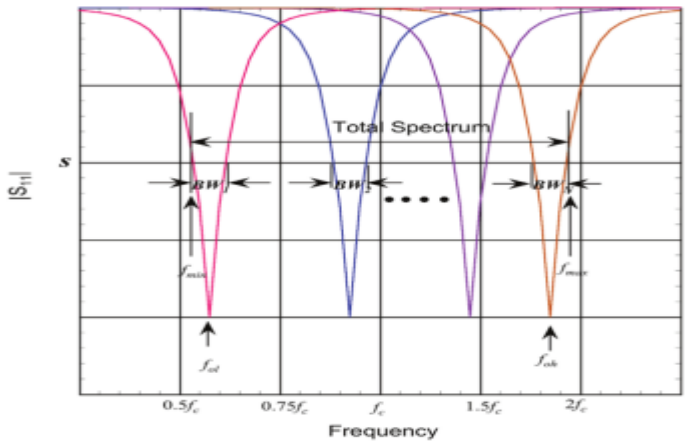


Figure II.23 : Coefficient de réflexion d'une antenne reconfigurable en fréquence [68].

- **Antenne reconfigurable en fréquence continue**

Dans ce cas, l'ajustement de la fréquence s'effectue de manière progressive et peut être réalisé sur une plage continue. L'antenne peut ainsi fonctionner à n'importe quelle fréquence comprise dans une bande donnée, sans être limitée à des valeurs discrètes. Ce type de reconfiguration repose généralement sur des composants accordables, tels que les diodes varactor, ou sur des matériaux à permittivité variable comme le graphène ou les cristaux liquides. Il est particulièrement adapté aux applications nécessitant un réglage précis et une adaptation en temps réel aux conditions de fonctionnement [69].

- **Antenne reconfigurable en fréquence discrète**

Dans ce cas, la fréquence de fonctionnement ne varie pas de manière continue, mais uniquement entre plusieurs valeurs prédéfinies. L'antenne opère donc sur des fréquences fixes, plutôt que sur une bande continue. Cette reconfiguration est généralement assurée par des diodes PIN ou des commutateurs RF-MEMS, chaque état du commutateur correspondant à une fréquence de résonance donnée. Ce principe présente l'avantage d'être simple à contrôler et relativement stable, mais il offre une flexibilité plus limitée. Il convient particulièrement aux applications multi bandes fonctionnant sur des plages fréquentielles bien définies [70].

La reconfigurabilité en fréquence joue un rôle essentiel dans les applications de radio cognitive, où elle permet d'alterner entre les modes de détection et de communication. C'est dans ce contexte que notre travail s'appuie sur ce type de reconfiguration.

V.3.2 Antennes reconfigurables en polarisation

La polarisation d'une antenne peut être reconfigurée afin d'améliorer la réutilisation des fréquences et de réduire les effets liés aux trajets multiples [71]. Elle dépend en grande partie de la structure physique de l'antenne, puisque l'orientation des courants de surface sur les éléments rayonnants est influencée par sa géométrie ainsi que par son mode d'excitation. Une antenne à polarisation reconfigurable peut ainsi passer d'une polarisation linéaire (LP) à une polarisation circulaire (CP), ou encore d'une polarisation circulaire droite (RHCP) à une polarisation circulaire gauche (LHCP), selon les besoins de l'application. Cette capacité améliore la flexibilité du système et facilite l'échange d'informations entre des antennes présentant des polarisations différentes [72].

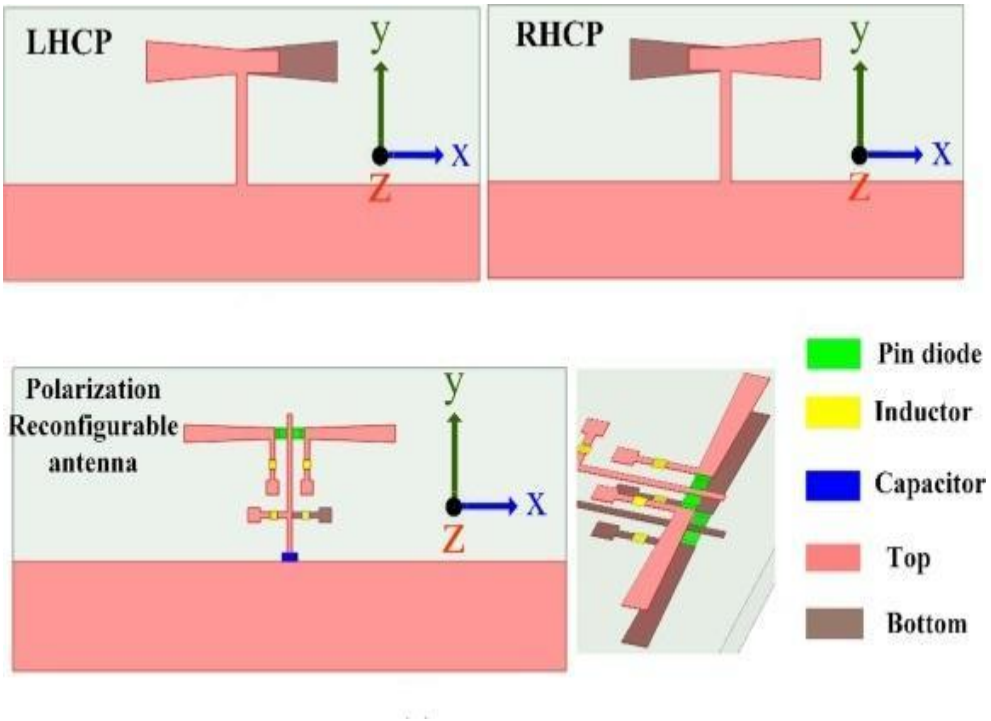


Figure II.24 : Antenne reconfigurable en polarisation [73].

V.3.3 Antennes reconfigurables en diagramme de rayonnement

Les antennes à reconfiguration du diagramme de rayonnement constituent une technologie essentielle pour les systèmes de télécommunication modernes. Elles permettent de modifier la forme, l'orientation ou le gain du diagramme de rayonnement, afin de privilégier certaines directions tout en en atténuant d'autres. Cette capacité de reconfiguration présente un intérêt particulier pour la réduction des interférences, la résistance au brouillage, l'amélioration de la sécurité des communications et l'optimisation de l'efficacité énergétique en orientant le faisceau vers les utilisateurs ciblés [74].

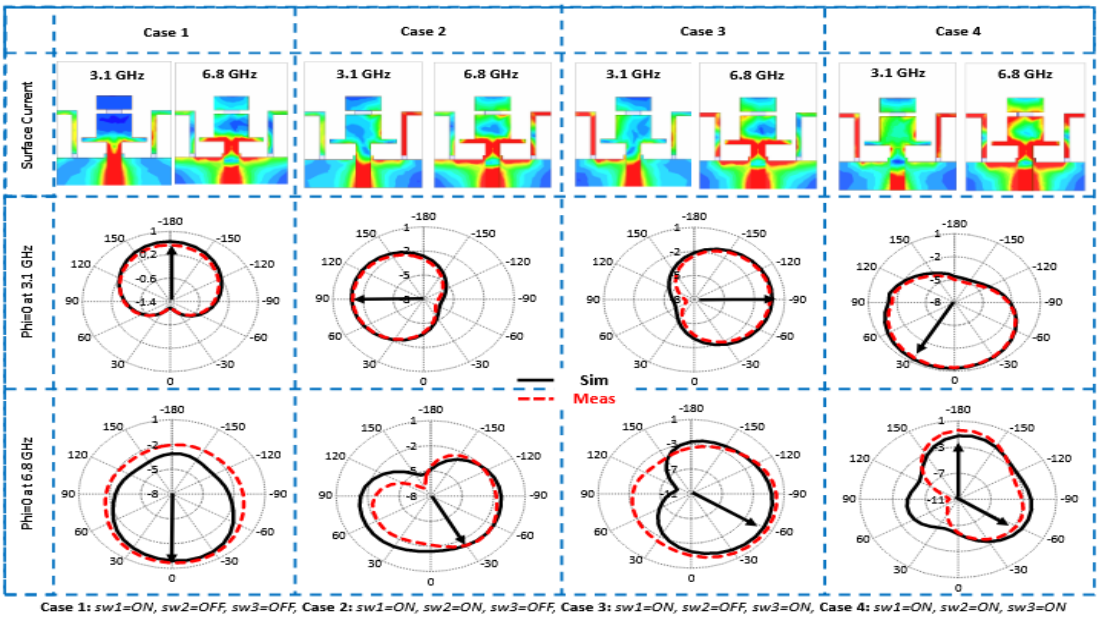


Figure II.25 : Les différents diagrammes de rayonnement d'une antenne reconfigurable [75].

Ainsi, cette approche constitue une solution prometteuse pour concentrer le signal dans la direction souhaitée tout en limitant les interférences provenant des directions indésirables. Par ailleurs, elle permet de modifier la distribution des courants sur la structure de l'antenne, afin d'orienter l'énergie rayonnée sous forme de faisceau vers des directions précises, ce qui contribue à l'amélioration du débit de transmission [76].

V.4 Les techniques de reconfiguration

Afin de répondre à ces exigences, plusieurs approches de reconfiguration sont étudiées. Elles reposent notamment sur l'utilisation de diodes varicap, de diodes PIN, de systèmes micro-électro-mécaniques (MEMS), de dispositifs optiques ainsi que de matériaux agiles [77].

V.4.1 Diode varicap

La diode varicap est un composant actif couramment employé pour permettre un réglage continu de la fréquence. Son comportement électrique peut être représenté à l'aide d'un schéma équivalent simplifié, comme indiqué sur la figure [78] :

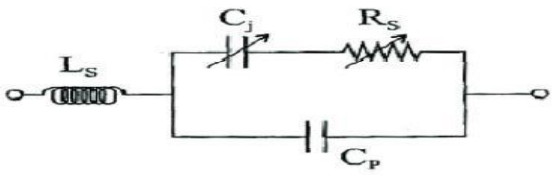


Figure II.26 : Diode varicap [78].

V.4.2 Diode PIN

La diode PIN est largement utilisée dans les systèmes RF en raison de sa rapidité de commutation entre les états de fonctionnement. Dans le domaine des antennes reconfigurables, elle sert fréquemment d'élément de commutation. Les schémas équivalents correspondant à ses deux états, ON et OFF, sont présentés dans la référence [79].

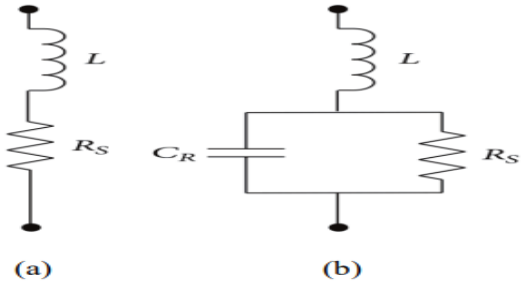


Figure II.27 : Diode PIN [79].

V.4.3 Les MEMS

L'utilisation des commutateurs RF basés sur la technologie MEMS suscite un intérêt croissant dans le domaine des antennes reconfigurables. Ces dispositifs reposent sur des mouvements mécaniques permettant d'établir un court-circuit ou un circuit ouvert dans une structure RF, ce qui offre plusieurs possibilités de configuration selon le cheminement du signal, le mode d'actionnement, le type de contact et l'architecture adoptée. Grâce à leurs performances élevées et à leur faible consommation, les commutateurs RF MEMS peuvent supporter des puissances importantes et conviennent à de nombreuses applications, notamment les radars, les analyseurs de réseau, les communications par satellite et les stations de base [78].

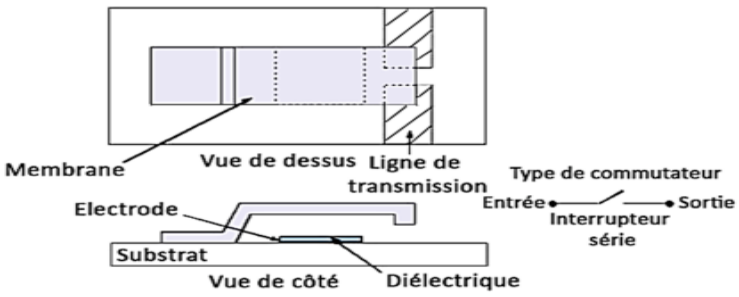


Figure II.28 : Commutateur MEMS [78].

V.4.4 Les matériaux agiles

Les matériaux dits « agiles » ou « intelligents » sont utilisés comme substrats afin de faire varier leurs propriétés électromagnétiques, notamment la permittivité ou la perméabilité, sous l'action

d'un champ électrique et magnétique externe. Cette aptitude permet d'améliorer la flexibilité des antennes. Toutefois, leur mise en œuvre reste complexe, car elle exige un système de commande élaboré, l'application de tensions élevées, une alimentation sophistiquée, ainsi qu'une gestion des pertes d'énergie et des temps de réponse relativement longs [78]. Ces dernières années, de nombreuses recherches ont exploré l'intégration de ces matériaux pour concevoir des antennes reconfigurables, en mettant particulièrement l'accent sur les cristaux liquides et le graphène.

- **Cristaux liquides**

Les cristaux liquides (CL) constituent un matériau non linéaire dont la constante diélectrique varie sous l'effet d'une tension appliquée, modifiant ainsi l'orientation moléculaire [80]. Dans l'étude [81], ils sont intégrés en tant que substrat d'une ligne microruban. Un simple ajustement de la permittivité des CL génère un déphasage, ce qui permet de reconfigurer le diagramme de rayonnement d'un réseau d'antennes.

- **Graphène**

Le graphène, matériau bidimensionnel innovant formé d'atomes de carbone en structure hexagonale, offre une ajustabilité exceptionnelle sur une vaste gamme de fréquences, des micro-ondes aux térahertz. Contrôlable électriquement ou thermiquement, il s'impose comme une solution idéale pour les antennes reconfigurables et les dispositifs THz [82]. Ces antennes tirent parti de ses propriétés uniques pour allier une miniaturisation extrême (à l'échelle micrométrique) à des performances élevées en gain et bande passante, ouvrant des perspectives dans l'infrarouge lointain et au-delà [83]. Par exemple, une antenne THz reconfigurable en fréquence et en faisceau, basée sur le graphène, couvre 0,1-2 THz avec une efficacité maximale de 85 % via l'ajustement des potentiels chimiques – des résultats prometteurs pour les communications THz [84].

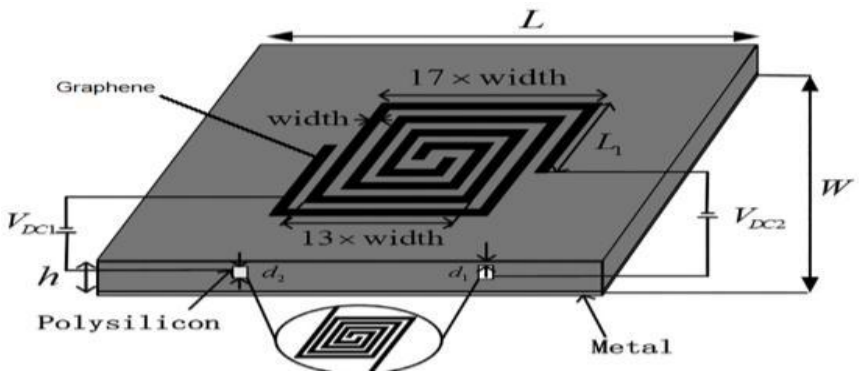


Figure II.29 : Structure de l'antenne en spirale carrée à base de Graphene [84].

V.4.5 Modification mécanique

La reconfiguration mécanique, bien que moins répandue dans la conception d'antennes reconfigurables, repose sur une altération physique de leur structure. Cette approche offre des atouts notables : une gestion de puissance élevée, des pertes minimisées et un réglage continu. En déformant ou déplaçant les éléments de l'antenne, on peut ainsi adapter le diagramme de rayonnement, la polarisation ou la fréquence de résonance. Contrairement aux méthodes basées sur des interrupteurs électriques ou optiques, elle évite les circuits de polarisation complexes et les environnements optiques spécifiques [85]. Les techniques principales incluent le pliage, la rotation ou le déplacement contrôlé de parties de l'antenne, comme détaillé dans [86-87].

V.4.6 Commutateur optique

Le commutateur optique est considéré comme une solution très performante par rapport aux autres techniques de reconfiguration. Toutefois, son principal inconvénient reste son coût élevé. Cette approche est également appréciée car elle permet d'éviter l'utilisation de circuits de polarisation [88].

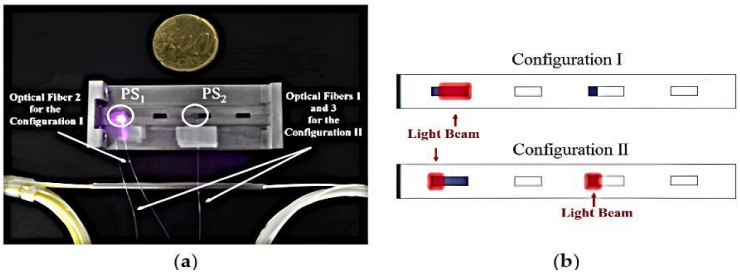


Figure II.30 : (a) Configuration de mesure du prototype fabriqué (b) différentes configurations [89].

VI. Contribution des antennes reconfigurables à la radio cognitive

La radio cognitive (RC), la radio logicielle définie (SDR) et les antennes reconfigurables, en synergie, permettent des communications sans fil adaptatives et performantes. La RC exploite dynamiquement les opportunités spectrales, ce qui requiert des équipements capables d'opérer sur diverses fréquences. La SDR offre un contrôle logiciel pour ajuster des paramètres comme la modulation ou la fréquence porteuse. Les antennes reconfigurables, pour leur part, modifient en temps réel leurs propriétés afin de répondre aux exigences variables, optimisant ainsi l'efficacité spectrale.

Les spécifications des antennes sont étroitement liées à l'architecture du système RC, telle que décrite au chapitre premier. Comme l'illustre dans la figure, ce système repose sur une antenne de détection pour repérer les portions sous-utilisées du spectre, suivie d'une antenne reconfigurable pour établir une communication optimale via l'attribution du canal adapté. [85] L'antenne de détection doit donc couvrir une large bande de fréquences. Cependant, en mode ultra-large bande (UWB), des interférences peuvent surgir, dégradant les performances globales.

Pour surmonter ces défis, une antenne unique intégrant des fonctionnalités reconfigurables simplifie l'architecture en alternant entre le mode détection UWB et le mode communication reconfigurable. Cette approche réduit les pertes de trajet et assure une communication efficace, tout en s'adaptant aux contraintes spectrales dynamiques [80], [90].

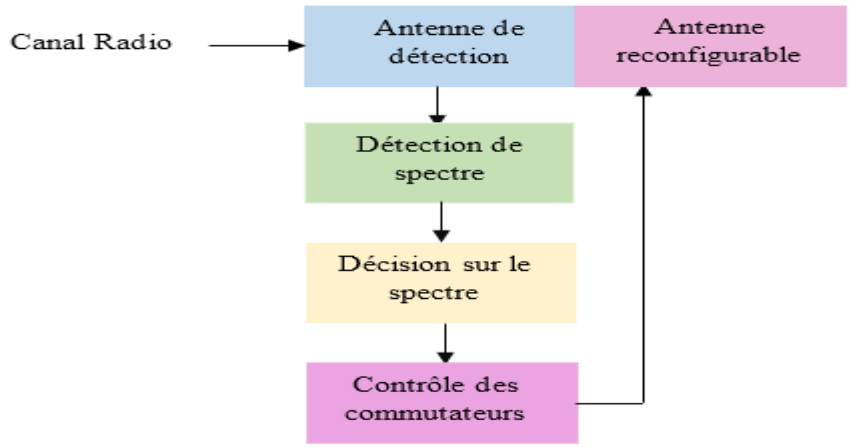


Figure II.31 : Organigramme de la radio cognitive [85].

