

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان

—  
Université Aboubakr Belkaïd - Tlemcen -  
Faculté de TECHNOLOGIE



## MEMOIRE

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

**En** : TELECOMMUNICATIONS

**Spécialité** : Systèmes des Télécommunications

**Par** :

**BELAHCENE SOHEYB ABDERRAHMANE**

**MESMOUDI MALIKA**

### Theme

Conception et miniaturisation des antennes de réseaux  
radio cognitifs pour des applications IoT

**Soutenu publiquement le 08 / 06 / 2023 devant le jury composé de :**

Mme H. BENOSMAN	MCA	Université de Tlemcen	Présidente
Mme H. BADAOU	Professeur	Université de Tlemcen	Examinatrice
M M.Z. BABA-AHMED	MCA	Université de Tlemcen	Encadrant
M M.A. RABAH	MRA	CDS d'Oran	Co-Encadrant

**Année universitaire : 2022 /2023**

## Remerciement

Nos remerciements vont tout d'abord à ALLAH tous puissant pour nous avoir donné la volonté, la patience et le courage nécessaire pour mener ce modeste travail à bout.

Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements et notre profonde gratitude à Monsieur **BABA-AHMED Mohammed Zakarya**, Maître de conférences classe A, pour avoir dirigé notre travail et pour son soutien et son aide, sa compétence, ainsi que pour les précieux conseils qu'il nous a prodigués.

Nous remercions vivement Madame **BENOSMAN Hayat**, maitre de conférences classe A à l'université de Tlemcen, pour l'honneur qu'elle nous a fait en présidente le jury de ce travail.

Nous tenons à exprimer nos vifs remerciements à Madame **BADAoui Hadjira**, professeur à l'Université de Tlemcen pour l'acceptation d'être examinatrice de ce mémoire.

Nos remerciements les plus vifs s'adressent aussi à Monsieur **RABAH Mohammed Amin**, maitre de recherche classe A notre Co-encadreur à l'université de Tlemcen d'avoir contribué à la conception et réalisation de notre PFE.

Nos vifs remerciement vont aussi à l'ensemble des membre du Laboratoire de télécommunication de Tlemcen **TTL**, de nous avoir acceptés et accueillis à bras ouvert durant notre projet.

Nous souhaitons exprimer nos remerciements à toutes les personnes qui ont contribué, de manière directe ou indirecte, à la réalisation de ce projet.

## Dédicace

Je dédie ce travail à mes parents qui m'ont toujours soutenu et je les remercie pour tous les sacrifices de tout genre qu'ils ont fait pour mon présent et mon avenir afin de faire de moi ce que je suis.

A toute ma famille paternelle MESMOUDI

Et maternelle CHABANE-SARI

A mes amis ZINEB, MARWA, AYMEN, MOUSSA

Et à tous ceux qui me sont chers

Pour leurs amours, leurs soutiens et leurs encouragements constants tout au long de mes études. Leurs présences et leurs confiances ont été une source d'inspiration et de motivation pour moi

MESMOUDI Malika

# **Dédicace II**

## **Je dédie ce modeste travail :**

A mes chers parents, qu'aucune dédicace ne saurait exprimer  
mes sincères sentiments,  
Pour leurs patiences illimitées, leurs encouragements continus, leurs aides,  
en témoignage de mon profond amour et respect pour leurs grands  
sacrifices.

**À mes chères sœurs.**

**À mon frère.**

**À mes chère amis « Sidou, Sid ahmed, Moussa, Aymen ».**

Et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour que ce travail soit  
possible, je vous dis merci.

BELAHCENE Soheyb Abderrahmane

## Résumé

L'Internet des objets (IoT) est un réseau mondial d'objets interconnectés. Cependant, les versions orientées objets, orientées Internet, orientées sémantique et tactiles de l'IoT n'ont aucun sens si les objets IoT ne sont pas équipés d'intelligence. Pour cela, les tendances actuelles de la recherche s'orientent vers la radio cognitive. Parmi ces technologies, une importance particulière est accordée à la radio cognitive. L'agilité en fréquence est très utilisée dans les communications sans fil et mobiles à cause de la croissance importante et continue du nombre des standards à utiliser pour chaque système de télécommunication et de leurs exigences en termes de qualité et de nombre d'utilisateurs.

L'objectif de ce PFE est de faire une conception ainsi qu'une miniaturisation des antennes de réseaux radio cognitifs pour des applications d'IoT afin de servir de solutions auto-reconfigurables pour un certain nombre d'applications IoT.

**Mots clés :** Réseaux de Radio Cognitive, Antennes miniatures, Adaptation, Applications IOT.

## Abstract

The Internet of Things (IoT) is a global network of interconnected objects. However, object-oriented, internet-oriented, semantic-oriented, and tactile-oriented versions of the IoT make no sense if IoT objects are not equipped with intelligence. Therefore, current research trends are moving towards cognitive radio. Among these technologies, particular importance is given to cognitive radio. Frequency agility is widely used in wireless and mobile communications due to the significant and continuous growth in the number of standards used for each telecommunication system and their requirements in terms of quality and number of users.

The objective of this final year project is to design and miniaturize cognitive radio network antennas for IoT applications, serving as self-reconfigurable solutions for a variety of IoT applications.

**Keywords:** Cognitive Radio Networks, Miniature Antennas, Adaptation, IoT Applications.

## الملخص

إن الإنترنت الوسائل هي شبكة عالمية من الأجهزة المتصلة ببعضها البعض. ومع ذلك، فإن الإصدارات الموجهة للإنترنت، والموجهة للدلالة، والموجهة للملاسة من الإنترنت للأشياء لا تكون لها أي معنى إذا لم تكن الأجهزة مجهزة بالذكاء. ولذلك، فإن اتجاهات البحث الحالية تتجه نحو الراديو الإدراكي. ومن بين هذه التقنيات، يولى اهتمامًا خاصًا للراديو الإدراكي. يتم استخدام التكيف الترددي على نطاق واسع في الاتصالات اللاسلكية والمحمولة بسبب النمو الكبير والمستمر في عدد المعايير المستخدمة لكل نظام اتصال ومتطلباتها من حيث الجودة وعدد المستخدمين.

يهدف هذا المشروع في السنة الأخيرة إلى تصميم وتصغير هوائيات الراديو الإدراكية لشبكات الإنترنت للأشياء، لتكون حلولاً ذاتية القابلية لإعادة التشكيل متنوعة من تطبيقات الإنترنت للأشياء.

**كلمات مفتاحية:** شبكات الراديو الإدراكي، الهوائيات المصغرة، التكيف، تطبيقات الإنترنت للأشياء.

# Table des matières

Remerciement.....	II
Dédicace.....	III
Dédicace II.....	IV
Résumé.....	V
Table des matières.....	VI
Liste des figures.....	X
Liste des tableaux.....	XIII
Acronymes et abréviations.....	XIV
Introduction général.....	1

## Chapitre I : Technologie cognitive et internet des objets

I.1 – Introduction.....	6
I.2- / Radio cognitive.....	6
I.2.1- / La radio logicielle restreinte (SDR).....	6
I.2.2- / La radio cognitive.....	7
I.2.2.1- / Historique.....	7
I.2.2.2- / Définition.....	8
I.2.3- / Relation entre RC et SDR.....	8
I.2.4- / L'architecture de la radio cognitive.....	9
I.3- Caractéristique de la radio cognitive.....	10
I.3.1- / Cycle de cognition.....	10
I.3.1.1- / Définition.....	10
I.3.1.2- / La phase d'observation.....	11
I.3.1.3- / La phase d'orientation.....	12
I.3.1.4- / La phase de planification.....	13
I.3.1.5- / La phase de décision.....	13
I.3.1.6- / La phase d'action.....	14
I.3.1.7- / La phase d'apprentissage.....	14
I.3.2- / Fonction de la radio cognitive.....	15
I.3.2.1- / Détection du spectre (Spectrum Sensing).....	15

I.3.2.2- /Décision du spectre (Spectrum decision).....	15
I.3.2.3- /partage du spectre (Spectrum analyse) .....	15
I.3.2.4- /Mobilité du spectre (Spectrum mobility) .....	16
I.3.3- / Application de la radio cognitive .....	17
I.3.3.1- /Véhicules aériens cognitifs sans pilote .....	17
I.3.3.2- /Machine à machine M2M .....	18
I.3.3.3- / Digital home.....	18
I.4- /Internet des objets (IoT) .....	19
I.4.1- / Définition.....	19
I.4.2- / Historique .....	20
I.4.3- / architecture de l'IoT .....	21
I.4.4- / Avantage et Inconvénient de l'IoT.....	22
I.4.4.1 - / Avantage.....	22
I.4.4.2- / Inconvénient.....	23
I.5/ Caractéristique de l'IoT .....	23
I.5.1/Protocol utilisé .....	23
I.5.2/Domaine application de l'IoT .....	24
I.6- / Relation entre Radio cognitive et IoT.....	26
I.7 Conclusion.....	28

## **Chapitre II : Antennes et miniaturisation**

II.1- / Introduction.....	32
II.2- / Définition .....	32
II.4- / Les types des antennes.....	34
II.4.1- / Antenne filaire .....	34
II.4.2- / Antenne a cornet .....	35
II.4.3- / Antenne parabolique.....	36
II.4.4- / Antenne a fente .....	37
II.4.5- / Antenne directives.....	38

II.4.6-/ Antenne Vivaldi.....	39
II.4.7-/ Le dipôle demi-onde .....	39
II.4.8-/ Antenne log-périodique .....	40
II.4.9-/ Antennes omnidirectionnelles.....	41
II.4.9.1-/ Antenne biconique .....	42
II.4.9.2-/ Antenne discône.....	43
II.4.10-/ Antenne Patch (micro-ruban) .....	43
II.4.10.1-/ Structure d'une antenne imprimée.....	44
II.4.10.2-/ Les paramètres géométriques d'une antenne imprimée.....	45
II.4.10.3-/ Les techniques d'alimentation .....	46
II.4.10.4-/ Techniques d'adaptation des antennes patch.....	47
II.5-/ Les caractéristiques des antennes .....	48
II.5.1-/ Caractéristiques électriques .....	48
II.5.2-/ Caractéristiques de rayonnement .....	49
II.6-/ Définition des antennes électriquement petites .....	50
II.7-/Facteur de miniaturisation .....	51
II.8-/ Effet de miniaturisation sur les paramètres de l'antenne .....	52
II.8.1-/ Directivité .....	52
II.8.2-/ Efficacité de rayonnement .....	52
II.8.3-/ Facteur de qualité de l'antenne .....	53
II.8.4-/ Impédance d'entrée et correspondance.....	54
II.9-/ Limites théoriques de la miniaturisation des antennes .....	54
II.10-/ Différentes techniques de miniaturisation .....	55
II.10.1-/ Technique n° 1 : Modification de la géométrie.....	55
II.10.1.1 insertion d'encoches ou de fentes.....	55
II.10.1.2-/ Modification de la géométrie du plan de masse.....	56
II.10.2-/ Technique n° 2: Miniaturisation avec les métas matériaux .....	56
II.10.3-/ Technique n° 3: Court-circuit .....	57
II.12-/ Réseau d'antenne .....	58
II.12.1-/ Définition.....	58
II.12.1-/ Les types alimentation .....	58
II.12-/ Conclusion .....	59

### **Chapitre III : Simulation et réalisation**

III.1-/ Introduction.....	62
---------------------------	----

III.2-/Conception et simulation.....	62
III.2.1-/ Outils de simulation.....	62
III.2.2-/Conception d'une antenne patch rectangulaire.....	63
III.2.2.1-/ Adaptation de l'antenne patch .....	65
III.3-/ Miniaturisation de l'antenne patch.....	68
III.3.1-/ Par modification de la géométrie de l'antenne .....	68
III.3.1.1-/ Au niveau du patch .....	68
III.3.1.2-/ Au niveau de la masse .....	68
III.3.1.3-/Réseaux d'antenne .....	71
III.3.1.3.1-/Réseaux d'antennes à deux éléments.....	71
III.3.1.3.2-/Réseaux d'antenne à quatre éléments .....	74
III.3.1.4-/ Etude et comparaison.....	79
III.3.2-/ Par l'ajout des métamatériaux au niveau de l'antenne 2×2.....	80
III.3.2.1-/ Conception et simulation de la cellule SRR (Split Ring Resonator) .....	80
III.3.2.2-/Antenne miniature associée aux cellules SRR.....	81
III.3.2.2-/étude et comparaison .....	84
III.3.3-/ Par la méthode du DGS.....	84
III.3.3.1-/structure de l'antenne patch circulaire :.....	84
III.3.3.2-/Nouvelle structure miniaturisé.....	87
III.3.3.3-/Réseaux d'antenne a deux éléments : .....	90
III.3.3.4-/Réseaux d'antenne à quatre éléments .....	92
III.3.3.5-/Etude comparative .....	94
III.4-/ Réseau expérimentaux.....	95
III.4.1-/ Mesure expérimental .....	95
III.4.1.1-/Mesure du coefficient de réflexion S11 .....	95
III.4.1.2-/ Mesure du VSWR.....	97
III.5-/ Conclusion.....	98
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>100</b>
<b>Références bibliographiques.....</b>	<b>102</b>

## Liste des figures

### Chapitre I : Technologie cognitive et internet des objets

Figure I. 1 Relation entre RC et SDR [7].....	9
Figure I. 2 L'architecture de la radio cognitive [6].....	10
Figure I. 3 Cycle de cognition [8] .....	11
Figure I. 4 Spectrum (a) superposition et (b) sous-couche [10] .....	16
Figure I. 5 Cognitive digital home [12].....	19
Figure I. 6 Les 3 visions de l'IoT [5].....	20
Figure I. 7 L'architecture de l'internet des objets [5] .....	21
Figure I. 8 Relation entre RC et l'IdO [5] .....	27

### Chapitre II : Antennes et miniaturisation

Figure II. 1 Schéma électrique équivalent d'une antenne [18]. .....	33
Figure II. 2 Antenne filaire usuelles [19].....	35
Figure II. 3 Antenne a corne [22].....	36
Figure II. 4 Antenne parabolique [23].....	37
Figure II. 5 Antenne a fente [24].....	37
Figure II. 6 Diagramme de rayonnement d'une antenne directive [19].....	38
Figure II. 7 antenne Vivaldi [26].....	39
Figure II. 8 le dipôle demi-onde [19].....	40
Figure II. 9 antenne log périodique [19].....	41
Figure II. 10 Antenne omnidirectionnelles [19].....	41
Figure II. 11 Antenne biconique [19].....	42
Figure II. 12 Antenne discône [19].....	43
Figure II. 13 Antenne Patch [28].....	43
Figure II. 14 Structure d'une antenne imprimée [28].....	44
Figure II. 15 alimentation par contact [19].....	46
Figure II. 16 alimentation par proximité [19].....	46
Figure II. 17 Représentation du diagramme de rayonnement d'une antenne [29].....	49
Figure II. 18 Les types de polarisation [29].....	49
Figure II. 19 Sphère minimale qui englobe l'antenne [30].....	50
Figure II. 20 Effet de l'insertion de fentes et d'encoches sur le courant surfacique d'une antenne planaire [24].....	55
Figure II. 21 Modification dans le patch et dans le plan de masse [32].....	55
Figure II. 22 structure d'une cellule meta [33].....	56
Figure II. 23 les types de courts-circuits [32].....	57

Figure II. 24 Alimentation d'un réseau d'antenne [35].....	58
--	----

### **Chapitre III :Simulation et réalisation**

Figure III. 1 Outil de simulation CST studio suite 2019.....	64
Figure III. 2 Structure de l'antenne patch initial.....	65
Figure III. 3 Coefficient de réflexion de l'antenne patch initial.....	65
Figure III. 4 Le rapport d'onde stationnaire VSWR du patch initial.....	66
Figure III. 5 Gain en fonction de la fréquence du patch initial.....	66
Figure III. 6 structure de l'antenne patch avec encoche.....	67
Figure III. 7 coefficient de réflexion de l'antenne patch avec encoche.....	67
Figure III. 8 VSWR de l'antenne patch avec encoche.....	68
Figure III. 9 Gain de l'antenne patch avec encoche.....	68
Figure III. 10 Diagramme de rayonnement en 3D et polaire de l'antenne avec encoche.....	69
Figure III. 11 Antenne miniaturisé en patch (à gauche) /à la masse (à droite).....	70
Figure III. 12 coefficient de réflexion de la nouvelle structure.....	70
Figure III. 13 VSWR de la nouvelle structure.....	71
Figure III. 14 le gain en fonction de la fréquence de la nouvelle structure.....	71
Figure III. 15 Le diagramme de rayonnement.....	72
Figure III. 16 Structure d'un réseau d'antennes à deux éléments.....	73
Figure III. 17 coefficient de réflexion de deux éléments.....	73
Figure III. 18 VSWR de l'antenne a deux éléments.....	73
Figure III. 19 le gain en fonction de la fréquence.....	74
Figure III. 20 Le diagramme de rayonnement.....	75
Figure III. 21 Structure d'un réseau à quatre éléments (à gauche) / Plan de masse (à droite).....	75
Figure III. 22 Coefficient de réflexion à quatre éléments.....	76
Figure III. 23 VSWR de l'antenne a quatre éléments.....	76
Figure III. 24 Le gain en fonction de la fréquence.....	77
Figure III. 25 Le diagramme de rayonnement.....	78
Figure III. 26 Structure d'un réseau à quatre éléments.....	78
Figure III. 27 Coefficient de réflexion à quatre éléments.....	78
Figure III. 28 VSWR de l'antenne à quatre éléments hybride.....	79
Figure III. 29 gain en fonction de la fréquence.....	79
Figure III. 30 Le diagramme de rayonnement.....	80
Figure III. 31 Représentation de la cellule unitaire SRR.....	81

Figure III. 32 Coefficient de réflexion et transmission de la cellule SRR.....	82
Figure III. 33 Structure d'antenne chargée par un réseau de SRR (patch à gauche/ plan de masse à droite).....	82
Figure III. 34 coefficient de réflexion de l'antenne avec métamatériaux. ....	83
Figure III. 35 VSWR de l'antenne avec métamatériaux.....	83
Figure III. 36 Gain en fonction de la fréquence. ....	84
Figure III. 37 Diagramme de rayonnement de l'antenne patch avec métamatériaux. ....	84
Figure III. 38 structure circulaire. ....	86
Figure III. 39 Coefficient de réflexion de l'antenne circulaire. ....	86
Figure III. 40 VSWR de l'antenne patch circulaire initial. ....	86
Figure III. 41 Gain du Patch circulaire initial. ....	87
Figure III. 42 Diagramme de rayonnement d'antenne circulaire original. ....	87
Figure III. 43 nouvelle structure de l'antenne circulaire miniaturisée (vue devant à droite/ vue derrière à gauche). ....	88
Figure III. 44 coefficient de réflexion de l'antenne circulaire miniaturisée. ....	89
Figure III. 45 Gain de l'antenne circulaire miniaturisée. ....	89
Figure III. 46 VSWR de l'antenne circulaire miniaturisée. ....	90
Figure III. 47 Diagramme de rayonnement de l'antenne circulaire miniaturisée.....	90
Figure III. 48 Structure d'antenne a deux éléments. ....	91
Figure III. 49 coefficient de réflexion.....	91
Figure III. 50 VSWR du réseau circulaire a deux éléments. ....	91
Figure III. 51 Gain du réseau circulaire a deux éléments.....	92
Figure III. 52 Diagramme de rayonnement du réseau a deux éléments.....	92
Figure III. 53 Nouvelle structure à quatre éléments. ....	93
Figure III. 54 Coefficient de réflexion du réseau circulaire a 4 éléments.....	93
Figure III. 55 VSWR du réseau circulaire a 4 éléments.....	94
Figure III. 56 Gain du réseau circulaire a 4 éléments. ....	94
Figure III. 57 Diagramme de rayonnement. ....	95
Figure III. 58 réseau d'antennes réalisé (vue de face gauche/ vue derrière droite) .....	96
Figure III. 59 Teste du réseau d'antenne réalise .....	97
Figure III. 60 Coefficient de réflexion mesuré du réseau d'antennes .....	97
Figure III. 61 Comparaison entre S11 simulé et mesuré.....	98
Figure III. 62 VSWR du réseau d'antenne .....	99
Figure III. 63 Comparaison entre VSWR simule et mesure.....	99

## Liste des tableaux

### Chapitre III : Simulation et réalisation

Tableau III. 1 Les dimensions de l'antenne initial.....	64
Tableau III. 2 Les dimensions d'antenne avec encoche.....	66
Tableau III. 3 Les nouvelles dimensions de l'antenne miniaturisée.....	70
Tableau III. 4 Comparaison entre les antennes rectangulaires.....	80
Tableau III. 5 Comparaison entre les réseaux à quatre éléments.....	85
Tableau III. 6 Dimension d'antenne patch circulaire.....	85
Tableau III. 7 Dimension d'antenne circulaire miniaturisée.....	88
Tableau III. 8 Comparaison d'antenne circulaire.....	95

## Acronymes et abréviations

- AEP** : Antenne électriquement petite.
- AMQP** : Advanced message queuing protocol.
- AR** : Autorité réglementaire.
- ARC** : Architecture de la radio cognitive.
- CN** : Cognitive network.
- CoAP** : Constrained application protocol .
- CR** : Radio cognitive.
- CRIoT** : Internet des objets de la radio cognitive.
- DGS** : Defected Ground Structure.
- EES** :
- EPC** : Code de produit électronique.
- ESA** : Agence Spatiale Européenne.
- IoT**: Internet of Things.
- IP**: Protocole Internet.
- GPS**: Global Positioning System.
- KQML**: Knowledge query and manipulation language.
- LTM**: Long Terme Memory.
- MAC**: Media: Access Control.
- MQTT**: Message Queuing Telemetry Transport.
- OWL**: Web Ontology Language.
- PU**: Primary user.
- RBW**: Resolution Band Width.
- RF**: Radio Frequency.
- RFID**: Radio Fréquence IDentificateur.
- RKRL**: Radio Knowledge Representation Language.
- RPL ipv6**: Routing Protocol for Low-power and Lossy networks.
- RXML**: Radio eXtensible Markup Language.
- SDR**: Software Defined Radio.
- SP**: Sensory Perception.
- SR**: Software Radio.
- STM**: Short Term Memory.
- TCP**: Transmission Control Protocol.
- UAV**: Unmanned Aerial Vehicle.
- UC**: Utilisateurs Cognitifs.
- UWB**: Ultra-Wide-Band

**VSWR:** Voltage Standing Wave Ratio.

**Wi-Fi:** Wireless fidelity.

**6LoWPAN ipv6:** Low power Wireless Personal Area Network.

# Introduction générale

La technologie de la Radio Cognitive (RC) est un domaine en pleine expansion qui joue un rôle crucial dans le monde actuel. Cette technologie permet aux appareils sans fil de détecter et d'analyser leur environnement radio, afin de prendre des décisions intelligentes en matière de communication. En utilisant des algorithmes sophistiqués, les appareils peuvent identifier les bandes de fréquences disponibles et les utiliser de manière efficace, optimisant ainsi l'utilisation du spectre radioélectrique.

Dans le monde actuel, où les besoins en communication sans fil sont de plus en plus importants, la radio cognitive offre de nombreux avantages. Elle permet d'optimiser l'utilisation des fréquences radio disponibles, évitant ainsi les congestions et les interférences. De plus, elle offre une flexibilité accrue, permettant aux appareils de s'adapter aux conditions changeantes de leur environnement radio.

La radio cognitive trouve des applications dans de nombreux domaines, tels que les réseaux sans fil, les communications mobiles, les réseaux de capteurs, et même l'Internet des Objets (IoT). Elle favorise l'interopérabilité des appareils et permet une utilisation plus efficace des ressources radioélectriques limitées.

Avec l'avènement de l'Internet des Objets (IoT) et la prolifération des appareils connectés, la demande de réseaux sans fil efficaces et évolutifs n'a cessé de croître. Les réseaux radio cognitifs, qui permettent une utilisation intelligente et dynamique du spectre radio, se présentent comme une solution prometteuse pour répondre à ces besoins croissants. Dans ce contexte, la conception et la miniaturisation des antennes jouent un rôle crucial pour assurer des communications fiables et efficaces au sein de ces réseaux.

L'objectif principal de ce mémoire est d'étudier et de proposer des méthodes de conception et de miniaturisation des antennes spécifiquement adaptées aux réseaux radio cognitifs dans le contexte des applications IoT. Nous explorons les défis uniques liés à la conception d'antennes pour ces réseaux, tels que la compatibilité spectrale, la coexistence avec d'autres utilisateurs du spectre et les contraintes de taille imposées par les appareils IoT.

Dans le premier chapitre de ce PFE, nous allons voir deux technologies différentes à savoir la radio cognitive avec ses différents aspects passant de son architecture, son mode de fonctionnement ainsi que les domaines d'applications. La deuxième technologie consiste à voir l'Internet des Objets en caractérisant son architecture, les protocoles utilisées ainsi

que les domaines de prédictibilité. A la fin du chapitre nous expliquerons la relation entre ces deux technologies.

Dans le deuxième chapitre, nous allons voir les différents aspects des antennes. Nous explorons différentes structures d'antennes, telles que les antennes multi-bandes, qui permettent une utilisation efficace du spectre et une adaptation dynamique aux conditions du canal. Nous discutons également des techniques de miniaturisation, telles que les antennes imprimées sur substrat et les différentes structures qui répondent aux contraintes de taille imposées par les appareils IoT.

Enfin, dans le troisième et dernier chapitre, nous évaluons les performances des antennes conçues et miniaturisées en utilisant des simulations numériques et des mesures expérimentales. Nous analysons les paramètres clés tels que le gain, la directivité et la bande passante, tout en tenant compte des applications utilisées pour notre étude.

En conclusion, ce mémoire vise à contribuer à la conception et à la miniaturisation des antennes pour les réseaux radio cognitifs dans le contexte des applications IoT. Les résultats de cette étude fourniront des informations précieuses pour le développement de systèmes de communication sans fil plus efficaces, flexibles et adaptés aux besoins de l'ère de l'IoT.

# **Chapitre I**

## **Technologie Cognitive et Internet des Objets**

## Sommaire :

I.1 – Introduction .....	6
I.2–/ Radio cognitive .....	6
I.2.1–/ La radio logicielle restreinte (SDR) .....	6
I.2.2–/ La radio cognitive .....	7
I.2.2.1-/ Historique.....	7
I.2.2.2-/ Définition .....	8
I.2.3-/ Relation entre RC et SDR .....	8
I.2.4–/ L’architecture de la radio cognitive.....	9
I.3– Caractéristique de la radio cognitive.....	10
I.3.1–/ Cycle de cognition.....	10
I.3.1.1-/Définition .....	10
I.3.1.2-/La phase d’observation .....	11
I.3.1.3-/ La phase d’orientation .....	12
I.3.1.4-/ La phase de planification .....	13
I.3.1.5-/ La phase de décision .....	13
I.3.1.6-/ La phase d’action .....	14
I.3.1.7-/ La phase d’apprentissage .....	14
I.3.2–/ Fonction de la radio cognitive .....	15
I.3.2.1–/Détection du spectre (Spectrum Sensing).....	15
I.3.2.2–/Décision du spectre (Spectrum decision).....	15
I.3.2.3–/partage du spectre (Spectrum analyse) .....	15
I.3.2.4–/Mobilité du spectre (Spectrum mobility) .....	16
I.3.3–/ Application de la radio cognitive .....	17
I.3.3.1–/Véhicules aériens cognitifs sans pilote.....	17
I.3.3.2–/Machine à machine M2M .....	18
I.3.3.3–/ Digital home.....	18
I.4–/Internet des objets (IoT).....	19
I.4.1–/ Définition .....	19
I.4.2–/ Historique.....	20
I.4.3–/ architecture de l’IoT .....	21
I.4.4–/ Avantage et Inconvénient de l’IoT .....	22
I.4.4.1 –/ Avantage.....	22

I.4.4.2-/ Inconvénient.....	23
I.5/ Caractéristique de l’IoT .....	23
I.5.1/Protocol utilisé .....	23
I.5.2/Domaine application de l’IoT.....	24
I.6-/ Relation entre Radio cognitive et IoT .....	26
I.7 Conclusion.....	28

## I.1 – Introduction

La radio cognitive est une technologie de communication sans fil intelligente qui utilise des techniques d'apprentissage automatique et de traitement du signal pour optimiser l'utilisation du spectre radioélectrique, c'est une technologie en constante évolution qui offre de nombreuses possibilités pour améliorer les communications sans fil. Elle est déjà utilisée dans diverses applications, telles que les réseaux de communication sans fil, les systèmes de surveillance de l'environnement, les réseaux de capteurs sans fil, et est considérée comme une technologie clé pour le développement des réseaux 5G et de l'Internet des Objets (IoT « Internet of Things »).

Dans ce chapitre, nous allons présenter les différents points et caractéristique de la radio cognitive ainsi que la technologie internet des objets et voir le lien qui les unies.

## I.2- / Radio cognitive

### I.2.1- / La radio logicielle restreinte (SDR)

Pour parler de la radio logicielle restreinte (SDR « Software Defined Radio »), nous devons d'abord abordée le thème de **la radio logiciel** qui d'après les travaux de Joseph **Mitola** en **1991**, a été définit comme une classe de radio reprogrammable et reconfigurable [1].

La radio logicielle, également connue sous le nom de (Software Radio), est un système de communication sans fil configurable qui utilise des circuits numériques programmables pour effectuer le traitement de signal. Son objectif principal est de rapprocher autant que possible la conversion entre le monde analogique et numérique de l'antenne, à la fois en réception et en émission. Cela permet à la radio logicielle de bénéficier de la flexibilité nécessaire pour s'adapter à une large gamme de réseaux, protocoles et techniques de communication sans fil, ainsi que de répondre aux besoins croissants en termes de performances et d'interopérabilité entre des systèmes hétérogènes.

La radio logicielle restreinte (Software Defined Radio) est apparue pour la première fois dans l'article scientifique « Software Radios : Survey, Critical Evaluation and Future Directions » en **1992** [2].

Software-Defined Radio (SDR) ou radio logicielle est un système de communication sans fil qui permet de remplacer les circuits électroniques traditionnels d'un émetteur-récepteur radio par des logiciels. L'objectif est de permettre à un même matériel

physique de communiquer sur différents types de fréquences grâce à un standards de communication, simplement en modifiant le logiciel [3].

La radio logicielle offre plusieurs avantages par rapport aux radios traditionnelles. Tout d'abord, elle permet une grande flexibilité en termes de fréquences et de standards de communication, puisqu'elle peut être reconfigurée à l'aide de logiciels pour s'adapter à différents types de signaux radio. Elle offre également une meilleure qualité de signal, car les signaux numériques sont moins sensibles aux interférences et peuvent être traités de manière plus précise. Enfin, elle est souvent moins coûteuse que les radios traditionnelles, car elle peut être construite à partir de composants standardisés [3].

Les radios logicielles sont utilisées dans de nombreuses applications, telles que la radiodiffusion, la télévision, les communications militaires et la radiocommunication civile. Elles sont également de plus en plus populaires dans les domaines de l'Internet des objets et des réseaux sans fil locaux [3].

## **I.2.2- / La radio cognitive**

### **I.2.2.1- / Historique**

Le concept de la radio cognitive a été introduit officiellement pour la première fois par **Joseph Mitola** en **1999** [4].

En **1998**, Randy H. Katz et Eric A. Brewer de l'Université de Californie pourraient construire un système de réseau qui permet aux stations mobiles (MS) de se déplacer entre différents types de réseaux avec la meilleure connectivité possible et un minimum de perturbation pendant les transferts. Après cela, des réseaux à courte portée tels que l'Ultra-large-Bande (ULB), ZigBee et L'IoT ont émergé. Ces recherches et technologies de pointe ont coopéré à l'apparition de la radio cognitive [5].