VII. Domaines d'application des antennes reconfigurables

Les avancées en communications sans fil appellent une nouvelle génération d'antennes reconfigurables, capables de s'adapter dynamiquement aux environnements et de modifier leurs caractéristiques en réponse aux conditions ambiantes. Ces antennes trouvent des applications dans de nombreux secteurs, notamment :

- **Internet des objets médicaux (I'oMT)**

Dans l'Internet des objets médicaux, les antennes reconfigurables sont intéressantes pour leur compacité, leur flexibilité et leur aptitude à s'adapter à différents scénarios de communication. Elles permettent de concevoir des dispositifs plus efficaces pour la transmission de données

médicales, tout en répondant aux contraintes de miniaturisation et de faible consommation énergétique [91].

- **Applications satellitaires**

Dans les systèmes satellitaires, les antennes reconfigurables permettent d'adapter le diagramme de rayonnement, la fréquence ou la polarisation afin d'améliorer la couverture et de réduire les interférences. Cette capacité est particulièrement utile dans les environnements où les contraintes de propagation sont variables et où la flexibilité du lien radio est indispensable [66].

- **Systèmes de radio cognitive**

Dans les systèmes de radio cognitive, les antennes reconfigurables jouent un rôle essentiel, car elles facilitent l'accès dynamique au spectre. Elles peuvent ajuster rapidement leurs paramètres afin de s'adapter aux bandes de fréquences disponibles et d'optimiser l'exploitation des ressources radio [66].

- **Réseaux 5G**

Dans les réseaux 5G, les antennes reconfigurables répondent aux exigences de flexibilité, de large bande passante et d'efficacité spectrale. Elles contribuent à améliorer les performances du système en permettant une adaptation plus efficace aux besoins de communication de nouvelle génération [92].

VIII. Avantages et les inconvénients d'une antenne reconfigurable

Les antennes reconfigurables offrent une grande flexibilité pour s'adapter aux besoins dynamiques des systèmes de communication, comme dans les applications IoMT. Voici un tableau récapitulant leurs principaux avantages et inconvénients :

Avantages	Inconvénients
Grande flexibilité et adaptation à plusieurs services sur un seul appareil.	Coût plus élevé que les antennes classiques.
Réduction du nombre d'antennes, ce qui diminue la taille et le coût du système.	Consommation énergétique accrue.
Bonne isolation entre différentes normes et bandes sans fil.	Conception et simulation plus complexes.
Reconfiguration du rayonnement, offrant une diversité spatiale.	Intégration de composants actifs et de circuits de polarisation.
Reconfiguration en fréquence utile à de nombreuses applications sans fil.	Peut réduire l'efficacité globale du système.
Reconfiguration en polarisation réduisant les effets du multi chemin et améliorant la sécurité de transmission.	

Tableau II.2 : Avantages et inconvénients des antennes reconfigurables [93].

IX. Conclusion

Ce chapitre a permis de présenter les concepts fondamentaux des antennes ainsi que leurs principaux paramètres de performance. Une étude des différents types d'antennes a été réalisée, mettant en évidence leurs caractéristiques et leurs domaines d'application.

Un intérêt particulier a été porté aux antennes imprimées en raison de leur compacité et de leur facilité d'intégration dans les systèmes modernes. Par ailleurs, les antennes reconfigurables ont été introduites comme une solution innovante offrant une grande flexibilité grâce à leur capacité d'adaptation dynamique.

Ainsi, ces antennes constituent une technologie prometteuse pour les systèmes de communication de nouvelle génération, notamment dans des environnements intelligents tels que la radio cognitive.

Dans la continuité du chapitre précédent, ce chapitre est consacré à la simulation et à la réalisation d'une antenne reconfigurable compacte dédiée aux applications de l'IoMT. L'objectif est de concevoir et valider une structure performante, adaptée aux contraintes de miniaturisation et d'adaptabilité dans un environnement de radio cognitive.

Chapitre III

Conception d'antenne Reconfigurable pour I'IoMT

Table des matières

I. Introduction 57
II. Description du logiciel de simulation CST Studio Suite 57
III. Conception d'une antenne patch en forme rectangulaire 58
III.1 Cahier des charges 58
III.2 Géométrie de l'antenne simulée 59
III.3 Conception d'une antenne patch rectangulaire sur FR4 60
III.3.1 Antenne initiale FR4 60
III.3.2 Antenne initiale adaptée FR4 61
III.3.3 Antenne multi-résonance FR4 62
III.4 Conception d'une antenne patch rectangulaire sur Roger 65
III.4.1 Antenne initiale Roger 65
III.4.2 Antenne initiale adaptée Roger 67
III.4.3 Antenne multi-résonance Roger 68
III.5 Conception d'une antenne patch rectangulaire sur silicone 71
III.5.1 Antenne initiale silicone 71
III.5.2 Antenne initiale adaptée silicone 73
III.5.3 Antenne multi-résonance silicone 74
III.5.4 Antenne multi-résonance en silicone avec h = 1,9 77
IV. L'antenne patch reconfigurable multibande 80
IV.1 Modélisation de la diode vacator 80
IV.1.1 À l'antenne multi-résonance silicone 80
V. Étude comparative 82
V.1 Etudes comparative entre antenne avec substrat en Roger et en Silicone 82
V.2 Tableau récapitulatif et critères de la bande IoMT 83
V.3 Choix des substrats pour l'IoMT 84
VI. Conclusion 84

I. Introduction

L'essor de l'Internet des Objets Médicaux (IoMT) contribue aujourd'hui à l'amélioration des services de santé grâce à la surveillance à distance, au suivi en temps réel des patients et à l'échange rapide des données médicales. Cependant, la multiplication des dispositifs connectés impose de nouvelles contraintes en matière d'utilisation du spectre radioélectrique, rendant nécessaires des solutions de communication plus flexibles et intelligentes. Dans ce contexte, les antennes reconfigurables associées à la radio cognitive représentent une approche prometteuse pour répondre à ces défis.

Ce chapitre est consacré à la conception, à la simulation et à l'évaluation d'une antenne patch rectangulaire compacte et reconfigurable destinée aux applications IoMT en environnement radio cognitif. L'objectif est de développer une antenne capable de fonctionner de manière adaptative sur plusieurs bandes de fréquences d'intérêt, notamment 2,4 GHz, 5,8 GHz et la bande X, Pour atteindre cet objectif, la reconfigurabilité fréquentielle est obtenue par l'intégration de diodes varactors permettant de modifier les caractéristiques électriques de l'antenne et d'adapter sa fréquence de fonctionnement en fonction des besoins du système. Cette capacité d'adaptation contribue à une meilleure exploitation des ressources spectrales disponibles tout en répondant aux exigences de flexibilité et d'agilité imposées par les réseaux radio cognitifs.

Afin d'étudier l'influence du substrat sur les performances de l'antenne, trois matériaux diélectriques ont été analysés et comparés : le Rogers, le FR4 et le Silicone. Les simulations ont été réalisées sous CST Studio Suite, et les performances obtenues, telles que le coefficient de réflexion (S11), le gain, la bande passante et les diagrammes de rayonnement, sont présentées et discutées afin de valider l'efficacité de la structure proposée pour les applications IoMT basées sur la radio cognitive.

II. Description du logiciel de simulation CST Studio Suite

La conception d'antennes micro-rubans nécessite l'emploi d'un logiciel de simulation électromagnétique performant. Parmi les solutions disponibles, CST MICROWAVE STUDIO se distingue par sa spécialisation dans la simulation 3D haute fréquence, l'utilisation de la méthode des intégrales finies (FIT) pour résoudre les équations de Maxwell, et la prise en charge de multiples technologies d'antennes imprimées. En raison de ces atouts, CST MICROWAVE STUDIO a été retenu comme outil de simulation pour notre étude, permettant une analyse détaillée et une optimisation des performances des antennes. Son interface

utilisateur conviviale et ses fonctionnalités avancées en font un choix pertinent pour la réalisation de ce travail.

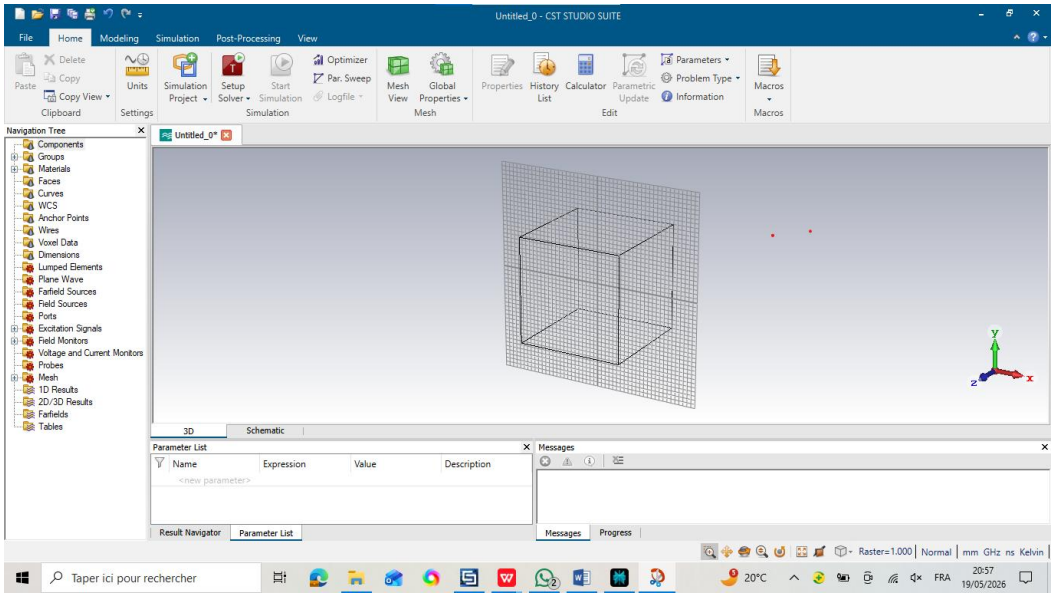


Figure III.1 : Interface du logiciel de simulation CST Studio 2019.

III. Conception d'une antenne patch en forme rectangulaire

III.1 Cahier des charges

Dans le cadre de ce projet, l'objectif est de concevoir une antenne patch rectangulaire multi-bande capable de fonctionner aux fréquences de résonance 2,4 GHz, 5,8 GHz et 8 GHz. La conception initiale de l'antenne est basée sur une fréquence centrale fr = 4 GHz afin de faciliter l'obtention des différentes bandes de résonance souhaitées. Les spécifications du cahier des charges définissent les paramètres suivants :

- Permittivité relative (ε_r) : Rogers TR5880 = 2,2 ; Silicon (silicium) = 11,9 ; FR4 = 4,3.
- tangente de perte (tan δ) : Rogers =0,0009 ; Silicon = 0,001 ; FR4 = 0,025.
- Hauteur du substrat (h) : 1,56 mm.
- Fréquence initiale de conception (fr) : 4,00 GHz.
- Fréquences de résonance souhaitées : 2,4 GHz ; 5,8 GHz ; 8,0 GHz.
- Impédance de la ligne micro-ruban : 50 Ω.
- Type d'alimentation : ligne micro-ruban.
- Épaisseur du cuivre (t) : 0,035 mm.

III.2 Géométrie de l'antenne simulée

La conception de l'antenne patch rectangulaire multi-bande nécessite le calcul des dimensions principales du patch, notamment la largeur (W) et la longueur (L), à l'aide des équations théoriques appropriées présentées dans le tableau III.1. Les dimensions de l'antenne dépendent principalement de la fréquence de résonance et des caractéristiques du substrat utilisé. L'antenne proposée est conçue à partir d'une fréquence principale de résonance fr = 4 GHz afin d'obtenir un fonctionnement multi-bande aux fréquences 2,4 GHz, 5,8 GHz et 8 GHz. Elle est alimentée par une ligne micro-ruban adaptée à une impédance de 50 Ω.

Trois substrats sont étudiés et comparés : le FR4 (LOSSY) de permittivité relative $\varepsilon_r = 4{,}3$, le Rogers de permittivité relative $\varepsilon_r = 2{,}2$, et le Silicon (silicium) de permittivité relative $\varepsilon_r = 11{,}9$, tous d'épaisseur h = 1,56 mm. Le patch rayonnant ainsi que le plan de masse sont réalisés en cuivre d'épaisseur t = 0,035 mm. Les dimensions finales de l'antenne ont été optimisées sous logiciel de simulation afin d'obtenir les fréquences de résonance souhaitées.

Paramètres de l'antenne	Équation
Longueur réelle du patch	$L_p = L_{\text{eff}} - 2\Delta L$
Longueur effective	$L_{\text{eff}} = \frac{c}{2\text{fr}\sqrt{\varepsilon\text{reff}}}$
L'extension de longueur	$L_{\text{eff}} = \frac{0.412\ \text{h}(\ \varepsilon\text{reff} + 0.3\left(\frac{w}{h} + 0.264\right)}{(\varepsilon\text{reff} - 0.258)\left(\frac{w}{h} + 0.8\right)}$
Constante diélectrique	$\varepsilon_{\text{reff}} = \frac{\varepsilon r + 1}{2} + \frac{\varepsilon r - 1}{2}\left(1 + 12\frac{h}{w}\right)^{-\frac{1}{2}}$
Largeur du patch	$W_p = \frac{c}{2\text{fr}\sqrt{\varepsilon\text{r} + 1}}$
Longueur du substrat	$L_g = L_p + 6h + L_f$
Largeur du substrat	$W_g = W_p + 6h$
Largeur de la ligne	$W_f = \frac{8\text{e}^{\text{A}}}{\text{e}^{2\ \text{A}-2}} \times \text{h}$ Avec $\text{A} = \frac{Zc\sqrt{2(\varepsilon_{r+1})}}{120} + \frac{1}{2} + \frac{(\varepsilon_{r-1})}{(\varepsilon_{r+1})} + \left(h\ln\frac{\pi}{2} + \frac{1}{\varepsilon_r} \times \ln\frac{4}{\pi}\right)$

Tableau III.1 : Les équations paramétriques d'un patch rectangulaire.

III.3 Conception d'une antenne patch rectangulaire sur FR4

III.3.1 Antenne initiale FR4

Après les calculs effectués, les paramètres géométriques de l'antenne patch rectangulaire sont résumés dans le tableau ci-dessous :

Paramètre	Dimensions (mm)
La largeur du patch (Wp)	23.036
La longueur du patch (Lp)	17.616
La largeur de la ligne d'alimentation (Wf)	3.058
La longueur de la ligne d'alimentation (Lf)	18.084
La longueur du substrat (Lg)	45.06
La largeur du substrat (Wg)	32.396

Tableau III.2 : Dimensions de l'antenne patch rectangulaire résonant à 4 GHz sur FR4.

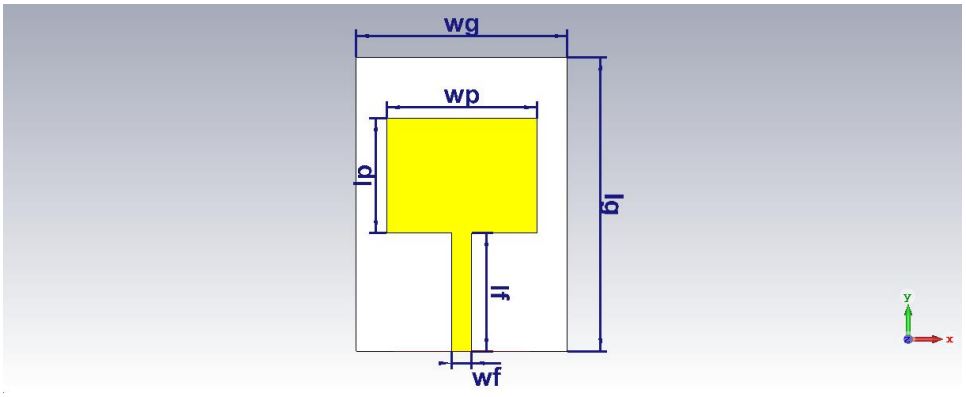


Figure III.2 : Structure d'une antenne patch rectangulaire initiale FR4.

• Coefficient de réflexion S11

Il est observé sur la figure que l'antenne simulée résonne à 4 GHz mais avec un coefficient S11 de seulement -6 dB. Par conséquent, une meilleure résonance sera étudiée pour améliorer le niveau du S11 à cette même fréquence.

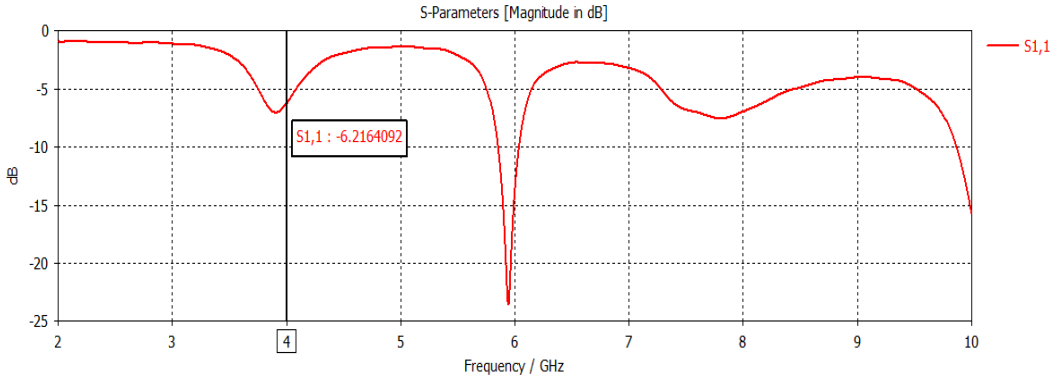


Figure III.3 : Coefficient de réflexion de l'antenne patch initiale FR4.

- **Voltage Standing Wave Ratio (VSWR)**

À 4 GHz, le VSWR est d'environ 2,91. Cette valeur est supérieure à de 2, ce qui indique une mauvaise adaptation d'impédance.

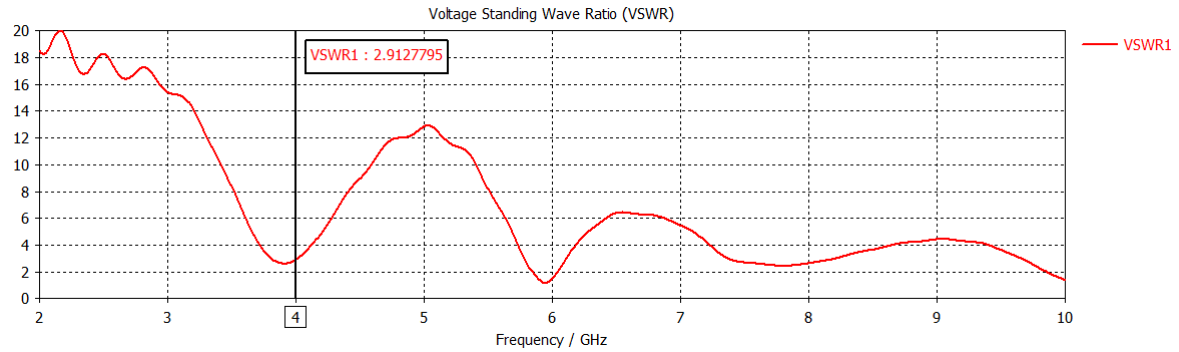


Figure III.4 : Le taux d'ondes stationnaires (TOS) de l'antenne patch initiale FR4.

III.3.2 Antenne initiale adaptée FR4

Pour l'adaptation de l'antenne optimisée, nous avons apporté plusieurs modifications suite à une étude paramétrique réalisée sous logiciel. Nous avons incorporé des encoches (Gpf = 3 mm, Fi = 4 mm), puis augmenté la largeur et la longueur du patch (wp = 23,079 mm, lp = 17,7 mm), ainsi que la longueur de la ligne d'alimentation (lf = 17,65 mm). Cette configuration est illustrée dans la figure suivante.

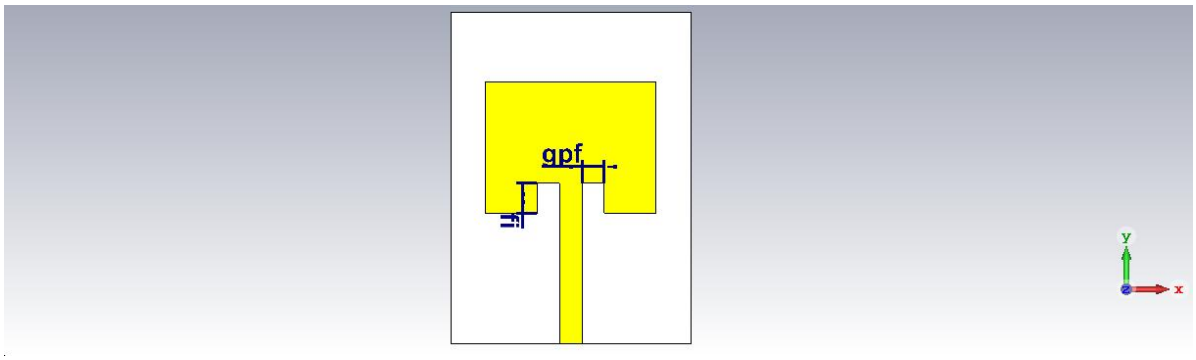


Figure III.5 : Structure de l'antenne patch avec encoches FR4.