Au début des années **2000**, les groupes de recherche, les groupes de normalisation et les organismes de réglementation s'entendaient généralement pour dire que nous devrions utiliser efficacement le spectre des radiofréquences. C'est donc ici que la radio cognitive est devenue le candidat le plus prometteur pour résoudre ce problème en offrant intelligemment une occupation du spectre plus élevée aux fournisseurs de services de réseau sans fil et aux utilisateurs individuels [6].

Quelques années plus tard, la RC était déployée dans les bandes de télévision à l'aide d'appareils qui peuvent exploiter le spectre, un spectre qui est inoccupé dans une région géographique particulière ou dites des « espaces blancs » [6].

Au cours des dernières années, ces travaux novateurs et consécutifs ont permis au domaine de la recherche de se généraliser et de créer une technologie radio cognitive efficace.

### **I.2.2.2-/ Définition**

La radio cognitive (CR) est un appareil de communication intelligent et flexible qui interagit avec la région environnante pour connaître son environnement de radiofréquences, son état interne, son emplacement et ses besoins d'application. Ainsi, la radio peut utiliser cette information pour ajuster ses paramètres de fonctionnement (p. ex., puissance d'émission, fréquence de fonctionnement, technologie de communication, schéma de modulation...) instantanément afin de se reconfigurer pour atteindre les objectifs de communication souhaités. [7]

Une caractéristique importante qui différencie la radio cognitive des autres radio normales est leur agilité le long des lignes suivantes :

- Agilité spectrale : désigne les stratégies de découverte du spectre disponible ainsi que la transmission opportuniste dans le spectre identifié.
- Agilité technologique : désigne le fonctionnement d'un seul appareil radio dans diverses technologies d'accès.

### **I.2.3-/ Relation entre RC et SDR**

Jusqu'au développement de la technologie radio cognitive, la radio logicielle restreinte (SDR) a été principalement proposé pour réaliser des dispositifs sans fil multi mode et multistandard. Ainsi, le rôle du SDR dans les radios cognitives est très essentiel, c'est-à-dire la réalisation de caractéristiques cognitives (p. ex., conscience, détection, etc.) dans la radio cognitive.

L'une des définitions les plus importantes de la radio cognitive qui appuie fortement l'argument est que : « Une radio cognitive est une radio logicielle restreinte et qui est consciente de son environnement, de son état interne et de son emplacement, et qui ajuste de façon autonome ses opérations pour atteindre les objectifs désignés » [9].

Bien que de nombreux modèles différents sur la relation entre la radio cognitive (RC) et la radio logicielle restreinte (SDR), l'un des plus simples modèles conceptuels qui décrit la relation entre eux est illustré dans la Figure I.1.

Le "moteur cognitif " représente la partie chargée de l'optimisation ou du contrôle du module radio logicielle restreinte en se basant sur quelques paramètres d'entrée tels que les informations issues de la perception sensorielle ou de l'apprentissage de l'environnement radio, du contexte utilisateur, et de l'état du réseau [8].

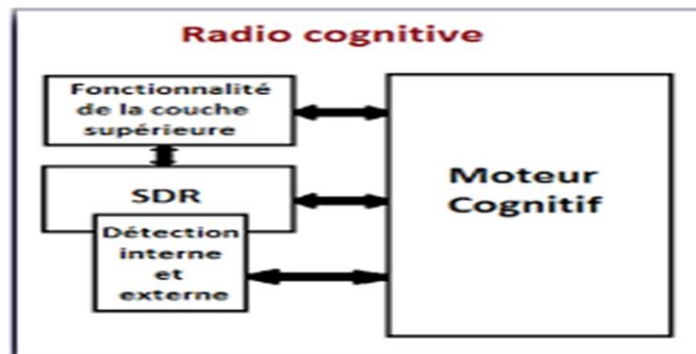


Figure I.1 Relation entre RC et SDR [8].

#### I.2.4- / L'architecture de la radio cognitive

L'architecture d'une radio cognitive est l'ensemble cohérent de règles de conception selon lesquelles un ensemble particulier de composants effectue une série de fonctions de produit et de service. Les six composantes fonctionnelles d'une architecture radio cognitive sont les suivantes :

- ✓ La perception sensorielle (Sensory Perception : SP) de l'utilisateur qui inclut l'interface haptique (du toucher), acoustique, la vidéo et les fonctions de détection et de la perception.
- ✓ Les capteurs de l'environnement local (emplacement, température, accéléromètre, etc.).
- ✓ Les applications système (les services médias indépendants comme un jeu en réseau).
- ✓ Les fonctions SDR (qui incluent la détection RF et les applications radio de la SDR).
- ✓ Les fonctions de la cognition (pour les systèmes de contrôle planification, d'apprentissage).

- ✓ Les fonctions locales effectrices (synthèse de la parole, du texte, des graphiques et des affiches multimédias).

La figure ci-dessous nous montre l'architecture de la radio cognitive. Dans la couche physique, la radiofréquence est implémentée sur la base de la radio définie par le logiciel. Les protocoles d'adaptation des couches MAC (Media Access Control), réseau, transport et applications doivent être sensibles aux variations de l'environnement radio cognitif. En particulier, les protocoles d'adaptation devraient tenir compte de l'activité de circulation des principaux utilisateurs, des besoins de transmission des utilisateurs secondaires et des variations de la qualité des canaux.

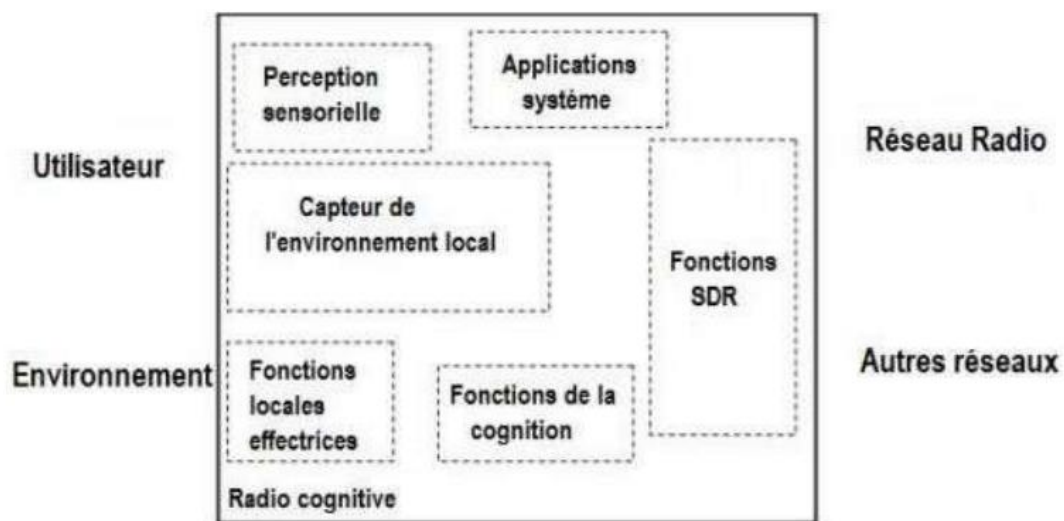


Figure I.2 L'architecture de la radio cognitive [9].

## I.3- Caractéristique de la radio cognitive

### I.3.1- / Cycle de cognition

#### I.3.1.1- / Définition

Le cycle cognitif développé pour la radio cognitive (CR) est illustré à la Figure I.3, Ce cycle met en œuvre les capacités requises de la radio cognitive idéale dans une séquence réactive.

Les stimuli entrent dans la radio cognitive (CR) lorsque des interruptions sensorielles sont envoyées au cycle cognitif pour une réponse. Une telle radio cognitive idéale observe continuellement (sens et perçoit) l'environnement, s'oriente, crée des plans, décide, puis agit.

Dans un système d'inférence à processeur unique, le flux de contrôle de la radio cognitive (CR) peut également se déplacer dans le cycle de l'observation à l'action. Dans

un système multiprocesseur, les structures temporelles de détection, de prétraitement, de raisonnement et d'action peuvent être parallèles et complexes.

Le processus de Figure I.3 est appelé l'époque de sillage parce que le raisonnement pendant cette époque du temps est réactif à l'environnement. Nous ferons référence aux « périodes de sommeil » pour les conditions de mise hors tension, aux « périodes de réveil » pour la reconnaissance et l'apprentissage de modèles à forte intensité de calcul.

Au cours de l'époque de sillage, la réception d'un nouveau stimulus sur l'un des capteurs radio cognitifs (CR) ou l'achèvement d'un cycle cognitif antérieur initie un nouveau cycle cognitif.

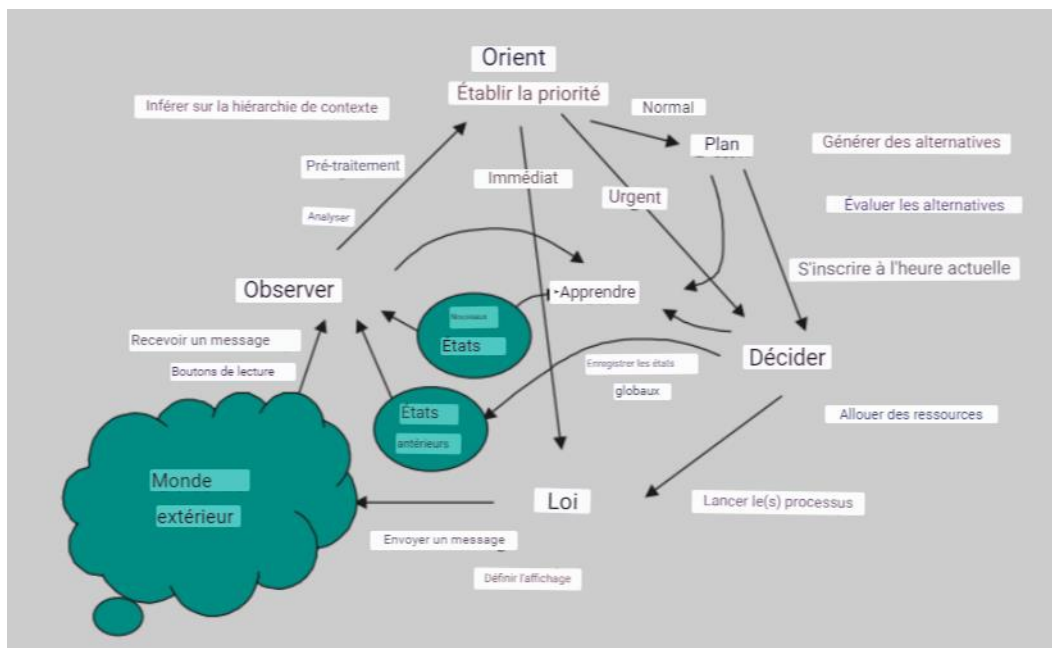


Figure I.3 Cycle de cognition [10].

### I.3.1.2-/La phase d'observation

La radio cognitive sent et perçoit l'environnement en acceptant de multiples stimuli dans de nombreuses dimensions simultanément et en liant ces stimuli - tous ensemble ou plus typiquement en sous-ensembles - à une expérience antérieure de manière à pouvoir ensuite détecter des stimuli sensibles au temps et finalement générer des plans d'action.

Ainsi, la radio cognitive regroupe continuellement l'expérience et compare les agrégats antérieurs à la situation actuelle. Une radio cognitive CR peut agréger l'expérience en se souvenant de tout. Cela peut ne pas sembler une chose très intelligente à faire jusqu'à ce que vous calculiez que tous les audio, images uniques, et les e-mails que la radio pourrait

connaître dans une année ne prend que quelques centaines de giga-octets de mémoire, en fonction du détail de l'image. L'architecture informatique permettant de se souvenir et de corrélérer rapidement l'expérience actuelle avec tout ce qui a été connu auparavant est donc une capacité fondamentale de l'architecture de la radio cognitive (ARC). Un détecteur de nouveauté identifie les nouveaux stimuli, en utilisant les nouveaux aspects des stimuli partiellement familiers pour identifier les primitives d'apprentissage incrémentiel [9].

### **I.3.1.3-/ La phase d'orientation**

La « phase d'orientation » détermine la signification d'une observation en liant l'observation à un ensemble de stimuli d'une « scène ». Cette phase fonctionne sur les structures de données internes qui sont analogues à la mémoire à court terme (STM) que les gens emploient pour engager un dialogue sans nécessairement se souvenir de tous au même degré dans la mémoire à long terme. L'environnement naturel fournit la redondance nécessaire pour initier le transfert de la STM à la mémoire à long terme (LTM). Dans l'architecture de la radio cognitive, le transfert de la STM à la LTM se fait par le cycle de sommeil dans lequel le contenu de la mémoire à court terme (STM) depuis le dernier cycle de sommeil est analysé par rapport aux autres et à la mémoire à long terme (LTM) existante. La façon de le manipuler de manière robuste demeure un important sujet de recherche pour la RC, mais le processus est défini par l'architecture de la radio cognitive. La correspondance des stimuli actuels avec l'expérience stockée peut être obtenue par la reconnaissance de stimulus ou par la liaison [10].

**La reconnaissance de stimulus :** La reconnaissance de stimulus se produit lorsqu'il y a une correspondance exacte entre un stimulus actuel et une expérience antérieure. La réaction peut être appropriée ou erronée. Chaque stimulus est placé dans un contexte plus large, qui comprend des stimuli supplémentaires et des états internes pertinents, y compris le temps. Parfois, la phase Oriente déclenche immédiatement une action en tant que comportement réactif stimulus-réponse. Une panne de courant, par exemple, peut appeler directement un acte qui enregistre les données (le chemin « Immédiat » vers la phase Action dans la figure I.3. Une perte irrécupérable de signal sur un réseau peut nécessiter la réallocation de ressources, par exemple, de l'analyse de la parole à la recherche de canaux RF alternatifs. Ceci peut être accompli via le chemin marqué « Urgent » dans la figure I.3 [10].

**La liaison :** La liaison se produit lorsqu'il existe une correspondance presque exacte entre un ensemble actuel de stimuli et une expérience antérieure et que des critères très généraux d'application de l'expérience antérieure à la situation actuelle sont remplis. Un tel critère est le nombre de caractéristiques inégalées de la scène actuelle. Si une seule fonctionnalité est inégalée, la liaison peut être la première étape dans la génération d'un plan pour se comporter de façon similaire dans la scène actuelle comme dans la dernière scène comparable. En plus du nombre de fonctionnalités qui correspondent exactement, l'apprentissage basé sur l'instance (IBL) prend en charge la correspondance et la liaison inexacts. La liaison détermine également la priorité associée aux stimuli. Une meilleure liaison génère une plus grande attente d'apprentissage autonome, tandis qu'une liaison moins efficace génère une priorité moindre pour le plan naissant [10].

#### **I.3.1.4-/ La phase de planification**

La plupart des stimuli sont traités de façon délibérée plutôt que réactive. Un message réseau entrant serait normalement traité en générant un plan (dans la phase Plan, le chemin normal). Dans les réseaux RC de qualité, de recherche et de puissance industrielle, les modèles formels de causalité seraient intégrés dans les outils de planification.

La phase de planification doit également inclure un raisonnement au fil du temps. Généralement, les réponses réactives sont préprogrammées ou apprises en étant racontées, alors que d'autres réponses délibératives sont planifiées. Les outils de planification de sources ouvertes comme le OPRS (Procedural Reasoning System) peuvent être intégrés à la phase du plan.

Les outils de planification permettent la synthèse des comportements de RF et d'accès à l'information d'une manière orientée vers les objectifs en fonction des perceptions, des règles de l'autorité réglementaire (AR) et des préférences de l'utilisateur apprises antérieurement [10].

#### **I.3.1.5-/ La phase de décision**

La phase « Décider » sélectionne parmi les plans candidats le meilleur choix. La radio peut avoir le choix d'avertir l'utilisateur d'un message entrant (par exemple, se comporter comme un téléavertisseur) ou de reporter l'interruption à plus tard (par

exemple, se comporter comme une secrétaire qui filtre les appels pendant une réunion importante) [9].

#### **I.3.1.6-/ La phase d'action**

La phase d'action lance les processus sélectionnés à l'aide d'effecteurs qui accèdent au monde externe ou aux états internes de la RC.

L'accès au monde extérieur consiste principalement à composer des messages à prononcer dans l'environnement local ou exprimés en texte localement ou à un autre RC ou CN (cognitive network) ,RKRL (radio knowledge representation language), OWL (web ontology language), RXML (relational data base storage) , ou toute autre norme appropriée d'échange de connaissances.

Les actions sur les états internes comprennent le contrôle des ressources telles que les canaux radio. L'action RC permet également de mettre à jour les modèles internes existants, par exemple : ajout d'un nouveau en ajoutant un modèle de stimulus-expérience-réponse (serModel) à un ensemble interne de modèles existant. De tels nouveaux modèles peuvent être affirmés par une action du <Self/> pour encapsuler l'expérience. L'expérience peut également être activement intégrée dans les structures de connaissances RXML. L'acquisition de connaissances peut être réalisée par une action qui crée les structures de données appropriées [10].

#### **I.3.1.7-/ La phase d'apprentissage**

L'apprentissage dépend de la perception, des observations, des décisions et des actions. L'apprentissage initial est médié par la phase d'Observation dans laquelle toutes les perceptions sensorielles sont continuellement appariées à toutes les expériences antérieures pour compter continuellement les occurrences et se souvenir du temps écoulé depuis la dernière occurrence des stimuli des primitives aux agrégats.

L'apprentissage peut se produire lorsqu'un nouveau type de serModel est créé en réponse à une action pour instancier un serModel généré en interne. Par exemple, les états internes antérieurs et actuels peuvent être comparés aux attentes pour en savoir plus sur l'efficacité d'un mode de communication, en installant un nouveau mode réactif RF (spécifique au mode) [10].

### **I.3.2- / Fonction de la radio cognitive**

La radio cognitive nécessite quatre fonctions principales qui sont :

#### **I.3.2.1- /Détection du spectre (Spectrum Sensing)**

La détection du spectre est la fonction principale de la radio cognitive (RC), L'objectif est de détecter l'apparition d'utilisateurs sous licence (PU), grâce à la surveillance continue de leur activité sur les bandes de fréquences cibles, et de déterminer l'état d'occupation des premiers utilisateurs. La détection du spectre est un problème fondamental pour la RC, en ce qui concerne sa fonctionnalité pour assurer la sensibilisation et la sensibilité aux changements dans l'état des radiofréquences pour les utilisateurs cognitifs (UC). En outre, il fournit des informations utiles sur la disponibilité des bandes utilisables et découvre des trous de spectre accessibles sur une large gamme de fréquences. Par conséquent, il garantit le bon guidage d'accès pour l'utilisateur secondaires loin de toute interférence nuisible pour l'utilisateur premier [5].

#### **I.3.2.2- /Décision du spectre (Spectrum decision)**

La Détection du spectre est une fonction qui estime la qualité du service des trous détectés pendant l'opération de détection du spectre et choisie la bande de spectre appropriée qui répond aux exigences de communication [7].

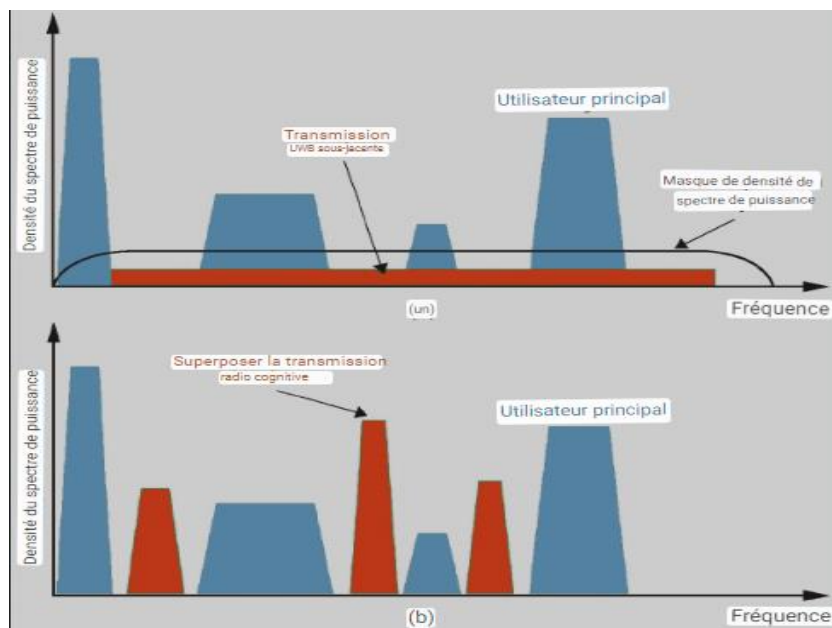
#### **I.3.2.3- /partage du spectre (Spectrum analyse)**

L'accès dynamique au spectre est le nouveau concept opposé à l'assignation statique du spectre de fréquences et à sa gestion. Plusieurs utilisateurs secondaires peuvent avoir accès aux trous de spectre détectés. Cependant, l'accès de deux utilisateurs secondaires ou plus à la même bande de fréquences entraîne des collisions et des conflits. Le partage du spectre gère l'utilisation du spectre entre plusieurs utilisateurs secondaires afin de réduire au minimum les interférences et les collisions nuisibles [11].

Le partage du spectre peut être défini comme une hiérarchisation des priorités d'accès entre les principaux utilisateurs autorisés et les utilisateurs secondaires non autorisés de la RC. Il est conçu pour maintenir une programmation du spectre équitable parmi les utilisateurs secondaires.

Il existe deux topologies célèbres pour l'accès au spectre de l'utilisateur secondaire : l'approche superposée et l'approche sous-spectre.

- a) **L'approche de superposition du spectre** : le dispositif RC devra identifier les bandes de spectre inactives, qui ne sont pas utilisées par les systèmes sous licence à un moment et à un endroit donné, et utiliser ces bandes inactives de manière dynamique. Les utilisateurs secondaires de cette topologie peuvent transmettre avec une puissance de transmission élevée pour augmenter leurs débits pour des opportunités de spectre données à l'intérieur de ces bandes. Voir la Figure I.4[12].
- b) **L'approche de la sous-couche du spectre** : les utilisateurs secondaires de la RC sont autorisés à transmettre avec une faible puissance de transmission comme dans la technologie Ultra-Wide-Band (UWB) sans avoir besoin d'identification des trous de spectre. Les SUs de ce modèle peuvent transmettre simultanément et coexister avec les PUs. Cependant, ils ne sont pas autorisés à émettre avec une puissance de transmission élevée, même si la bande RF entière est inactive (non utilisée par les unités de projet). Voir la Figure I.4[12].



**Figure I.4 Spectrum (a) superposition et (b) sous-couche [12].**

#### **I.3.2.4- /Mobilité du spectre (Spectrum mobility)**

Après avoir sélectionné une bande de spectre appropriée, l'utilisateur secondaire commence la communication. Cependant, en raison de la nature dynamique de l'environnement sans fil, après un certain temps, un utilisateur principal peut commencer à communiquer dans la bande sélectionnée. Dans ce cas, l'utilisateur secondaire modifie sa bande de fonctionnement pour éviter les interférences avec les

unités centrales. Ce transfert (entre bandes de spectre) réalisant la fonctionnalité des dispositifs RC est appelé mobilité spectrale [11].

La mobilité du spectre est la fonction qui garantit que les utilisateurs secondaires passent d'un trou de spectre à un autre, en tenant compte des caractéristiques de chaque bande de fréquences à accéder et de tous les protocoles de partage. Lorsqu'un utilisateur primaire apparaît soudainement, la mobilité du spectre fournit une transmission transparente, pendant la fréquence de fonctionnement et la commutation de mode d'accès pour l'utilisateur secondaire, et s'adapte à l'évolution rapide de l'environnement de communication [7].

### **I.3.3- / Application de la radio cognitive**

#### **I.3.3.1- / Véhicules aériens cognitifs sans pilote**

Les véhicules aériens sans pilote en anglais unmanned aerial vehicle (UAV), aussi connus sous le nom de drones, sont un autre domaine important qui suscite un intérêt croissant en radio cognitive (CR). Essentiellement, les UAV sont des aéronefs exploités sans pilote humain. Les UAV sont généralement déployés dans des zones qui sont potentiellement trop dangereuses, très risquées, très coûteuses ou difficiles pour les activités humaines. Par exemple, les régions sujettes aux tremblements de terre, les zones de guerre, le contrôle des incendies, y compris les applications de suivi et de surveillance. Essentiellement, les UAV sont conçus pour des missions de surveillance et de reconnaissance. En conséquence, ils sont généralement équipés de capteurs, de caméras ainsi que d'équipements de communication. Toutefois, le déploiement d'UAV dans la bande ISM implique que les UAV doivent concurrencer d'autres technologies, par exemple la technologie Wi-Fi, Bluetooth et IEEE 82.15.4 pour la bande de spectre disponible. Il en résulte une rareté du spectre utilisable pour le déploiement des UAV128.

Toutefois, la RC peut atténuer le problème de la rareté du spectre au moyen de techniques d'ASD. De plus, améliorer la capacité des canaux en utilisant le spectre de façon opportuniste pour les UAV. Les autres avantages de l'application du CR pour les UAV comprennent (1) la réduction de la consommation d'énergie et du retard, et (2) le déploiement superposé. De même, les domaines d'application potentiels des CR-UAV (CR-UAV) comprennent (1) les drones commerciaux, (2) la surveillance de la circulation,

(3) la surveillance des cultures, (4) la gestion des catastrophes, (5) les patrouilles frontalières et (6) la surveillance des feux de forêt [13].

### **I.3.3.2- /Machine à machine M2M**

Les communications de machine à machine (M2M) permettent l'automatisation mécanique de capteurs omniprésents. La demande de communications personnelles sans fil pour l'échange de voix, d'audio, de vidéo, de courriels et de réseaux cellulaires basés sur l'infrastructure a permis l'automatisation complète des réseaux de capteurs.

Les réseaux de capteurs cognitifs peuvent être utilisés pour les communications M2M de nombreuses façons. La communication pourrait être entre le capteur et le décideur (comme dans les compteurs/moniteurs rapportant des données à un décideur), entre plusieurs agents de calcul au sein du décideur ou entre le décideur et l'exécuteur d'action. À l'avenir, plusieurs réseaux d'accès radio pourront être intégrés et gérés dans le cadre d'un réseau hiérarchique unique. Les radios cognitives peuvent permettre une conception efficace de l'interface air des réseaux M2M. Les radios cognitives pourraient exploiter de manière opportuniste le spectre supplémentaire et la connectivité disponibles dans différents réseaux pour améliorer la capacité du système et la qualité de service des appareils. Les dispositifs radio cognitifs peuvent remplacer les dispositifs radio multiples afin d'utiliser efficacement le spectre disponible dans les bandes autorisées et non autorisées [14].

### **I.3.3.3- / Digital home**

Le nombre d'appareils dans une maison augmente avec le nombre de services abonnés par chaque utilisateur dans la maison. Les technologies comme Bluetooth, infrarouge et Wi-Fi (wireless fidelity) sont des technologies sans fil qui ont éliminé le besoin de communications câblées entre les divers appareils. Le problème, cependant, est que beaucoup de ces technologies ne sont pas conçues pour fonctionner en harmonie avec les autres technologies et sont une cause d'interférence pour les récepteurs qui ne font pas partie de leur réseau. Un contrôleur central qui résout le conflit et supervise la coexistence des réseaux est donc nécessaire. Une maison numérique cognitive peut être la solution à tous les problèmes d'interférence dus aux multiples technologies concurrentes. Comme le montre la figure 3.1, une maison numérique cognitive peut

fonctionner sur des espaces blancs dans des bandes sans licence pour transporter des informations de contrôle entre des dispositifs.

Un nœud génie agit comme un contrôleur central pour coordonner le fonctionnement de ces dispositifs de sorte que le nombre de conflits et de collisions est réduit. Cela conduit à une utilisation efficace des ressources dans les dispositifs. L'utilisateur n'a pas à gérer les réseaux et dispositifs individuels et le contrôleur central peut être utilisé pour automatiser la gestion du réseau domestique. Un tel contrôle central améliore également la sécurité dans de tels réseaux où le contrôleur peut être utilisé comme une passerelle vers le monde extérieur. Les applications domestiques numériques cognitives s'intègrent dans le cadre sous-jacent du fonctionnement radio cognitif en raison du fonctionnement à faible puissance des dispositifs radio cognitifs [14].

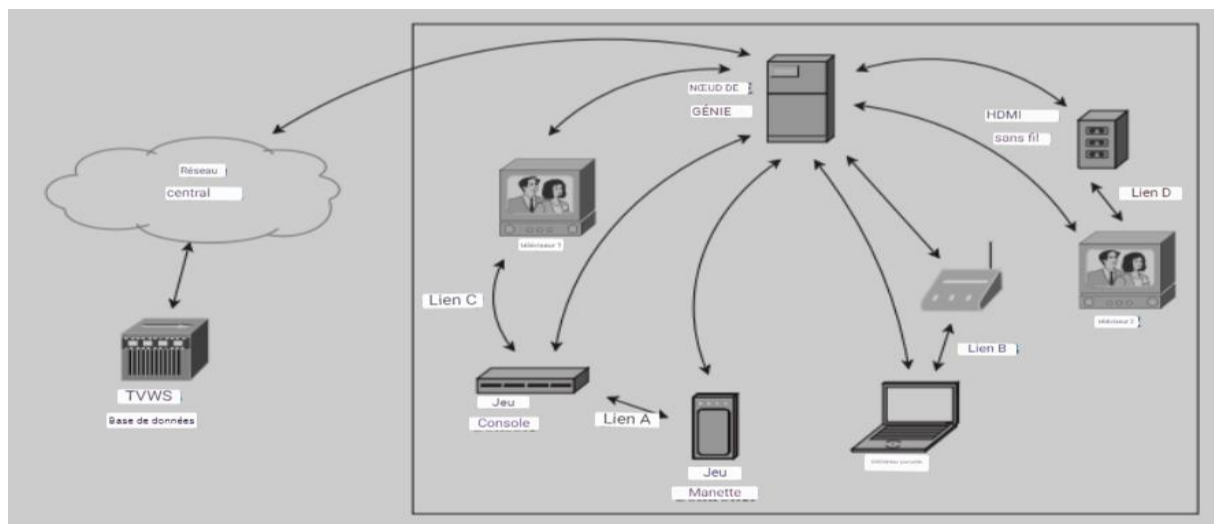


Figure I.5 Cognitive digital home [14].

## I.4- /Internet des objets (IoT)

### I.4.1- / Définition

Récemment, le terme Internet des objets (IoT) a attiré davantage l'attention. Plusieurs technologies et recherches ont été utilisées pour permettre à la technologie de l'Iot de croître énormément. On s'attend à ce que l'Iot influence notre vie quotidienne et nos comportements.

Internet of things (IoT) est défini comme un réseau mondial d'objets interconnectés qui permet à des dispositifs nommés objets ou choses ; tels que des dispositifs informatiques, des dispositifs mécaniques, des machines ... ect de se relier entre eux, on leur assignons une adresse IP pour pouvoir transmettre ou recevoir des paquets sur un

réseau. Ces choses peuvent être connectées soit de manière filaire ou sans fil, mais la connexion sans fil sera utilisée fréquemment en raison de sa flexibilité.