• Coefficient de réflexion S11

À la fréquence de 4 GHz, le coefficient de réflexion S11 atteint -40 dB, traduisant une excellente adaptation d'impédance. Cette valeur confirme que l'antenne résonne de manière optimale à cette fréquence.

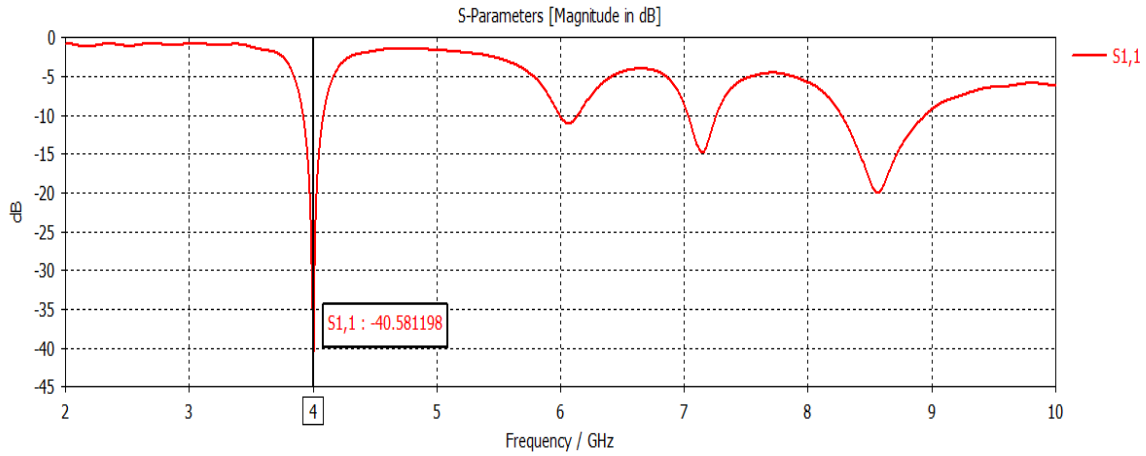


Figure III.6 : Coefficient de réflexion de l'antenne patch avec encoches FR4.

- **Voltage Standing Wave Ratio (VSWR)**

L'antenne présente une adaptation quasi-parfaite à 4 GHz (VSWR = 1,019 ≪ 2), confirmant une réflexion d'énergie négligeable et validant les dimensions calculées.

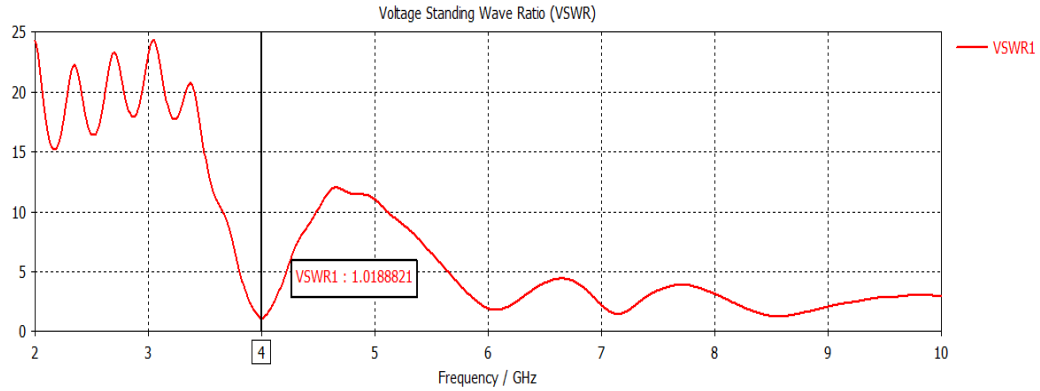


Figure III.7 : Le taux d'ondes stationnaires (TOS) de l'antenne patch avec encoches FR4.

III.3.3 Antenne multi-résonance FR4

Dans le cadre de notre étude et pour combler les critères de notre système IoMT, une nouvelle structure semble un choix cohérent en ajoutant des découpes de différentes formes au patch de l'antenne de base afin de répondre aux cahiers des charges ciblé. La nouvelle configuration présente un carré évidé pour introduire la résonance à 2,4 GHz, une fente en forme de L pour générer la résonance à 8 GHz, Un élément solide ajouté le long de la ligne d'alimentation pour simuler le comportement de stubs et obtenir la résonance à 5,8 GHz, ainsi qu'un petit cercle au point d'alimentation pour améliorer l'adaptation à 8 GHz, comme illustré dans la figure III.8.

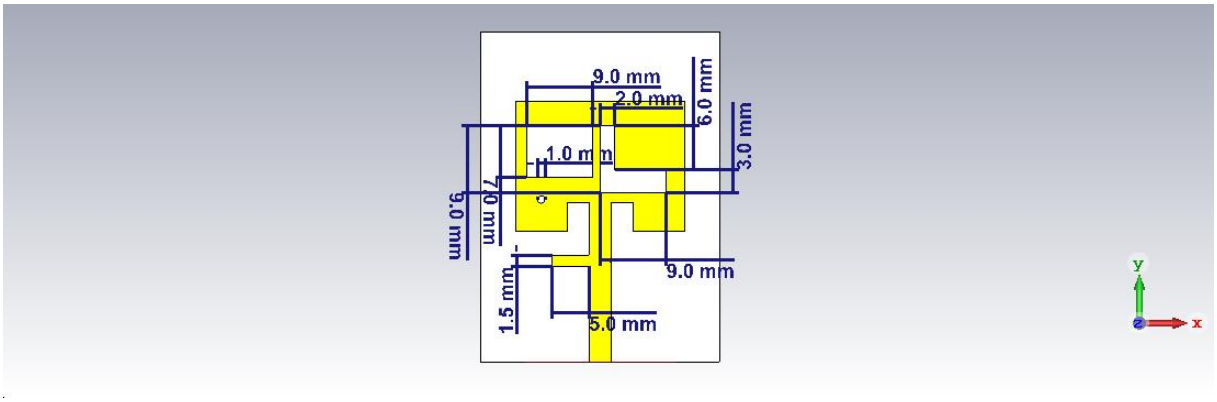


Figure III.8 : Nouvelle structure de l'antenne FR4.

- **Coefficient de réflexion**

  La figure présente le coefficient de réflexion S_{11} de la nouvelle structure de l'antenne. On observe quatre résonances distinctes : à 2,408 GHz avec S_{11} = −20,755 dB, à 5,728 GHz avec S_{11} = −17,773 dB, à 8,144 GHz avec S_{11} = −10,621 dB, et à 8,88 GHz avec S_{11} = −21,996 dB. Les quatre valeurs sont inférieures au seuil de −10 dB, confirmant une bonne adaptation sur les trois bandes cibles : 2,4 GHz, 5,8 GHz et la bande X, et validant ainsi les choix structurels de la nouvelle géométrie.

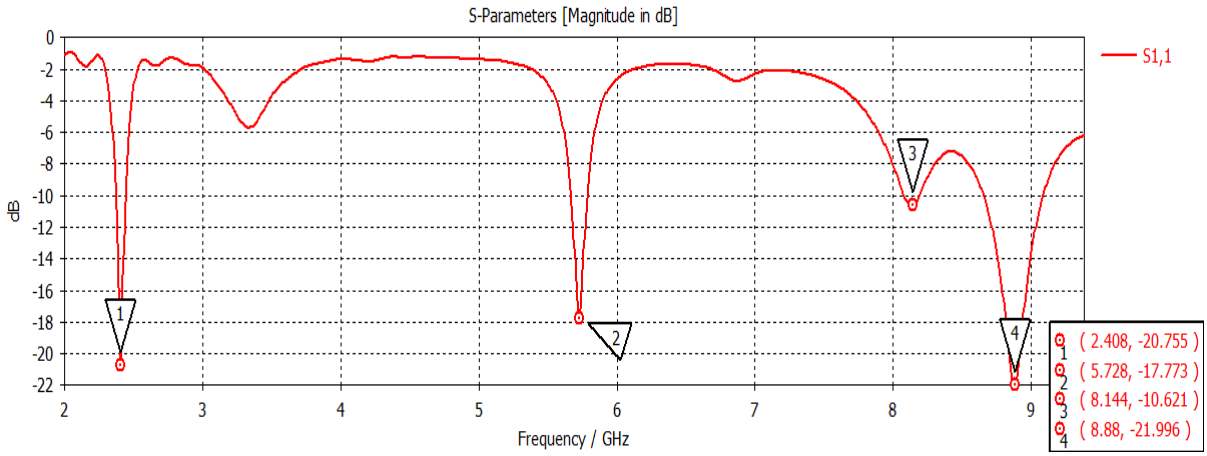


Figure III.9 : Coefficient de réflexion de l'antenne patch de la nouvelle structure FR4.

- **Voltage Standing Wave Ratio VSWR**

  La courbe du VSWR confirme les résultats obtenus par le S_{11}. On observe quatre minima : 1,2019 à 2,408 GHz, 1,2968 à 5,728 GHz, 1,8346 à 8,144 GHz et 1,1727 à 8,88 GHz, toutes largement inférieures au seuil de 2, ce qui valide une bonne adaptation de l'antenne sur les trois bandes cibles et valide les résultats obtenus par le coefficient de réflexion S_{11}.

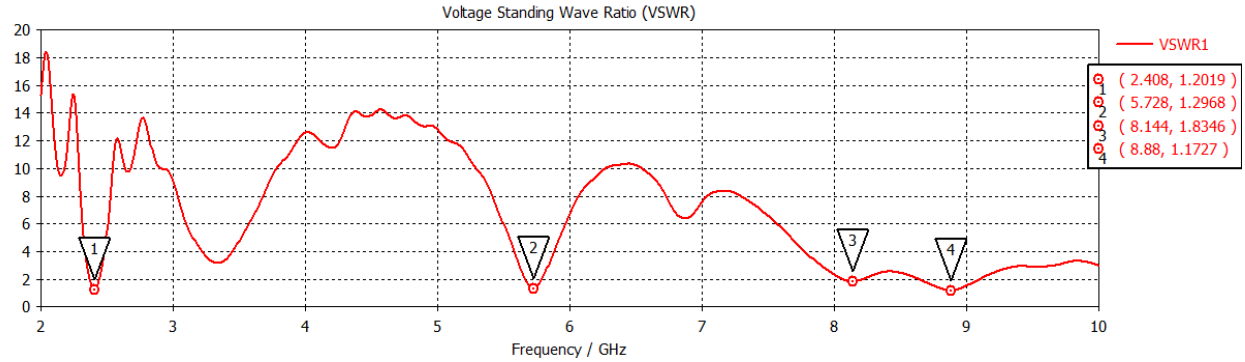
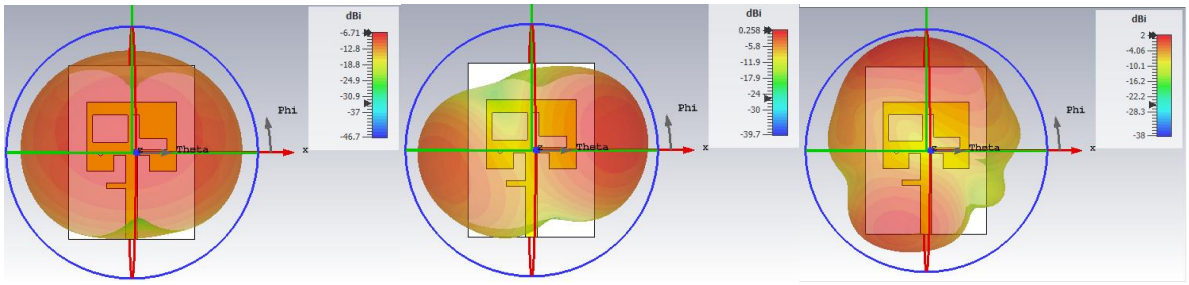


Figure III.10 : Le taux d'ondes stationnaires (TOS) de la nouvelle structure FR4.

- **Le diagramme de rayonnement**

  La figure III.11 présente les diagrammes de rayonnement de l'antenne aux trois bandes de résonance, où la figure (a) correspond à 2,4 GHz, la figure (b) à 5,8 GHz et la figure (c) à 8 GHz. On observe un gain de −6,71 dBi à 2,4 GHz, 0,082 dBi à 5,8 GHz et 2 dBi à 8 GHz. Ces valeurs restent globalement faibles, ce qui peut être attribué aux pertes diélectriques élevées du substrat FR4 (tan δ = 0,02), dont l'impact devient particulièrement significatif aux hautes fréquences.



(a) 2.4 GHz **(b) 5.72GHz** **(c) 8.14 GHz (band X)**

Figure III.11 : Diagramme de rayonnement de la nouvelle structure FR4 en 3D.

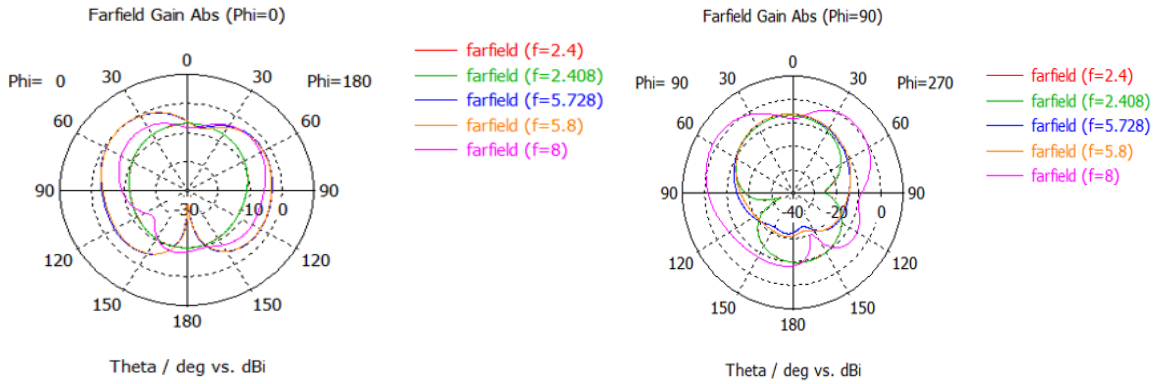


Figure III.12 : Diagramme de rayonnement (phi = **0 °*et* 90°**) de la nouvelle structure FR4 en 2D.

- **Gain**

La figure III.13 nous montre la variation du gain en fonction de la fréquence. À 2,408 GHz, le gain atteint −6,7 dBi, puis s'améliore progressivement pour atteindre -0.59 dBi à 5,728 GHz, et +1,99 dBi à 8 GHz. Ces résultats mettent en évidence que l'antenne sur substrat FR4 offre de meilleures performances aux hautes fréquences, bien qu'elle reste peu efficace dans la bande basse.

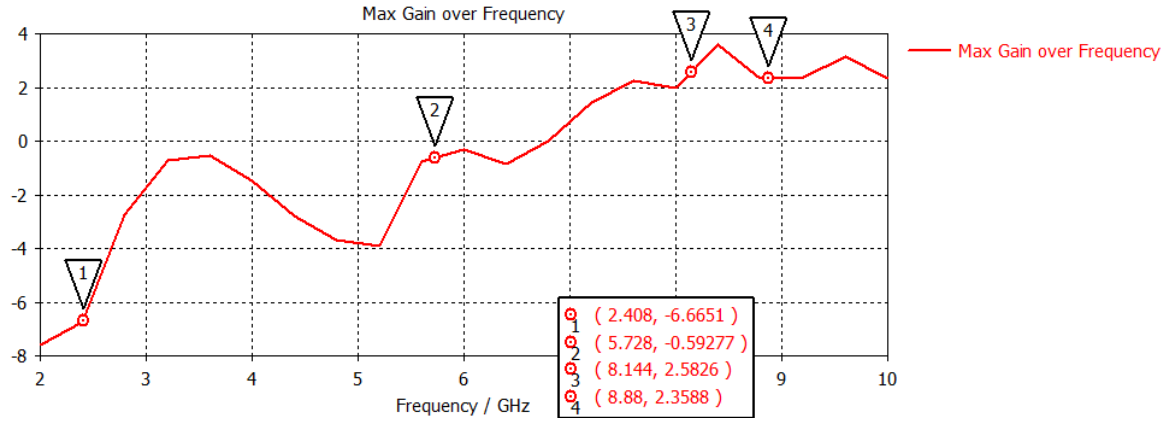


Figure III.13 : Gain de la nouvelle structure FR4.

- **Interprétation des Résultat de l'antenne FR4**

Les résultats obtenus avec le substrat FR4 montrent que l'antenne proposée permet de générer plusieurs résonances grâce aux différentes modifications apportées au patch. Cependant, malgré sa simplicité de fabrication et son faible coût, le FR4 présente des pertes diélectriques relativement élevées susceptibles de limiter les performances de l'antenne, notamment en termes de gain et d'efficacité aux hautes fréquences.

Pour améliorer cette étude, sera menée en utilisant un substrat Rogers TR5880 à faibles pertes afin d'analyser son influence sur les caractéristiques de rayonnement et les performances globales de l'antenne destinées aux applications IoT, IoMT.

III.4 Conception d'une antenne patch rectangulaire sur Roger

III.4.1 Antenne initiale Roger

Dans le but d'améliorer les performances de l'antenne, notamment en termes de gain, d'efficacité et de stabilité aux fréquences élevées, un substrat Rogers TR5880 à faibles pertes a été adopté, caractérisé par une permittivité $\varepsilon_r = 2,2$.

Après les calculs de dimensionnement, les paramètres géométriques de l'antenne patch rectangulaire obtenus sont présentés dans le tableau ci-dessous :

Paramètre	Dimensions (mm)
La largeur du patch (Wp)	29.646
La longueur du patch (Lp)	24.430
La largeur de la ligne d'alimentation (Wf)	4.847
La longueur de la ligne d'alimentation (Lf)	25.282
La longueur du substrat (Lg)	59.072
La largeur du substrat (Wg)	39.006

Tableau III.3 : Dimensions de l'antenne patch rectangulaire Roger résonant à 4 GHz.

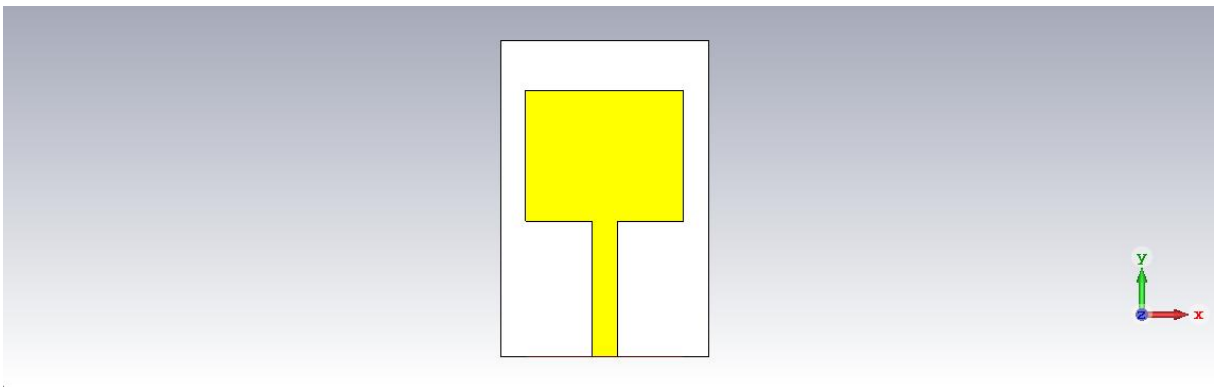


Figure III.14 : Structure d'une antenne patch rectangulaire initiale Roger.