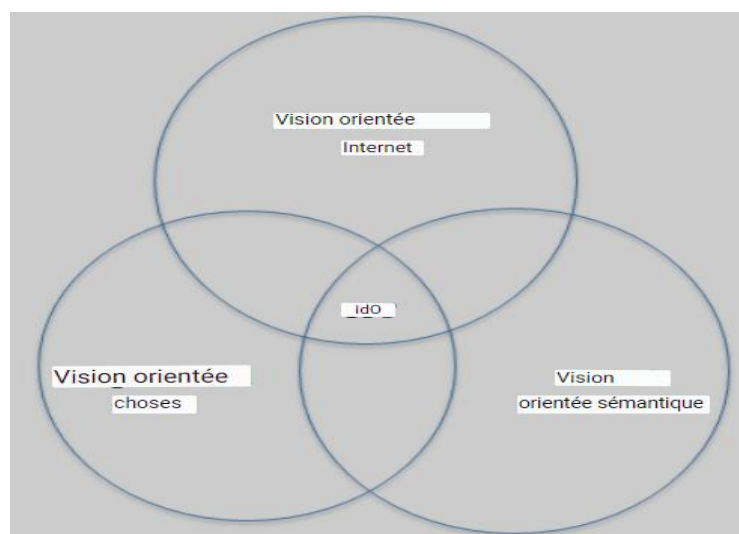
La communication souhaitée est avec une intervention humaine minimale, seuls les objets interagissent ensemble [7].

Comme on peut voir dans la figure I.6 ci-dessous, Internet of things a trois visions particulières : orientée vers les choses, orientée vers Internet et orientée vers la sémantique.

- La motivation derrière la vision orientée vers les choses est le suivi d'objets à l'aide de réseaux basés sur des capteurs et de technologies omniprésentes utilisant la RFID, car chaque objet peut être identifié de manière unique grâce à son code de produit électronique (EPC).

- La vision orientée Internet a gagné en intérêt grâce à un réseau IP déjà développé. Les objets sont censés pouvoir être adressés via des protocoles IP dans le monde entier.

- La vision sémantique entre en jeu pour le traitement des données brutes générées par les capteurs et les systèmes basés sur les capteurs sous une forme significative et une séparation marquée des données et de leur interprétation [7].



**Figure I.6 Les 3 visions de l'IoT [7].**

#### **I.4.2- / Historique**

En 1999, le terme Internet des objets a été inventé par Kevin Ashton, directeur exécutif de l'AutoIDCentre, MIT. La même année, ils ont également inventé un système mondial d'identification d'articles basé sur la RFID. En 2000, le géant de l'électronique LG a annoncé son projet de révéler un réfrigérateur intelligent qui déterminerait lui-même si les aliments qu'il contient sont ou non réapprovisionnés. En 2003, la RFID a été

déployée massivement dans l'armée américaine dans le cadre du programme Savi. La même année, le géant du commerce de détail Walmart a déployé la RFID dans tous ses magasins à travers le monde dans une plus grande mesure. En 2005, des publications de premier plan comme The Guardian, Scientific American et Boston Globe ont cité de nombreux articles sur l'Internet des objets (IoT) et son évolution future. En 2008, un groupe d'entreprises a lancé l'Alliance IPSO pour promouvoir l'utilisation du protocole Internet (IP) dans les réseaux « des objets intelligents » et pour permettre l'Internet des objets. En 2008, la FCC a approuvé l'utilisation du « spectre des espaces blancs ». Enfin, le lancement d'IPv6 en 2011 a déclenché une croissance et des intérêts massifs dans ce domaine. Plus tard, des géants de l'informatique comme Cisco, IBM, Ericson ont pris beaucoup d'initiatives éducatives et commerciales avec l'Internet of things [15].

#### **I.4.3- / architecture de l'IoT**

Comme le montre la figure I.7, l'architecture IoT est constituée de cinq couches :

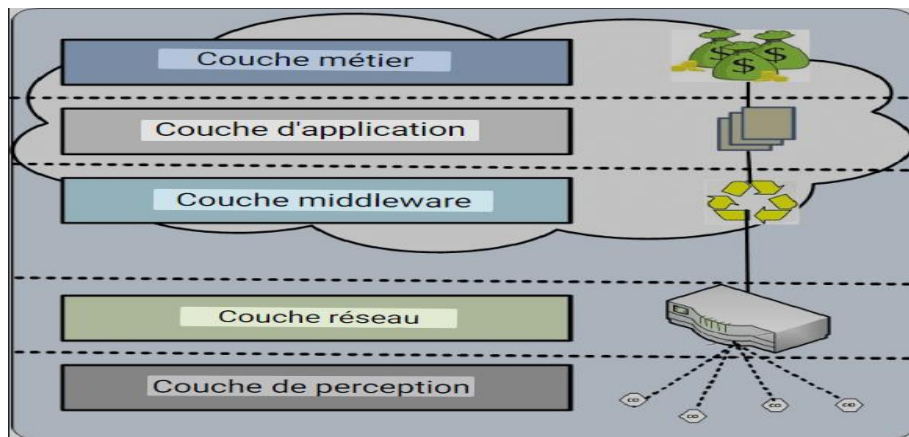
**Couche de perception :** qui représente les choses physiques, telles que les étiquettes RFID, les capteurs, les actionneurs ...etc. Son rôle principal est de recueillir l'information voulue et de la convertir en données. Certains d'entre eux comme des actionneurs convertissent le signal de commande en ordre.

**Couche de transmission :** son rôle principal est d'utiliser les technologies de mise en réseau pour transférer les données collectées par la couche de perception à la couche de middleware ou recevoir des signaux de commande de la couche de middleware à la couche de perception.

**Couche intergicielle :** Il s'agit d'une couche logicielle qui analyse les données reçues de la couche précédente, et sur la base de cette analyse, des décisions sont prises.

**Couche Application :** Elle contient les applications IoT. Il fournit des services à un utilisateur final en fonction des données traitées.

**Couche métier :** sur la base des données reçues de la couche précédente, la couche métier permet à l'administration du système de contrôler la fonctionnalité de l'ensemble des réseaux IoT. Il crée divers modèles d'affaires [7].



**Figure I.7 L'architecture de l'internet des objets [7].**

#### **I.4.4- / Avantage et Inconvénient de l'IoT**

##### **I.4.4.1 - / Avantage**

1. Minimiser l'effort humain : les appareils IoT communiquent et interagissent entre eux, ils fournissent l'automatisation des tâches qui nous aide à améliorer la qualité d'un service d'entreprise et à réduire le besoin d'intervention humaine.
2. Gagnez du temps : Comme nous l'avons mentionné plus haut, réduisez l'effort humain, ce qui nous fait gagner beaucoup de temps également. Gagner du temps, c'est principaux avantages de la plateforme IoT.
3. Collecte de données améliorée : Dans l'IOT, l'information est très facile d'accès, même si nous sommes loin de notre emplacement, et il est mis à jour très rapidement en temps réel. Ainsi, ces appareils peuvent accéder à n'importe quelle information de n'importe quel endroit à n'importe quel moment sur n'importe quel appareil.
4. Amélioration de la sécurité : Comme nous le savons dans l'Internet des Objets Si nous avons un système qui est interconnecté, il peut aider à un contrôle plus intelligent des villes et des maisons grâce aux téléphones mobiles. Il améliore la sécurité et nous offre une protection personnelle.
5. Utilisation efficace des ressources : avec l'aide de l'IOT, on peut augmenter et surveiller l'utilisation des ressources en connaissant les fonctionnalités et en sachant comment chaque appareil fonctionne.
6. Utilisation réduite d'autres équipements électroniques : les dispositifs électroniques sont directement connectés et peuvent communiquer avec un ordinateur, tel qu'un mobile, ce qui permet une utilisation efficace de l'électricité. Par conséquent, il n'y aura pas d'utilisation non importante de l'électricité Équipements.

7. Utilisation dans les systèmes de trafic : livraison, suivi des actifs, trafic, surveillance ou suivi des transports, commande individuelle le suivi, le contrôle des stocks et la gestion des clients peuvent être rentables avec le bon suivi en utilisant la technologie IoT [16].

#### **1.4.4.2- / Inconvénient**

1. Questions de sécurité : les systèmes IoT communiquent et se connectent sur les réseaux. Ainsi, ils offrent peu de contrôle malgré les mesures de sécurité, et il peut inviter divers types d'attaques de réseau.

2. Respect de la vie privée : le système Iot fournit des données personnelles détaillées sans la participation active de l'utilisateur.

3. Augmentation du chômage : en raison de l'Iot, les personnes non qualifiées ou même qualifiées sont très exposées au risque de perdre leur emploi, ce qui entraîne des taux de chômage élevés. Des robots, des caméras de surveillance intelligentes, des machines à laver intelligentes, des systèmes de repassage intelligents et d'autres installations remplacent également les travailleurs qui peuvent effectuer ces travaux auparavant.

4. La complexité du système : Le processus de mise au point, de développement, de maintenance, de conception et de mise en œuvre de la technologie étendue au système de l'Iot est assez complexe.

5. De fortes chances que l'ensemble du système soit corrompu : Il est possible que chaque appareil connecté devienne corrompu s'il y a un bogue dans le périphérique.

6. Forte dépendance à l'internet : dépend fortement de l'internet et ne peut pas fonctionner efficacement sans l'internet.

7. La réduction de l'activité mentale et physique : elle peut rendre les gens ignorants parce qu'ils ne comptent que sur des appareils intelligents au lieu de travailler seuls, ce qui les rend inactifs et léthargiques [16].

### **1.5/ Caractéristique de l'IoT**

#### **1.5.1/Protocol utilisé**

- MQTT (message queuing telemetry transport) Protocol: Il s'agit d'un protocole standard ouvert géré par l'OASIS, conçu pour les communications via l'internet des objets sur TCP (transmission control protocol). Lorsque MQTT a été développé, son objectif principal était de développer des exigences de messagerie entre périphériques

et passerelles et ne répond pas à la plupart des besoins de passerelles vers un datacenter ou des connexions intra-datacenter.

- AMQP (advanced message queuing protocol) Protocol : Il a été conçu pour remplacer les protocoles existants qui fonctionnaient pour les intergiciels. L'AMQP est essentiellement un protocole binaire qui a été conçu pour l'interopérabilité.

- CoAP (constrained application protocol) Protocol : est l'acronyme de contrainte application Protocol. Il est basé sur un sous-ensemble de http.

-6LoWPAN (ipv6 low power wireless personal area network) : IPv6 Le protocole de réseau personnel sans fil de faible puissance permet à 6LoPWAN d'utiliser plus de 802.15.4 pour le réseau sans fil. Le protocole 6LoWPAN est souvent utilisé pour les réseaux de capteurs sans fil et le protocole Thread pour la domotique sur lequel nous pouvons utiliser 6LoWPAN.

-RPL (ipv6 routing protocol for low-power and lossy networks) : Les couches Internet effectuent également le routage pour ce protocole qui est conçu dans des réseaux contraints tels que les réseaux de capteurs sans fil où tous les périphériques ne sont pas accessibles à tout moment sur internet. Dans RPL en raison de données d'inaccessibilité perdues, RPL calcule la meilleure métrique pour les données à atteindre à la destination [17].

### **I.5.2/Domaine application de l'IoT**

- Maison et bâtiment intelligents : Un grand nombre d'appareils IoT hétérogènes sont intégrés et configurés dans des structures de bâtiment, telles que des maisons et des bureaux, pour surveiller les activités quotidiennes de l'individu et également pour prévoir les événements futurs. Les appareils IoT installés dans ces réseaux collectent des informations sensibles, qui sont dans un format de série chronologique qui décrit chaque détail et les interactions entre les individus et les machines. Ainsi, l'utilisation des appareils IoT dans les bâtiments intelligents aide à la conservation des informations générales et personnelles. En outre, elle fournit des services, tels que le contrôle de la confidentialité, le contrôle d'accès, la numérisation de la vidéo, la détection des intrusions, les alarmes incendie, le contrôle de la qualité de l'air et l'éclairage contrôle.

-Agriculture : L'agriculture est l'une des disciplines importantes, où les technologies de l'Internet des objets peuvent être intégrées pour assurer la qualité des produits

agricoles afin de construire un système agricole intelligent. Par exemple, les capteurs IoT déployés dans les exploitations agricoles peuvent surveiller et aider à protéger les cultures contre les attaques des rongeurs ou des insectes. En outre, les dispositifs IoT peuvent également être utilisés pour différentes activités agricoles, telles que l'estimation de conditions environnementales favorables, les prévisions météorologiques, pour n'en citer que quelques-unes. Les données collectées à partir des capteurs IoT peuvent être stockées dans différents serveurs cloud et analysées plus en profondeur pour améliorer la productivité agricole et minimiser la consommation d'énergie.

-Automatisation du secteur : Le développement d'applications de l'Internet des objets pour l'automatisation du domaine industriel est un domaine de recherche actif. Les applications de l'Iot aident les organisations industrielles à améliorer leur économie mondiale et leurs performances. Il existe de nombreuses applications de l'IdO dans le domaine de l'automatisation industrielle, telles que l'intégration de la technologie de l'IdO pour l'apprentissage numérique, la gestion de la chaîne d'approvisionnement des produits, la communication de machine à machine, l'optimisation de la consommation d'énergie, l'optimisation de la consommation d'énergie et la communication de véhicule à véhicule. L'objectif du déploiement et de l'exploitation du domaine de l'automatisation industrielle à l'aide de dispositifs IoT est d'améliorer la fonctionnalité et les performances des systèmes intelligents industriels et de modéliser la simulation et la communication entre ces systèmes à l'aide de réseaux sans fil.

-Grille intelligente : La consommation d'énergie est l'une des caractéristiques importantes de la technologie de réseau intelligent de Iot. Il s'agit d'un nouveau mécanisme intelligent de distribution d'électricité qui se concentre sur l'augmentation des ressources renouvelables dans les systèmes électriques, le contrôle de l'exploitation dans le réseau et l'optimisation de la consommation d'électricité pour les consommateurs. La technologie de réseau intelligent fournit de nombreux services, tels que la gestion de la distribution et de la consommation, le contrôle de la transmission, l'architecture de mesure améliorée, l'intégration des ressources renouvelables, le stockage de l'énergie et l'infrastructure d'auto-réparation. Par conséquent, les technologies de réseaux intelligents sont considérées comme l'une des technologies de base pouvant contribuer à la construction de villes intelligentes. La technologie de réseau intelligent assure l'efficacité, la fiabilité, la durabilité et la sécurité dans le

développement des villes intelligentes en intégrant l'Iot pour concevoir divers services intelligents. En outre, elle utilise diverses techniques, telles que l'apprentissage automatique et le calcul distribué, pour mettre au point des systèmes de gestion de l'énergie intelligents et efficaces [18].

## **I.6- / Relation entre Radio cognitive et IoT**

L'Internet des objets (IOT) peut être défini comme un système d'objets numériques interconnectés qui permettent à des objets de transmettre des données sur le réseau sans interaction d'homme à homme ou d'homme à ordinateur. Le concept de l'IoT a évolué rapidement et touche la majeure partie de notre vie quotidienne. Mais comme il se développe rapidement, un spectre doit être localisé pour les paquets produits à partir des réseaux de l'IoT, les réseaux de radio cognitive (CRN) ont été introduits pour être intégrés avec le concept de l'IoT nommé Cognitive Radio Internet of Things (CR IoT), pour donner à l'IoT suffisamment de spectre pour se développer selon les besoins [7].

L'utilisation du réseau CRN pour établir le réseau intelligent de l'IoT constituera une solution efficace et économique au problème de la rareté du spectre de l'IoT. La technologie CR sera fusionnée avec l'IoT pour être appelée Internet des objets de la radio cognitive (CRIoT). Le CRIoT sera utilisé dans de nombreuses applications, en particulier les applications urgentes telles que les soins de santé intelligents et les transports intelligents. Les technologies fusionnées devraient satisfaire de nombreux paramètres de réseau tels que la disponibilité des canaux, le délai d'allocation, le délai de bout en bout, la fiabilité, l'efficacité énergétique, le haut débit, etc... De nombreuses normes et technologies de communication doivent être utilisées pour faire face à l'augmentation de la connectivité parmi le grand nombre d'applications et de services IoT qui utilisent la technologie CR [7].

Bien que divers défis pour le CRIoT dépendent du scénario d'application conçu et de la structure de réseau existante, il existe des défis communs pour tous les aspects de l'Internet des objets de la radio cognitive, ces défis sont considérés comme des domaines de recherche ouverts. Ces défis communs sont les suivants :

-Normalisation : L'existence de technologies multiples est considérée comme l'un des principaux défis dans le développement des applications de l'Iot. Notez que l'IEEE 802.22 est une norme pour les réseaux régionaux sans fil qui utilisent les espaces blancs

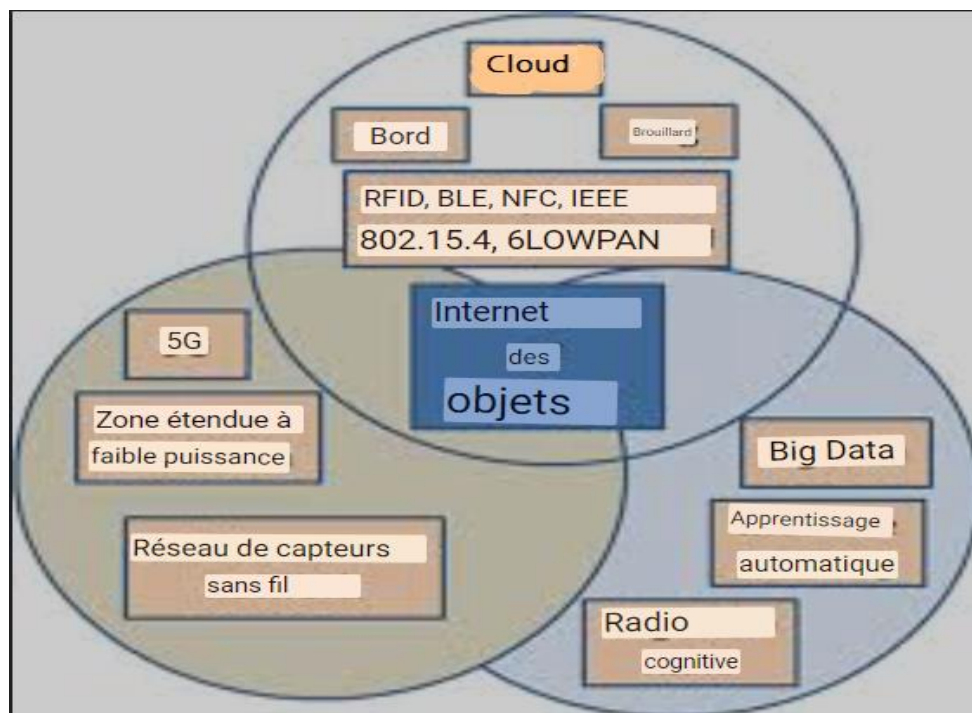
dans le spectre de fréquences (TV), elle peut être considérée comme une étape pour la normalisation CRN. Maintenant, il y a de grands efforts pour la normalisation de CRIoT.

-Mobilité : le système CRIoT doit fonctionner parfaitement malgré la mobilité IoT, ce qui entraîne le changement de topologie et de trous libres à utiliser.

-Disponibilité des ressources : La plupart des applications (IoT) possèdent un grand nombre d'objets IoT sur le même réseau, ce qui nécessite des ressources réseau considérables pour être suffisant pour prendre en charge leurs opérations.

-Consommation d'énergie : Le concept CRIoT consommera une énergie électrique considérable, en particulier en phase de détection du spectre, de sorte que la consommation d'énergie doit être aussi minimale que possible. La prévision des espaces spectraux vides peut être considérée comme une bonne solution si elle est effectuée efficacement. La récupération d'énergie doit également être prise en considération pour être en mesure de fournir suffisamment d'énergie électrique pour atteindre l'objectif visé.

-Évolutivité : les applications (IoT) connecteront des millions, voire des milliards d'objets IoT sur le même réseau intelligent. Un protocole d'allocation de canal pour ce numéro n'est pas une tâche facile. Des services et des opérations extensibles doivent être développés pour tolérer que de nouveaux services et dispositifs rejoignent constamment le réseau [7].



**Figure I.8 Relation entre RC et l'IdO [7].**

## **I.7 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons abordé le thème de la radio cognitive, ses caractéristiques, ses fonctions et ses domaines d'application. Nous avons évoqué aussi l'internet des objets, son architecture, ses protocoles et domaines d'application et pour finir nous avons vu la relation entre ses deux technologies.

Dans le prochain chapitre nous allons parler des différents types d'antenne en adéquation avec l'utilisation pour l'IoT et la RC et des différentes méthodes de leur miniaturisation.

**CHAPITRE II**  
**ANTENNES ET**  
**MINIATURISATION**

## Sommaire

II.1-/ Introduction.....	32
II.2-/ Définition .....	32
II.4-/ Les types des antennes.....	34
II.4.1-/ Antenne filaire.....	34
II.4.2-/ Antenne a cornet.....	35
II.4.3-/ Antenne parabolique .....	36
II.4.4-/ Antenne a fente.....	37
II.4.5-/ Antenne directives .....	38
II.4.6-/ Antenne Vivaldi .....	38
II.4.7-/ Le dipôle demi-onde.....	39
II.4.8-/ Antenne log-périodique.....	40
II.4.9-/ Antennes omnidirectionnelles .....	41
II.4.9.1-/ Antenne biconique.....	42
II.4.9.2-/ Antenne discône .....	42
II.4.10-/ Antenne Patch (micro-ruban).....	43
II.4.10.1-/ Structure d'une antenne imprimée.....	44
II.4.10.2-/ Les paramètres géométriques d'une antenne imprimée .....	44
II.4.10.3-/ Techniques d'alimentation .....	45
II.4.10.4-/ Techniques d'adaptation des antennes patch.....	46
II.5-/ Les caractéristiques des antennes .....	47
II.5.1-/ Caractéristiques électriques.....	47
II.5.2-/ Caractéristiques de rayonnement .....	48
II.6-/ Définition des antennes électriquement petites .....	49
II.7-/Facteur de miniaturisation .....	50
II.8-/ Effet de miniaturisation sur les paramètres de l'antenne .....	51
II.8.1-/ Directivité.....	51
II.8.2-/ Efficacité de rayonnement.....	52
II.8.3-/ Facteur de qualité de l'antenne.....	53
II.8.4-/ Impédance d'entrée et correspondance .....	53
II.9-/ Limites théoriques de la miniaturisation des antennes .....	53
II.10-/ Différentes techniques de miniaturisation .....	54
II.10.1-/ Technique n° 1 : Modification de la géométrie.....	54

II.10.1.1 insertion d'encoches ou de fentes .....	54
II.10.1.2-/ Modification de la géométrie du plan de masse .....	55
II.10.2-/ Technique n° 2: Miniaturisation avec les métas matériaux .....	55
II.10.3-/ Technique n° 3: Court-circuit.....	56
II.12-/ Réseau d'antenne .....	57
II.12.1-/ Definition .....	57
II.12.1-/ Les types alimentation .....	57
II.12-/ Conclusion .....	58

## **II.1-/ Introduction**

Les antennes sont des composants essentiels de la communication sans fil. Elles permettent de transmettre et de recevoir des signaux radio, ce qui est crucial pour les réseaux de télécommunication, les satellites, les radars, les systèmes de navigation, les capteurs sans fil, les systèmes de surveillance, les systèmes de contrôle, et bien d'autres applications. Les antennes sont disponibles dans une variété de formes et de tailles, allant des grandes antennes paraboliques utilisées pour la communication satellitaire, aux petites antennes intégrées dans les téléphones mobiles.

Cependant, la miniaturisation des antennes est un enjeu majeur dans le domaine de la communication sans fil. En effet, de nombreuses applications nécessitent des antennes de petite taille, mais ces dernières ont souvent des performances inférieures à celles des antennes de plus grande taille. Par conséquent, de nombreux chercheurs travaillent sur des techniques pour miniaturiser les antennes tout en préservant ou en améliorant leurs performances.

Ce chapitre présente un aperçu des antennes et des techniques de miniaturisation des antennes. Nous commençons par une présentation générale des antennes, en expliquant leur fonctionnement et leurs caractéristiques. Nous examinons ensuite les techniques courantes de miniaturisation des antennes, telles que l'utilisation de matériaux diélectriques, l'insertion des fentes, le changement dans le plan de masse, et l'introduction de courts-circuits électriques.

En somme, ce chapitre offre un aperçu des antennes et de la miniaturisation des antennes, qui sont des domaines clés de la communication sans fil.

## **II.2-/ Définition**

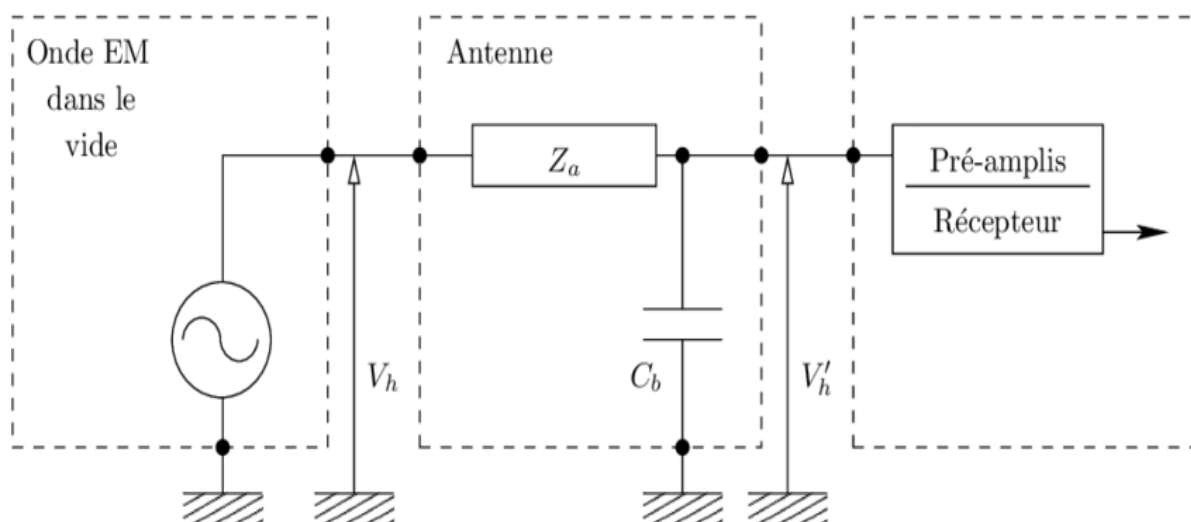
Une antenne est un dispositif utilisé pour envoyer ou recevoir des ondes électromagnétiques, comme des signaux de radio ou de télévision. Elle convertit les signaux électriques en ondes électromagnétiques qui se propagent dans l'air, ou vice versa, en captant les ondes électromagnétiques et en les convertissant en signaux électriques.

Les antennes peuvent se présenter sous différentes formes et tailles, notamment les antennes filaires, les antennes patch, les antennes à réflecteur parabolique et les antennes dipôles. Elles sont utilisées dans un large éventail d'applications, notamment

les systèmes de communication, la radiodiffusion, les systèmes radar et les communications par satellite.

L'efficacité d'une antenne est déterminée par plusieurs facteurs, notamment sa conception, sa gamme de fréquences et son orientation. Le gain d'une antenne, ou sa capacité à amplifier les signaux, est également un facteur important.

La technologie des antennes modernes a considérablement progressé ces dernières années, avec le développement de nouveaux matériaux, de nouvelles techniques de fabrication et de nouvelles conceptions qui ont amélioré leur efficacité, leur taille et leurs performances [17].



**Figure II. 1 Schéma électrique équivalent d'une antenne [18].**

### II.3-/ Le rôle d'une antenne

Les antennes sont des composants essentiels dans de nombreux systèmes de communications. Leur rôle principal est de transmettre et de recevoir des ondes électromagnétiques, telles que des ondes radio, des micro-ondes et même des ondes lumineuses, qui transportent des informations telles que des signaux vocaux, de données et des vidéos. Les antennes sont présentes dans de nombreux appareils, des smartphones aux téléviseurs en passant par les radios et les systèmes de communication par satellite.

Voici quelques-uns des principaux rôles des antennes :

-Transmission : Les antennes sont utilisées pour transmettre des informations sur de longues distances. Elles convertissent les signaux électriques en ondes électromagnétiques qui peuvent voyager dans l'air ou dans d'autres milieux.

-Réception : Les antennes sont également utilisées pour recevoir des ondes électromagnétiques provenant d'autres sources. Elles convertissent ces ondes en signaux électriques qui peuvent être traités par des dispositifs de communication.

-Amplification du signal : Les antennes peuvent amplifier les signaux faibles, ce qui les rend plus faciles à détecter et à traiter. Ceci est particulièrement utile dans les situations où les signaux peuvent être faibles ou déformés, comme dans les environnements éloignés ou bruyants.

-Directionnalisé : Les antennes peuvent être conçues pour avoir des propriétés directionnelles spécifiques, leur permettant de concentrer leur transmission ou leur réception dans une direction particulière. Ceci est utile dans les situations où vous souhaitez communiquer avec un endroit spécifique ou éviter les interférences provenant d'autres sources.

-Taille et portabilité : Les antennes peuvent être conçues pour être petites et portables, ce qui les rend idéales pour les appareils mobiles tels que les Smartphones et les appareils GPS ( Global Positioning System). Elles peuvent également être conçues pour des applications spécifiques, telles que les communications par satellite ou les systèmes de radar .

Les antennes jouent un rôle essentiel dans de nombreuses applications, notamment la communication sans fil, la radiodiffusion, le radar et la communication par satellite. La conception d'une antenne doit tenir compte de facteurs tels que la gamme de fréquences, le gain, le diagramme de rayonnement, la polarisation et l'adaptation d'impédance. Les progrès de la technologie des antennes ont permis d'accélérer les débits de données, d'augmenter la portée et d'améliorer la fiabilité des systèmes de communication.

## **II.4- / Les types des antennes**

Il existe de nombreux types d'antennes, chacun ayant ses propres avantages et inconvénients. Voici quelques types d'antennes courants [19] :

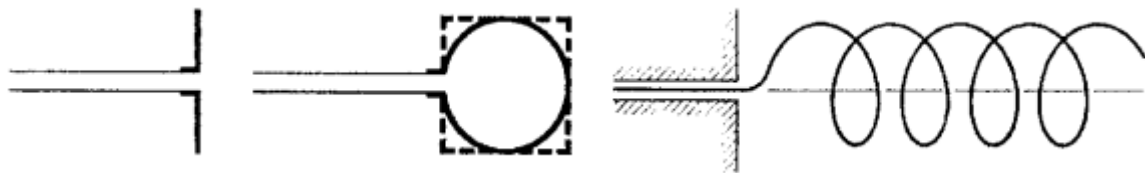
### **II.4.1- / Antenne filaire**

Une antenne filaire est un type d'antenne qui consiste en un fil conducteur de longueur spécifique qui est utilisé pour émettre ou recevoir des signaux électromagnétiques. Les antennes filaires peuvent être utilisées pour une variété d'applications, y compris la

communication radio, la transmission de données et la réception de signaux de télévision.

Les antennes filaires peuvent varier en longueur et en forme en fonction de la fréquence des signaux à transmettre ou à recevoir. Les antennes plus longues peuvent être utilisées pour des fréquences plus basses, tandis que les antennes plus courtes peuvent être utilisées pour des fréquences plus élevées. Les antennes filaires peuvent également être orientées dans une direction spécifique pour optimiser la réception ou la transmission des signaux dans une zone particulière.

Les antennes filaires peuvent être utilisées seules ou en combinaison avec d'autres types d'antennes pour améliorer la qualité de la réception ou de la transmission des signaux électromagnétiques. Les antennes filaires sont souvent utilisées dans les applications nécessitant une antenne simple et peu coûteuse, telles que les antennes domestiques pour la télévision ou les antennes pour les radios à ondes courtes [20].



**Figure II. 2 Antenne filaire usuelles [19].**

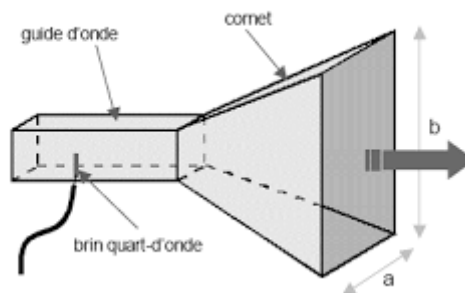
#### **II.4.2- / Antenne a cornet**

Une antenne à cornet est une antenne directive qui se compose d'un cornet métallique conique ou pyramidal, dont l'ouverture est reliée à une source de signal électromagnétique. Le cornet sert à concentrer le champ électromagnétique émis ou reçu par l'antenne sur une région de l'espace spécifique, afin d'obtenir une meilleure directivité et une plus grande efficacité.

Les antennes à cornet sont utilisées dans une grande variété d'applications, notamment la télédétection, la radiodiffusion, la communication par satellite, la navigation aérienne et maritime, la mesure et l'analyse de signaux RF, la recherche scientifique et militaire. Elles peuvent être utilisées pour émettre ou recevoir des signaux à large bande ou à bande étroite, selon la conception de l'antenne [21].

Les avantages des antennes à cornet incluent leur haute directivité, leur large bande passante, leur faible niveau de bruit et leur résistance aux interférences électromagnétiques. Cependant, elles sont souvent plus volumineuses et plus coûteuses

que d'autres types d'antennes, ce qui peut limiter leur utilisation dans des applications où l'encombrement et les coûts sont des facteurs critiques.



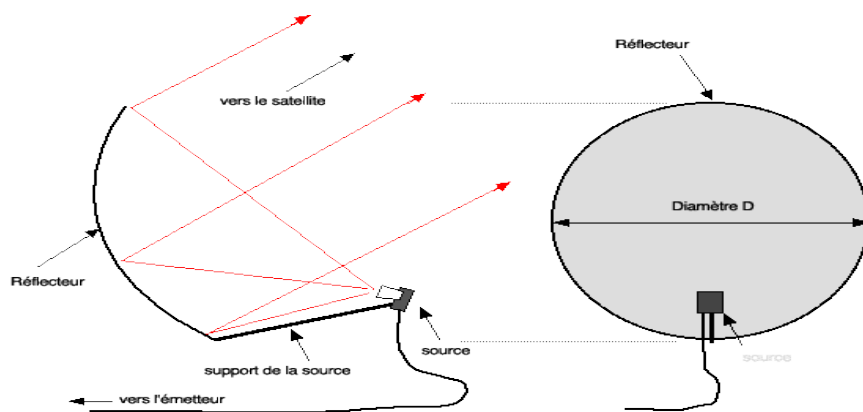
**Figure II. 3 Antenne a cornet [22].**

#### **II.4.3- / Antenne parabolique**

Une antenne parabolique est une antenne directive qui se compose d'une parabole réfléchissante et d'un élément rayonnant situé à son foyer. L'élément rayonnant peut être une antenne à cornet, une antenne à fente, une antenne à dipôle ou une antenne à plaque métallique, selon les spécifications de l'antenne parabolique.

L'antenne parabolique utilise la propriété réfléchissante de la surface parabolique pour diriger les ondes électromagnétiques émises ou reçues par l'élément rayonnant dans une direction spécifique, ce qui permet d'obtenir une directivité élevée et une plus grande portée. Les antennes paraboliques sont souvent utilisées pour les applications de communication par satellite, de télédiffusion, de télédétection, de radar, de surveillance et de défense.

Les avantages des antennes paraboliques comprennent leur haute directivité, leur grande efficacité, leur faible niveau de bruit et leur capacité à traiter des signaux de très faible niveau. Cependant, elles peuvent être encombrantes et coûteuses à fabriquer, ce qui peut limiter leur utilisation dans certaines applications [23].



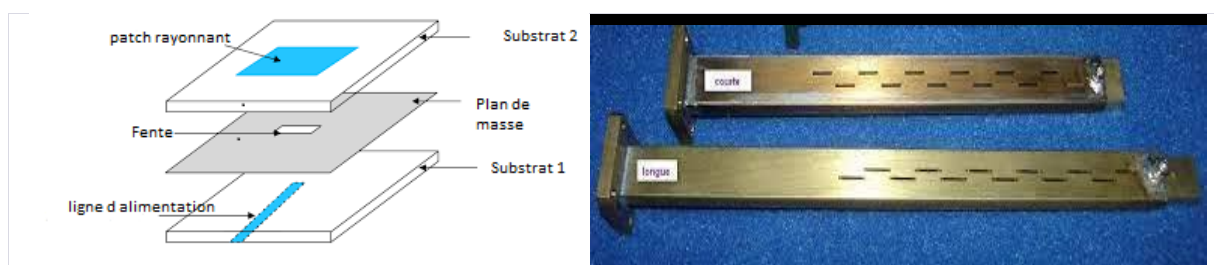
**Figure II. 4 Antenne parabolique [23].**

#### II.4.4- / Antenne a fente

Une antenne à fente est une antenne plane qui utilise une ou plusieurs fentes dans une plaque conductrice pour rayonner ou capter des ondes électromagnétiques. Les fentes dans la plaque conductrice créent des champs électromagnétiques qui sont émis ou captés par l'antenne, en fonction de la polarisation et de la fréquence des ondes.

Les antennes à fente peuvent être utilisées pour les applications de communication, de télédétection, de radar et de mesure. Elles ont plusieurs avantages par rapport aux autres types d'antennes, tels que leurs faibles profils, leurs larges bandes passantes, leurs hautes directivités, leurs résistances aux interférences et leurs compatibilités avec les circuits imprimés. Les antennes à fente peuvent être utilisées seules ou en combinaison avec d'autres antennes, telles que des antennes patch ou des antennes à cornet, pour améliorer les performances du système [24].

Cependant, les antennes à fente peuvent être plus difficiles à concevoir et à fabriquer que d'autres types d'antennes, en raison de la complexité de la géométrie de la fente et des exigences de précision de la fabrication.



**Figure II. 5 Antenne a fente [24].**

#### II.4.5- / Antenne directives

Les antennes directives sont des types d'antennes qui concentrent l'énergie de rayonnement dans une direction spécifique, plutôt que de la diffuser uniformément dans toutes les directions. Elles sont utilisées dans de nombreuses applications, notamment dans les systèmes de communication sans fil, les radars et les systèmes de navigation.

Elles peuvent être utilisées pour améliorer la qualité de la transmission ou de la réception en réduisant les interférences et le bruit.

Les antennes directives peuvent prendre différentes formes, telles que les antennes à cornet, les antennes paraboliques, les antennes à fente et les antennes à réseau [19].

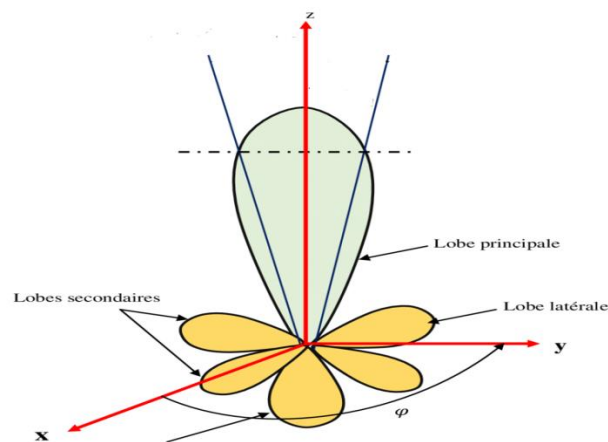


Figure II. 6 Diagramme de rayonnement d'une antenne directive [19].

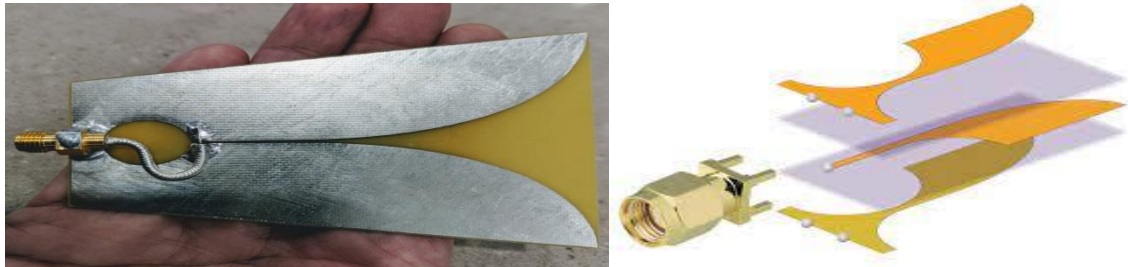
#### II.4.6- / Antenne Vivaldi

L'antenne à transition progressive, également connue sous le nom d'antenne Vivaldi, est une antenne directionnelle à large bande qui peut être utilisée pour les communications sans fil, les radars, l'imagerie par radar et d'autres applications à haute fréquence.

L'antenne Vivaldi est nommée d'après son concepteur, Paul Vivaldi, qui l'a développée dans les années 1990. Elle se compose d'une structure en forme de cornet avec une ouverture de plus en plus large, qui permet une transition progressive de l'impédance entre la ligne d'alimentation et l'antenne elle-même. Cette transition progressive est cruciale pour minimiser les réflexions d'impédance et maximiser l'efficacité de l'antenne [25].

L'antenne Vivaldi est connue pour sa large bande passante, sa directivité élevée et son gain élevé. Elle est également capable de fonctionner à des fréquences allant jusqu'à

plusieurs dizaines de GHz. Cependant, elle peut être assez complexe à construire et à mettre au point en raison de sa forme spécifique et de la nécessité de maintenir une transition progressive de l'impédance sur toute sa longueur.



**Figure II. 7** antenne Vivaldi [26].

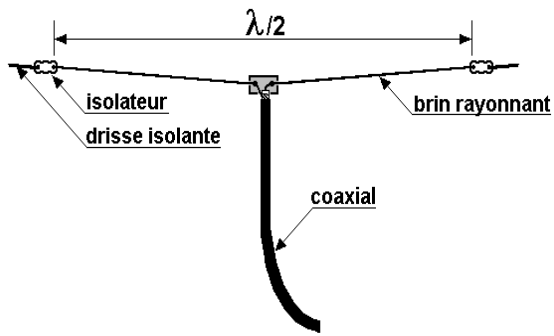
#### **II.4.7-/ Le dipôle demi-onde**

Le dipôle demi-onde est une antenne filaire qui est couramment utilisée pour la transmission et la réception des ondes radio. C'est une antenne à polarisation linéaire qui est constituée d'un fil conducteur coupé à une longueur de  $\lambda/2$  (demi-longueur d'onde) pour la fréquence de fonctionnement de l'antenne.

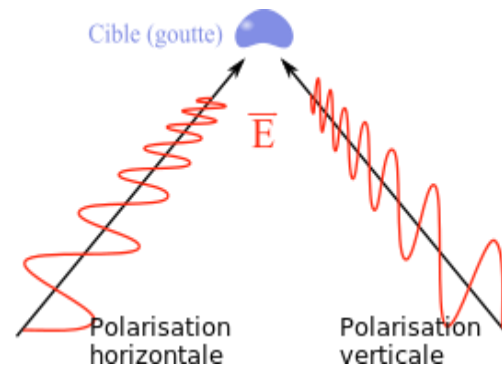
Le dipôle demi-onde est alimenté par une ligne d'alimentation coaxiale ou à ligne symétrique, qui est connectée au centre du dipôle. Lorsqu'un signal est appliqué à l'antenne, un courant alternatif circule dans les deux moitiés du dipôle, produisant un champ électromagnétique qui rayonne dans l'espace.

Le dipôle demi-onde est une antenne omnidirectionnelle dans le plan horizontal, ce qui signifie qu'elle émet ou reçoit des signaux de manière uniforme dans toutes les directions perpendiculaires à son axe. Cependant, dans le plan vertical, elle a un modèle de rayonnement plus complexe, avec des lobes de rayonnement qui dépendent de la hauteur et de l'environnement de l'antenne.

Le dipôle demi-onde est une antenne relativement simple et facile à construire, avec une large bande passante et une impédance d'entrée relativement constante sur une plage de fréquences. Il est couramment utilisé pour les radios FM, les émetteurs de télévision et d'autres applications de transmission et de réception à haute fréquence [27].



**Le dipôle demi-onde**



**les types de polarisation linéaire**

**Figure II. 8 le dipôle demi-onde [19].**

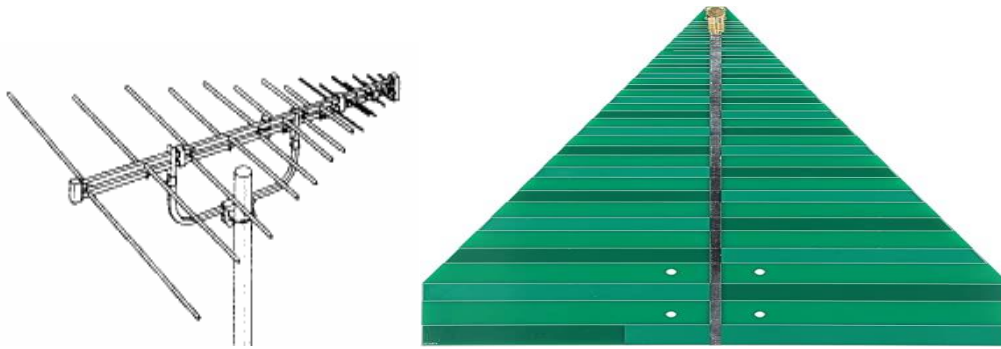
#### **II.4.8-/ Antenne log-périodique**

L'antenne log-périodique est une antenne directionnelle à large bande qui peut être utilisée pour les communications sans fil, les radars, l'imagerie par radar et d'autres applications à haute fréquence. Elle se compose d'une série de dipôles demi-onde connectés en série, avec des longueurs de dipôles qui augmentent progressivement à mesure que l'on se déplace le long de l'antenne[19].

La forme et les dimensions de l'antenne log-périodique sont conçues de manière à ce que sa réponse en fréquence soit constante sur une large plage de fréquences, avec une impédance d'entrée relativement constante sur cette plage. Cela permet à l'antenne de fonctionner efficacement sur une gamme de fréquences sans nécessiter d'ajustement.

L'antenne log-périodique est connue pour sa directivité élevée, sa large bande passante et son faible niveau de bruit. Elle est également capable de fonctionner à des fréquences allant jusqu'à plusieurs GHz. Cependant, elle peut être plus complexe à construire et à mettre au point que certaines autres antennes en raison de sa structure en cascade de dipôles.

L'antenne log-périodique est couramment utilisée dans les applications de communication sans fil, y compris les réseaux cellulaires, les systèmes de communication par satellite, les radios militaires et les équipements de surveillance radar. Elle peut également être utilisée pour l'imagerie médicale, l'analyse spectrale et d'autres applications scientifiques et industrielles qui nécessitent une large bande passante et une haute directivité.



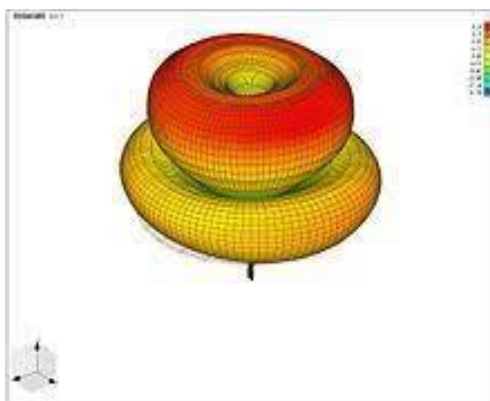
**Figure II. 9 antenne log périodique [19].**

#### **II.4.9-/ Antennes omnidirectionnelles**

Les antennes omnidirectionnelles sont des antennes qui émettent et reçoivent des signaux radio dans toutes les directions à partir d'un point central. Elles sont souvent utilisées pour les communications mobiles, les réseaux sans fil et les radios de diffusion.

Les antennes omnidirectionnelles sont conçues pour émettre un signal uniforme dans toutes les directions horizontales, avec une certaine atténuation dans la direction verticale. Elles sont souvent comparées aux antennes directionnelles, qui sont conçues pour émettre dans une direction spécifique et fournir une plus grande portée et une meilleure qualité de signal dans cette direction.[19]

Les antennes omnidirectionnelles peuvent avoir différentes formes et tailles, telles que des antennes à tige verticale, des antennes à disque, des antennes hélicoïdales, etc. Elles sont généralement utilisées dans des situations où la direction d'arrivée du signal est inconnue ou peut varier, comme dans les communications mobiles où l'utilisateur se déplace souvent.



**Diagramme de rayonnement**



**Antennes omnidirectionnelles**

**Figure II. 10 Antenne omnidirectionnelles [19].**

#### II.4.9.1- / Antenne biconique

L'antenne biconique est une antenne large bande, ce qui signifie qu'elle est capable de transmettre et de recevoir des signaux sur une large gamme de fréquences. Elle est particulièrement utile pour les applications nécessitant une grande largeur de bande, telles que les tests d'émissions radio, les mesures de champ électromagnétique, la surveillance des signaux électromagnétiques et les communications à large bande.

Cependant, l'antenne biconique a également des inconvénients. Elle est sensible à la polarisation des signaux électromagnétiques, ce qui signifie que son efficacité peut varier en fonction de l'orientation des signaux par rapport à l'antenne. Elle est également sensible aux signaux provenant de l'arrière de l'antenne, ce qui peut entraîner des interférences [19].

Malgré ses inconvénients, l'antenne biconique reste un choix populaire pour de nombreuses applications en raison de sa large bande passante et de sa facilité d'utilisation.

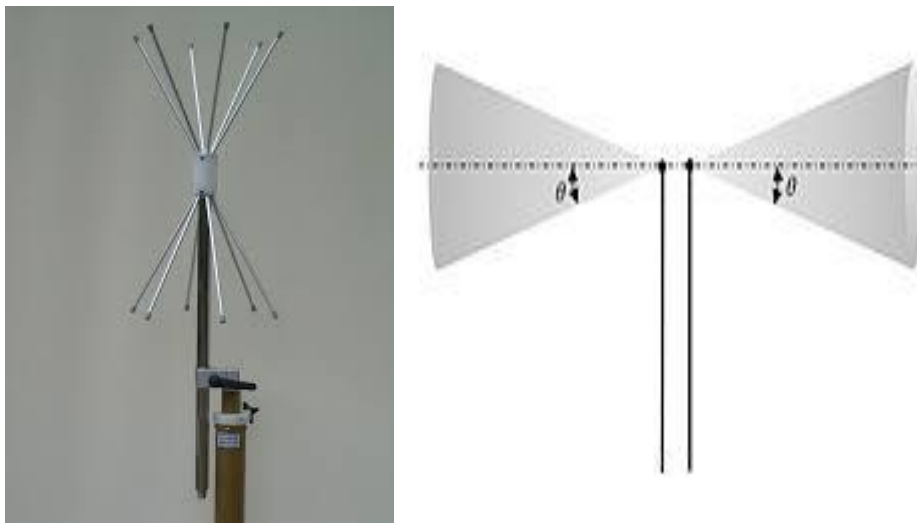


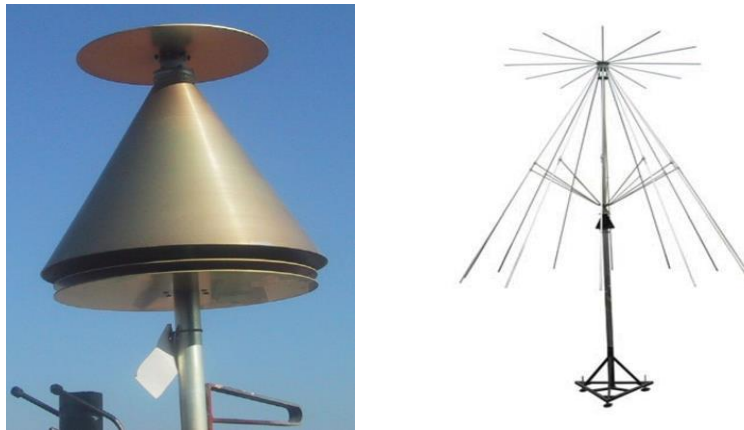
Figure II. 11 Antenne biconique [19].

#### II.4.9.2- / Antenne discône

Une antenne discône est une antenne radioélectrique constituée de deux disques métalliques de même taille mais de polarité opposée, espacés l'un de l'autre par un isolant en forme de cylindre. Les disques sont reliés à une ligne d'alimentation coaxiale qui permet de transmettre et de recevoir des signaux.

En résumé, l'antenne discône à double disque qui offre une directivité élevée, une large bande passante et une efficacité de rayonnement élevée. Elle est utilisée dans de

nombreuses applications de radiodiffusion, de télécommunication, de surveillance de la circulation aérienne, de recherche en physique nucléaire, etc [19].



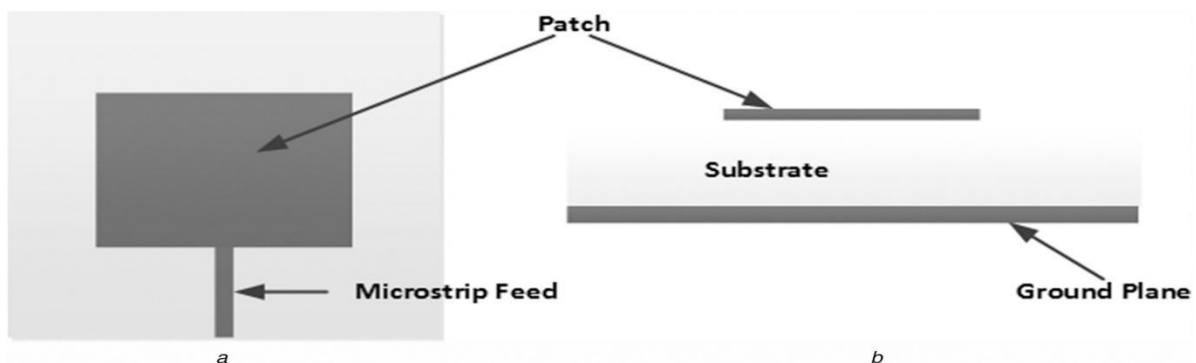
**Figure II. 12 Antenne discône [19].**

#### **II.4.10- / Antenne Patch (micro-ruban)**

Une antenne patch est un type d'antenne utilisé dans les systèmes de communication radiofréquence (RF). Il se compose d'une pièce métallique mince, généralement faite de cuivre ou d'aluminium, placée sur un plan de sol. La pièce est généralement de forme carrée, rectangulaire ou circulaire, et est habituellement placée au centre du plan du sol.

Lorsqu'un signal est appliqué à l'antenne patch, il génère un champ électromagnétique qui rayonne vers l'extérieur. La forme et la taille de la pièce, ainsi que la distance entre la pièce et le plan au sol, déterminent la fréquence du signal qui est transmis ou reçu [28].

Les antennes patch sont couramment utilisées dans les systèmes de communication sans fil, tels que les téléphones portables, les routeurs Wi-Fi et les systèmes de communication par satellite. Ils sont également utilisés dans les systèmes de radiogoniométrie et de radar. Les antennes patchs sont souvent préférées aux autres types d'antennes car elles sont légères, faciles à fabriquer et peuvent être fabriquées très petites, ce qui les rend idéales pour une utilisation dans des appareils compacts.



**Figure II. 13 Antenne Patch [28].**

### II.4.10.1- Structure d'une antenne imprimée

Une antenne imprimée est une antenne dont les composants sont fabriqués en utilisant des techniques d'impression. Elle est généralement composée d'un substrat diélectrique, d'une couche de métal imprimée, et éventuellement d'une couche de protection pour protéger la couche de métal. La forme et la disposition de la couche de métal déterminent les caractéristiques de l'antenne, telles que la fréquence de fonctionnement, le gain, la polarisation et la directivité.

La forme de l'antenne imprimée peut varier, allant des antennes de patch rectangulaires simples aux antennes plus complexes, telles que les antennes de patch à fente, les antennes en forme de spirale, les antennes à boucle, etc. La forme de l'antenne est choisie en fonction des exigences de performance, de la bande de fréquence de fonctionnement et de la taille. Les antennes imprimées sont souvent utilisées dans les systèmes de communication sans fil, tels que les téléphones portables, les réseaux Wi-Fi, les radars, etc...[28].

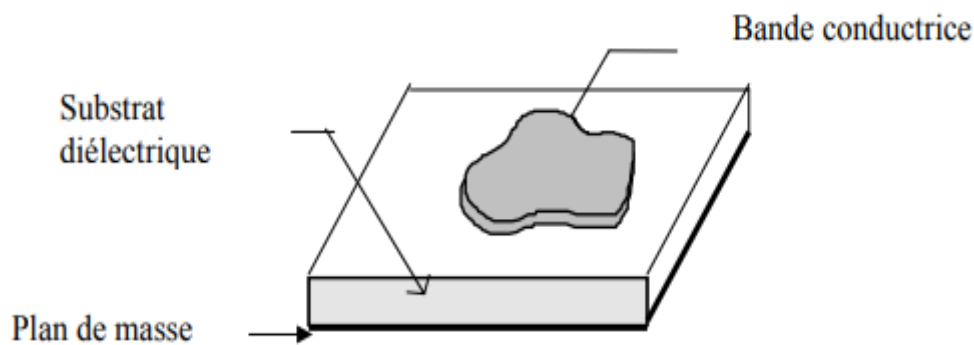


Figure II. 14 Structure d'une antenne imprimée [28].

### II.4.10.2- Les paramètres géométriques d'une antenne imprimée

➤ Longueur du patch (L) :

La longueur du patch détermine la résonance de l'antenne et est généralement choisie pour être une fraction de la longueur d'onde de fonctionnement de l'antenne, et sa relation est :

$$L_{eff} = \frac{c}{2f\sqrt{\epsilon_{r\ eff}}} \quad (II.1)$$

$\epsilon_{r\ eff}$  est la permittivité effective donne par :

$$\epsilon_{r\ eff} = \left(\frac{\epsilon_r + 1}{2}\right) + \left(\frac{\epsilon_r - 1}{2}\right) \frac{1}{\sqrt{1 + 12 \frac{h}{W}}} \quad (II.2)$$

La longueur effective de patch égale a :

$$L_{eff} = L + 2\Delta L \quad (II.3)$$

La longueur du Patch agale alors a :

$$L = L_{eff} - 2\Delta L \quad (II.4)$$

➤ Largeur du patch (W) :

La largeur du patch détermine l'impédance caractéristique de l'antenne et est généralement choisie pour donner une impédance correspondant à celle de la ligne de transmission associée, et sa relation est :

$$W = \frac{c}{2f} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (II.5)$$

$\epsilon_r$  : la permittivité relative.

$f$  : la fréquence fondamentale de l'antenne.

$c$  : la vitesse de la lumière

➤ Choix du substrat :

Des nombreux substrats utilisent dans la conception des antennes imprimées et doivent être compatibles avec le matériel du patch et les paramètres qui définissent s'ils sont compatibles ou non, citons parmi ces choix :

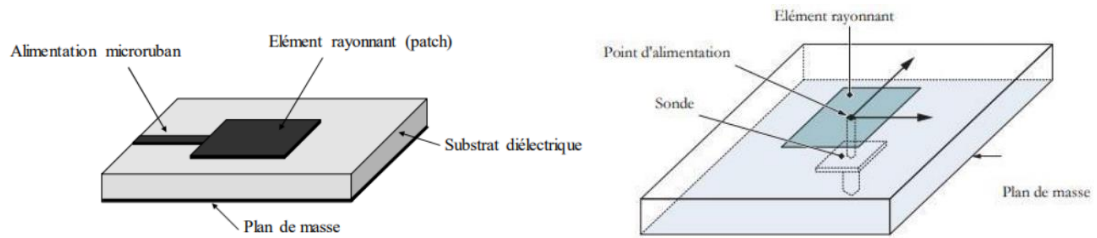
-Épaisseur du substrat (h) : l'épaisseur du substrat est choisie pour contrôler l'impédance caractéristique de l'antenne et pour fournir un support physique pour le patch. Il est généralement choisi pour être une fraction de la longueur d'onde de fonctionnement de l'antenne.

-Constante diélectrique du substrat ( $\epsilon_r$ ) : la constante diélectrique du substrat affecte l'impédance caractéristique, la bande passante et le gain de l'antenne. Les matériaux avec une constante diélectrique plus élevée offrent une impédance caractéristique plus élevée et une meilleure bande passante, tandis que les matériaux avec une constante diélectrique plus faible offrent un gain plus élevé [28].

#### II.4.10.3-/ Techniques d'alimentation

Les techniques d'alimentation des antennes désignent la manière dont l'énergie électromagnétique est fournie à une antenne. Il existe plusieurs types de techniques d'alimentation pour les antennes, qui sont brièvement expliqués ci-dessous:

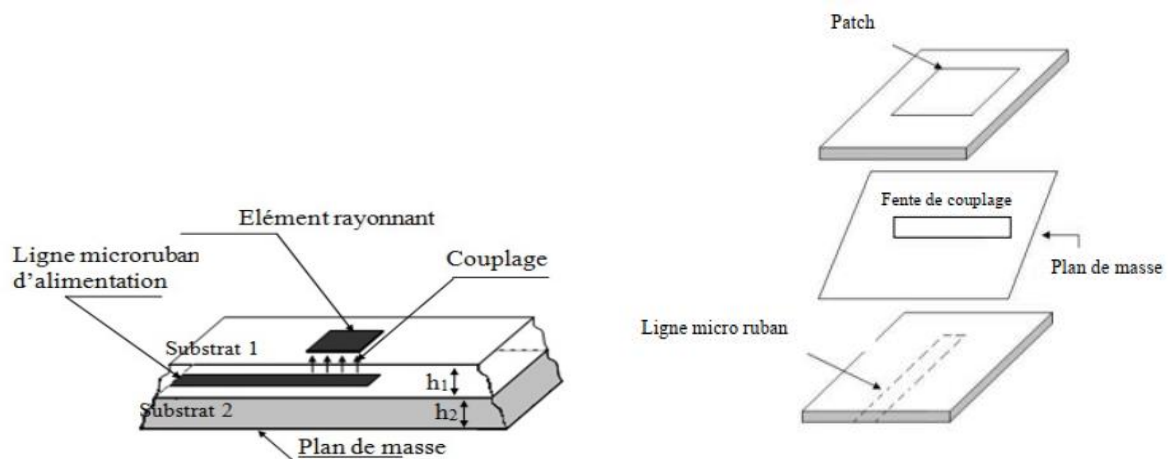
➤ Alimentation par contact (ou alimentation par conduction): Dans cette technique d'alimentation l'antenne est connectée directement à la source d'alimentation via un fil conducteur. L'énergie est transférée à l'antenne à travers ce fil. Cette technique est couramment utilisée dans les antennes filaires [19].



**Figure II. 15 alimentation par contact [19].**

- Alimentation par proximité : Cette technique d'alimentation est similaire à l'alimentation par contact, mais au lieu d'être en contact direct avec l'antenne, la source d'alimentation est placée à proximité de l'antenne. L'énergie est transférée à l'antenne via un champ électromagnétique qui est créé entre la source d'alimentation et l'antenne. Cette technique est souvent utilisée dans les antennes RFID (Radiofréquence-identification) et les antennes de communication sans fil.

Ces deux techniques sont utiles dans certaines applications spécifiques, mais leur utilisation dépend du type d'antenne et des conditions de fonctionnement.