- **Coefficient de réflexion**

À 4 GHz, le paramètre S_{11}=-4,74 dB de l'antenne initiale indique une adaptation insuffisante, justifiant ainsi la nécessité d'une optimisation pour atteindre le seuil requis de -10 dB.

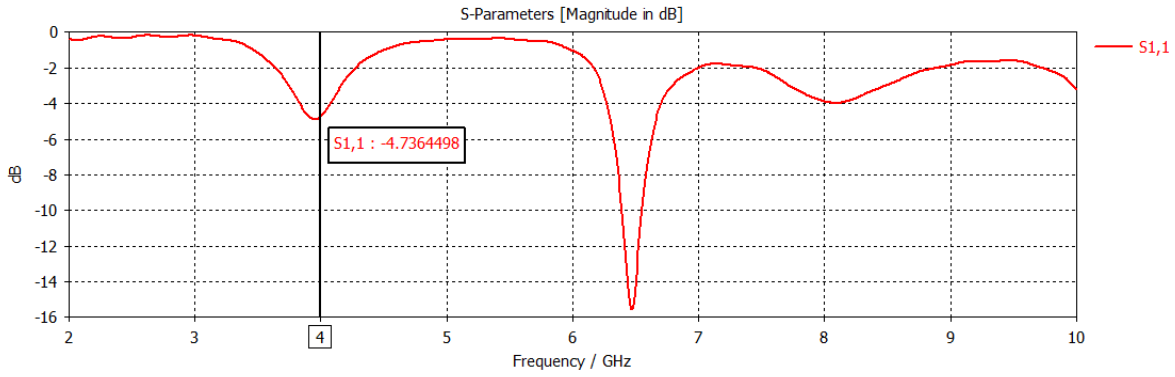


Figure III.15 : Coefficient de réflexion de la forme rectangulaire initiale Roger.

- **Voltage Standing Wave Ratio VSWR**

Le VSWR de l'antenne initiale atteint 3,76 à la fréquence de conception, valeur très élevée par rapport au seuil acceptable qui doit être inférieur à 2.

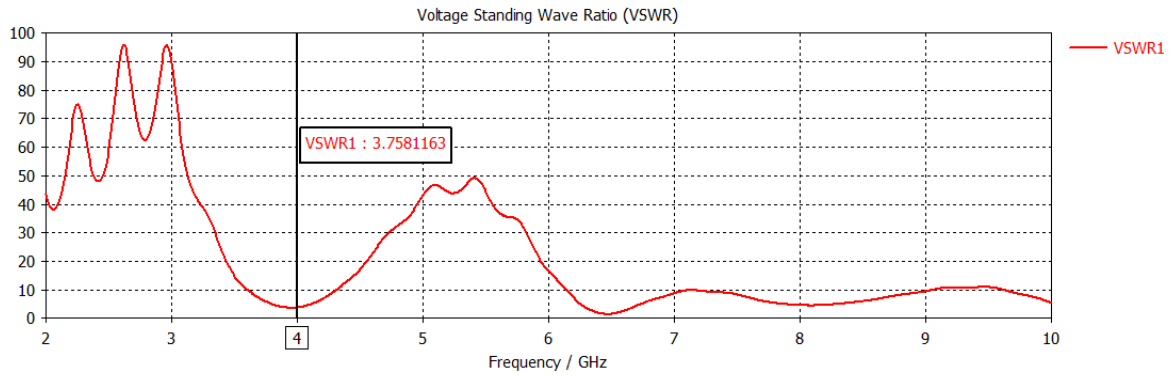


Figure III.16 : Le taux d'ondes stationnaires (TOS) de l'antenne patch initiale Roger.

III.4.2 Antenne initiale adaptée Roger

La figure III.17 illustre la structure de l'antenne patch adaptée par introduction d'encoches (Gpf = 2.6 mm, Fi = 6,5 mm) sur les bords du patch, permettant d'améliorer l'adaptation d'impédance à la fréquence de conception de 4 GHz.

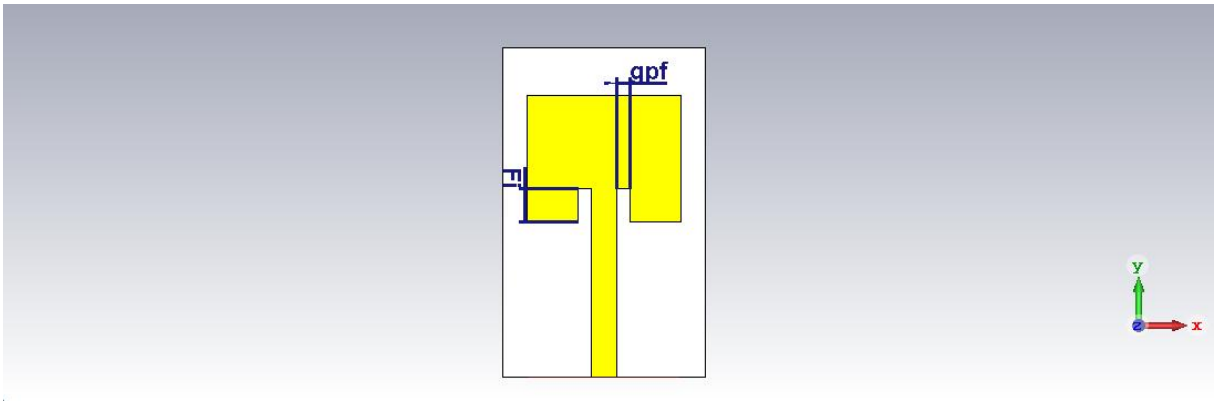


Figure III.17 : Structure de l'antenne patch avec encoches Roger.

- **Coefficient de réflexion**

Le paramètre S_{11} atteint -49,78 dB à 4 GHz, valeur largement inférieure au seuil de -10 dB ce qui se traduit par une très bonne adaptation de l'antenne représentée dans la figure III.18.

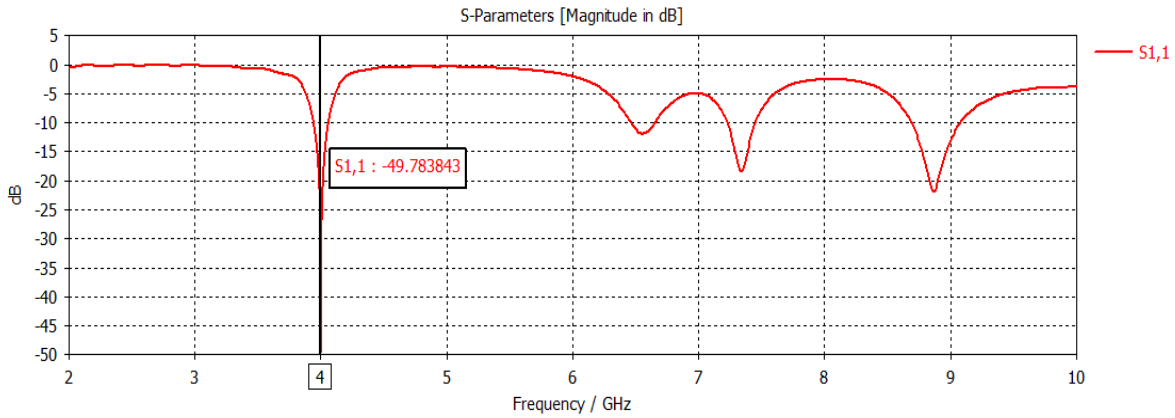


Figure III.18 : Coefficient de réflexion de l'antenne patch avec encoches Roger.

- **Voltage Standing Wave Ratio VSWR**

La figure III.19 présente le VSWR de l'antenne adaptée, affichant une valeur de 1,006 à 4 GHz, largement inférieure au seuil de 2 et quasiment parfait à 1.

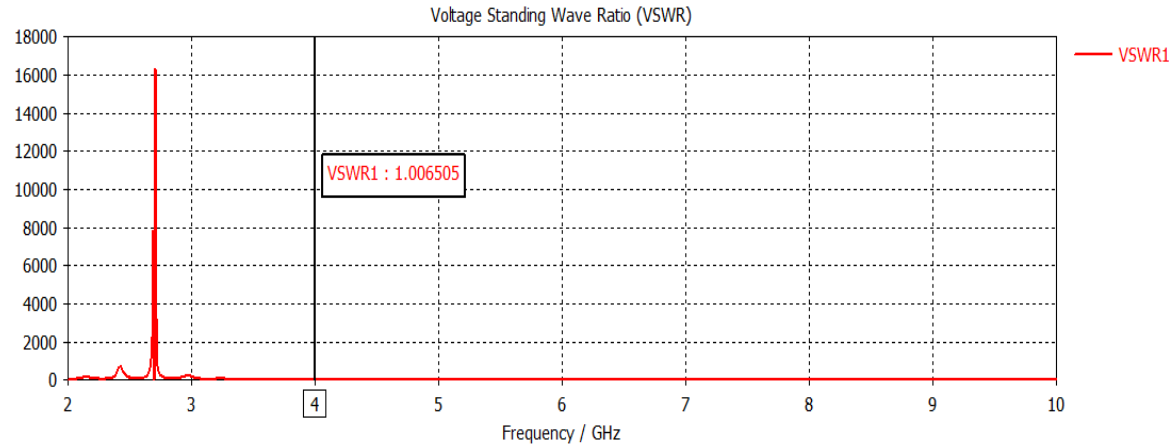


Figure III.19 : Le taux d'ondes stationnaires (TOS) de l'antenne patch avec encoches Roger.

III.4.3 Antenne multi-résonance Roger

Afin de concevoir une antenne multibande, une nouvelle structure est proposée en intégrant différentes découpes géométriques au patch de base : un carré évidé pour la résonance à 2,4 GHz, une fente en L pour 8 GHz, un élément solide le long de la ligne d'alimentation pour 5,8 GHz, et un cercle au point d'alimentation pour améliorer l'adaptation à 8 GHz, comme illustré dans la figure III.20.

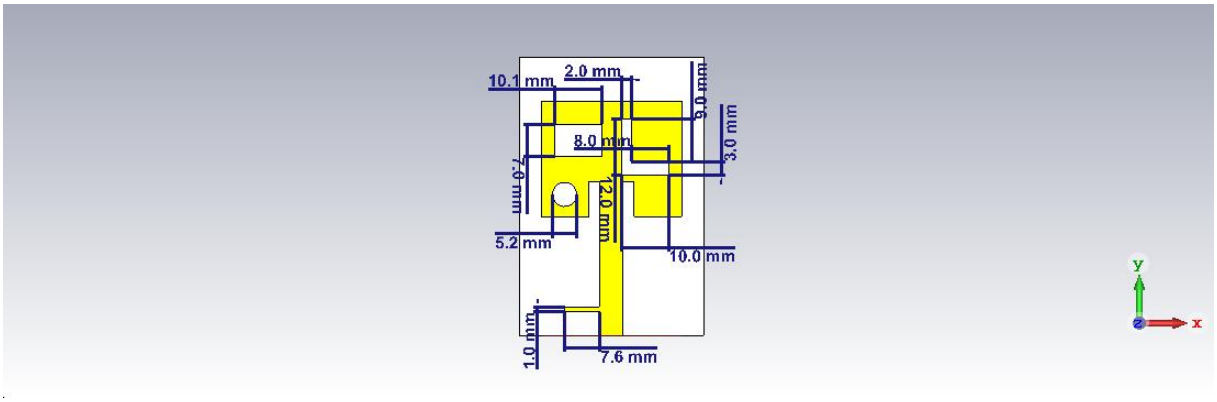


Figure III.20 : Nouvelle structure de l'antenne Roger.

- **Coefficient de réflexion**

La Figure illustre le paramètre S_{11} de la nouvelle structure, mettant en évidence quatre fréquences de résonance situées à 2,432 GHz (-15,818 dB), 5,808 GHz (-25,966 dB), 7,272 GHz (-24,688 dB) et 8,256 GHz (-11,356 dB). Toutes ces valeurs sont inférieures à -10 dB, ce qui confirme le bon fonctionnement multibande de l'antenne.

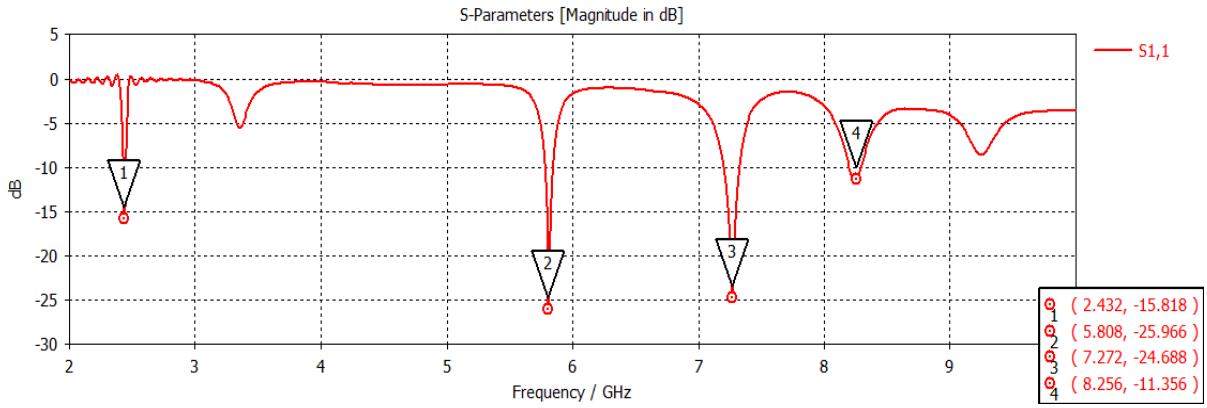


Figure III.21 : Coefficient de réflexion de l'antenne patch de la nouvelle structure Roger.

- **Voltage Standing Wave Ratio VSWR**

La figure III.22 présente le VSWR en fonction de la fréquence et met en évidence plusieurs points de résonance. On observe qu'à 2,432 GHz (VSWR ≈ 1,38) et 5.808 GHz (VSWR ≈ 1,10), l'antenne est très bien adaptée. De même, à 7,272 GHz (VSWR ≈ 1,12) et 8,256 GHz (VSWR ≈ 1,74), l'adaptation reste acceptable. Ces résultats confirment le bon fonctionnement de l'antenne sur plusieurs bandes de fréquences.

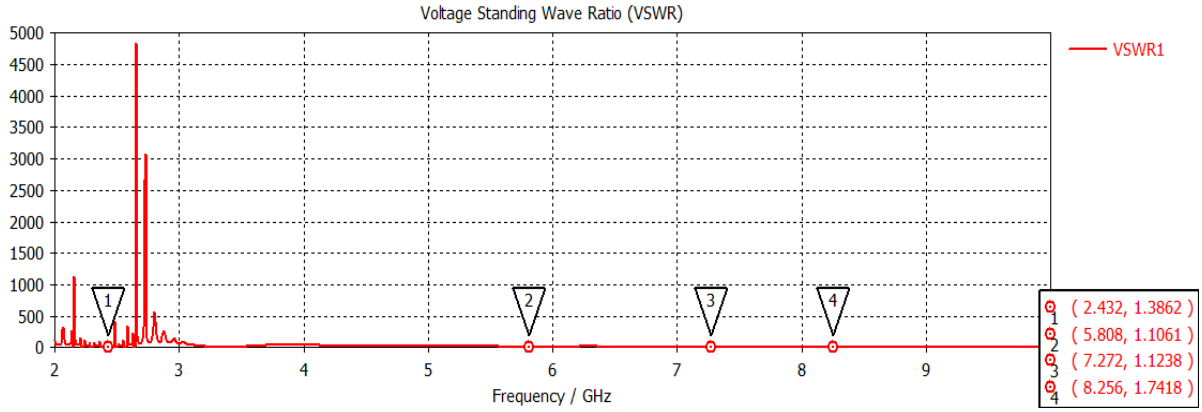
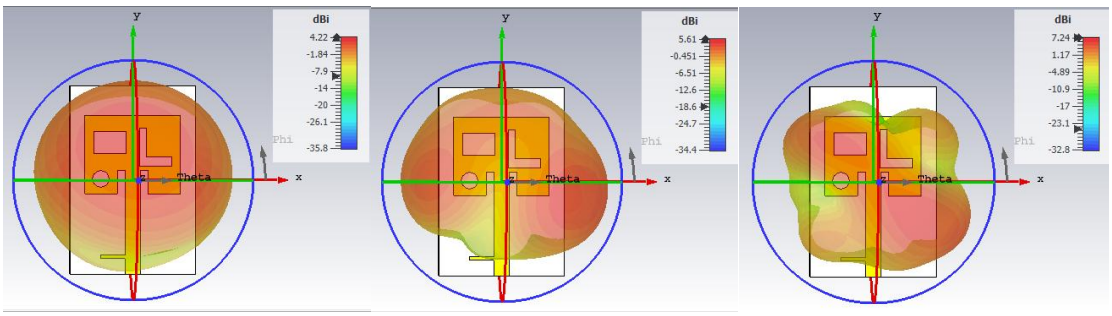


Figure III.22 : Le taux d'ondes stationnaires (TOS) de la nouvelle structure Roger.

- **Le diagramme de rayonnement**

La figure III.23 présente le diagramme de rayonnement de l'antenne à 2,4 GHz, 5,8 GHz et 8 GHz. Le gain maximal est d'environ 4,22 dBi à 2,4 GHz, 5,61 dBi à 5,8 GHz et 7,24 dBi à 8 GHz. On observe un rayonnement quasi omnidirectionnel, qui devient plus directif avec l'augmentation de la fréquence. Ces résultats confirment de bonnes performances de rayonnement sur les différentes bandes étudiées.



(a) 2.43Ghz **(b) 5.8Ghz** **(c) 8.25Ghz (band X)**

Figure III.23 : Diagramme de rayonnement de la nouvelle structure Roger en 3D.

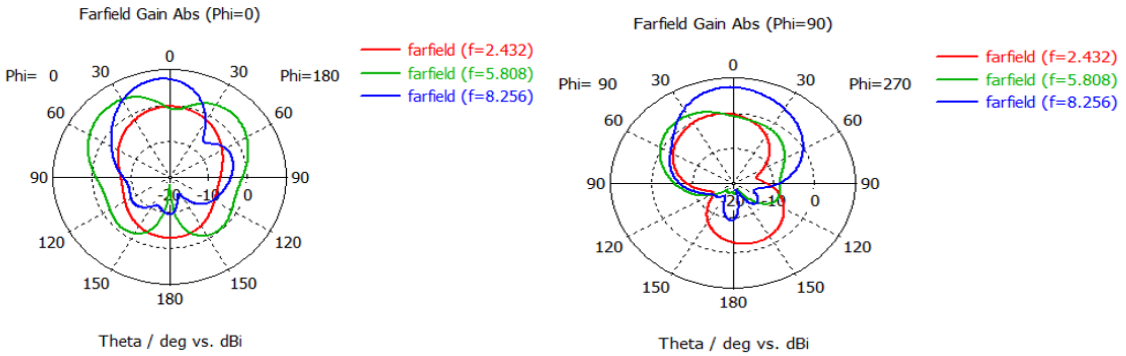


Figure III.24 : Diagramme de rayonnement (phi = **0** et **90**°) de la nouvelle structure Roger en 2D.

- **Gain**

La figure III.25 nous montre la variation du gain en fonction de la fréquence pour le substrat Rogers. À 2.432 GHz, le gain atteint 5,1902 dBi, tandis qu'à 5.808 GHz il est de 4,0044 dBi, et à 8.88 GHz il atteint 6,9636 dBi. Ces résultats mettent en évidence que le substrat Rogers offre de meilleures performances sur toute la bande, avec un gain positif et croissant dès les basses fréquences.