**Figure II. 16 alimentation par proximité [19].**

#### **II.4.10.4- / Techniques d'adaptation des antennes patch**

Il existe plusieurs techniques d'adaptation des antennes patch pour améliorer leur performance dans différentes conditions environnementales :

- Adaptation par ligne quart d'onde : Cette technique consiste à utiliser une ligne quart d'onde (ou une fraction de celle-ci) patch et la ligne d'alimentation pour créer une impédance de charge qui correspond à l'impédance caractéristique de la ligne d'alimentation.

- Adaptation par stub : Cette technique d'adaptation pour transformer l'impédance de l'antenne patch en une impédance de charge appropriée. La ligne quart d'onde est généralement placée entre l'antenne
- implique l'utilisation d'un stub (ou un bras de ligne de transmission) pour modifier l'impédance d'entrée de l'antenne patch. Le stub peut être ouvert ou court-circuité à une certaine distance de l'antenne patch pour créer une impédance de charge appropriée [28].
- Adaptation avec encoche : Cette technique consiste à ajouter une encoche (ou une fente) dans la plaque conductrice de l'antenne patch pour ajuster l'impédance d'entrée. L'encoche peut être placée à différentes positions sur la plaque conductrice pour créer l'impédance de charge souhaitée.

## II.5-/ Les caractéristiques des antennes

Les antennes se caractérisent généralement par quelques paramètres importants. Ils permettent de comparer les structures entre elles, mais aussi les simulations et les mesures sur prototypes [29].

### II.5.1-/ Caractéristiques électriques

Les caractéristiques électriques d'une antenne décrivent son comportement en réponse aux signaux électromagnétiques. Voici les principales caractéristiques électriques d'une antenne :

- Impédance : l'impédance d'une antenne mesure la résistance qu'elle offre aux signaux électromagnétiques. L'impédance peut être exprimée en termes de résistance et de réactance, et elle dépend de la fréquence des signaux. L'impédance de l'antenne doit être adaptée à celle du système émetteur/récepteur pour minimiser les pertes de signal. Elle est exprimée par la relation suivante :

$$Z_{in} = \frac{V_e}{I_e} = R + jX \quad (II.6)$$

$Z_{in}$  : impédance d'entrée aux bornes a et b.

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

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

Le coefficient de réflexion sert à mesurer la quantité de signal réfléchi par rapport à la quantité de signal incident [29].

La relation entre le coefficient  $\Gamma$  et l'impédance d'entrée de l'antenne ainsi que l'impédance caractéristique de la ligne d'alimentation peut être exprimée par la formule suivante :

$$\Gamma = \frac{Z_{in} + Z_c}{Z_{in} - Z_c} \quad (II.7)$$

$Z_c$  : Impédance caractéristique de la ligne d'alimentation, généralement égale à  $50\Omega$ .

Nous pouvons représenter  $\Gamma$  sous la forme d'un paramètre S en dB comme suit :

$$S_{11} = 20\log(\Gamma) \quad (II.8)$$

- Bande passante : la bande passante d'une antenne est la plage de fréquences sur laquelle elle Fonctionne efficacement. Elle est déterminée par la conception de l'antenne et peut être élargie en utilisant des techniques spécifiques. Elle dépend de l'impédance, la directivité, la polarisation des ondes et enfin les dimensions de l'antenne. On définit la largeur de la bande comme suit :

$$BW = \frac{+f - (-f)}{fr} \quad (II.9)$$

$+f$  est la fréquence max et  $-f$  et la fréquence min  $fr$  la fréquence de résonance

### II.5.2- / Caractéristiques de rayonnement

Les caractéristiques de rayonnement d'une antenne sont les propriétés qui décrivent la façon dont l'antenne émet ou reçoit des ondes électromagnétiques dans l'espace. Ces caractéristiques sont importantes pour déterminer l'efficacité et les performances de l'antenne [29].

- Gain : le gain d'une antenne est une mesure de la quantité de puissance qu'elle peut émettre ou recevoir dans une direction donnée par rapport à une antenne isotrope idéale (une antenne théorique qui émet ou reçoit uniformément dans toutes les directions). Le gain est exprimé en décibels (dB) avec la relation suivante :

$$G = 4\pi(\theta, \varphi)/Pa \quad (II.10)$$

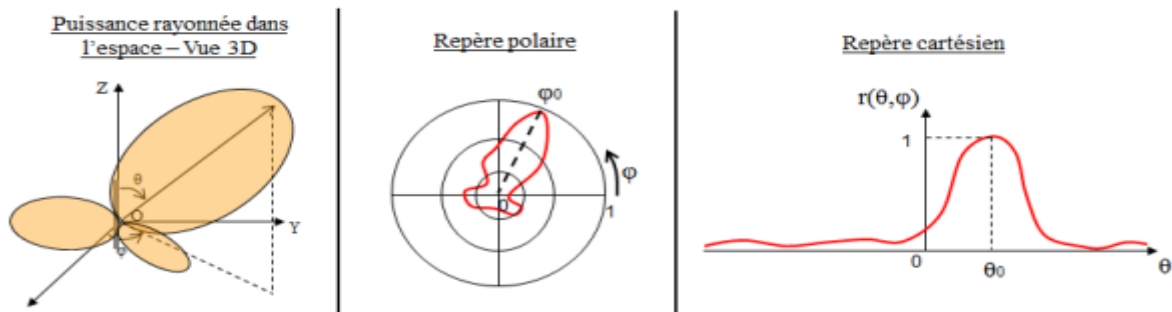
$(\theta, \varphi)$  : La direction sphérique

$Pa$  : La puissance qui rayonnerait une antenne

- Directivité : la directivité d'une antenne décrit sa capacité à émettre ou à recevoir des signaux dans une direction donnée. Les antennes directionnelles ont une directivité plus élevée que les antennes omnidirectionnelles et sont utilisées pour les applications qui nécessitent une couverture ciblée, sa relation est :

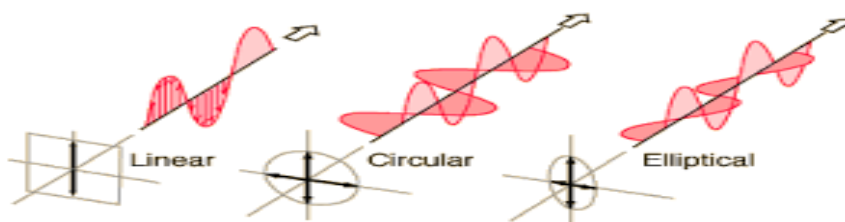
$$D(\theta, \varphi) = 4\pi \frac{P(\theta, \varphi)}{P_r} \quad (\text{II.11})$$

- Diagramme de rayonnement : il s'agit d'un graphique qui montre la puissance rayonnée par l'antenne dans différentes directions. Le diagramme de rayonnement peut être représenté en 2D ou en 3D, et il permet de déterminer la direction et l'intensité du faisceau d'ondes électromagnétiques émis ou reçus par l'antenne [29].



**Figure II. 17 Représentation du diagramme de rayonnement d'une antenne [29].**

- Polarisation : elle décrit l'orientation du champ électrique de l'onde électromagnétique émise ou reçue par l'antenne. La polarisation peut être linéaire, circulaire ou elliptique, et elle doit être alignée avec la polarisation de l'onde émise ou reçue pour maximiser la puissance de transmission ou de réception.



**Figure II. 18 Les types de polarisation [29].**

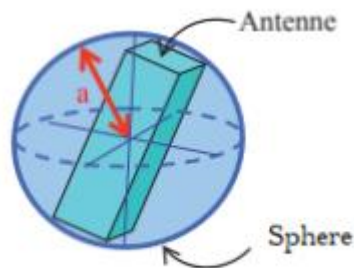
## II.6-/ Définition des antennes électriquement petites

D'après les recherches menées par Wheeler, une antenne est considérée comme électriquement petite (AEP) lorsqu'elle a une dimension maximale inférieure à  $\lambda/\pi$ , où  $\lambda$  représente la longueur d'onde et cette valeur est communément appelée la "radiansphère". Cette définition est équivalente à dire qu'une antenne est électriquement petite si elle répond à la condition suivante [30] :

$$Ka < 1$$

K : le nombre d'onde  $2\pi/\lambda$

a : le rayon de la sphère minimale qui englobe l'antenne



**Figure II. 19 Sphère minimale qui englobe l'antenne [30].**

La radiansphère est la distance qui marque la transition entre le champ proche (où l'énergie électromagnétique est stockée dans l'antenne) et le champ lointain (où cette énergie est propagée). La réduction de la taille de l'antenne par rapport à la longueur d'onde électrique a pour conséquence de limiter les performances radioélectriques de l'antenne.

Les performances d'une antenne électriquement petite (AEP) sont déterminées par sa taille électrique  $ka$ , son facteur de qualité (ou bande passante) et son efficacité. Une attention particulière est accordée au facteur de qualité et à son lien avec la taille électrique, car plusieurs études ont été menées pour déterminer la valeur minimale du facteur de qualité (et donc la valeur maximale de la bande passante) pour une taille d'antenne donnée [30].

## **II.7-/Facteur de miniaturisation**

Le facteur de miniaturisation d'une antenne fait référence à la mesure dans laquelle une antenne peut être réduite en taille tout en conservant ses performances en matière de rayonnement électromagnétique [31].

Les facteurs de miniaturisation dépendent de plusieurs facteurs, notamment de la fréquence de fonctionnement de l'antenne, de la polarisation de l'onde électromagnétique, de la directivité et du type d'antenne. Les technologies d'antennes miniatures les plus courantes incluent les antennes patch, les antennes à fil, les antennes à fente, les antennes imprimées en 3D, les antennes intégrées aux circuits électroniques. Et on peut la calculer en fonction de la taille par la relation suivante :

$$FM = \frac{S_{min}}{S_{org}} \quad (II.12)$$

$S_{min}$  : la surface après la miniaturisation.

$S_{org}$  : la surface originale.

Les facteurs de miniaturisation sont souvent utilisés pour concevoir des antennes pour des applications dans lesquelles la taille et le poids sont des préoccupations importantes, telles que les systèmes de communication portables, les drones, les satellites, les dispositifs médicaux implantables, etc.

## **II.8- / Effet de miniaturisation sur les paramètres de l'antenne**

Afin de comprendre les caractéristiques des petites antennes, il est important d'examiner l'impact de la miniaturisation sur leur fonctionnement. En effet, la réduction de la taille d'une antenne peut influencer plusieurs de ses caractéristiques telles que sa fréquence de fonctionnement, sa polarisation, sa directivité, ainsi que sa forme. C'est pourquoi, pour établir une base solide d'étude sur les petites antennes, il est essentiel de prendre en compte l'effet de la miniaturisation sur leurs performances. Cette compréhension est particulièrement importante pour la conception d'antennes. Ces paramètres sont :

### **II.8.1- / Directivité**

En général, les petites antennes sont connues pour avoir un diagramme de rayonnement unidirectionnel ou bidirectionnel, avec une directivité  $D$  allant de 1,5 à 3, selon la théorie. De plus, les petites antennes sont souvent considérées comme des antennes superdirectives, car leur directivité  $D$  reste constante pour des valeurs décroissantes de  $ka$ , où  $k$  est le nombre d'onde et  $a$  est la taille de l'antenne [29].

En pratique, les performances de l'antenne peuvent être affectées par divers effets tels que la diffraction, les pertes de conduction, les perturbations dues à des éléments environnementaux, etc.

## II.8.2- / Efficacité de rayonnement

L'efficacité du rayonnement est un aspect crucial pour les petites antennes, mais il n'a pas été étudié de manière approfondie jusqu'à présent. Le facteur d'efficacité de rayonnement d'une antenne, noté  $\eta$ , est simplement le rapport de la puissance rayonnée par l'antenne à la puissance délivrée à ses bornes d'entrée.

L'efficacité du rayonnement est importante car elle détermine la quantité d'énergie qui est réellement rayonnée dans l'espace par l'antenne par rapport à la quantité d'énergie qui est perdue sous forme de chaleur ou d'autres pertes internes dans l'antenne. Pour les petites antennes, qui sont souvent utilisées dans des applications où l'espace et le poids sont limités, une efficacité de rayonnement élevée est essentielle pour une performance optimale.

Cependant, il est important de noter que l'efficacité de rayonnement d'une antenne dépend de nombreux facteurs, tels que la fréquence de fonctionnement, la taille et la forme de l'antenne, ainsi que de l'environnement électromagnétique dans lequel elle fonctionne. Par conséquent, il est essentiel de comprendre comment ces facteurs peuvent affecter l'efficacité de rayonnement pour concevoir des petites antennes efficaces dans diverses applications [29].

Souvent le facteur d'efficacité est représenté dans la formule :

$$G = \eta(1 - |\Gamma|^2)D \quad (\text{II.13})$$

G : le gain

$\Gamma$  : Efficacité

Et efficacité de rayonnement  $\eta$  peut être représentée comme

$$\eta = \frac{R_{rad}}{R_{rad} + R_{loss}} = \frac{R_{rad}}{R_a} \quad (\text{II.14})$$

Ou  $R_a = R_{rad} + R_{loss}$ : résistance totale d'entrée d'antenne.

Les pertes dans l'antenne à l'exception du rayonnement sont modélisées à travers une résistance série de perte ( $R_{loss}$ ).

On remarque que lorsque la taille de l'antenne  $ka$  diminue,  $R_{rad}$  diminue et la résistance série des pertes  $R_{loss}$  domine l'expression de l'efficacité de l'équation .Harrington montre que les pertes sont extrêmement importantes pour des valeurs  $ka$  plus petites. Cette diminution d'efficacité est principalement due à la conduction dépendante de la fréquence et des pertes diélectriques dans l'antenne.

### II.8.3- / Facteur de qualité de l'antenne

Une quantité intrinsèquement significative pour une petite antenne est le facteur  $Q$ , défini par :

$$Q = \frac{2\omega \max(W_e, W_m)}{Pa} \quad (\text{II.15})$$

$W_e$  et  $W_m$ : énergies électriques et magnétiques stockées moyennées dans le temps.

$Pa$ : puissance reçue par l'antenne.

Les puissances rayonnées sont liées à la puissance reçue à travers:

$$Prad = \eta Pa \quad (\text{II.16})$$

$\eta$  : Le rendement de l'antenne.

Un autre aspect important de  $Q$  est qu'il est inversement proportionnel à la largeur de bande de l'antenne. Une approximation couramment utilisée entre  $Q$  et la bande passante fractionnelle  $BW$  de 3 dB de l'antenne est:

$$Q \approx \frac{1}{BW} \text{ Pour } Q \gg 1 \quad (\text{II.17})$$

### II.8.4- / Impédance d'entrée et correspondance

L'impédance d'entrée des petites antennes est généralement caractérisée par une faible résistance et une réactance élevée. Lorsque la taille de l'antenne diminue, la résistance au rayonnement  $R_{rad}$  diminue, ce qui entraîne la domination de la réactance de l'antenne [29].

$$R_{rad} \propto \left(\frac{h}{\lambda}\right)^2 \quad (\text{II.18})$$

$h$ : la hauteur d'antenne et  $\lambda$ : la longueur d'onde.

Cela implique une diminution quadratique de la résistance d'entrée en fonction de la taille électrique.

### II.9- / Limites théoriques de la miniaturisation des antennes

Wheeler a fixé une limite fondamentale à l'ÉES depuis 1947. Considère la dimension maximale de l'ESA comme est inférieure à:  $\lambda/2\pi$ .

$$Ka < 1 \quad (\text{II.19})$$

$$K = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (\text{II.20})$$

$\lambda$ : longueur d'onde.

$a$ : rayon de sphère renfermant la dimension maximale des antennes.

Selon Wheeler, les ESAs se trouvent dans le vide de l'espace et peuvent être enveloppées dans une sphère de rayon  $a$ , telle que  $ka < 1$ .

La réduction de la taille d'une antenne provoque des dégradations du gain et de l'efficacité de l'antenne, et la bande passante devient plus étroite.

Les paramètres affectant les limitations fondamentales des petites antennes sont:

- Facteur de qualité l'antenne  $Q$ :  $Q$  est proportionnel avec  $(ka)$ .
- Le rapport de bande passante RBW (Resolution BandWidth) est proportionnel à  $(ka)$ , RBW est presque égal à  $1/Q$ .  $\eta$  est proportionnel avec  $(ka)$  [31].
- La taille de l'antenne  $ka$ :  $ka$  est beaucoup plus petit que l'unité, où  $a$  est le rayon d'une sphère entourant l'antenne.

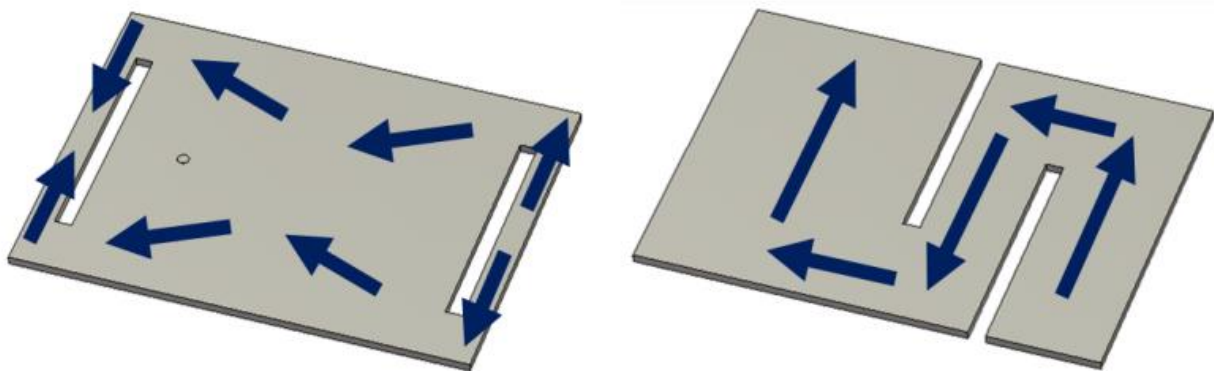
## II.10-/ Différentes techniques de miniaturisation

### II.10.1-/ Technique n° 1 : Modification de la géométrie

Cette technique de miniaturisation est la plus répandue actuellement et concerne un panel de formes antennaires.

#### II.10.1.1 insertion d'encoches ou de fentes

En ajoutant des fentes ou des encoches sur l'élément rayonnant, le courant électrique est contraint de suivre un chemin plus long que celui qu'il aurait emprunté sans la modification géométrique du patch. Cette augmentation de la distance parcourue par le courant surfacique pour contourner les fentes introduites dans le patch entraîne une diminution de la fréquence de résonance de l'antenne. Ainsi, pour une même structure, l'antenne devient plus compacte [24].

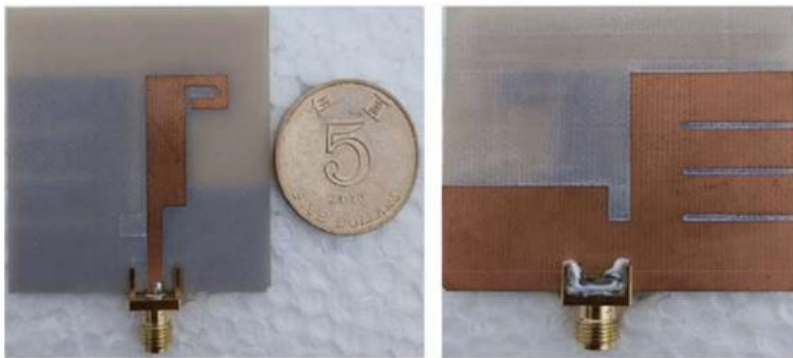


**Figure II. 20 Effet de l'insertion de fentes et d'encoches sur le courant surfacique d'une antenne planaire [24].**

L'introduction de fentes dans la structure rayonnante est une des techniques employées pour augmenter le chemin parcouru par les courants électriques. Cette méthode permet non seulement de contraindre les courants à contourner les fentes et donc de rallonger leur trajet, mais également d'induire des effets capacitifs et inductifs qui modifient l'impédance d'entrée de l'antenne. Cette technique est similaire à celle étudiée par Nguyen. En modifiant les caractéristiques de la fente, la fréquence de résonance peut être modifiée. En effet, plus la fente est longue, plus la fréquence de résonance diminue [24].

#### **II.10.1.2-/ Modification de la géométrie du plan de masse**

Tout comme pour l'élément rayonnant, la modification de la configuration du plan de masse permet également de réduire considérablement la taille de l'antenne. Une étude détaillée est réalisée pour analyser le comportement d'une antenne patch dont le plan de masse incorpore des fentes en méandre [32].

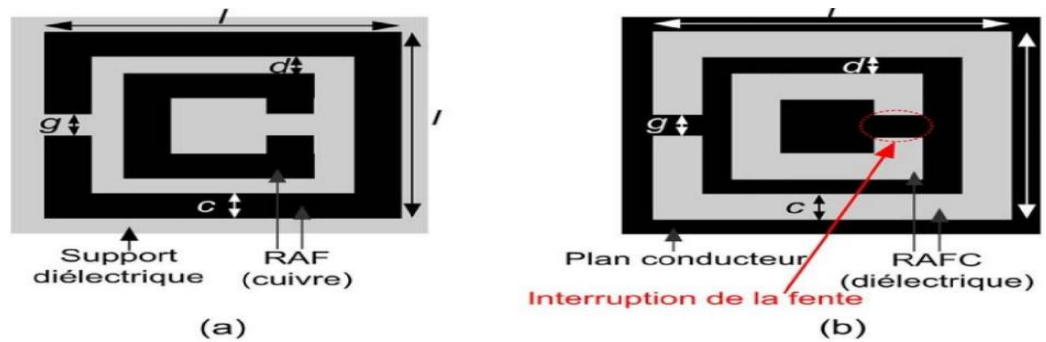


**Figure II. 21 Modification dans le patch et dans le plan de masse [32].**

#### **II.10.2-/ Technique n° 2: Miniaturisation avec les méta matériaux**

Les méta-matériaux sont des matériaux artificiels qui ont des propriétés électromagnétiques inhabituelles qui ne sont pas présentes dans les matériaux naturels. Ces matériaux sont constitués de structures artificielles miniatures, appelées "unités de métamatériaux", qui sont répétées à l'échelle nanométrique pour former une structure globale qui peut interagir avec les ondes électromagnétiques.

La miniaturisation des antennes avec les méta-matériaux est possible en utilisant des structures de métamatériaux pour créer des antennes plus petites, plus efficaces et plus légères que les antennes traditionnelles. Les méta-matériaux peuvent être utilisés pour améliorer les performances des antennes de plusieurs manières :



**Figure II. 22 structure d'une cellule meta [33].**

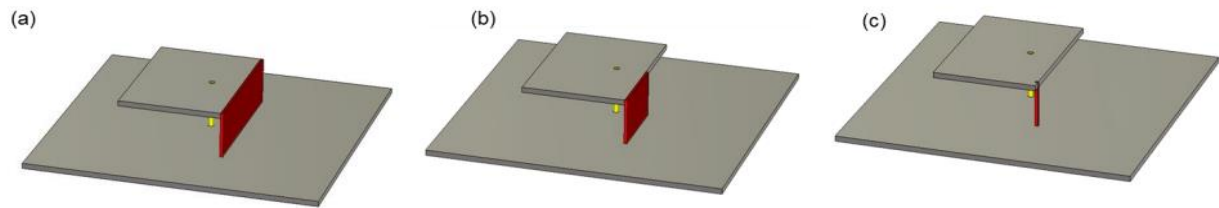
Réduction de la taille de l'antenne : Les méta-matériaux peuvent être utilisés pour réduire la taille globale de l'antenne. Les structures de métamatériaux peuvent être conçues pour concentrer le champ électromagnétique dans une zone plus petite, ce qui permet de réduire la taille globale de l'antenne.

Augmentation de l'efficacité de l'antenne : Les méta-matériaux peuvent également être utilisés pour augmenter l'efficacité de l'antenne, ce qui permet de réduire la puissance requise pour transmettre un signal. Les structures de métamatériaux peuvent être conçues pour augmenter le rayonnement de l'antenne dans la direction souhaitée, tout en réduisant le rayonnement dans les autres directions[32].

### II.10.3- / Technique n° 3: Court-circuit

L'introduction de courts-circuits électriques entre le plan de masse et l'élément rayonnant est une technique courante utilisée pour la miniaturisation des dispositifs antennaires. Cette méthode est basée sur le principe de la réduction de la longueur d'onde effective, qui est réalisée en augmentant la charge électrique du circuit. Les courts-circuits sont généralement de trois types : en forme de plan(a), de languette(b) ou filaire(c) comme la montre la figure II.2. Chacun de ces types peut avoir des avantages et des inconvénients en fonction de l'application spécifique et des contraintes de conception.

Cependant, il convient de noter que l'ajout d'un court-circuit électrique peut également avoir des effets indésirables, tels qu'une augmentation de la perte d'insertion, une réduction de la largeur de bande et une détérioration de la qualité du signal. Par conséquent, la conception d'un dispositif antenne doit être soigneusement évaluée pour optimiser ses performances en tenant compte des effets de l'introduction de courts-circuits électriques [32].



**Figure II. 23 les types de courts-circuits [32].**

Dans les cas (a) et (b) Il en résulte une antenne ayant une dite antenne quarte d'onde (réduction de dimension de 50 %).

## **II.12- / Réseau d'antenne**

### **II.12.1- / Définition**

Un réseau d'antennes est un système composé de plusieurs antennes individuelles connectées ensemble pour produire une réponse globale. Les antennes dans un réseau d'antennes sont généralement disposées de manière régulière, à des intervalles précis les unes des autres, pour créer une structure cohérente et efficace.

Le but d'un réseau d'antennes est de combiner les signaux provenant de différentes antennes pour améliorer les performances globales du système d'antennes. En utilisant plusieurs antennes, les réseaux d'antennes peuvent augmenter la directivité, la portée, la résolution ou la sensibilité du système, en fonction des besoins de l'application.

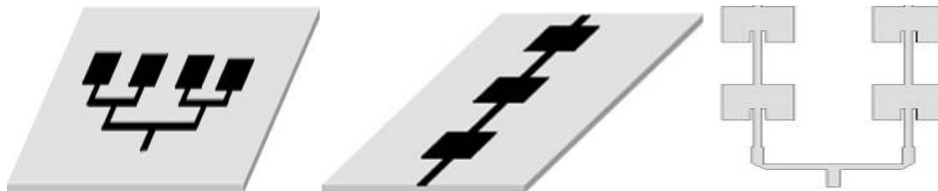
Il existe différents types de réseaux d'antennes, tels que les réseaux linéaires, les réseaux en grille, les réseaux circulaires et les réseaux de patches. Le choix du type de réseau d'antennes dépend des besoins spécifiques de l'application [34].

Les performances d'un réseau d'antennes dépendent de nombreux facteurs, tels que la taille des antennes individuelles, l'espacement entre les antennes, la phase et l'amplitude des signaux de commande, et les propriétés de rayonnement individuelles de chaque antenne.

### **II.12.1- / Les types alimentation**

Il existe plusieurs types d'alimentation pour les réseaux d'antennes, selon le type d'antenne utilisé et les exigences spécifiques de l'application. Voici quelques exemples :

- Alimentation en série : Dans ce type d'alimentation, les antennes individuelles du réseau sont connectées en série les unes aux autres, avec l'alimentation fournie à l'extrémité du réseau. Cette configuration est souvent utilisée pour les réseaux d'antennes dipôles [34].
- Alimentation en parallèle : Dans ce type d'alimentation, les antennes individuelles du réseau sont connectées en parallèle les unes aux autres, avec l'alimentation fournie au centre du réseau. Cette configuration est souvent utilisée pour les réseaux d'antennes à boucle.
- Alimentation Hybrid : c'est une combinaison entre l'alimentation en série et en parallèle .



**Figure II. 24 Alimentation d'un réseau d'antenne [35].**

## **II.12- / Conclusion**

La miniaturisation des antennes est un défi important dans le domaine de la communication sans fil. Les antennes sont essentielles pour de nombreuses applications, mais leur taille peut être un obstacle pour les appareils mobiles, les réseaux de capteurs, les drones, les wearables, les dispositifs IoT, et autres appareils électroniques. Les antennes miniatures doivent souvent être conçues pour fonctionner à des fréquences élevées et avec une large bande passante, tout en maintenant une efficacité de rayonnement suffisante.

Cependant, malgré les progrès réalisés dans le domaine de la miniaturisation des antennes, il reste encore de nombreux défis à relever. Les performances des antennes miniatures peuvent être affectées par des facteurs tels que les interférences, le bruit, l'effet de sol, la polarisation, et la directivité. Les techniques de miniaturisation peuvent également entraîner des compromis entre les performances, la taille et la complexité de la conception.

En conclusion, les antennes sont des composants essentiels pour la communication sans fil, et la miniaturisation des antennes est une tendance clé pour répondre aux besoins de l'industrie des appareils électroniques en termes de taille, de poids et de

performances. Les techniques de miniaturisation des antennes doivent être soigneusement évaluées pour chaque application spécifique, en prenant en compte les compromis entre les performances, la taille et la complexité de la conception. En résumé, ce chapitre avait pour objectif de clarifier les notions relatives aux antennes et aux différentes techniques de miniaturisation, dans le but de faciliter la compréhension des simulations d'antennes présentées dans la suite de ce mémoire.

# **Chapitre III**

## **Conception et Réalisation**

## Sommaire

III.1-/ Introduction.....	63
III.2-/Conception et simulation.....	63
III.2.1-/ Outils de simulation.....	63
III.2.2-/Conception d'une antenne patch rectangulaire.....	64
III.2.2.1-/ Adaptation de l'antenne patch .....	66
III.3-/ Miniaturisation de l'antenne patch.....	69
III.3.1-/ Par modification de la géométrie de l'antenne.....	69
III.3.1.1-/ Au niveau du patch .....	69
III.3.1.2-/ Au niveau de la masse .....	69
III.3.1.3-/Réseaux d'antenne .....	72
III.3.1.3.1-/Réseaux d'antennes à deux éléments.....	72
III.3.1.3.2-/Réseaux d'antenne à quatre éléments .....	75
III.3.1.4-/ Etude et comparaison.....	80
III.3.2-/ Par l'ajout des métamatériaux au niveau de l'antenne 2×2.....	81
III.3.2.1-/ Conception et simulation de la cellule SRR (Split Ring Resonator) .....	81
III.3.2.2-/Antenne miniature associée aux cellules SRR.....	82
III.3.2.2-/étude et comparaison .....	85
III.3.3-/ Par la méthode du DGS.....	85
III.3.3.1-/structure de l'antenne patch circulaire :.....	85
III.3.3.2-/Nouvelle structure miniaturisé.....	88
III.3.3.3-/Réseaux d'antenne a deux éléments : .....	91
III.3.3.4-/Réseaux d'antenne à quatre éléments .....	93
III.3.3.5-/Etude comparative .....	95
III.4-/ Réseau expérimentaux.....	96
III.4.1-/ Mesure expérimental .....	96
III.4.1.1-/Mesure du coefficient de réflexion S11 .....	96

III.4.1.2-/ Mesure du VSWR.....	98
III.5-/ Conclusion.....	99

### **III.1-/ Introduction**

Les progrès réalisés dans le domaine de la miniaturisation des antennes patch ont été rendus possibles grâce à des avancées technologiques telles que l'utilisation de matériaux à haute permittivité, la modification de la forme et de la structure de l'antenne, ainsi que l'optimisation des techniques de fabrication. Ces méthodes permettent de réduire les dimensions physiques de l'antenne tout en maintenant ou en améliorant ses performances en termes de bande passante, de gain et de directivité.