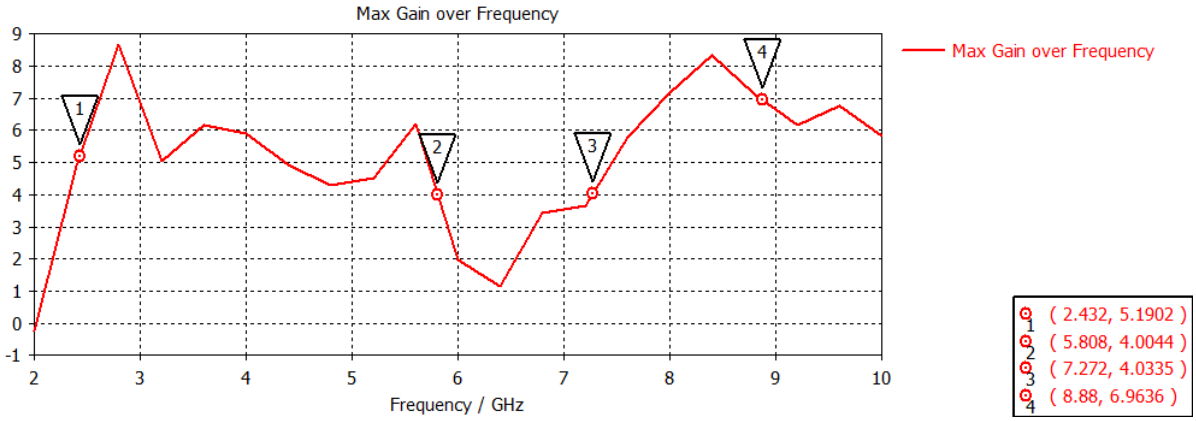


Figure III.25 : Gain de la nouvelle structure Roger.

- **Interprétation des Résultat de l'antenne Roger**

L'antenne sur substrat Rogers TR5880 présente d'excellentes performances en termes de gain et d'adaptation par rapport au substrat FR4, pour les fréquences respectivement 2.4 GHz, 5.8 GHz et la bande X à 8 GHz, la rendant bien adaptée aux applications IoMT. Cependant, malgré son amélioration par rapport au FR4, sa permittivité de 2.2 engendre des dimensions relativement grandes, incompatibles avec les exigences de miniaturisation de l'IoMT. C'est pourquoi nous envisageons le passage au substrat Silicium (Silicone), dont la permittivité élevée permettra une réduction significative des dimensions de l'antenne.

III.5 Conception d'une antenne patch rectangulaire sur silicone

III.5.1 Antenne initiale silicone

La figure III.26 montre la structure initiale de l'antenne patch rectangulaire sur substrat silicone (silicium), dont les dimensions géométriques sont déterminées analytiquement à partir de la fréquence de résonance cible. Les paramètres géométriques de l'antenne sont résumés dans le tableau ci-dessous :

Paramètre	Dimensions (mm)
La largeur du patch (Wp)	14.765
La longueur du patch (Lp)	10.530
La largeur de la ligne d'alimentation (Wf)	1.238
La longueur de la ligne d'alimentation (Lf)	10.870
La longueur du substrat (Lg)	30.76
La largeur du substrat (Wg)	24.125

Tableau III.4 : Dimensions de l'antenne patch rectangulaire silicone résonant à 4 GHz.

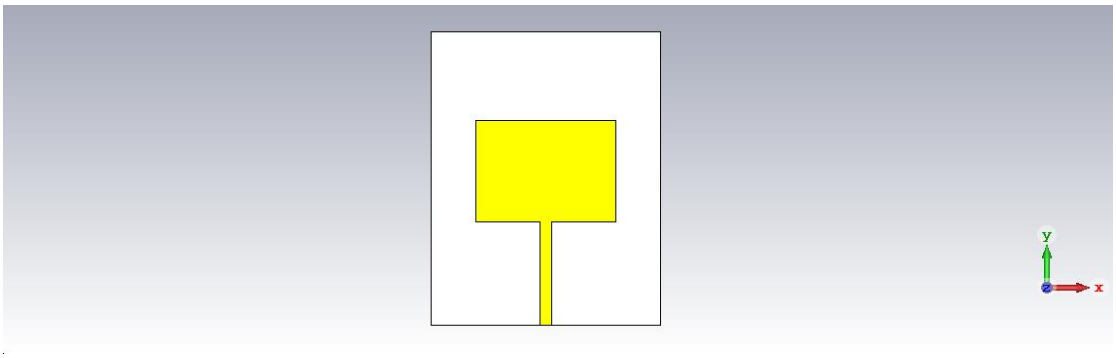


Figure III.26 : Structure d'une antenne patch rectangulaire initiale silicone.

- **Coefficient de réflexion**

La figure III.27 nous montre le coefficient de réflexion de l'antenne initiale. À 4 GHz, on observe une valeur de S_{11} d'environ -3.34 dB, ce qui indique une mauvaise adaptation de l'antenne avant optimisation.

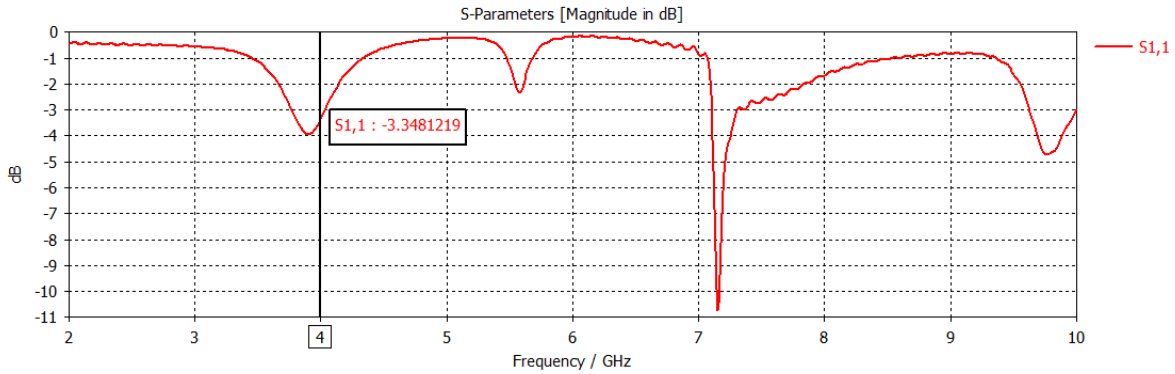


Figure III.27 : Coefficient de réflexion de la forme rectangulaire initiale silicone.

- **Voltage Standing Wave Ratio VSWR**

Le VSWR atteint environ 5,25 à 4 GHz, indiquant une mauvaise adaptation de l'antenne.

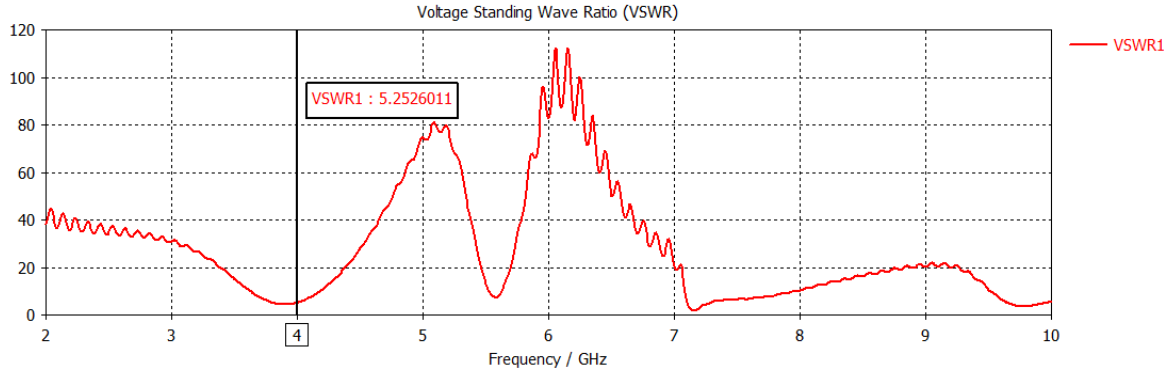


Figure III.28 : Le taux d'ondes stationnaires (TOS) de l'antenne patch initiale silicone.

III.5.2 Antenne initiale adaptée silicone

Pour adapter l'antenne, des encoches sont ajoutées afin d'améliorer l'adaptation d'impédance. La nouvelle structure obtenue est présentée dans la figure III.29.

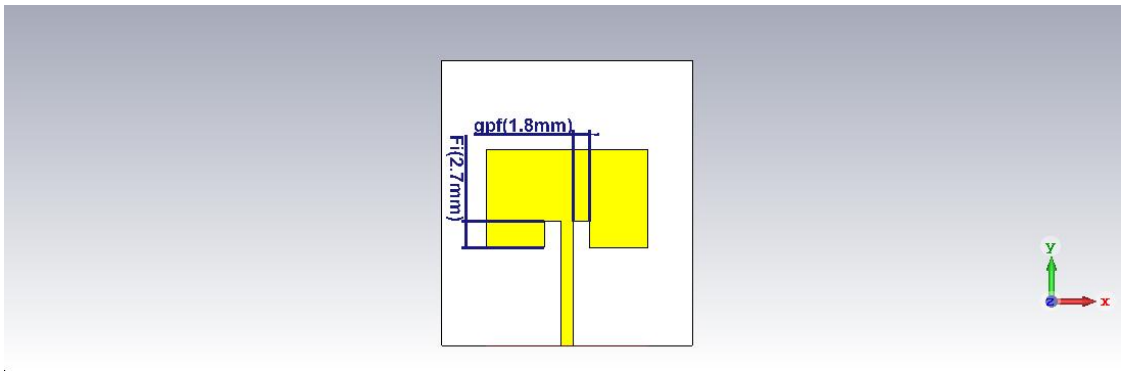


Figure III.29 : Structure de l'antenne patch avec encoches silicone.

- **Coefficient de réflexion**

La figure III.30 montre le coefficient de réflexion de l'antenne après adaptation. À 4 GHz, le S_{11} atteint environ -40,83 dB, indiquant une très bonne adaptation de l'antenne.

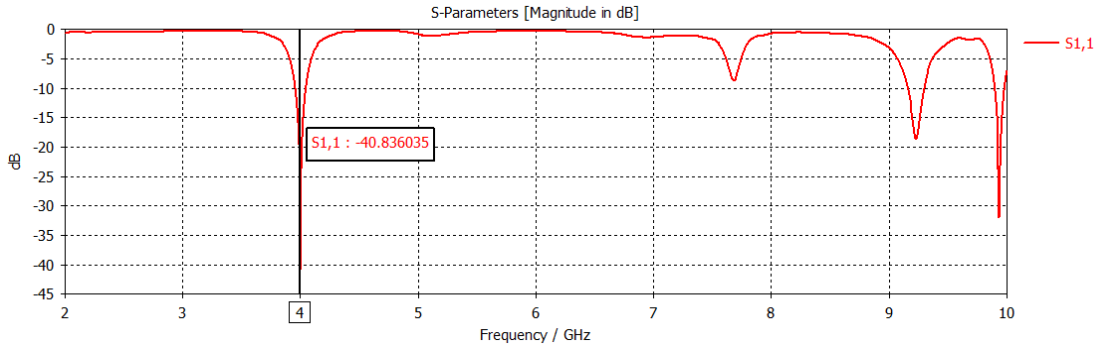


Figure III.30 : Coefficient de réflexion de l'antenne patch avec encoches silicone.

- **Voltage Standing Wave Ratio VSWR**

Le VSWR atteint environ 1,01 à 4 GHz, indiquant une excellente adaptation de l'antenne avec encoches.

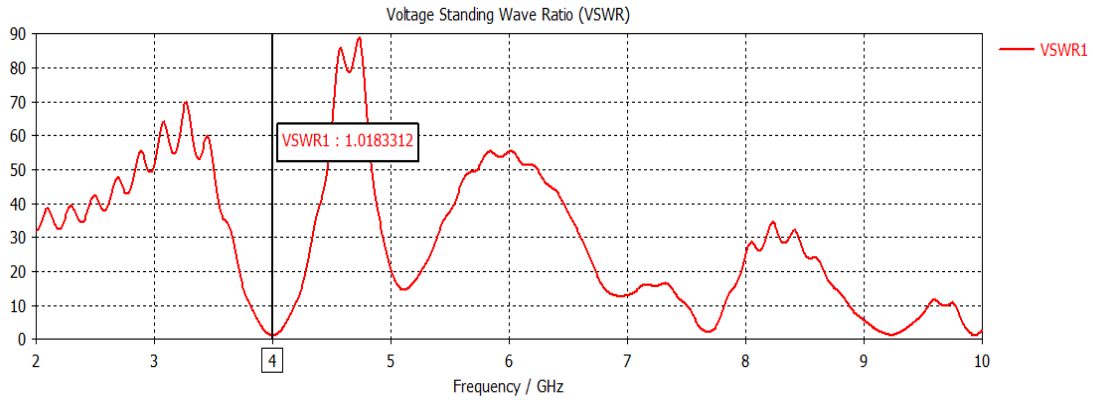


Figure III.31 : Le taux d'ondes stationnaires (TOS) de l'antenne patch avec encoches silicone.

III.5.3 Antenne multi-résonance silicone

Pour obtenir un fonctionnement à multi résonance, la structure de l'antenne est modifiée en ajoutant des éléments supplémentaires. La nouvelle configuration obtenue est illustrée dans la figure III.32.

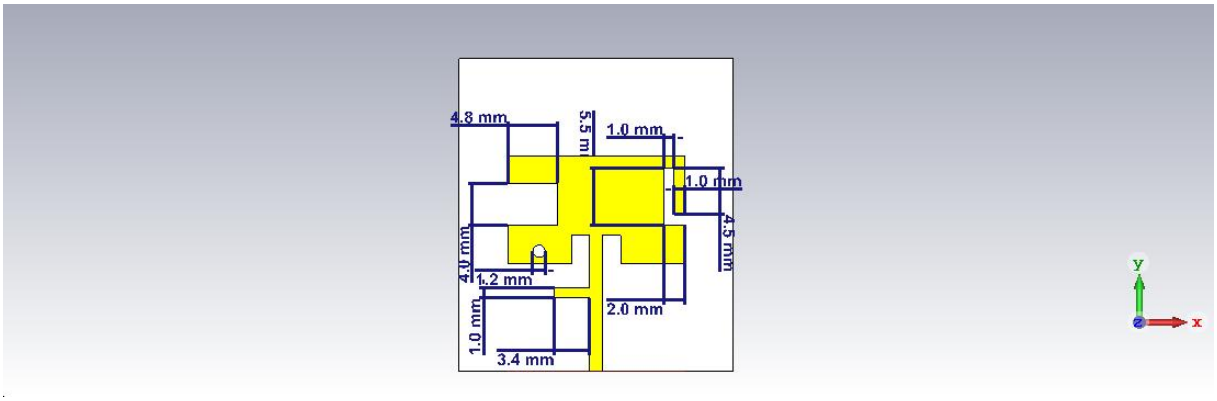


Figure III.32 : Nouvelle structure de l'antenne silicone.

- **Coefficient de réflexion**

Le coefficient de réflexion nous montre plusieurs résonances atteignant environ -17,4 dB à 2,4 GHz, -35,5 dB à 5,85 GHz, -11,2 dB à 7,27 GHz et -23,8 dB à 8,06 GHz, indiquant une bonne adaptation sur plusieurs bandes de fréquences.

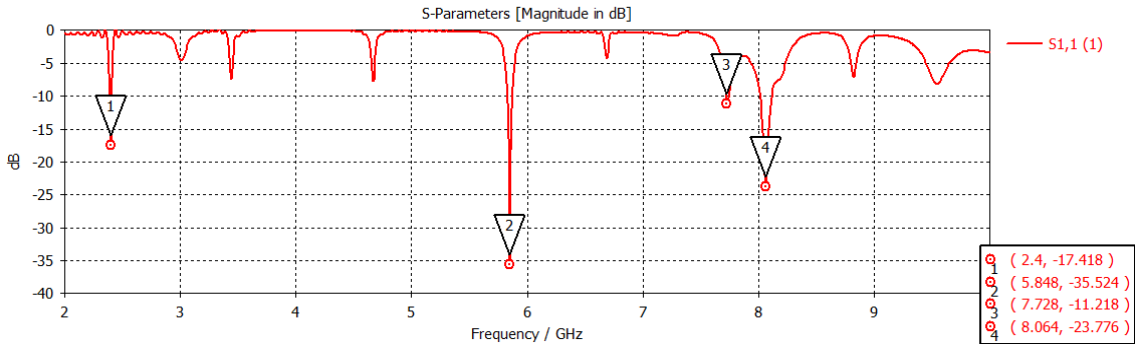


Figure III.33 : Coefficient de réflexion de l'antenne patch de la nouvelle structure silicone.

- **Voltage Standing Wave Ratio VSWR**

Le VSWR présente des valeurs proches de 1,03 à 5,85 GHz, 1,15 à 8,06 GHz et 1,31 à 2,4 GHz, indiquant une bonne adaptation sur plusieurs bandes de fréquences.

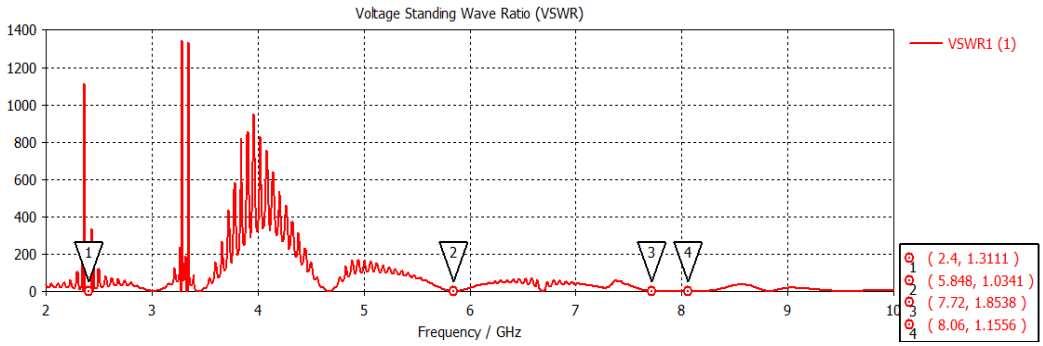
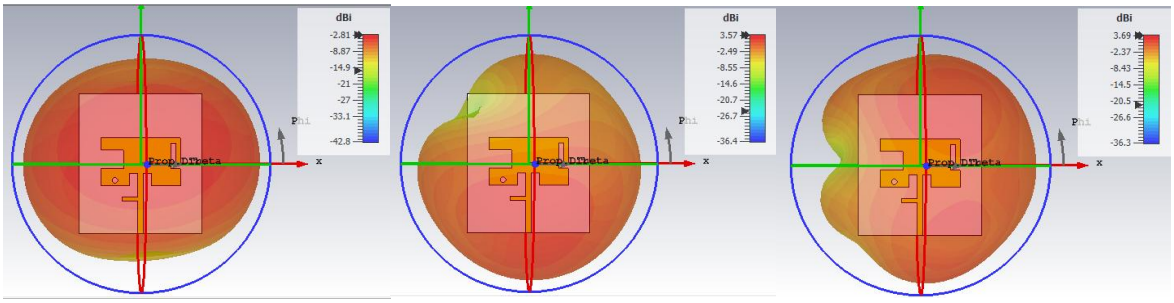


Figure III.34 : Le taux d'ondes stationnaires (TOS) de la nouvelle structure silicone.

- **Le diagramme de rayonnement**

La figure montre le diagramme de rayonnement de la nouvelle structure en 3D pour (a) 2,4 GHz, (b) 5,8 GHz et (c) 8 GHz. À 2,4 GHz, le gain est négatif (≈ –2,81 dBi), ce qui indique des pertes importantes et une faible efficacité de rayonnement, l'antenne ne rayonne pas efficacement à cette fréquence. En revanche, à 5,8 GHz (≈ 3,57 dBi) et 8 GHz (≈ 3,69 dBi), le gain devient positif, traduisant un bon rayonnement et de meilleures performances.



(a) 2.4Ghz **(b) 5.84Ghz** **(c) 8.06Ghz (band X)**

Figure III.35 : Diagramme de rayonnement de la nouvelle structure silicone en 3D.