Dans ce chapitre, nous nous attellerons à la conception d'une antenne patch rectangulaire grâce au logiciel CST Microwave Studio comme choix d'outil de simulation. Les dimensions seront calculées à l'aide de formules empiriques afin d'obtenir la fréquence d'opération souhaitée. Par la suite, nous pourrons modifier certains paramètres de l'antenne pour répondre aux exigences spécifiques de l'application utilisée, l'étape suivante consiste à la miniaturisation de l'antenne à l'aide de plusieurs méthodes que nous avons évoqué dans le chapitre précédent pour obtenir au final une antenne patch miniaturisée à la fréquence désirée. La dernière partie sera quant à elle consacrée aux différents réseaux d'antennes, dans le but d'augmenter et d'améliorer le gain ainsi que la directivité et faire la réalisation et les mesures de cette dernière.

### **III.2-/Conception et simulation**

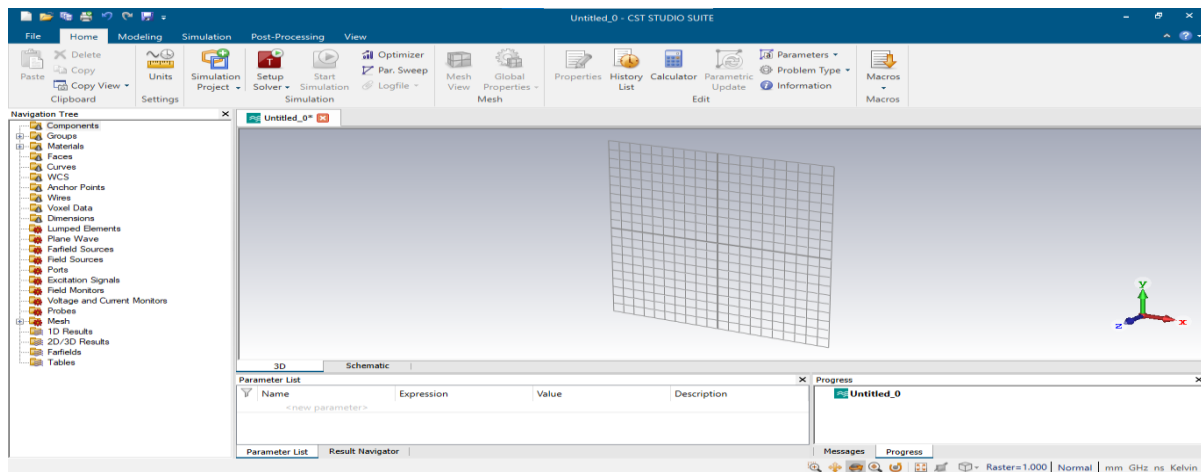
Pour cette étude, nous allons concevoir des antennes patch rectangulaire et circulaire afin de mettre en évidence les effets de la miniaturisation sur cette dernière. Pour cela nous allons utiliser différentes méthodes.

#### **III.2.1-/ Outils de simulation**

Nous connaissons plusieurs outils de simulation et de conception d'antennes. Parmi eux nous pouvons citer : le HFSS, IE3D, FEKO et CST MICROWAVESTUDIO.

Dans notre étude nous allons nous concentrer sur le logiciel CST MICROWAVESTUDIO (figure III.1) qui est un outil spécialisé pour la conception, la simulation et l'optimisation de systèmes électromagnétique. Il est utilisé dans les principales entreprises de technologie et d'ingénierie du monde entier.

Les deux principales caractéristiques du CST sont : la précision et la rapidité [36].



**Figure III. 1 Outil de simulation CST studio suite 2019.**

### III.2.2- /Conception d'une antenne patch rectangulaire

Notre étude consiste en premier lieu à proposer une antenne patch rectangulaire qui fonctionne à la fréquence 5.8 GHz largement utilisé dans les domaines IoT. Cette antenne doit répondre aux cahier de charge suivantes :

- La permittivité relative du substrat  $\epsilon_r=4.3$  de type FR4.
- La hauteur du substrat diélectrique  $h=1.6\text{mm}$ .
- L'impédance d'entrée  $Z_c =50\Omega$ .

Notre structure de base ci-dessous (Figure III.2) se compose d'une antenne patch imprimé sur un substrat diélectrique en matériau FR4, d'une épaisseur de 1,6mm, d'un plan de masse et d'une alimentation avec une ligne micro-ruban.

Le tableau suivant indique les différents paramètres de l'antenne patch initiale :

Paramètres	Wg	Lg	Wp	Lp	Wa	La
Dimensions (mm)	27.48	21.48	15.88	11.89	3.137	9.18

**Tableau III. 1 Les dimensions de l'antenne initial.**

Avec :

- **Wg** : la largeur du substrat.
- **Lg** : la longueur du substrat.
- **Wp** : la largeur du patch.
- **Lp** : la longueur du patch.
- **Wa** : La largeur de la ligne micro ruban.
- **La** : la longueur de la ligne micro ruban.

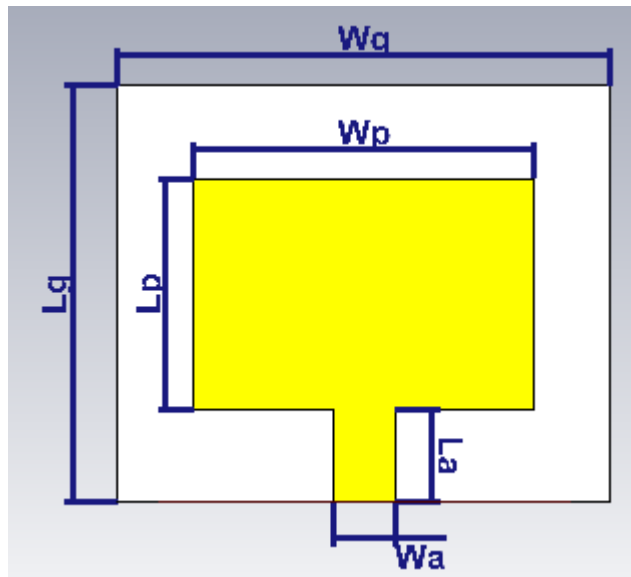


Figure III. 2 Structure de l'antenne patch initial.

➤ **Coefficient de réflexion S11 :**

La figure (III.3) représente le résultat du coefficient de réflexion S11 de valeur -6.55 exprimé en décibels (dB). Il décrit dans quelle mesure les ondes sont réfléchies ou transmises depuis un appareil.

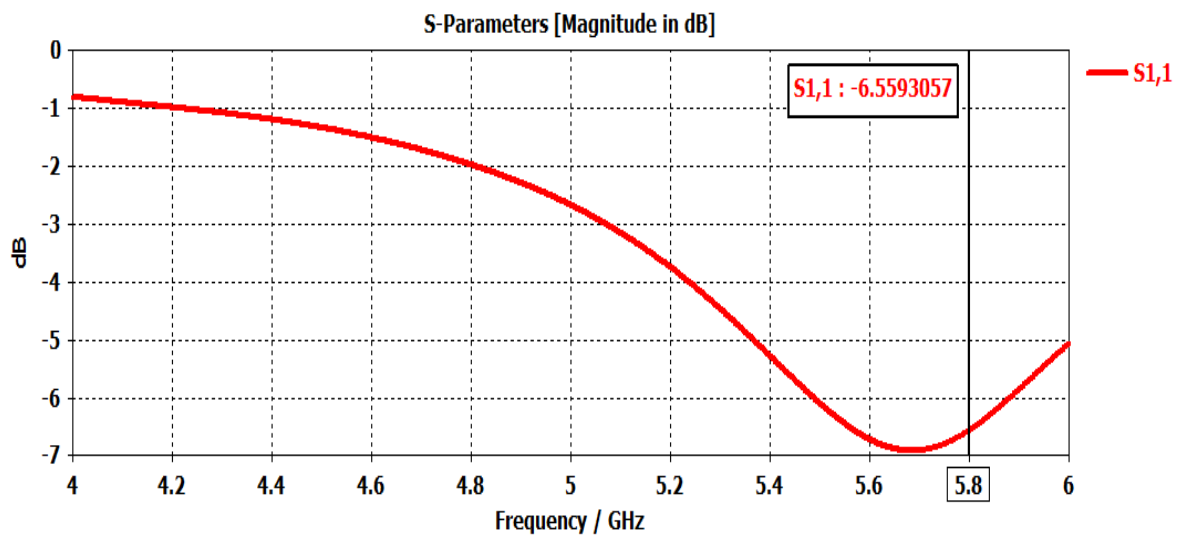
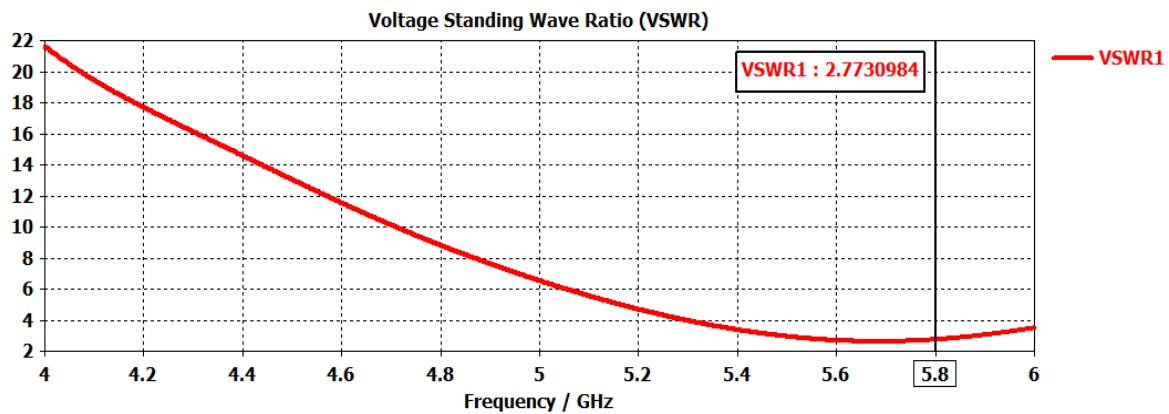


Figure III. 3 Coefficient de réflexion de l'antenne patch initial.

➤ **Rapport d'ondes stationnaire VSWR :**

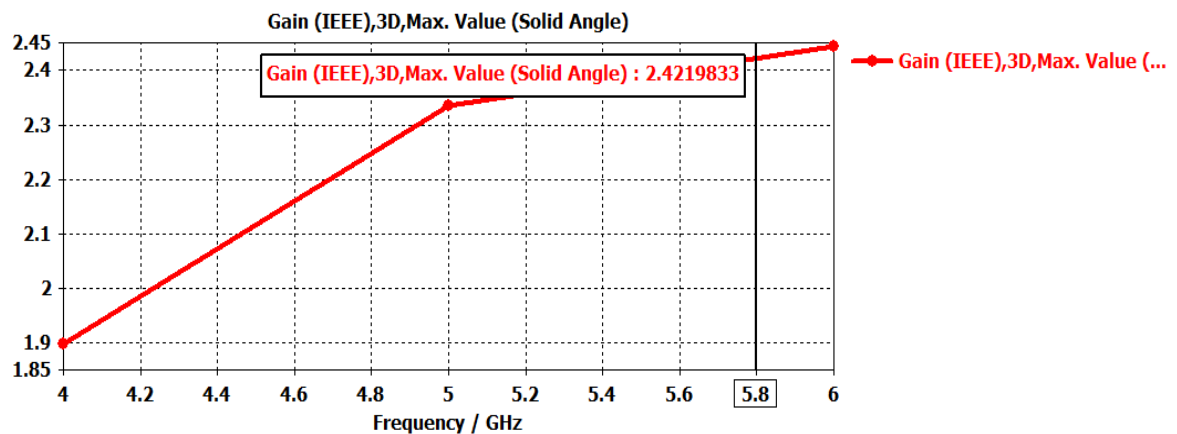
La figure (III.4) représente Le rapport d'ondes stationnaires VSWR en fonction de la fréquence. Nous pouvons lire sur la figure III.4, une valeur de 2.77. Cette valeur étant supérieur à 2, cela témoigne un mauvais résultat pour notre étude.



**Figure III. 4** Le rapport d'onde stationnaire VSWR du patch initial.

➤ **Le Gain :**

La figure III.5 montre la variation du gain de l'antenne en fonction de la fréquence. Nous avons obtenu une bonne valeur de 2.42dBi à la fréquence 5.8 GHz.



**Figure III. 5** Gain en fonction de la fréquence du patch initial.

**III.2.2.1- / Adaptation de l'antenne patch**

A la lumière de ces résultats, nous allons apporter un correctif à travers la mise en place d'encoches insérées au niveau de la ligne micro ruban (voir la figure III.6) afin d'ajuster la fréquence et l'adaptation de l'antenne à la fréquence désirée à 5.8 GHz.

Le tableau suivant représente les nouveaux paramètres de l'antenne patch :

Paramètres	Wg	Lg	Wp	Lp	Wa	Fi	GPF
Dimensions (mm)	25.48	21.48	17.6	11.88	3.137	4.38	0.05

**Tableau III. 2** Les dimensions d'antenne avec encoche.

Avec : **Fi** : la longueur de l'encoche et **GPF** : le largeur de l'encoche.

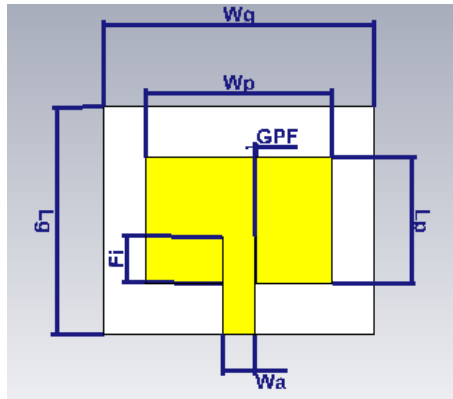


Figure III. 6 structure de l'antenne patch avec encoche.

➤ **Coefficient de réflexion S11 :**

Le S11 est généralement utilisé pour caractériser la performance d'une antenne. Une faible valeur S11 indique une bonne correspondance d'impédance entre l'antenne et le système. Comme le montre la figure (III.7) nous avons une multi bande avec une bonne adaptation S11= -20.58 dB à la fréquence désirée  $f=5.8$  GHz et S11=-13 dB à la fréquence 7.9GHz.

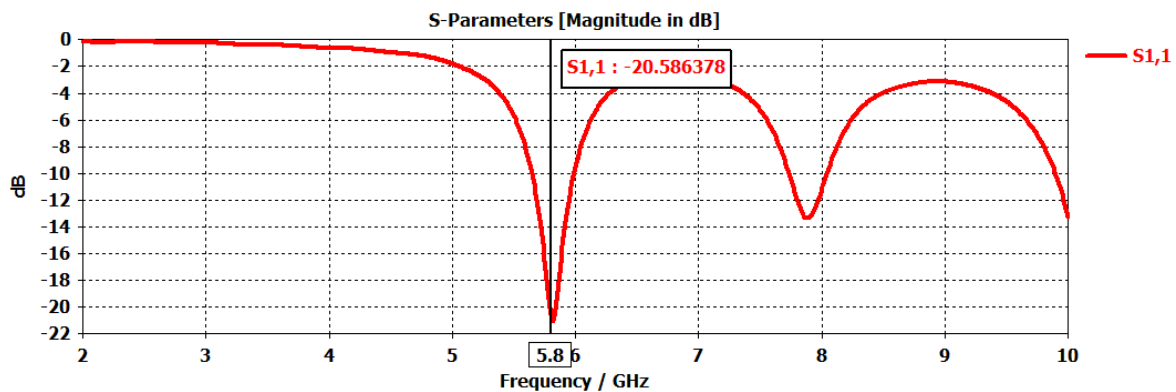


Figure III. 7 coefficient de réflexion de l'antenne patch avec encoche.

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

La figure III.8 illustre le rapport d'onde stationnaire de valeur égale à 1.20 qui a une bonne adaptation d'impédance entre l'antenne et la ligne d'alimentation, car elle se situe entre la plage de 1 à 2.

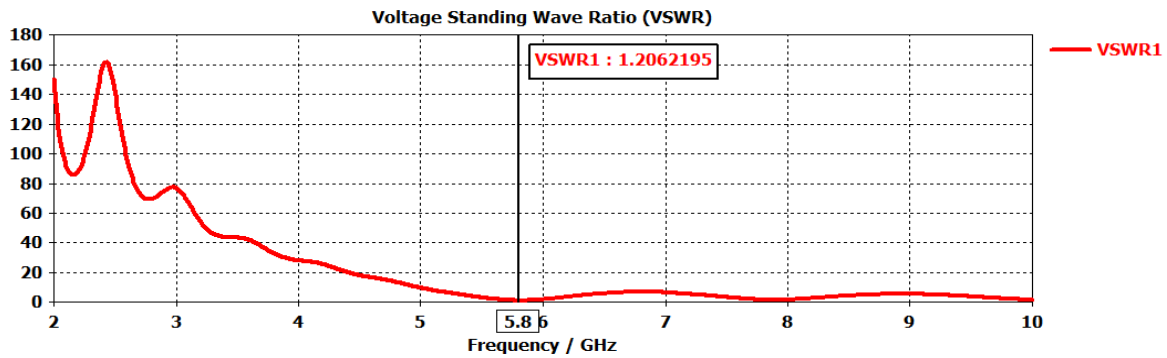


Figure III. 8 VSWR de l'antenne patch avec encoche.

➤ **Le gain :**

La Figure III.9 illustre la variation du gain en fonction de la fréquence. Nous avons obtenu à la fréquence de 5.8 GHz un bon gain avoisinant les 2.55 dBi. Les résultats observés témoignent donc l'efficacité de cette antenne.

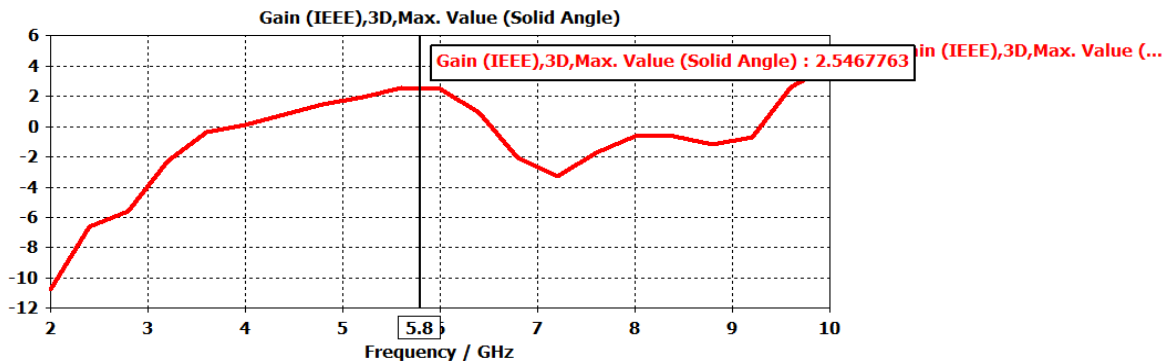
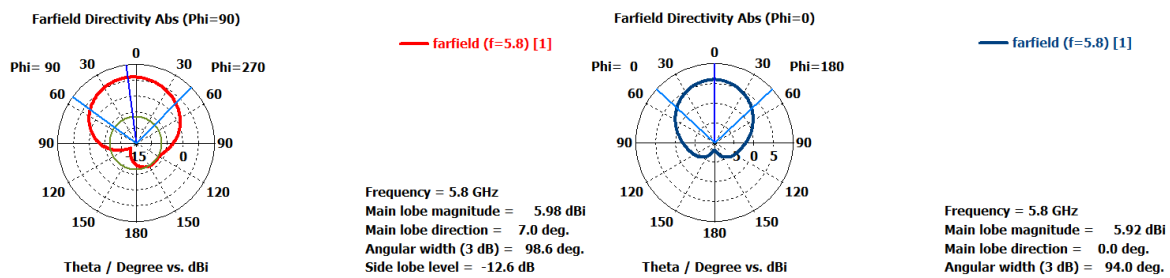
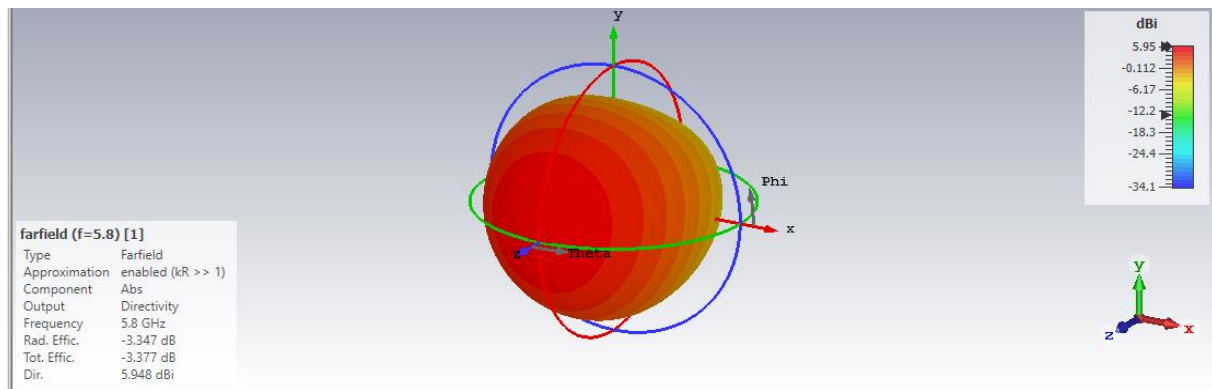


Figure III. 9 Gain de l'antenne patch avec encoche.

➤ **Le diagramme de rayonnement :**

La figure III.10 nous montre le diagramme de rayonnement en 2D et en 3D de l'antenne adapté à la fréquence 5.8 GHz, nous pouvons dire que le diagramme de rayonnement de l'antenne est pratiquement omnidirectionnel dans les deux plan H( $\phi=90$ ) et E( $\phi=0$ ). Il présente une directivité de 5.94 dBi et un angle d'ouverture à 3 dB de 94 degrés dans le plan E( $\phi=0$ ) et de 98.6 degrés dans le plan H( $\phi=90$ ).



**Figure III. 10 Diagramme de rayonnement en 3D et polaire de l'antenne avec encoche.**

### III.3- / Miniaturisation de l'antenne patch

De nos jours, les antennes sont de plus en plus utilisées dans différents domaines nécessitant des modèles réduits. Ces nouvelles contraintes nous obligent à les miniaturiser pour les intégrer sur diverses fréquences. Pour cela, nous allons voir plusieurs techniques de miniaturisation que nous appliquerons par la suite.

#### III.3.1- / Par modification de la géométrie de l'antenne

Cette technique de miniaturisation est la plus répandue actuellement, elle consiste à ajouter des fentes au niveau du patch et de la masse.

##### III.3.1.1- / Au niveau du patch

La figure III.11 représente la nouvelle structure de l'antenne après avoir effectué des modifications au niveau du patch. Nous allons ajouter des cercles aux extrémités, de rayon 3.25mm et des rectangles aux milieux, de dimension 4mm x 10mm.

##### III.3.1.2- / Au niveau de la masse

Des modifications peuvent également être apportés pour réduire la taille globale d'une antenne. En introduisant des fentes dans le plan de masse, la longueur électrique effective d'une antenne peut être augmentée. Cela permet d'atteindre les mêmes

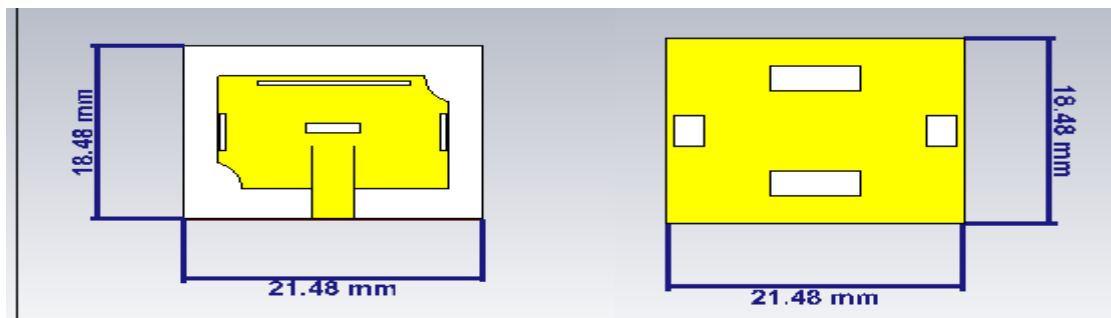
performances qu'une antenne plus grande sans pour autant occuper le même espace physique.

Dans notre cas, (Figure III.11) nous allons ajouter deux rectangles parallèles à droite et à gauche de 3mm avec une largeur de 2.25mm et deux autres rectangles parallèles de 6.5mm et avec une largeur de 2.5mm.

Les nouvelles dimensions de l'antenne patch miniaturisée sont les suivant :

Paramètre	Wg	Lg	Wp	Lp	Taux de miniaturisation
Dimensions (mm)	21.48	18.48	16.6	11.88	27%

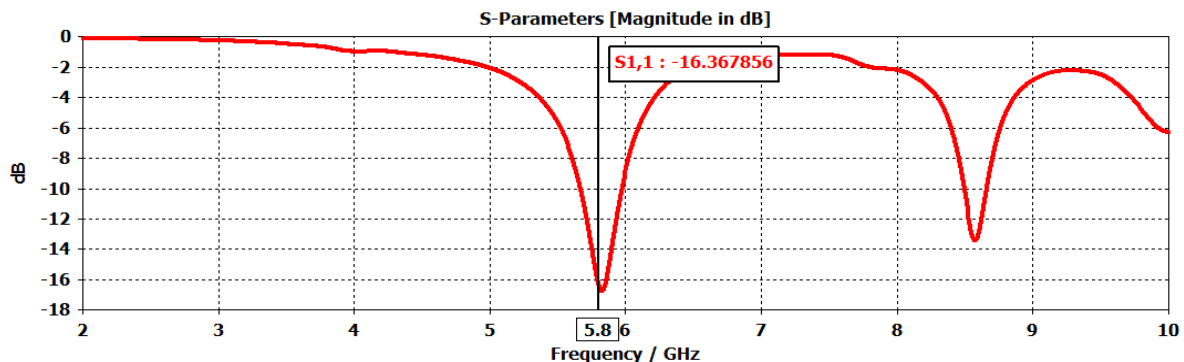
**Tableau III. 3 Les nouvelles dimensions de l'antenne miniaturisée.**



**Figure III. 11 Antenne miniaturisé en patch (à gauche) /à la masse (à droite).**

➤ **Coefficient de réflexion S11 :**

La figure III.12 représente le coefficient de réflexion S11 multi bande de -16.36dB à la fréquence de résonance de 5.8 GHz avec une largeur de bande de fréquence variant de 5.69 à 5.96 GHz et -13dB à la fréquence de résonance 8.5 GHz. Ce qui induit à un résultat satisfaisant pour notre étude.



**Figure III. 12 coefficient de réflexion de la nouvelle structure.**

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

La figure III.13 ci-dessous, indique le Rapport d'Onde Stationnaire de valeur de 1.358 inférieur à 2 ce qui montre une bonne adaptation d'impédance entre l'antenne et la ligne de transmission.

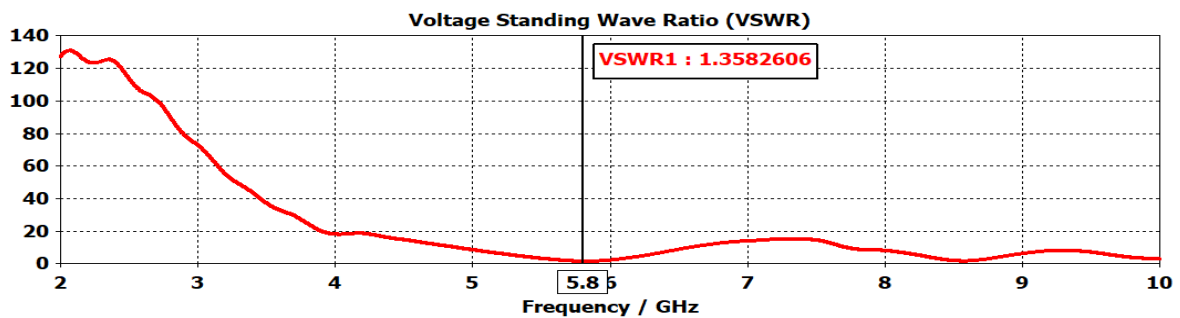


Figure III. 13 VSWR de la nouvelle structure.

➤ **Gain :**

D'après la figure III.14 ci-dessous, le gain est égal à 1.98dBi. Ce résultat correspond aux attentes de notre étude.

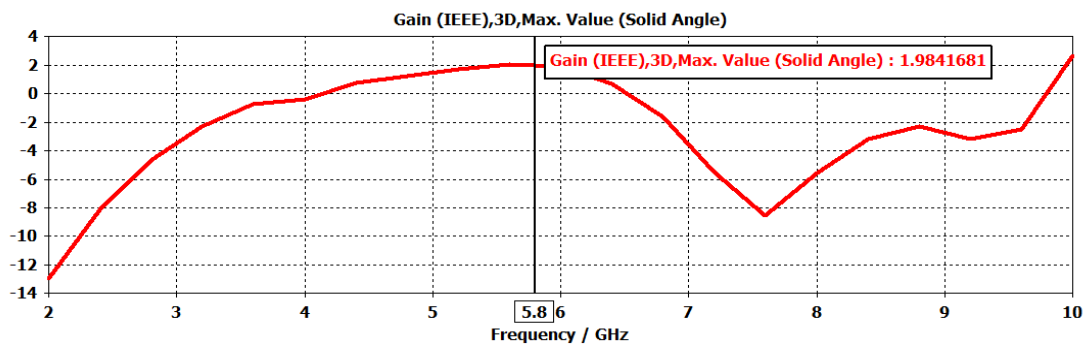


Figure III. 14 le gain en fonction de la fréquence de la nouvelle structure

➤ **Le diagramme de rayonnement :**

La figure III.15 ci-dessous présente le diagramme de rayonnement de l'antenne en 2D et 3D. Nous remarquons que l'antenne présente un rayonnement quasi omnidirectionnel sur le plan E( $\phi=0$ ) et le plan H( $\phi=90$ ) avec une directivité de 5.97dBi, un angle d'ouverture à 3 dB de 95.1 degrés pour le plan E( $\phi=0$ ) et 96.5 degrés pour le plan H( $\phi=90$ ).