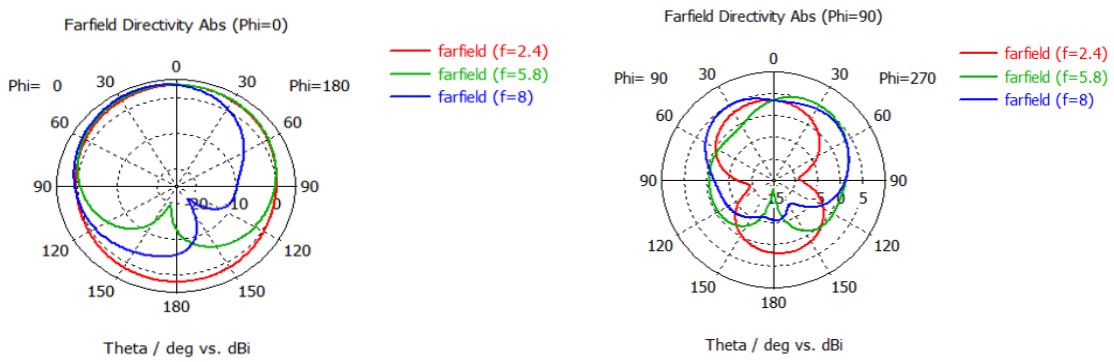


Figure III.36 : Diagramme de rayonnement (phi = **0 °*et* 90°**) de la nouvelle structure silicone en 2D.

- **Gain**

La figure III.37 nous montre la variation du gain en fonction de la fréquence pour le substrat silicium (Silicone). À 2,4 GHz, le gain est de −2,8135 dBi, puis il augmente significativement pour atteindre 2,5407 dBi à 5,848 GHz, et se stabilise à 3,73 dBi à 8 GHz. Ces résultats montrent une nette amélioration du gain en hautes fréquences, bien que le gain reste négatif en bande basse à 2,4 GHz. Afin d'améliorer davantage le gain sur l'ensemble de la bande, des techniques d'optimisation seront envisagées et étudiées par la suite.

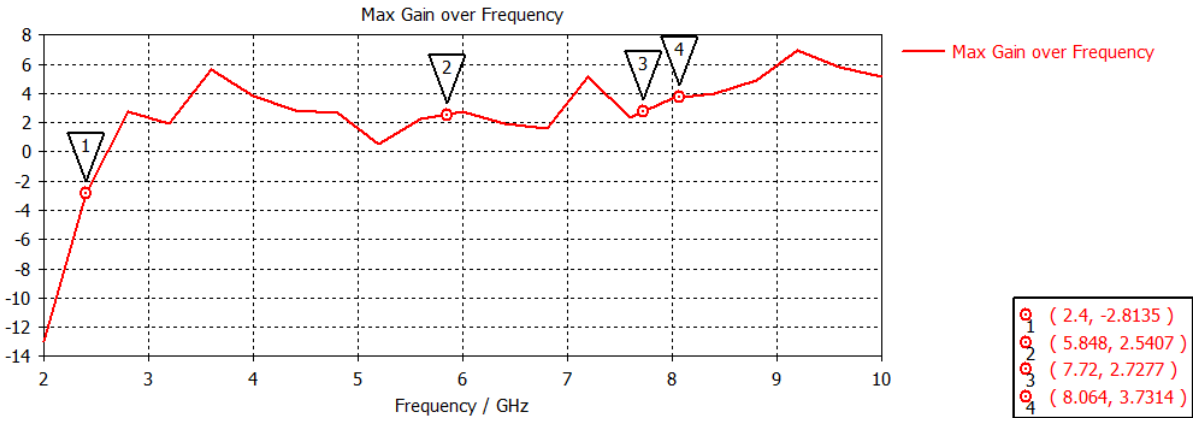


Figure III.37 : Gain de la nouvelle structure silicone.

- **Interprétation des Résultat de l'antenne Silicone**

En conclusion, l'antenne Silicone présente des performances insuffisantes à 2,4 GHz, avec un gain négatif, ce qui indique qu'elle ne fonctionne pas efficacement dans cette bande. Afin d'améliorer le gain et les performances de rayonnement, une augmentation de l'épaisseur du substrat en silicone de 1,56 mm à 1,9 mm + DGS est proposée. Cette modification permet d'optimiser le comportement de l'antenne, notamment aux fréquences d'intérêt.

III.5.4 Antenne multi-résonance en silicone avec h = 1,9

La figure III.38 nous montre la nouvelle structure de l'antenne après augmentation de l'épaisseur du substrat en silicone à 1,9 mm et l'ajout d'un DGS (Defected Ground Structure), afin d'améliorer le gain et les performances de rayonnement, notamment à 2,4 GHz.

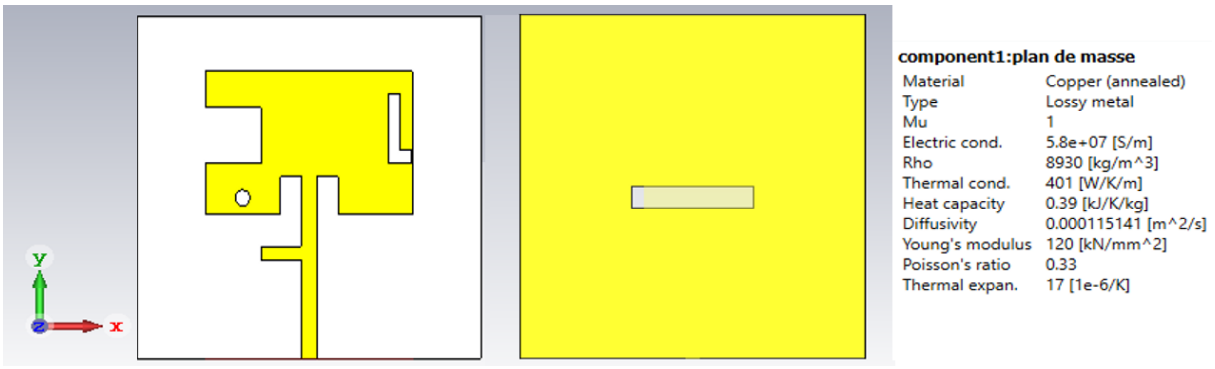


Figure III.38 : Nouvelle structure de l'antenne silicone h=1,9.

- **Coefficient de réflexion**

La figure III.39 présente le coefficient de réflexion S11 de l'antenne patch sur substrat silicium (épaisseur 1,9 mm). Trois résonances principales sont observées : 2,368 GHz (S11 = −21,44 dB), 5,856 GHz (S11 = −25,174 dB) et 8 GHz (S11 = −28,66 dB), confirmant le comportement multi-résonance de l'antenne. Les valeurs de S11 restent inférieures à −10 dB, attestant d'une bonne adaptation d'impédance. Une résonance supplémentaire à 4,024 GHz (S11 = −25,174 dB), absente dans les configurations précédentes, est attribuée à la forte permittivité du substrat silicium (εr = 11,9). L'augmentation de l'épaisseur à 1,9 mm a amélioré le gain à 1 dBi, tandis que l'introduction du DGS a porté ce gain à 2 dBi tout en optimisant davantage l'adaptation sur l'ensemble des bande ciblées.

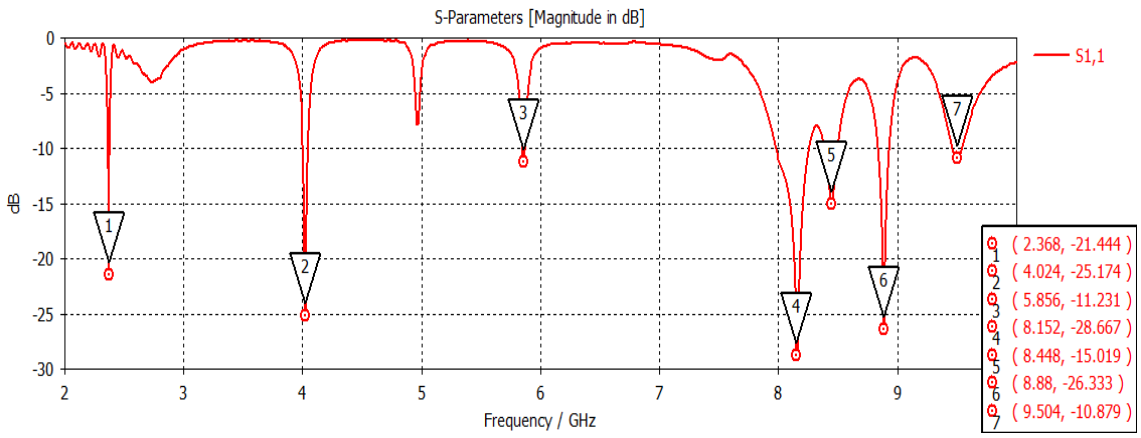


Figure III.39 : Coefficient de réflexion de l'antenne patch de la nouvelle structure silicone h=1,9.

- **Voltage Standing Wave Ratio VSWR**

La figure III.40 présente le VSWR de la nouvelle structure avec des résonances autour de 2,368 GHz, 5,854 GHz et dans la bande des 8,152 GHz, où les valeurs restent proches de 1, indiquant une bonne adaptation. On remarque également l'apparition d'une bonne adaptation à 4,024 GHz avec un VSWR de 1,1167.

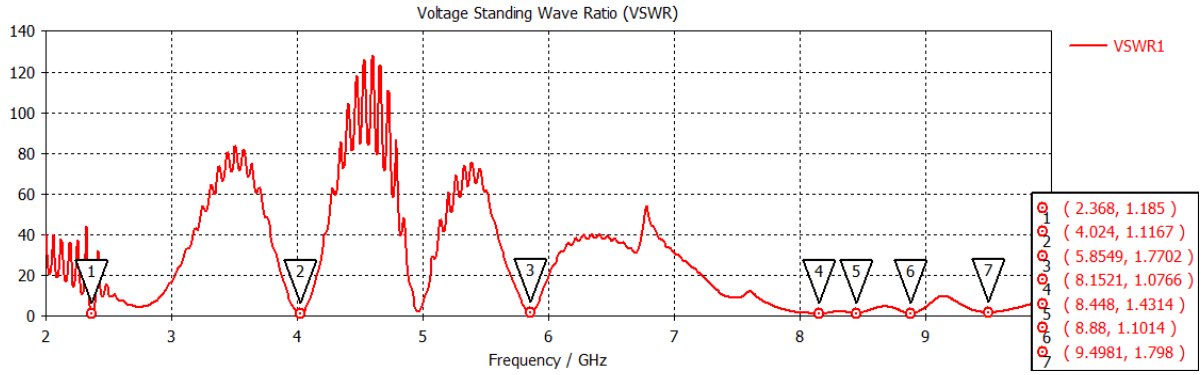
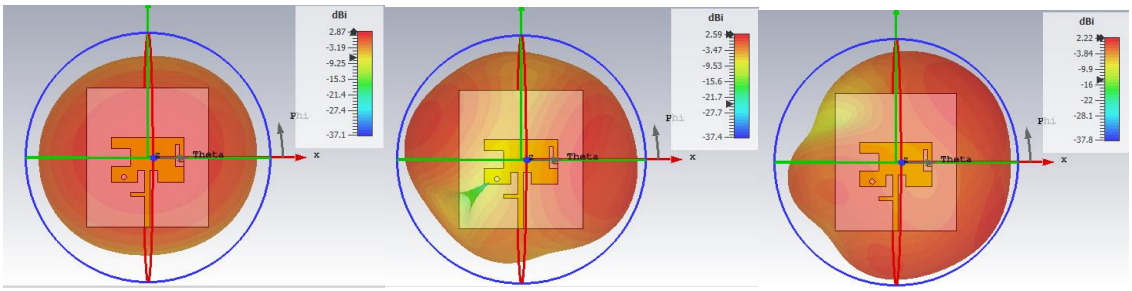


Figure III.40 : Le taux d'ondes stationnaires (TOS) de la nouvelle structure silicone h=1,9.

- **Le diagramme de rayonnement**

La figure III.41 les diagrammes de rayonnement de l'antenne après l'augmentation de l'épaisseur du substrat à 1,9 mm aux fréquences de 2,4 GHz, 5,8 GHz et 8 GHz. Les résultats montrent un rayonnement quasi omnidirectionnel avec une distribution de champ plus stable à 2,4 GHz, tandis qu'aux fréquences de 5,8 GHz et 8 GHz, le diagramme devient légèrement déformé en raison de l'apparition de lobes secondaires.



(a) 2.4 **(b) 5.8** **(c) 8 (band X)**

Figure III.41: Diagramme de rayonnement de la nouvelle structure en silicone avec h=1,9 en 3D.

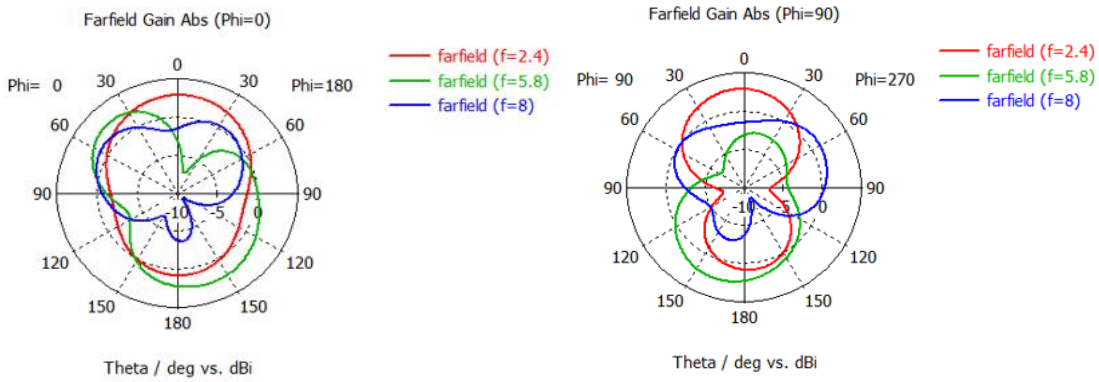


Figure III.42 : Diagramme de rayonnement (phi = **0 °*et* 90°**) de la nouvelle structure silicone h=1,9 en 2D.

- **Gain**

La figure III.43 nous montre la variation du gain en fonction de la fréquence pour le substrat en silicium. À 2,368 GHz, le gain atteint 2,12 dBi, puis diminue progressivement à 1,518 dBi à 5,854 GHz, ensuite il augmente à + 3 dBi à 8 GHz. Ces résultats montrent une amélioration notable du gain par rapport à la structure précédente, avec un gain positif et stable sur l'ensemble des bandes de fréquences étudiées.

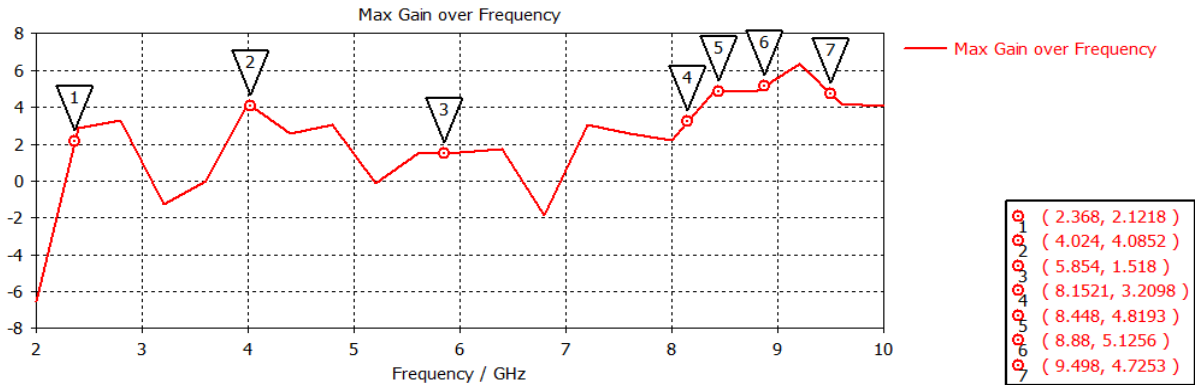


Figure III.43 : Gain de la nouvelle structure silicone h = 1,9.

- **Interprétation des Résultat de l'antenne Silicone avec h = 1,9**

En conclusion, l'augmentation de l'épaisseur du substrat en Silicone (silicium) à 1,9 mm a permis d'améliorer les performances de l'antenne patch rectangulaire. Les résultats obtenus montrent une bonne adaptation d'impédance aux fréquences de 2,4 GHz, 5,8 GHz et 8 GHz, avec l'apparition d'une nouvelle résonance bien adaptée autour de 4 GHz. Les diagrammes de rayonnement confirment également un comportement de rayonnement acceptable et stable dans les différentes bandes de fonctionnement, ce qui rend cette structure adaptée et adequate aux applications multi résonance et miniaturisé adaptée aux applications IoMT.

IV. L'antenne patch reconfigurable multibande

IV.1 Modélisation de la diode vacator

Dans le cadre de la conception d'une antenne reconfigurable pour les applications IoMT, le substrat silicone (ε_r = 11,9) a été retenu pour sa permittivité élevée, permettant une réduction des dimensions d'environ 50% par rapport au substrat Rogers, critère essentiel pour l'intégration dans des dispositifs médicaux portables ou implantables.

Pour assurer la reconfigurabilité en fréquence, des diodes varicap ont été intégrées en série sur la ligne d'alimentation du patch. Après plusieurs tentatives de positionnement sur différentes zones de la structure, cet emplacement s'est révélé le plus efficace, offrant la meilleure influence sur les fréquences de résonance. Modélisées par un circuit RLC série, les valeurs de chaque paramètre ont été fixées après de multiples itérations et ajustements successifs, afin d'obtenir le meilleur compromis en termes d'adaptation d'impédance et de reconfigurabilité en fréquence. Les valeurs retenues sont les suivantes :

Résistance série : R = 1 Ω (représentant les pertes de la diode). Valeur optimale déterminée par simulation paramétrique, assurant une modélisation fidèle des pertes de la diode.

Inductance série : L = 0,15 nH (modélisant les effets parasites). Valeur obtenue par simulation, représentant les effets parasites du boîtier CMS sans perturber les fréquences de résonance

Capacité variable : Cv variant de 0,1 pF à 3 pF Trois diodes varicap sont intégrées en série directement sur le patch rayonnant. Ce positionnement correspond aux zones de courant maximal sur le patch, garantissant une sensibilité optimale à la variation de capacité.

Ce modèle RLC série permet de simuler fidèlement le comportement électrique réel de la diode varicap. La variation de la capacité Cv, contrôlée par la tension de polarisation, permet de modifier la longueur électrique effective du patch, induisant ainsi un décalage contrôlé des fréquences de résonance sur les trois bandes ciblées : 2,4 GHz, 5,8 GHz et la bande X.

IV.1.1 À l'antenne multi-résonance silicone

La figure III.44 présente la nouvelle structure de l'antenne patch sur substrat silicone avec intégration de diodes varicap directement sur le patch rayonnant, en série.

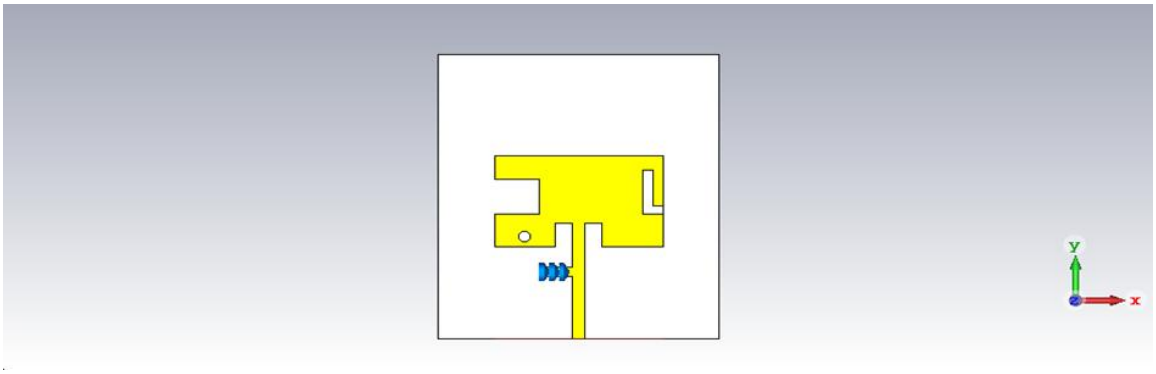


Figure III.44 : Nouvelle structure de l'antenne silicone h=1,9 avec diodes varicap.

Ce positionnement permet de modifier la longueur électrique effective du patch en fonction de la tension de polarisation, induisant ainsi un décalage contrôlé des fréquences de résonance sur les trois bandes ciblées : 2,4 GHz, 5,8 GHz et la bande X.

- **Coefficient de réflexion**

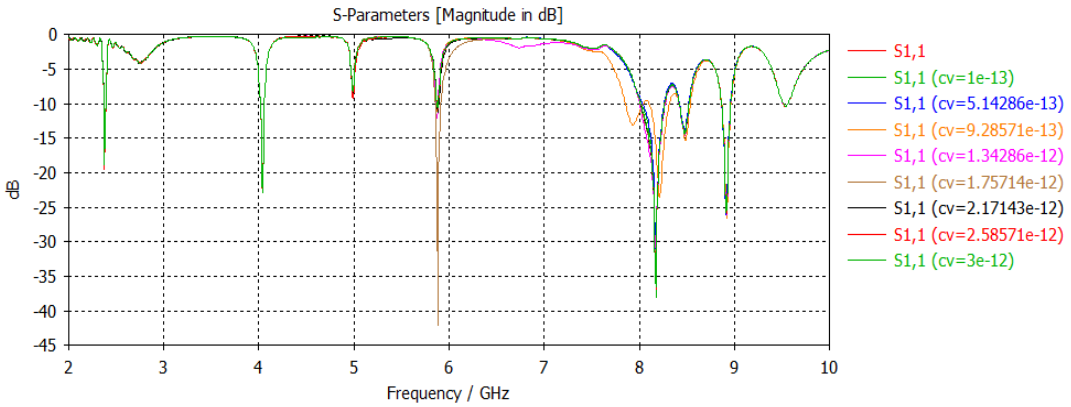


Figure III.45 : Coefficient de réflexion de l'antenne patch de la nouvelle structure en silicone avec h = 1,9.

La figure III.45 illustre le coefficient de réflexion S_{11} de la nouvelle structure en silicone avec h = 1,9.

On remarque qu'à 2,4 GHz, la fréquence de résonance se déplace progressivement de 2,36 GHz vers 2,376 GHz avec l'augmentation de Cv, témoignant un bon accord (d'une bonne accordabilité) avec la fréquence cible.

À 5,8 GHz, l'adaptation évolue de -11 dB à -42 dB, traduisant une nette amélioration du couplage selon la valeur de Cv. Cv = 1,75714 pF.

Enfin, à 8 GHz, la multiplicité des résonances observées selon Cv confirme la reconfigurabilité de l'antenne sur cette bande.

- **Gain**

La figure III.46 présente le gain maximal de l'antenne reconfigurable sur substrat en silicone en fonction de la fréquence, pour différentes valeurs de cv.

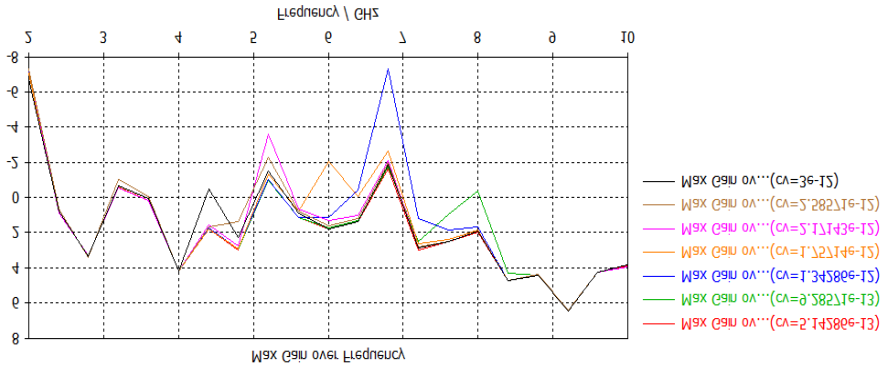


Figure III.46 : Gain de la nouvelle structure en silicone avec h=1,9 et diodes varicap.

À 2,36-2,4 GHz, le gain varie entre 0 et +2 dB selon cv, confirmant un rayonnement effectif avec un bon accord et une bonne accordabilité de l'antenne sur la bande ISM.

À 5,8 GHz, le gain atteint également de 0 à +2 dB, ce qui, associé à une adaptation de -42 dB, ceci valide les bonnes performances de rayonnement sur la bande WiFi.

En bande X (8-9 GHz), l'antenne atteint son gain maximal de +6 dB, avec une reconfigurabilité clairement visible entre les différentes valeurs de cv, confirmant l'aptitude du fonctionnement de la structure aux applications radar et satellite.

V. Étude comparative

Cette étude compare les performances de deux antennes patch rectangulaires multi-résonantes conçues sur deux substrats distincts : le substrat en Rogers (ε_r = 2,2, faibles pertes) et le substrat en silicone avec une épaisseur optimisée de h = 1,9 mm (ε_r = 11,9, avec DGS — Defected Ground Structure). Les deux structures visent un fonctionnement multi bande et multi résonance pour les applications de l'Internet des objets médicaux (IoMT).

La différence structurelle majeure entre les deux substrats réside dans le fait que le substrat en silicone, avec son épaisseur accrue à 1,9 mm et l'intégration d'un DGS (Defected Ground Structure), présente une résonance additionnelle à 4,024 GHz, absente dans le cas du substrat Rogers. Cette résonance supplémentaire élève le nombre effectif de bandes de résonance à cinq pour le substrat en silicone.

V.1 Etudes comparative entre antenne avec substrat en Roger et en Silicone

Le tableau suivant présente l'ensemble des fréquences de résonance obtenues pour chaque substrat, avec les valeurs du coefficient de réflexion S_{11}, VSWR et du Gain associés, en comparaison avec les résultats de la littérature et la contribution du travail fait.

Antenne résonnant à 4 GHz	Substrat en Roger RT5008 (ε_r = 2,2)			Substrat en Silicone : h = 1,9 mm (ε_r = 11,9)			
Paramètre	2,4 GHz	5,8 GHz	8,26 GHz	2,4 GHz	4.024 GHz	5,856 GHz	8.06 GHz
S11 (dB)	-15,82	-25,97	-11.36	-25.17	-25.17	-26,40	-29.25
VSWR	1,38	1,10	1,74	1,00	1,12	1,03	1,15
Gain (dBi)	4,22	5,61	7,24	2,87	4	2,59	2,22

Tableau III.5 : l'ensemble des fréquences de résonance obtenues pour chaque substrat.

- ❖ Résonance à 4,024 GHz : propre au substrat silicone h=1,9 mm avec DGS. Absente chez Roger. S11 = –25,17 dB / VSWR = 1,12.
- ❖ Roger présente un gain supérieur sur toutes les bandes communes a 2,4GHz,5.8GHz et band X 8. Cependant, le substrat silicone couvre une bande supplémentaire à 4,024 GHz, non accessible avec Roger pour cette configuration.

V.2 Tableau récapitulatif et critères de la bande IoMT

La synthèse des critères techniques et applicatifs permettant d'orienter le choix du substrat selon les exigences spécifiques des dispositifs en IoMT.

Critère	Roger	Silicone h=1,9	Avantage		Pertinence IoMT
Permittivité (εr)	2,2	11,9		**Silicone**	*εr élevée → miniaturisation des dispositifs portables / implantables*
Dimensions substrat	59 × 39 mm	30 × 24 mm		**Silicone**	*Réduction ≈ 50 % → intégration dans capteurs en IoMT implantables*
Nombre de bandes	4 bandes	4 bandes + 4 GHz*		**Silicone**	*Bande 4 GHz supplémentaire en Silicone (grâce au DGS et h=1,9)*
Gain (2,4 GHz)	**4,22 dBi**	2,87 dBi	**Roger**		*Roger supérieur, mais les deux restent acceptables pour le l'IoMT.*
Gain (5,8 GHz)	**5,61 dBi**	2,59 dBi	**Roger**		*Avantage pour le Roger il est notable sur cette bande*
Adaptation S11 à 2,4 GHz	-15,82 dB	**-25,17 dB**		**Silicone**	*Meilleure adaptation en Silicone sur la bande IoMT principale*
Pertes diélectriques	Très faibles	Élevées	**Roger**		*Pertes élevées avec le silicone → réduction du gain global*
Compatibilité miniaturisation IoMT	Limitée	**Optimale**		**Silicone**	*Silicone indispensable pour les dispositifs portables /implantables*
Coût et disponibilité	Élevé	Modéré		**Silicone**	*Silicone plus accessible pour la production en série pour l'IoMT*

Tableau III.6 : Tableau récapitulatif global.

- **Rogers (ε_r = 2,2)** : gain élevé (4,22 / 5,61 / 7,24 dBi), d'où une meilleure portée, idéal pour les dispositifs en IoMT externes portés sur le corps.
- **Silicone (ε_r = 11,9)** : une bonne miniaturisation qui est égale à 50% , (30 × 24 mm vs 59 × 39 mm), résonance à 4,024 GHz (proche MICS) et une meilleure adaptation à 2,4 GHz (S_{11} = −25,17 dB) ce qui indique une meilleure adaptation aux implants et patchs cutanés.

V.3 Choix des substrats pour l'IoMT

Utilisation du Roger TR5880	Utilisation du Silicone (h=1,9 mm)
• Gain élevé requis sur toutes les bandes (> 5 dBi) • Équipements IoMT externes (moniteurs portés sur le corps) • Applications nécessitant la bande X (7–8 GHz) avec fort gain • Prototypage à haute performance et pour les recherches RF • Contraintes de taille non critiques	• Miniaturisation requise : dispositifs implantables ou portables • Couverture multibande étendue incluant 4 GHz (médical dédié) • Capteurs IoMT intégrés dans des vêtements ou patchs cutanés • Production en série à coût réduit • Gain modéré acceptable (> 2 dBi suffit pour transmission courte portée)

Tableau III.7 : Choix des substrats pour l'IoMT.

- **Comparaison des résultats**

Pour les applications IoMT nécessitant une miniaturisation poussée et une couverture multi bande incluant les fréquences médicales dédiées, le substrat en silicone avec h=1,9 mm et DGS constitue le choix optimal. Ses dimensions réduites, sa résonance à 4 GHz et sa bonne adaptation à 2,4 GHz en font un candidat idéal pour les implants et capteurs portables.

Pour le substrat en Roger TR5880, demeure préférable lorsque les performances en RF (gain élevé, faibles pertes) priment sur la contrainte dimensionnelle, notamment pour les équipements en IoMT externes ou les systèmes de mesure sont à longues portées.

VI. Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la conception, la simulation et l'analyse d'une antenne patch rectangulaire reconfigurable multi-bande et à multi résonances destinée aux applications IoMT dans l'environnement en radio cognitive, en utilisant le logiciel CST Studio Suite.

Dans un premier temps, trois substrats ont été étudiés et comparés : le FR4, le Rogers TR5880 et le Silicone. Les résultats ont montré que le substrat en FR4, bien qu'économique, présente des pertes diélectriques élevées limitant ses performances en gain. Le substrat en Rogers

TR5880 offre d'excellentes performances RF avec un gain atteignant 7,24 dBi en bande X, mais ses dimensions restent importantes. Le substrat en Silicone avec h = 1,9 mm et un DGS s'est révélé le plus adapté aux contraintes IoMT, grâce à une miniaturisation d'environ 50% et une bonne adaptation sur les trois bandes cibles.

Dans un second temps, la reconfigurabilité en fréquence a été assurée par l'intégration de diodes varicap, permettant un contrôle dynamique des fréquences de résonance à 2,4 GHz, 5,8 GHz et en bande X. La structure reconfigurable en Silicone a démontré un bon accord une accordabilité et une efficacité avec un gain atteignant +6 dB en bande X et une adaptation excellente de -42 dB à 5,8 GHz.

En définitive, la structure proposée avec le substrat en Silicone avec h = 1,9 mm et un DGS et diodes varicap constitue la solution optimale, alliant compacité, reconfigurabilité et couverture multi-bande, répondant pleinement aux exigences des systèmes IoMT modernes.

Conclusion générale

L’évolution rapide des technologies de communication sans fil et la généralisation des dispositifs médicaux connectés transforment profondément le secteur de la santé à l’échelle mondiale. Grâce à l’Internet des Objets Médicaux (IoMT), il est désormais possible d’assurer un suivi continu des patients, d’améliorer la qualité des soins et de faciliter l’accès aux services médicaux. Toutefois, cette évolution s’accompagne de nouveaux défis liés à la disponibilité du spectre radioélectrique, à la consommation énergétique et à l’intégration de systèmes de communication toujours plus compacts et performants. Dans ce contexte, les antennes reconfigurables associées à la radio cognitive constituent une solution particulièrement intéressante pour répondre aux besoins des futures applications médicales intelligentes.

Dans le cadre de ce projet de fin d'études, nous avons mené une étude approfondie portant sur la conception, la simulation et l'analyse comparative d'une antenne patch rectangulaire reconfigurable compacte, dédiée aux applications de l'Internet des Objets Médicaux (IoMT) dans un environnement Radio Cognitive. L'ensemble de ce travail a été réalisé à l'aide du logiciel de simulation électromagnétique CST Studio Suite, en réponse aux exigences croissantes de miniaturisation, de multifonctionnalité et d'agilité fréquentielle imposées par les dispositifs médicaux connectés de nouvelle génération.

Le premier chapitre nous a permis d'acquérir une compréhension approfondie de l'IoMT et de la Radio Cognitive, de leurs architectures et de leurs exigences techniques. Nous avons mis en évidence la congestion croissante des bandes ISM et démontré que la radio cognitive constitue la solution la plus adaptée pour garantir une gestion dynamique et intelligente du spectre, offrant ainsi fiabilité, optimisation énergétique et priorisation des données médicales critiques.

Le deuxième chapitre a fourni les bases théoriques nécessaires à la compréhension des antennes et de la reconfigurabilité. L'étude des différents types d'antennes a justifié le choix de l'antenne patch imprimée pour sa compacité et sa facilité d'intégration, tandis que les diodes Varicap ont été identifiées comme la technique de reconfiguration la plus appropriée pour répondre aux exigences d'agilité fréquentielle de la radio cognitive appliquée à l'IoMT.

Le troisième chapitre, cœur applicatif de ce travail, a présenté la conception et la simulation d'une antenne patch multi bande et à multi résonances sur trois substrats : FR-4, Rogers et Silicone. Les résultats ont démontré que le substrat silicone avec h = 1,9 mm et la structure DGS constitue le meilleur compromis, offrant une miniaturisation d'environ 50%, une couverture multi bande sur 2,4 GHz, 5,8 GHz et la bande X, avec un gain atteignant +6 dB et

une adaptation de -42 dB. L'intégration des diodes Varicap (R = 1 Ω, L = 0,15 nH, Cv = 0,1 à 3 pF) a conféré à la structure une reconfigurabilité dynamique efficace.

En conclusion, les résultats obtenus démontrent la faisabilité et la pertinence de l'antenne développée pour les systèmes médicaux connectés de nouvelle génération. Les travaux réalisés constituent une base solide pour de futures recherches portant sur l'utilisation de matériaux biocompatibles, l'amélioration des performances par l'emploi de réseaux d'antennes reconfigurables, ainsi que la validation expérimentale de la structure à travers la fabrication et la caractérisation de prototypes réels. Cette continuité permettra de rapprocher davantage les solutions proposées des besoins concrets des applications médicales intelligentes de demain.

Bibliographie

Chapitre I

[1] Yousen, H. (2011). Radio Frequency Identification (RFID) technology and application [M]. *Publishing House of Electronics Industry*, *88*.

[2] Dolin, R. A. (2006, January). Deploying the" Internet of things". In *International Symposium on Applications and the Internet (SAINT'06)* (pp. 4-pp). IEEE.

[3] Wortmann, F., & Flüchter, K. (2015). Internet of things: technology and value added. *Business & information systems engineering*, *57*(3), 221-224.

[4] Mukhopadhyay, S. C., & Suryadevara, N. K. (2014). Internet of things: Challenges and opportunities. *Internet of Things: Challenges and opportunities*, 1-17.

[5] KEDDI, M., & MAARADJI, B. (2025). *Apprentissage profond pour la détection d'intrusions dans l'IoMT* (Doctoral dissertation, Université Ibn Khaldoun–Tiaret).

[6] S. Rubí, J. N., & L. Gondim, P. R. (2019). IoMT platform for pervasive healthcare data aggregation, processing, and sharing based on OneM2M and OpenEHR. *Sensors*, *19*(19), 4283.

[7] Ayadi, O. (2019). *Analyse et étude de la sécurité des données médicales dans l'Internet des objets à partir d'une approche technologique Blockchain* (Doctoral dissertation, PhD thesis, Université de Constantine 2)..

[8] Sun, L., Jiang, X., Ren, H., & Guo, Y. (2020). Edge-cloud computing and artificial intelligence in internet of medical things: architecture, technology and application. *IEEE access*, *8*, 101079-101092.

[9] Shaik, T., Tao, X., Higgins, N., Li, L., Gururajan, R., Zhou, X., & Acharya, U. R. (2023). Remote patient monitoring using artificial intelligence: Current state, applications, and challenges. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Data Mining and Knowledge Discovery*, *13*(2), e1485.

[10] Islam, S. R., Kwak, D., Kabir, M. H., Hossain, M., & Kwak, K. S. (2015). The internet of things for health care: a comprehensive survey. *IEEE access*, *3*, 678-708.

[11] Rahmani, A. M., Liljeberg, P., Jantsch, A., & Tenhunen, H. (2018). Exploiting smart e-Health gateways at the edge of healthcare Internet of Things. Future Generation Computer Systems, 78, 641–658. https://doi.org/10.1016/j.future.2017.02.014

[12] Alsubaei, F., Abuhussein, A., & Shiva, S. (2019). IoMT-Sec: A framework for enhancing security in Internet of Medical Things. Future Generation Computer Systems, 97, 539–553. https://doi.org/10.1016/j.future.2019.03.017

[13] Patel, S., Park, H., Bonato, P., Chan, L., & Rodgers, M. (2012). A review of wearable sensors and systems with application in rehabilitation. Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation, 9(1), 21. https://doi.org/10.1186/1743-0003-9-21

[14] Yaacoub, J.-P. A., Noura, M., Noura, H. N., Salman, O., Yaacoub, E., Couturier, R., & Chehab, A. (2020). Securing internet of medical things systems: Limitations, issues and recommendations. Future Generation Computer Systems, 105, 581–606.

[15] Allisone. (2025, March). Après l'IoT, l'internet des objets médicaux (IoMT). https://www.allisone.ai/blog/iomt-internet-of-medical-things

[16] Tedisel. (2024). La révolution de l'IoMT dans le secteur de la santé. Tedisel Medical. https://tediselmedical.com/fr/larevolution-de-liomt-dans-le-secteur-de-la-sante/

[17] Mascret, Q. (2024). L'internet des objets médicaux (IoMT) appliqué aux soins de santé ambulatoires: prévention, détection et alertes intelligentes en boucle fermée [Doctoral dissertation, Université Laval].

[18] Gadiaga, A. (2025). Création et mise en oeuvre d'une application basée sur les technologies IoMT pour le diagnostic et le suivi de l'insuffisance rénale.

[19] Mohamed, R. (2017). Mise en oeuvre d'un système de télésurveillance à base de capteurs intelligents: Application à la maintenance prévisionnelle.

[20] PARTIE, I. (2018). Principales technologies émergentes.

[21] Al-Safi, A. (2017). Architecture, simulation, and implementation of commodity computer components in software defined radio systems [Doctoral dissertation, Western Michigan University].

[22] Kafetzis, D., Vassilaras, S., Vardoulias, G., & Koutsopoulos, I. (2022). Software-defined networking meets software-defined radio in mobile ad hoc networks: State of the art and future directions. IEEE Access, 10, 9989–10014.

[23] Kaidenko, M. M., & Roskoshnyi, D. V. (2019). Software defined radio in communications. In Advances in information and communication technologies: Processing and control in information and communication systems (pp. 227–238). Springer International Publishing.

[24] Mitola, J., & Maguire, G. Q. (1999). Cognitive radio: Making software radios more personal. IEEE Personal Communications, 6(4), 13–18.

[25] Capela, G. G. (2014). Development of a software defined radio (SDR) for cognitive radio (CR) communication systems.

[26] Eappen, G., & Shankar, T. (2020). A survey on soft computing techniques for spectrum sensing in a cognitive radio network. SN Computer Science, 1(6), 352.

[27] Sudhahar, S., Pousia, S., Guruprasath, J., Dhanushragav, M., & Lakshminarasimman, S. (2023, December). Enhancement in 6G intelligent network technologies using cognitive radio network. In 2023 4th International Conference on Communication, Computing and Industry 6.0 (C2I6) (pp. 1–6). IEEE.