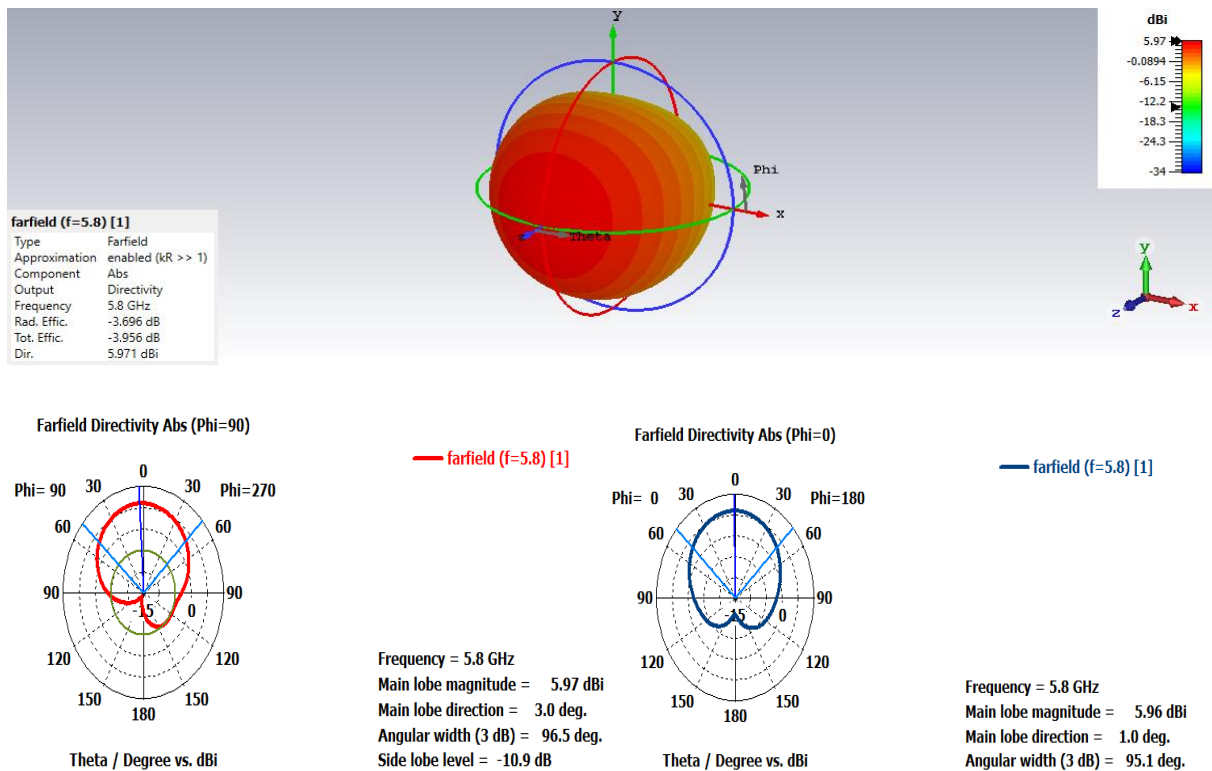


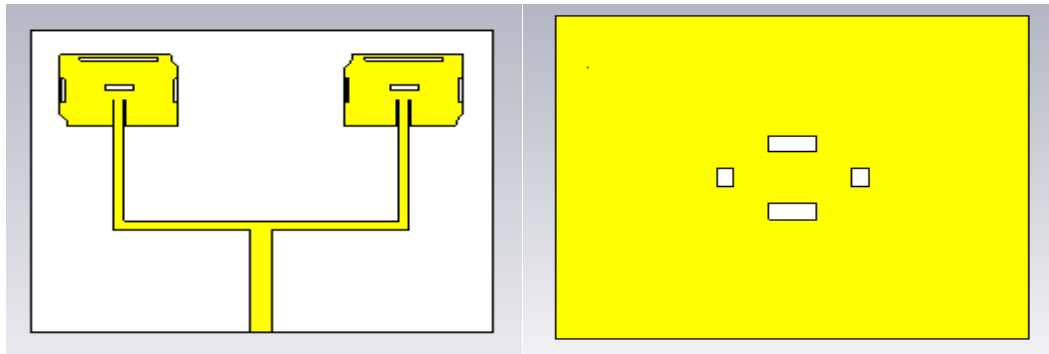
Figure III. 15 Le diagramme de rayonnement.

### III.3.1.3-/Réseaux d'antenne

Un réseau d'antennes est un système de plusieurs antennes connectées les unes aux autres pour former un ensemble fonctionnant de manière coordonnée. L'objectif d'un réseau d'antennes vise à améliorer davantage les performances d'une antenne. Dans notre cas, nous allons l'utiliser pour améliorer le gain et la directivité de l'antenne.

#### III.3.1.3.1-/Réseaux d'antennes à deux éléments

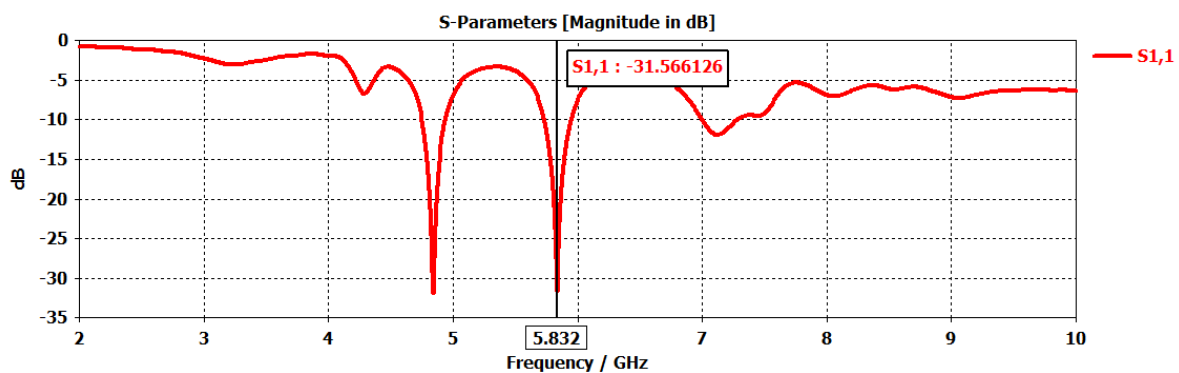
Un réseau d'antennes à deux éléments est un type de réseau qui est composé de deux antennes en parallèles ou en série. Dans notre cas, figure III.16, nous avons réalisé un réseau composé de deux éléments parallèles à partir de l'antenne précédente en conservant les mêmes paramètres. Nous disposons d'une alimentation d'entrée de  $50\Omega$ , une alimentation entre les antennes de  $75\Omega$  et une alimentation d'antennes de  $75\Omega$  aussi.



**Figure III. 16 Structure d'un réseau d'antennes à deux éléments.**

➤ **Coefficient de réflexion S11 :**

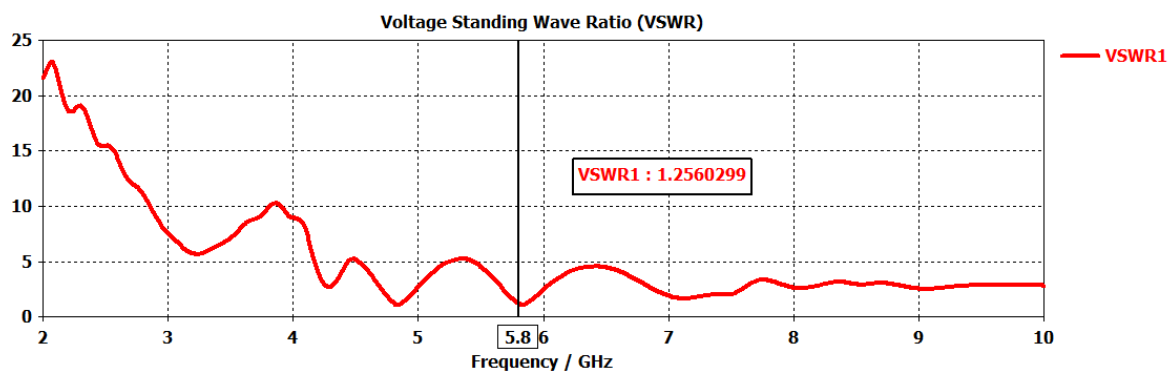
La figure III.17 représente un coefficient de réflexion S11 multi bande qui est égale à -31.56 dB à la fréquence 5.83 GHz qui est un peu décalé à notre fréquence de résonance 5.8 GHz et -32 dB à la fréquence 4.8 GHz, qui est un bon résultat pour notre étude.



**Figure III. 17 coefficient de réflexion de deux éléments.**

➤ **VSWR :**

D'après la figure III.18 ci-dessous, le taux d'onde stationnaire d'alimentation est égal à 1.25. Ce qui indique une bonne adaptation d'impédance entre l'antenne et la ligne de transmission.



**Figure III. 18 VSWR de l'antenne a deux éléments.**

➤ **Gain :**

La figure III.19 ci-dessous, représente le gain en fonction de la fréquence, nous pouvons remarquer un très bon gain allant jusqu'à 4.83dBi.

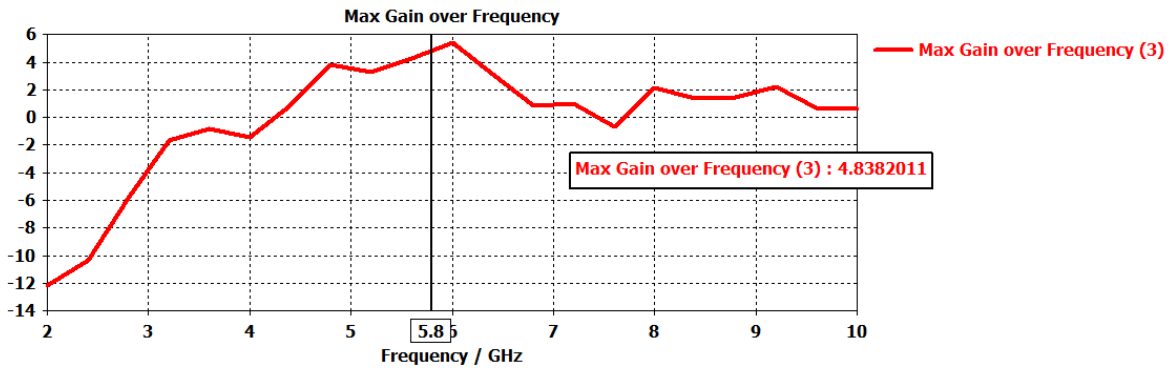
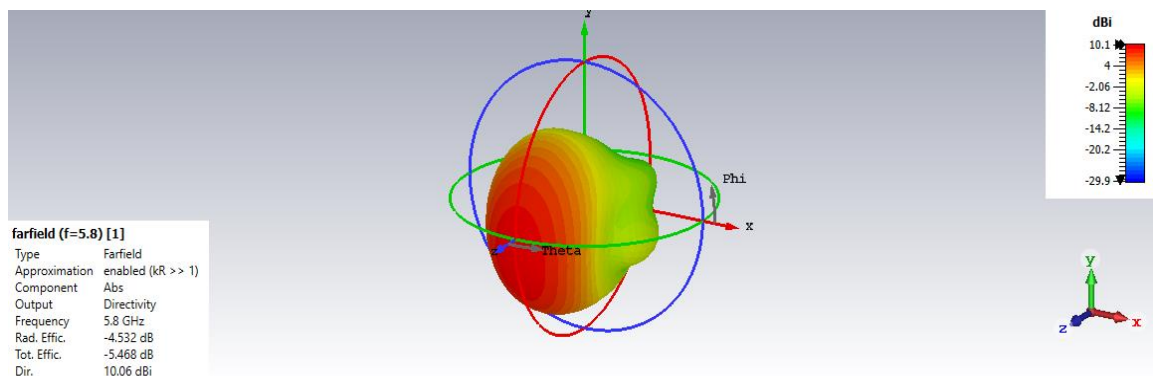


Figure III. 19 le gain en fonction de la fréquence.

➤ **Le diagramme de rayonnement :**

Ce diagramme de rayonnement en 2D et en 3D a une directivité de 10dB. Nous remarquons que pour le plan E ( $\phi=0$ ) la magnitude du lobe principal de l'antenne est de 9.85dBi, une largeur angulaire de 40.9 degrés avec un lobe latéral de -18.3dB et un diagramme de rayonnement quasi-omnidirectionnel. Pour le plan H( $\phi=90$ ) nous avons une magnitude du lobe principal de 10.1dBi, une largeur angulaire de 71.4 degrés et un diagramme de rayonnement quasi-omnidirectionnel.



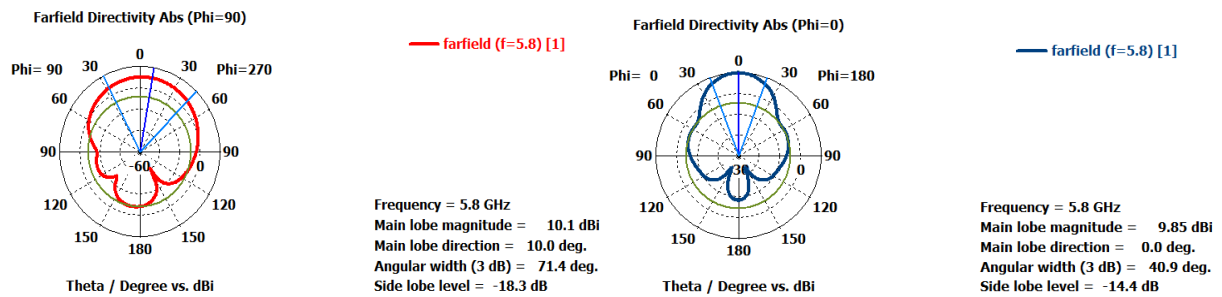


Figure III. 20 Le diagramme de rayonnement.

### III.3.1.3.2- /Réseaux d'antenne à quatre éléments

Une antenne à quatre éléments (2x2) correspond à un réseau de deux antennes disposées dans une matrice 2x2, dans laquelle chaque rangée et chaque colonne compte deux éléments d'antenne. Nous rappelons qu'il existe différents modèles d'antennes 2x2.

En ce qui concerne notre étude, nous allons étudier deux types de réseaux d'antennes qui sont : le modèle d'antennes hybrides et le modèle d'antennes parallèle. Nous allons par la suite faire une comparaison entre eux.

#### ➤ Réseaux d'antenne à quatre éléments en parallèle :

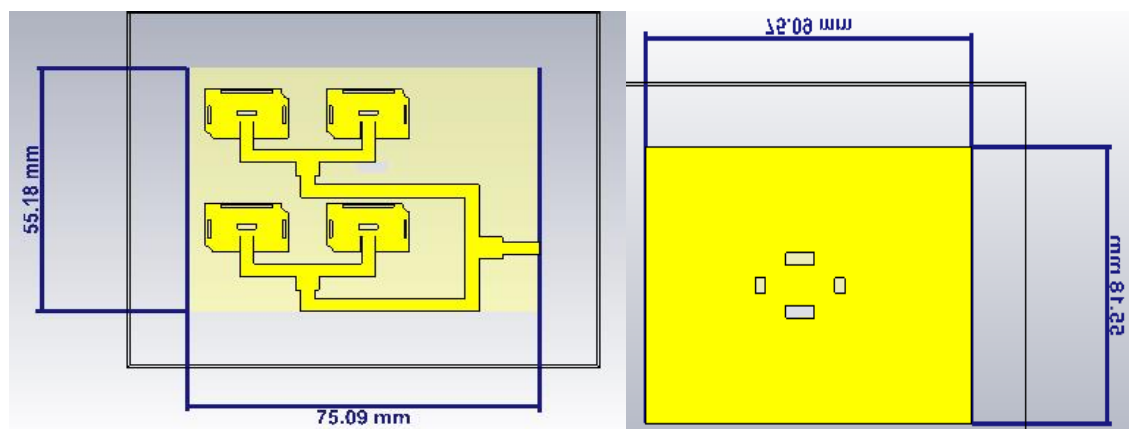
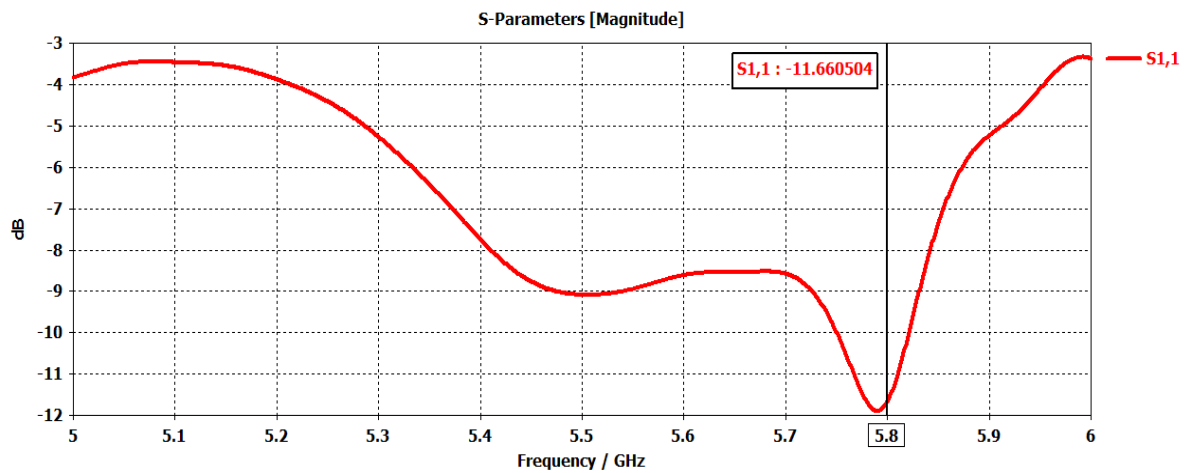


Figure III. 21 Structure d'un réseau à quatre éléments (à gauche) / Plan de masse (à droite).

#### ➤ Coefficient de réflexion :

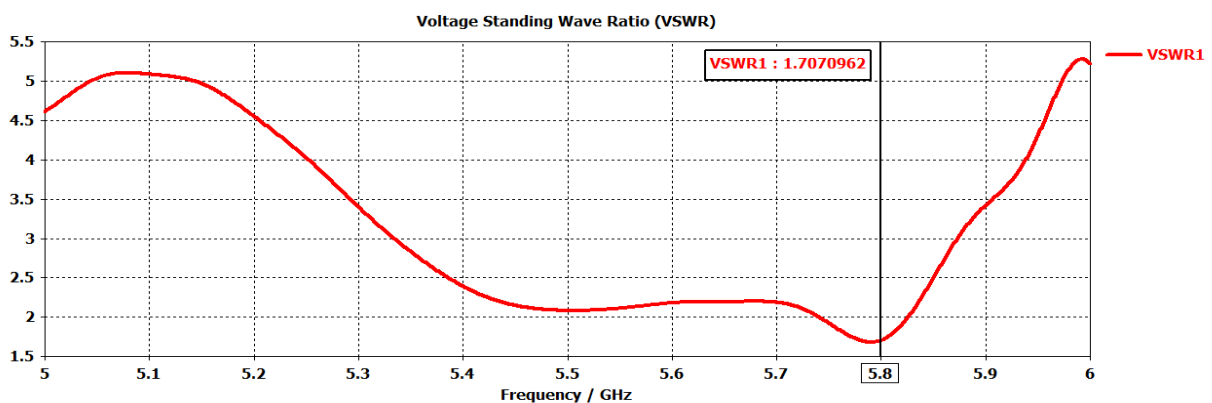
La figure III.22 illustre le coefficient de réflexion en fonction de la fréquence de résonance. Nous constatons que les performances de l'antenne se situent à la limite de ce qui acceptable, avec une adaptation à -11.66 dB.



**Figure III. 22 Coefficient de réflexion à quatre éléments.**

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

D'après la figure III.23, le rapport d'onde stationnaire est égal à 1.70. Cette donnée est inférieure à 2, cela indique une excellente adaptation d'impédance de l'antenne à la source d'alimentation, ce qui permet de maximiser le transfert d'énergie entre ces dernières.



**Figure III. 23 VSWR de l'antenne a quatre éléments.**

➤ **Gain :**

La figure III.24, nous montre des résultats plus précis pour notre simulation avec un excellent gain de 9.16 dBi à la fréquence de résonance 5.8 GHz. Nous pouvons toutefois noter que le gain de l'antenne est largement positif sur toute la plage de fréquences allant de 5 GHz à 6 GHz avec une valeur minimal de 7,8 dBi.

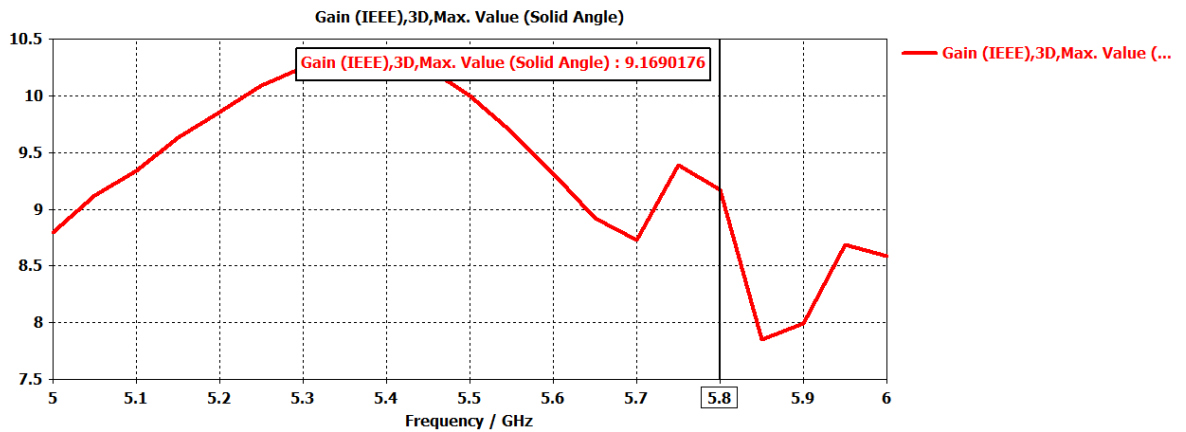
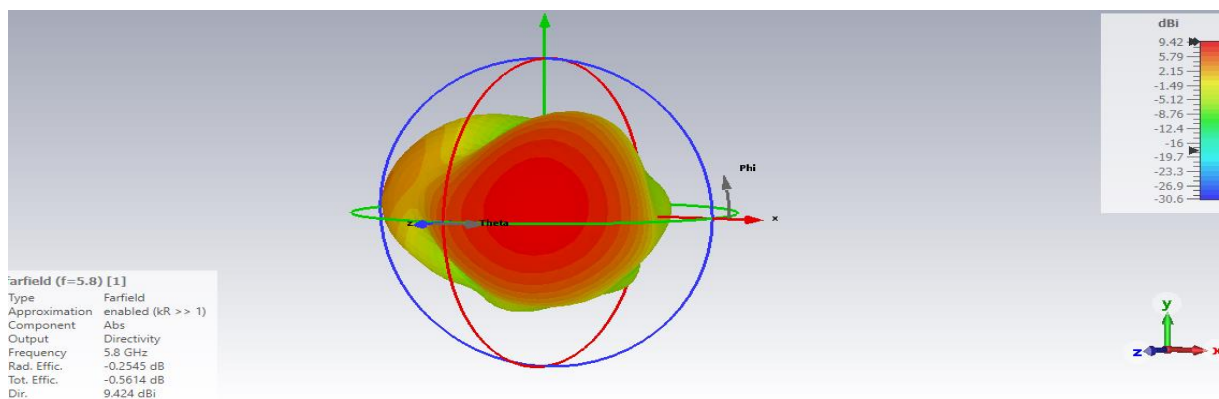


Figure III. 24 Le gain en fonction de la fréquence.

➤ Le diagramme de rayonnement :

La figure III.25 représente le diagramme de rayonnement de l'antenne en 2D et en 3D avec une directivité de 9.42 dBi. Nous remarquons que pour plan E ( $\phi=0$ ) la magnitude du lobe principal de l'antenne est de 9.29 dBi, avec une direction du lobe principal de 29 degrés, une largeur angulaire de 53.9 degrés avec lobe latéral de -6.4 dB avec un diagramme de rayonnement quasi-omnidirectionnel. Pour le plan H ( $\phi=90$ ) nous avons une magnitude du lobe principal de 6.31dBi avec une direction du lobe principale de 2 degrés, une largeur angulaire de 49.4 degrés, avec un diagramme de rayonnement quasi-omnidirectionnelle aussi.



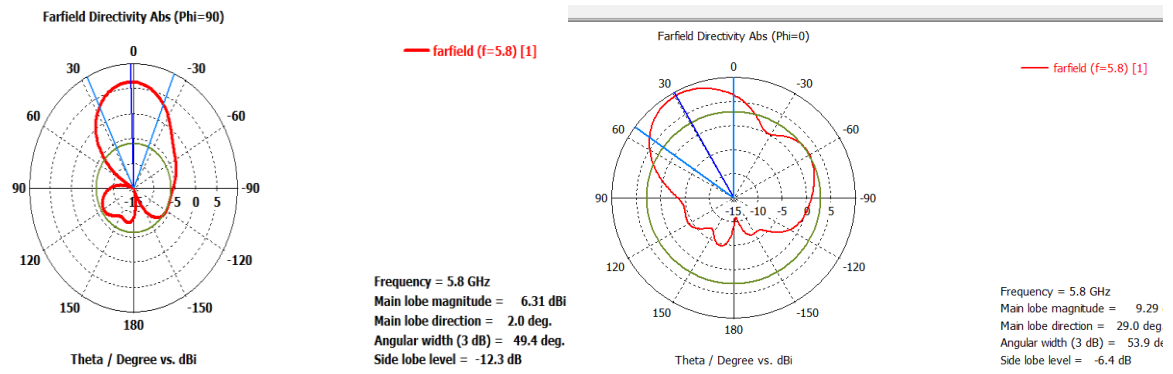


Figure III. 25 Le diagramme de rayonnement.

➤ Réseaux d'antenne à quatre éléments en hybride :

Un réseau d'antenne hybride est une combinaison entre les réseaux d'antenne en série et en parallèle.

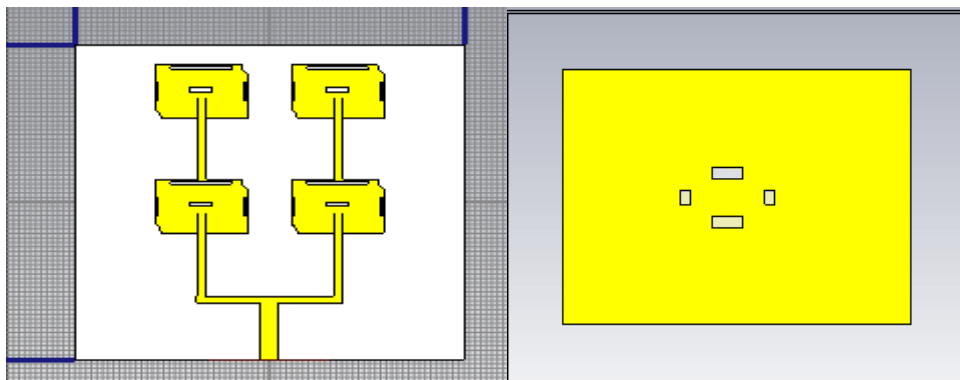


Figure III. 26 Structure d'un réseau à quatre éléments.

➤ Coefficient de réflexion :

Cette figure III.27 représente le coefficient de réflexion S11 multi bande avec plusieurs fréquence de résonance 4.2 GHz avec un S11 de -14 dB, 7.4 GHz avec un S11 de -11 dB et la fréquence désiré 5.8 GHz avec un S11 de -23.60 dB qui un bon résultat pour notre étude.

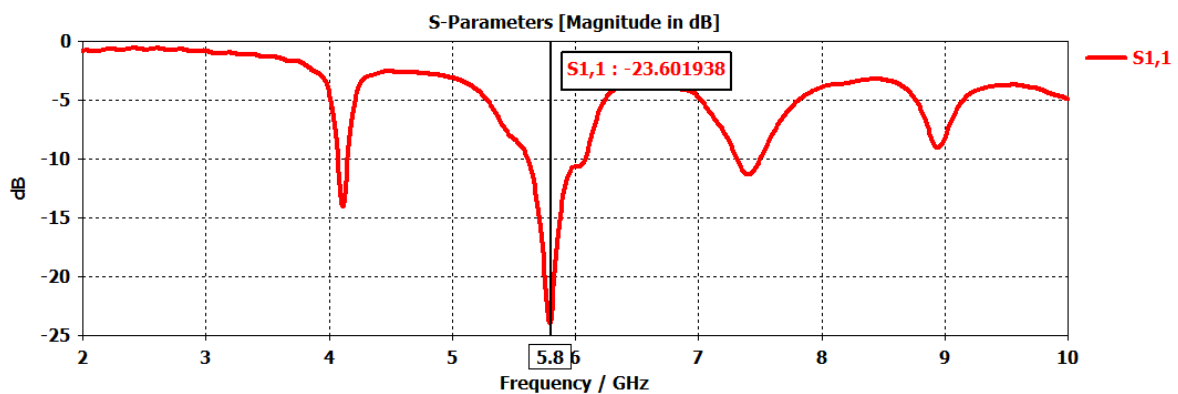
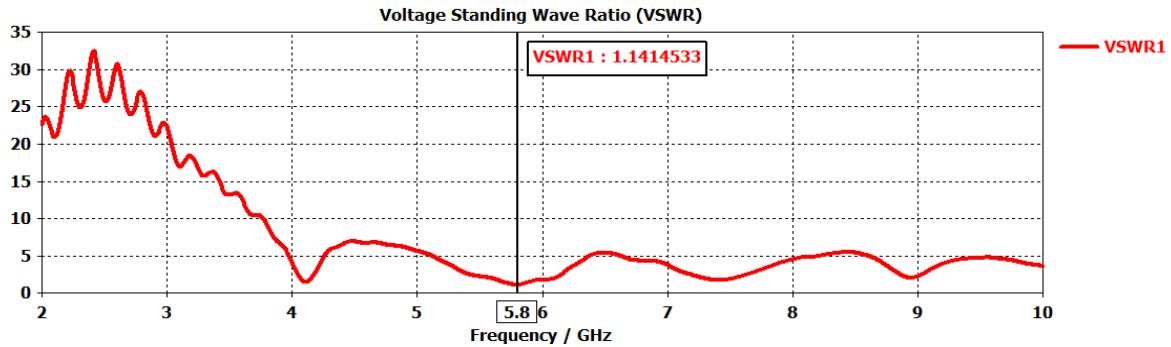


Figure III. 27 Coefficient de réflexion à quatre éléments.

➤ **VSWR :**

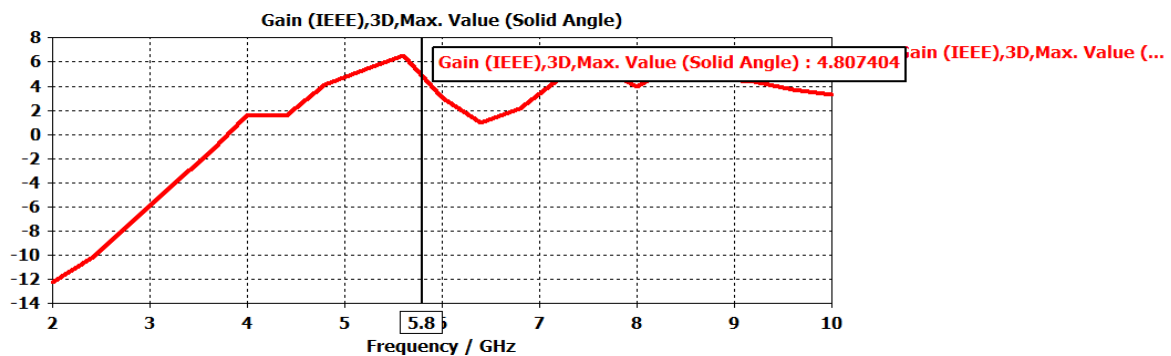
La figure III.28 ci-dessous, indique le Rapport d'Onde Stationnaire à 1.14 qui est inférieur à 2, ce qui montre une bonne adaptation d'impédance entre l'antenne et la ligne de transmission.