[28] Mukherjee, T., & Nath, A. (2015). Cognitive radio network architecture and security issues: A comprehensive study. International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering, 5(6), 124–133.

[29] Taleb, R. D. (2025). Réalisation des antennes reconfigurables dans les réseaux radio cognitifs destinés aux applications satellitaires [Doctoral dissertation, Université de Tlemcen].

[30] Nurmi, J., & Perera, D. G. (2021, October). Intelligent cognitive radio architecture applying machine learning and reconfigurability. In 2021 IEEE Nordic Circuits and Systems Conference (NorCAS) (pp. 1–6). IEEE.

[31] Amraoui, A. (2015). Vers une architecture multi-agents pour la radio cognitive opportuniste [Doctoral dissertation, Université de Tlemcen-Abou Bekr Belkaid].

[32] Larbi, I., & Benmammar, B. (2014). Négociation de spectre dans les réseaux de radio cognitive. arXiv preprint arXiv:1407.2217.

[33] Baba-ahmed, M. Z. (2015). Études des mécanismes d'adaptation autonome dans le contexte de la radio cognitive [Doctoral dissertation, Université de Tlemcen].

[34] Moawad, A. (2020). Enhancement of spectrum sensing in cognitive radio: Providing reliable spectral opportunities [Doctoral dissertation, Université de Bretagne Occidentale-Brest].

[35] Idris, M. Y. I., Ahmedy, I., Soon, T. K., Yahuza, M., Tambuwal, A. B., & Ali, U. (2024). Cognitive radio and machine learning modalities for enhancing the smart transportation system: A systematic literature review. ICT Express.

[36] Benammar, A. (2020). Analyse et conception dans la bande ISM de structures coaxiales [Doctoral dissertation, Université Abou Bekr Belkaid, Tlemcen]. https://theses-algerie.com/3748111992145699

[37] Bouchenak, S. (2025). Toward cognitive radio resource management based on multi-agent [Master's thesis, Université de Tlemcen]. https://dspace.univ-tlemcen.dz/items/3fdc74e5-4983-4dff-a8a5-d01cefd3d1fc

[38] Naresh Kumar, B., & Singh, J. S. P. (2022). Cognitive Internet of Medical Things applications. PMC. https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9356718/

[39] Benamara, M. (2020). Adaptation des protocoles de communication conçus pour les IoT aux systèmes IoMT [Master's thesis, Université Abou Bekr Belkaid, Tlemcen]. https://dspace.univ-tlemcen.dz/items/ca25dfd8-4367-4062-b89d-e97ddf6de6a3

[40] Guettai, B. (2022). Prédiction du spectre à base des réseaux de neurones artificiels [Master's thesis, Université de Ouargla]. https://dspace.univ-ouargla.dz/jspui/bitstream/123456789/28963/1/GUETTAI-BEN%20SLIMAN.pdf

[41] Bouzbibba, H. (2020). FreeBandWidth RPL pour IoMT [Doctoral dissertation, Université Abou Bekr Belkaid, Tlemcen]. https://dspace.univ-tlemcen.dz/collections/66b01a71-84aa-4ff0-bf1c-291178d274b9

Chapitre II

[1] Balanis, C. A. (2016). Antenna theory: Analysis and design (4th ed.). Wiley.

[2] Fleury, M. L. P., & B. G. (2007). Radiocommunications: Des concepts de base aux systèmes. Dunod.

[3] Mak, C. L., et al. (2020). Antenna for use in electronic communication systems (U.S. Patent No. 10,862,220).

[4] Maeng, S. J., Kwon, H., Ozdemir, O., & Güvenç, I. (2023). Impact of 3D antenna radiation pattern in UAV air-to-ground path loss modeling and RSRP-based localization in rural area. IEEE Open Journal of Antennas and Propagation.

[5] Xiao, Y., Lu, W. J., Zhao, M. L., Liu, L., & Zhu, L. (2023). Triple-mode resonant backfire feed antenna with nearly equal E-/H-plane and inverse taper patterns. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 70(6), 1946–1950.

[6] Weng, W. C., Yang, F., & Elsherbeni, A. Z. (2022). Electromagnetics and antenna optimization using Taguchi's method. Springer Nature.

[7] Liao, Q., Fonseca, N. J., Camacho, M., Palomares-Caballero, Á., Mesa, F., & Quevedo-Teruel, O. (2023). Ray-tracing model for generalized geodesic-lens multiple-beam antennas. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 71(3), 2640–2651.

[8] Joska, J. M. K. (2016). Influence de la PIRE sur la transmission par satellite géostationnaire. Éditions universitaires européennes.

[9] Mathivanan, S., & Rajeswari, A. (2022). Omnidirectional microstrip MIMO antenna for intelligent vehicle RADAR communication. Wireless Personal Communications, 127(4), 3407–3421.

[10] Aydin, E., & Aykac, R. E. (2023). The effect of antenna spacing on active S-parameters in planar array antennas. The Eurasia Proceedings of Science Technology Engineering and Mathematics, 24, 29–36.

[11] Sofiane, T. (2016). Caractérisation d'antennes avec le banc de mesure «Lucas nülle-Unitrain» en bande X [Doctoral dissertation, Université Mouloud Mammeri].

[12] Abotalebi, S. (2023). Ultra-wideband UHF/VHF electrically small antennas and ultra-wideband S-band and C-band compact form-factor antennas [Master's thesis, New Mexico State University].

[13] Krouka, W. (2021). Caractérisation non biaisée de l'efficacité d'antenne en chambre réverbérante: Apport du brassage et mise en place d'une méthode sans contact [Doctoral dissertation, Université Gustave Eiffel].

[14] Lynch, D. P., Tentzeris, M. M., Fusco, V., & Asimonis, S. D. (2024). Super realized gain antenna array. IEEE Transactions on Antennas and Propagation.

[15] Andrews, S. S. (2023). Electromagnetic waves. In Light and waves: A conceptual exploration of physics (pp. 273–305). Springer.

[16] Sarath, J. V., Bindu, P., Biju, K. S., & Rani, L. (2021). Review of antennas used in FPV/WLAN applications. Acta Technica Corviniensis-Bulletin of Engineering, 14(1), 29–40.

[17] Özdemir, Z. (2022). Kinematical modeling of circular and elliptical polarization of polarized light via screw transformation. Physica Scripta, 97(2), 025502.

[18] Aissaoui, D. (2019). Étude et conception d'antennes fractales pour des applications ultra-large-bande [Doctoral dissertation].

[19] Roohi, R., Attari, A. R., Majedi, M. S., & Lambot, S. (2024). Prediction of antenna reflection coefficient in presence of multilayer media: A fast spectral domain approach. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing.

[20] Jarvis, R. E., Mattingly, R. G., & McDaniel, J. W. (2021). UHF-band radar cross section measurements with single-antenna reflection coefficient results. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 70, 1–4.

[21] Saeed, M. H. R. (2022). Design and simulation of rectangular microstrip patch antennas (45 GHz and 60 GHz) for V-band applications. Passer Journal of Basic and Applied Sciences, 4(2), 100–104.

[22] Prabowo, A. S., Pambudiyatno, N., & Harianto, B. B. (2021). Microstrip antenna design with patch rectangular for primary surveillance radar (PSR) L-band application. In Journal of Physics: Conference Series (Vol. 1845, No. 1, p. 012033). IOP Publishing.

[23] Haddad, M., & Khelil, A. (2023). Conception et réalisation d'une antenne ultra large bande pour des applications biomédicales.

[24] Bencherif, Y., & Bouguenina, F. (2021). Réseaux d'antenne patch pour application spatiale.

[25] Pigeon, M. (2011). Etude et réalisation d'antennes ultra-compactes à base de métamatériaux: Application à la réalisation d'une antenne GNSS miniature [Doctoral dissertation, Institut National Polytechnique de Toulouse-INPT].

[26] Yadava, R. L. (2022). Antennas and wave propagation. PHI Learning Pvt. Ltd.

[27] Benomar, A. (2015). Étude des antennes à résonateurs diélectriques: Application aux réseaux de télécommunications [Doctoral dissertation, Université de Limoges].

[28] Kdrouci, A. (2021). Conception d'une antenne patch inspirée des méta-matériaux pour les applications RFID [Master's thesis, Université de Tlemcen].

[29] Parasuraman, S., Yogeeswaran, S., & Ramesh, G. P. (2020). Design of microstrip patch antenna with improved characteristics and its performance at 5.1 GHz for wireless applications. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (Vol. 925, No. 1, p. 012005). IOP Publishing.

[30] Al-Khaffaf, D. A. J., & Alshimaysawe, I. A. (2021). Miniaturised tri-band microstrip patch antenna design for radio and millimetre waves of 5G devices. Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science, 21, 1594–1601.

[31] Patel, D. H., & Makwana, G. D. (2021). A comprehensive review on multi-band microstrip patch antenna comprising 5G wireless communication. International Journal of Computing and Digital System.

[32] Messoudene, M. (2016). Modélisation par modèle équivalent amélioré des antennes périodiques et log-périodiques à base d'éléments rayonnants à encoche: Applications aux télécommunications sans fil [Doctoral dissertation].

[33] Rana, M. S., Hossain, S., Rana, S. B., & Rahman, M. M. (2023). Microstrip patch antennas for various applications: A review. Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science, 29(3), 1511–1519.

[34] Sharma, A., & Jaglan, N. (2019). Design of microstrip patch antenna for practical applications.

[35] Kaur, A., & Malik, P. K. (2021). Multiband elliptical patch fractal and defected ground structures microstrip patch antenna for wireless applications. Progress In Electromagnetics Research B, 91.

[36] Sabeti, S. M., Zehforoosh, Y., & Mohammadi, P. (2024). A low-profile stacked ME dipole antenna loaded with high-permittivity dielectric for 5G applications. IEEE Access.

[37] Errifi, H., Baghdad, A., & Sahel, A. (2014). Étude comparative de l'influence des deux méthodes d'adaptation d'impédance sur la performance de l'antenne patch rectangulaire à la fréquence 10 GHz. ResearchGate.

[38] Rocha, A., Mota, S., & Sousa, M. (2019). A demonstrator for impedance matching systems in transmission lines with time and frequency simulation. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 61(3), 92–103.

[39] Moussa, T. B., & Rabia, T. (2023). Influence des paramètres géométriques sur les performances de l'antenne patch rectangulaire.

[40] Ahmad, H. J., & Mahmood, F. M. (2024). Single and double stub tuner impedance matching of microwave circuits using Mathcad software. Cihan University-Erbil Scientific Journal, 8(2), 1–8.

[41] Ma, Z., Chen, J., Li, C., & Jiang, Y. (2023). A monopole broadband circularly polarized antenna with coupled disc and folded microstrip stub lines. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2023(1), 30.

[42] Adam, I., Yasin, M. N. M., Aziz, M. E. A., & Mi, S. (2019). Rectifier for RF energy harvesting using stub matching. Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science, 13(3).

[43] Sarkar, M., Singh, A., Gupta, S., & Hassanien, A. E. (2020). Smart antenna design for high-speed moving vehicles with minimum return loss. International Journal of Communication Systems, 33(11), e4414.

[44] Attaouat, F., & Lechehab, S. (2020). Étude et conception d'une antenne patch monopole à faisceau reconfigurable à base de surfaces sélectives en fréquence [Doctoral dissertation, Université Kasdi Merbah Ouargla].

[45] Chergui, S. (2021). Conception d'une antenne patch rectangulaire à double bande avec la structure à défaut dans le plan de masse (DGS) [Doctoral dissertation].

[46] Chouhbane, M. (2021). Étude et conception d'une antenne reconfigurable en fréquence et en diagramme de rayonnement.

[47] Guerroui, M. (2022). Conception d'une nouvelle antenne pour une application GPR [Doctoral dissertation].

[48] Harouni, Z. (2011). Conception et caractérisation d'une rectenna à double polarisation circulaire à 2.45 GHz [Doctoral dissertation, Université Paris-Est].

[49] Benderradji, H. M., Gherbi, L., & Chebbara, F. (2019). Étude d'une antenne microbande rectangulaire avec une couche protectrice.

[50] Valleau, J. (2016). Miniaturisation d'antennes très large bande pour applications spatiales [Doctoral dissertation, Institut National Polytechnique de Toulouse].

[51] Volakis, J. L., Chen, C. C., & Fujimoto, K. (2010). Small antennas: Miniaturization techniques and applications. McGraw-Hill.

[52] Chorfi, H. (2012). Conception d'un nouveau système d'antenne réseau conforme en onde millimétrique [Doctoral dissertation, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue].

[53] Pendry, J. B., Holden, A. J., Robbins, D. J., & Stewart, W. J. (1999). Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 47(11), 2075–2084.

[54] Yang, L. (2020). The measurement of antenna VSWR by means of a vector network analyzer.

[55] Arab, T. (2018). Étude des matériaux composites (titanate oxyde): Application pour la réalisation des substrats d'antennes miniatures [Doctoral dissertation, Université de Sétif].

[56] Sufyar, S. (2011). Contribution à l'étude d'antennes miniatures reconfigurables en fréquence par association d'éléments actifs [Doctoral dissertation, Université de Grenoble].

[57] Stutzman, W. L., & Thiele, G. A. (2012). Antenna theory and design (3rd ed.). John Wiley & Sons.

[58] Fallahpour, M., & Zoughi, R. (2017). Antenna miniaturization techniques: A review of topology- and material-based methods. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 60(1), 38–50.

[59] Rakholiya, A. A., & Langhnoja, N. V. (2017). A review on miniaturization techniques for microstrip patch antenna. International Journal of Advance Research and Innovative Ideas in Education, 3(2), 4281–4287.

[60] Garg, R., Bhartia, P., Bahl, I., & Ittipiboon, A. (2001). Microstrip antenna design handbook. Artech House.

[61] Kristou, N. (2018). Étude et conception de métamatériaux accordables pour la miniaturisation d'antennes aux fréquences micro-ondes [Doctoral dissertation, Université de Rennes].

[62] Abdalla, M. A., et al. (2018). Miniaturization techniques for microstrip patch antennas: A review. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 60(1), 38–50.

[63] Amellal, R. (2023). Application des réseaux de neurones artificiels dans l'optimisation des performances d'antennes reconfigurables. Revue Internationale du Chercheur, 4(3).

[64] Pawar, S. (2017). A review on reconfigurable antenna analysis and switch technologies. International Journal of Scientific Research in Science and Technology, 3(4), 6–12.

[65] Chaouche, Y. B. (2019). Conception d'antennes planaires reconfigurables pour opération large bande et multi-bande [Doctoral dissertation, Université Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi de Bordj Bou Arreridj].

[66] Taleb, R. D. (2025). Réalisation des antennes reconfigurables dans les réseaux radio cognitifs destinés aux applications satellitaires [Doctoral dissertation, Université de Tlemcen].

[67] Shah, I. A., Hayat, S., Basir, A., Zada, M., Shah, S. A. A., & Ullah, S. (2019). Design and analysis of a hexa-band frequency reconfigurable antenna for wireless communication. AEU - International Journal of Electronics and Communications, 98, 80–88.

[68] Rammal, M. (2017). Développement d'antennes agiles en fréquence intégrant un condensateur ferroélectrique [Doctoral dissertation, Université de Limoges].

[69] Nguyen, T., Bui, C., Narbudowicz, A., & Nguyen-Trong, N. (2023). Frequency-reconfigurable antenna with wide- and narrowband modes for sub-6 GHz cognitive radio. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 22, 64–68.

[70] Subbaraj, S., & Thomas, S. B. (2023). Reconfigurable antennas and their practical applications—A review. Radio Science, 58(9), 1–13.

[71] Kang, L., Li, H., Zhou, J., & Zheng, S. (2020). An OAM-mode reconfigurable array antenna with polarization agility. IEEE Access, 8, 40445–40452.

[72] Alhamad, R., Almajali, E., & Mahmoud, S. (2023). Electrical reconfigurability in modern 4G, 4G/5G and 5G antennas: A critical review of polarization and frequency reconfigurable designs. IEEE Access, 11, 29215–29233.

[73] Jaiswal, R. K., Dutta, R. K., Das, G., Ojha, A. K., & Srivastava, K. V. (2023). Circularly polarized three-element MIMO antenna with diversity and polarization reconfigurability techniques. AEU - International Journal of Electronics and Communications, 162, 154566.

[74] Nachouane, H. (2017). Contribution à la conception et à la réalisation d'antennes reconfigurables large bande à diversité pour les systèmes de communication radio cognitive de la quatrième génération [Doctoral dissertation, Institut National des Postes et Télécommunications].

[75] Isa, S. R., Jusoh, M., Sabapathy, T., Nebhen, J., Kamarudin, M. R., & Osman, M. N. (2022). Reconfigurable pattern patch antenna for mid-band 5G: A review. Computers, Materials & Continua, 70(2).

[76] Iqbal, A., Smida, A., Mallat, N. K., Ghayoula, R., Elfergani, I., Rodriguez, J., & Kim, S. (2019). Frequency and pattern reconfigurable antenna for emerging wireless communication systems. Electronics, 8(4), 407.

[77] Laheg, C. (2022). Étude et conception d'une antenne MIMO reconfigurable.

[78] Benzina, M., Chouiref, J., & Moulessehoul, W. (2022). Simulation d'une antenne imprimée agile pour les applications satellitaires [Doctoral dissertation].

[79] Gherbi, D. (2023). Étude et conception d'une antenne reconfigurable en utilisant des composants actifs.

[80] Mohanta, H. C., Kouzani, A., & Mandal, S. K. (2019). Reconfigurable antennas and their applications.

[81] Shu, J., Peng, H. L., Zhang, Y. P., & Mao, J. F. (2018). A dual polarized pattern reconfigurable antenna array using liquid crystal phase shifter. In 2018 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP) (pp. 1–2). IEEE.

[82] Jin, Z., Rong, Y., Yu, J., & Wu, F. (2024). Design of a compound reconfigurable terahertz antenna based on graphene. Plasmonics, 19(2), 621–629.

[83] Sirisha Mrunalini, L. N., & Arun, M. (2024). Reconfigurable fork shaped plasmonic graphene based nano-patch antenna for wireless network-on-chip application in THz band. Optical and Quantum Electronics, 56(2), 233.

[84] Zhang, X., Cunjun, R., Dai, J., Ding, Y., Ullah, S., & Kosar Fahad, A. (2021). Design of a reconfigurable antenna based on graphene for terahertz communication. International Journal of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields, 34(5), e2911.

[85] Karthika, K., & Kavitha, K. (2021). Reconfigurable antennas for advanced wireless communications: A review. Wireless Personal Communications, 120(4), 2711–2771.

[86] Nichols, M. W., Gonzalez, A., Alwan, E. A., & Volakis, J. L. (2023). An accordion-folding series-fed patch array with finite thickness: A folding technique for CubeSat arrays. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 65(3), 77–82.

[87] Damgaci, Y., & Cetiner, B. A. (2013). A frequency reconfigurable antenna based on digital microfluidics. Lab on a Chip, 13(15), 2883–2887.

[88] Mohamed, L., & Mahdjoub, Z. (2022). Contribution à l'étude et à la conception d'antennes patchs (ULB et BE) reconfigurables pour une radio cognitive [Doctoral dissertation].

[89] Da Costa, I. F., Cerqueira, A., Spadoti, D. H., Da Silva, L. G., Ribeiro, J. A. J., & Barbin, S. E. (2017). Optically controlled reconfigurable antenna array for mm-wave applications. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 16, 2142–2145.

[90] Sharma, S., Tripathi, C. C., & Rishi, R. (2017). An adaptive reconfigurable antenna for cognitive radio system. In 2017 International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics (ICACCI) (pp. 1121–1125). IEEE.

[91] Boukabou, A. (2021). Systèmes d'antennes reconfigurables intégrés dédiés aux réseaux IoT sans fil dynamiques [Doctoral dissertation]. https://theses.fr/2021COAZ4103

[92] Haddaoui, B. (2021). Étude et conception d'antennes reconfigurables en fréquence pour les applications 5G [Master's thesis, Université de Tlemcen]. https://dspace.univ-tlemcen.dz/items/73c6b75b-e326-48cd-8ed8-6893608bd87d

[93] Selma, D., & Maroua, B. (2020). Antenne reconfigurable à base de méta-matériaux [Master's thesis, Université Saad Dahlab de Blida].