**Figure III. 28 VSWR de l'antenne à quatre éléments hybride.**

➤ **Gain :**

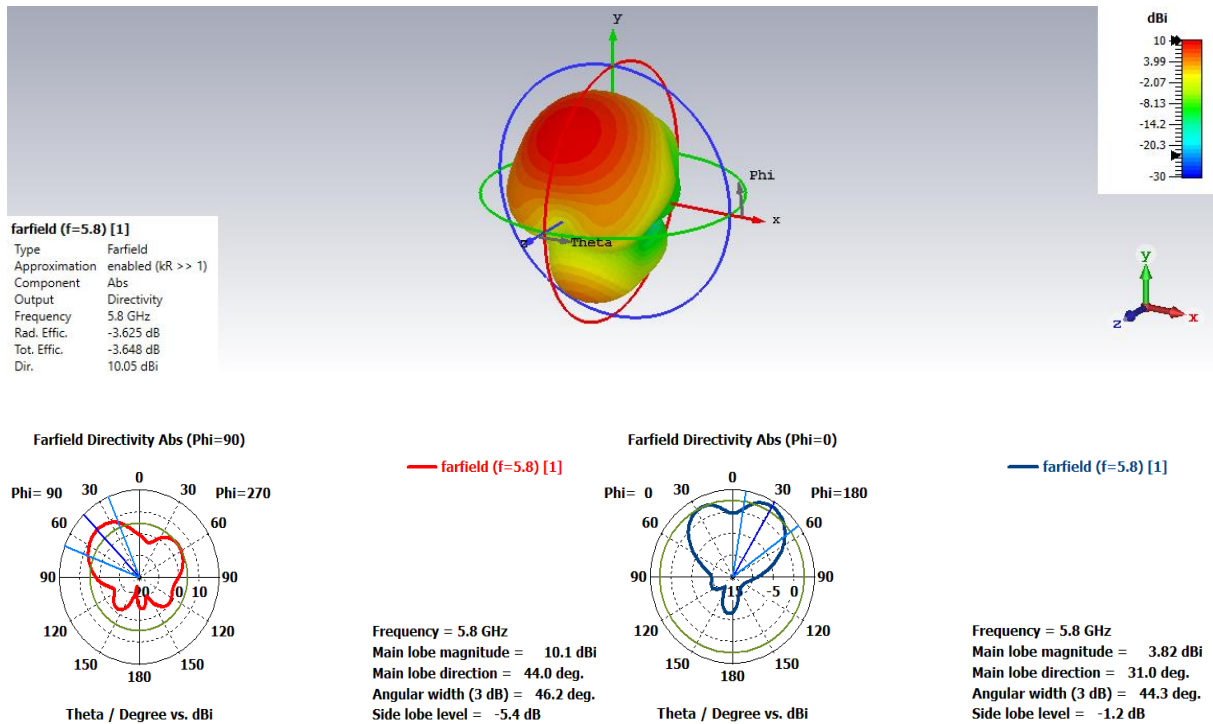
D'après la figure III.29, le gain est égal à 4.80 dBi Ce qui correspond aux exigences de notre étude.



**Figure III. 29 gain en fonction de la fréquence.**

➤ **Le diagramme de rayonnement :**

La figure III.30 représente le diagramme de rayonnement de l'antenne en 2D et en 3D pour les deux plan (H et E) qui ont un diagramme de rayonnement quasi-omnidirectionnel avec une directivité de 10.05 dBi. Nous remarquons que pour plan E ( $\phi=0$ ) la magnitude du lobe principal de l'antenne est de 3.82 dBi, la direction du lobe principal à 31 degrés, une largeur angulaire de 44.3 degrés. Pour le plan H ( $\phi=90$ ) nous avons une magnitude du lobe principal de 10.1 dBi avec une direction du lobe principale de 44 degrés, une largeur angulaire de 46.2 degrés.



**Figure III. 30 Le diagramme de rayonnement.**

### III.3.1.4- / Etude et comparaison

Antenne	Gain(dB)	Adaptation(dB)	VSWR	La bande passante	Dimension (Taux de miniaturisation)
Antenne miniaturisée	1.98	-16.36	1.35	5.16%	18.48x21.48 (27%)
Antenne à deux éléments	4.83	-18.90	1.25	6.51%	50x65 (28%)
Antenne à quatre éléments parallèles	9.16	-11.66	1.7	1.38%	55x75 (28%)
Antenne à quatre éléments hybrides	4.80	-23.60	1.14	10.34%	70x70 (28%)

**Tableau III. 4 Comparaison entre les antennes rectangulaires.**

Il est clair à partir des résultats ci-dessus et du tableau de comparaison que les résultats des différents paramètres d'antenne se sont améliorés pour le gain, en augmentant le nombre d'élément dans les réseaux le gain ne baisse d'augmenter par contre l'adaptation est de plus en plus basse ce qui est normale, plus le gain augmente plus l'adaptation baisse Comme nous pouvons l'observer aussi en ce qui concerne

l'adaptation celle du schéma est hybride et meilleur que celle du parallèle, en revanche pour le gain ce n'est pas le cas.

### III.3.2- / Par l'ajout des métamatériaux au niveau de l'antenne 2×2

#### III.3.2.1- / Conception et simulation de la cellule SRR (Split Ring Resonator)

Le SRR est un dispositif électromagnétique artificiel qui peut être utilisé pour manipuler les ondes électromagnétiques, telles que les ondes radio, les micro-ondes et les ondes lumineuses. Il est également utilisé pour la miniaturisation d'antennes en les insérant sur le plan de masse.

Les paramètres de conception proposés pour la cellule unitaire à la fréquence 5.8 GHz sur un plan de masse de 22mm×22mm sont les suivantes :

- La largeur  $W1=22$  mm.
- La métallisation  $a=1.15$ mm.
- La distance entre les deux anneaux  $b=2$ mm.
- La distance entre les fentes  $c=3$ mm.
- La hauteur du substrat  $hs=1.6$ mm.
- Les matériaux utilisés : 1/Pour le SSR : cuivre (cooper)  
2/Pour le substrat : FR-4

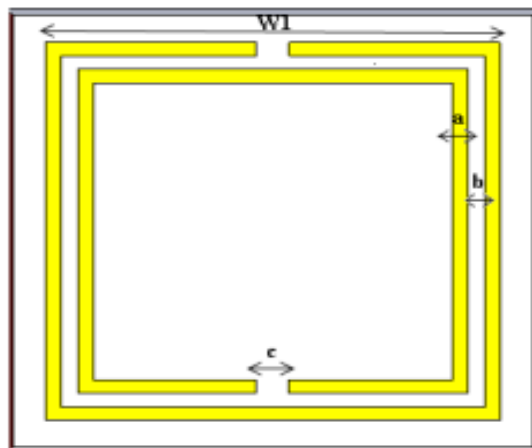
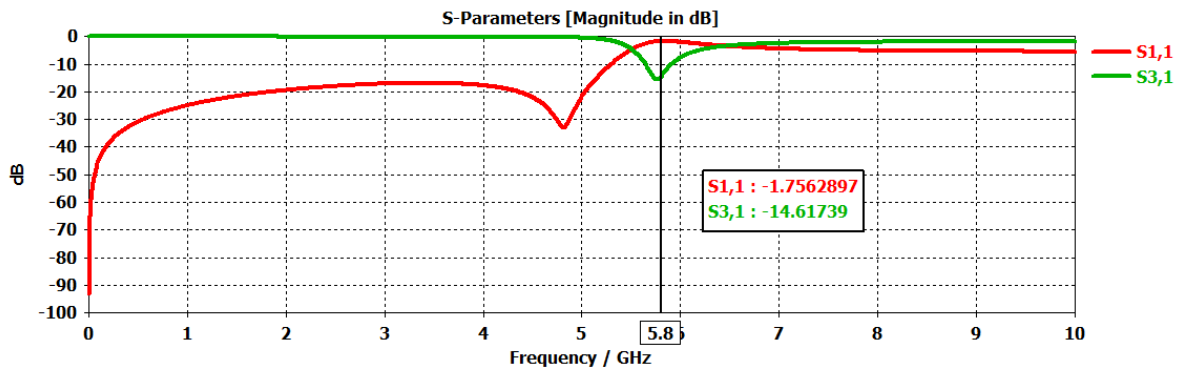


Figure III. 31 Représentation de la cellule unitaire SRR.

#### ➤ Représentation des paramètre (S) de la cellule unitaire :

Les résultats de simulation de la cellule SRR sont présentés dans figure III-32 qui représente les coefficients de réflexion (S11) et de transmission (S31) en dB. Nous

observons que le coefficient de transmission ( $S_{31}$ ) résonne à la fréquence 5.8 GHz avec un niveau de transmission à l'ordre de -14.61 dB.

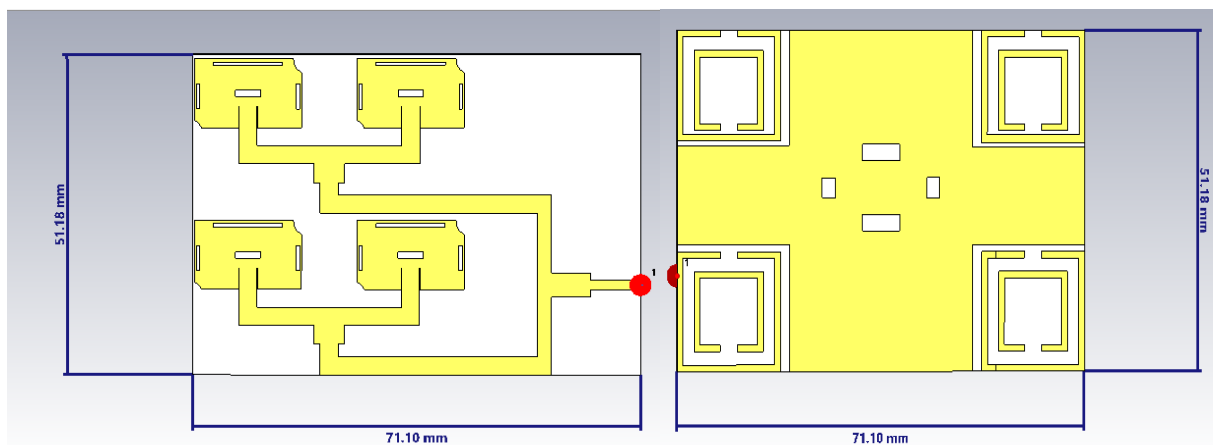


**Figure III. 32 Coefficient de réflexion et transmission de la cellule SRR.**

### III.3.2.2- /Antenne miniature associée aux cellules SRR

Afin de miniaturisée encore plus notre antenne  $2 \times 2$ , nous avons chargé un plan de masse par un réseau constitué de quatre cellules de SRR de forme carrée comme ceux étudiés dans la section précédente.

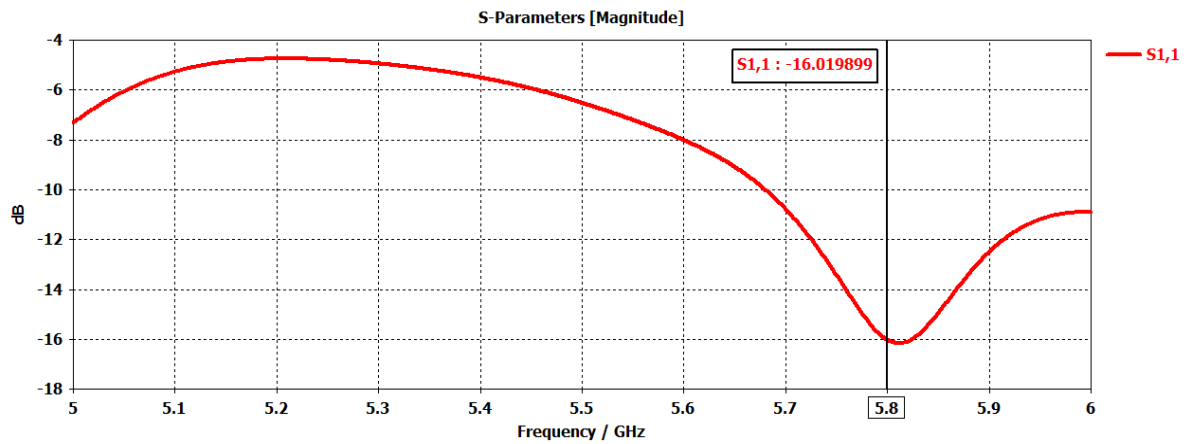
L'insertion de la cellule SRR sur le plan de masse nous a permettra de miniaturiser les dimensions du réseau d'antenne. Nous pourrons ainsi réduire la dimension de la largeur et la longueur de 4mm chacune. Cela représentera une diminution de plus de 12% de la surface de l'antenne.



**Figure III. 33 Structure d'antenne chargée par un réseau de SRR (patch à gauche/ plan de masse à droite).**

#### ➤ Coefficient de réflexion :

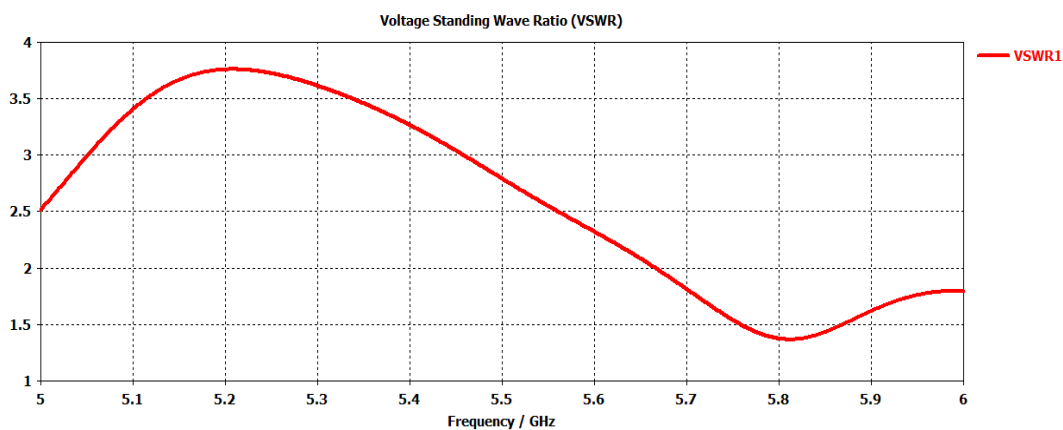
D'après le tracé  $S_{11}$ , nous remarquons que l'antenne a une fréquence de résonance de 5.8 GHz avec une adaptation de -16 dB, où elle rayonne le plus efficacement.



**Figure III. 34 coefficient de réflexion de l'antenne avec métamatériaux.**

➤ **VSWR :**

La courbe VSWR simulée de l'antenne patch avec métamatériaux conçue est représentée sur la figure III.35. Le VSWR est inférieur à 2, ce qui indique une bonne adaptation de l'antenne et la ligne de transmission.



**Figure III. 35 VSWR de l'antenne avec métamatériaux.**

➤ **Gain :**

D'après le graphe (III.36) ci-dessous nous pouvons voir que l'antenne a un gain de 3,9 dBi, dans la fréquence à 5.8 GHz. Ce résultat est un bon résultat pour notre application.

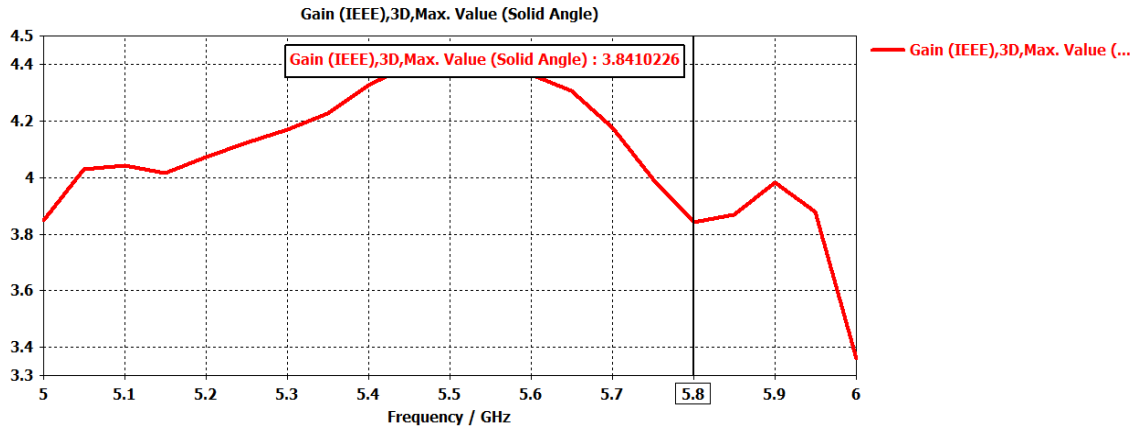


Figure III. 36 Gain en fonction de la fréquence.

➤ Diagramme de rayonnement :

La Figure (III.37) ci-dessous présente le diagramme de rayonnement de l'antenne en 2D et 3D. Nous remarquons que l'antenne présente un rayonnement quasi omnidirectionnel sur les deux plan E( $\phi=0$ ) et H( $\phi=90$ ) avec une directivité de 3.731dBi, un angle d'ouverture à 3dB de 41.2 degrés pour le plan E( $\phi=0$ ) et 45.6 degrés pour le plan H( $\phi=90$ ).

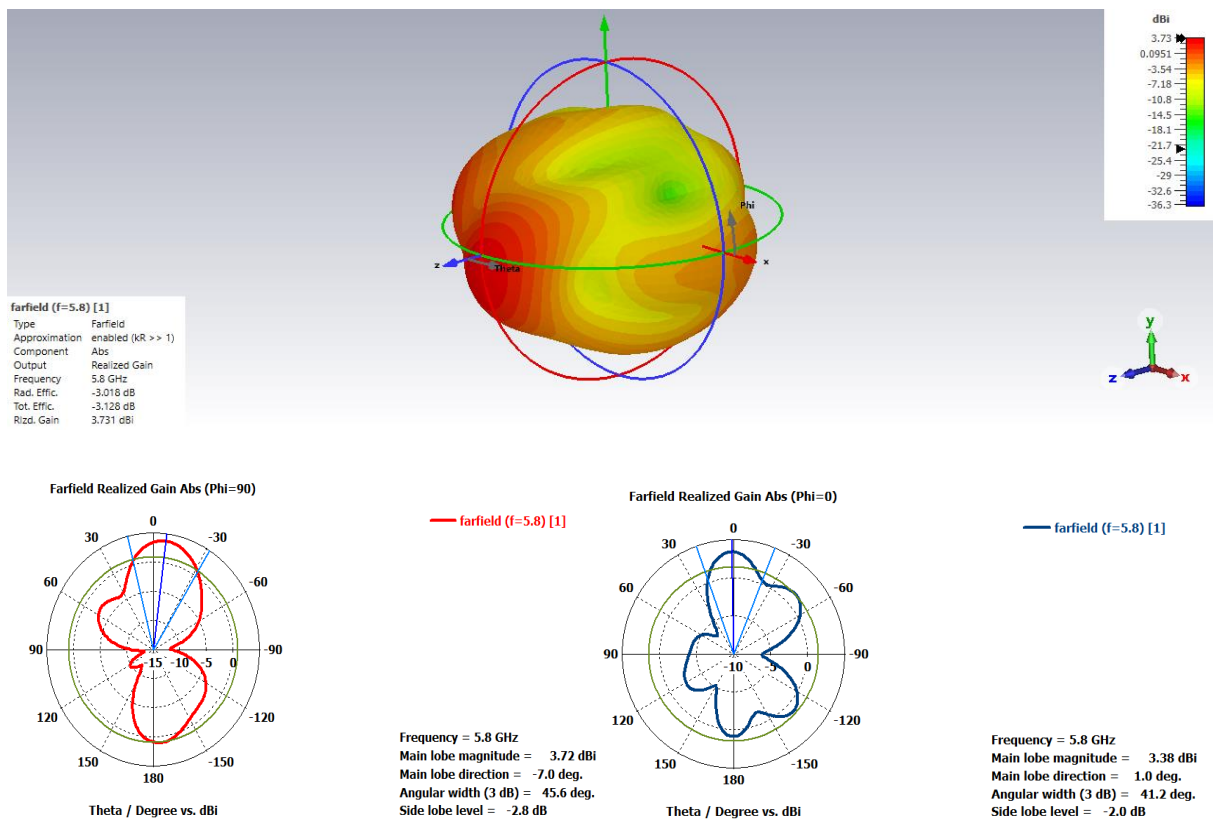


Figure III. 37 Diagramme de rayonnement de l'antenne patch avec métamatériaux.

### III.3.2.2-/étude et comparaison

Antenne	Gain (dB)	Adaptation(dB)	VSWR	Dimension(mm)
Antenne 2x2 parallèles	9.16	-12	1.70	75x55
Antenne 2x2 avec métamatériaux	3.9	-16	1.4	71x51(miniaturise par 13%)

**Tableau III. 5 Comparaison entre les réseaux à quatre éléments.**

Il est clair d'après les résultats ci-dessus et le tableau de comparaison que les résultats sont meilleurs avec les métamatériaux. On rappelle que la surface globale de l'antenne c'est réduit de **12 %** avec une diminution des dimensions de cette dernière de **4mm** en largeur et en longueur, ce qui est conforme à nos objectifs.

### III.3.3-/ Par la méthode du DGS

Pour cette partie, nous proposons une autre structure d'antenne circulaire en utilisant la méthode de miniaturisation du DGS (en anglais Defected Ground Structure).

La méthode DGS est une technique de miniaturisation utilisée pour des antennes de petites tailles. Le principe de cette méthode consiste à employer des fentes pour modifier la distribution du courant sur le plan de masse, en fonction de la dimension du DGS et de sa position relative, entraînant ainsi l'altération des caractéristiques de transmission. La DGS présente des caractéristiques différentes de géométries gravées au plan de masse.

#### III.3.3.1-/structure de l'antenne patch circulaire

Nous proposons au début une antenne patch circulaire avec un seul élément rayonnant dont les paramètres sont les suivant :

Paramètres	Ws	Ls	Rayon
Dimension(mm)	34	38	14.1

**Tableau III. 6 Dimension d'antenne patch circulaire.**

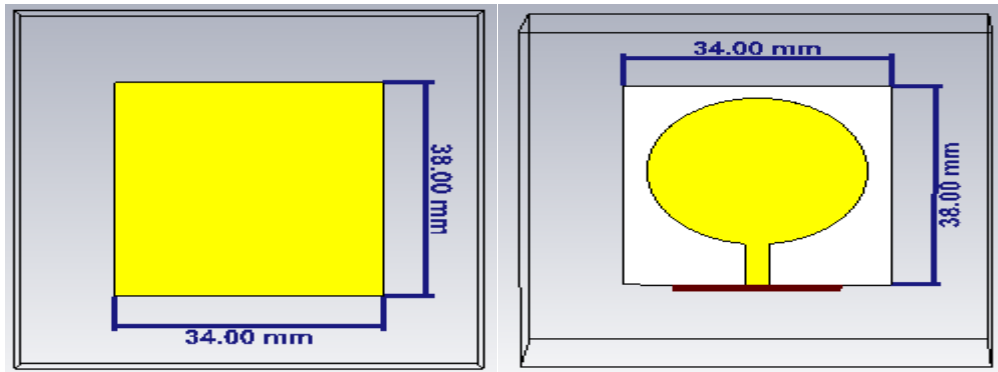


Figure III. 38 structure circulaire.

➤ Coefficient de réflexion :

La figure III.39 représente le coefficient de réflexion S11 avec multi bande, qui va nous permettre de visualiser le niveau d'adaptation de l'antenne patch circulaire sur toutes les fréquences de résonance 5.8 GHz qui a une valeur de S11 -15.62 dB, 6.85 GHz avec un S11 de -11 dB ,8.2 GHz avec S11 de -13 dB.

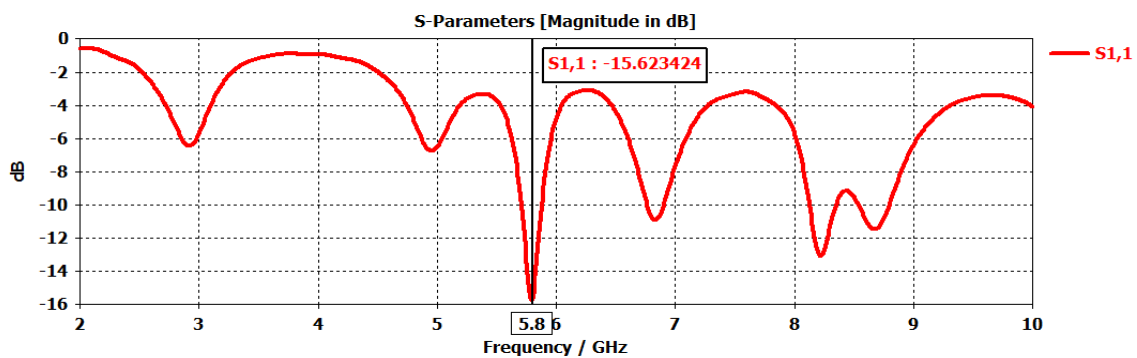


Figure III. 39 Coefficient de réflexion de l'antenne circulaire.

➤ VSWR :

La courbe VSWR simulée de l'antenne patch conçue est représentée sur la figure III.40. Il a une valeur de 1.396 à la fréquence 5.8 GHz, ce qui indique une bonne adaptation de l'antenne et de la ligne de transmission.

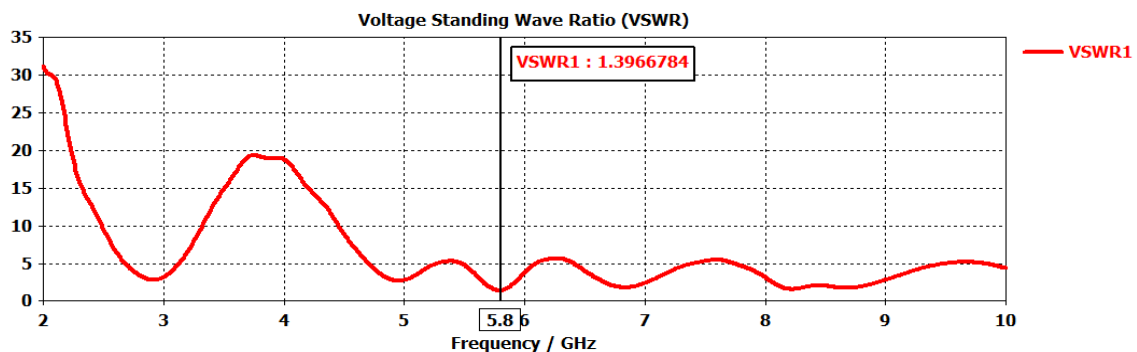
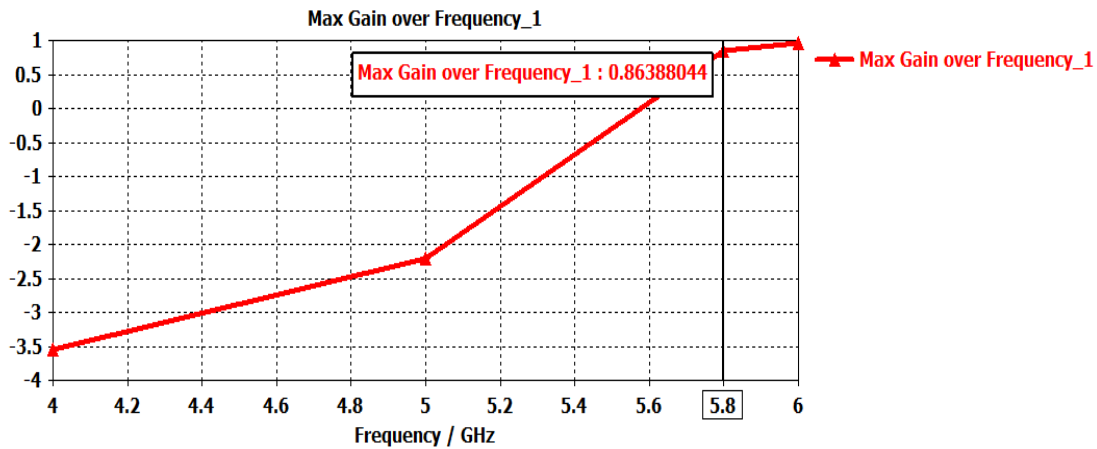


Figure III. 40 VSWR de l'antenne patch circulaire initial.

➤ **Gain :**

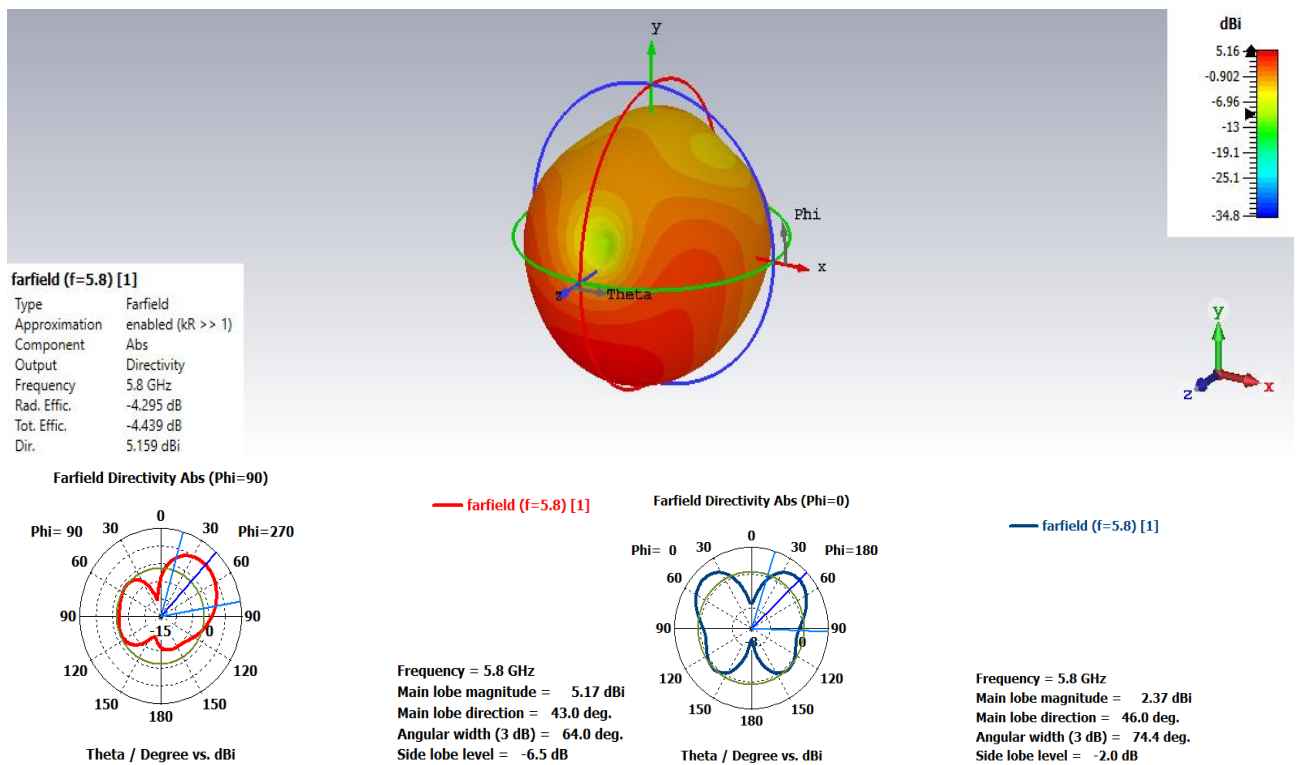
La figure III.41 illustre le gain en fonction de la fréquence. Le gain maximum à la fréquence 5.8 GHz est de 0.86 dBi. Cette adaptation est acceptable initialement.



**Figure III. 41 Gain du Patch circulaire initial.**

➤ **Diagramme de rayonnement :**

Les figure III.42 représente le diagramme de rayonnement en 2D et en 3D à la fréquence de résonance de 5.8 GHz dans les deux plans (E et H) avec une directivité à 5.15 dBi. On constate que l'antenne proposée a un diagramme de rayonnement omnidirectionnel dans les deux plans E( $\phi=0$ ) et H( $\phi=90$ ).



**Figure III. 42 Diagramme de rayonnement d'antenne circulaire original.**

### III.3.3.2-/Nouvelle structure miniaturisé

Après avoir appliqué la méthode du DGS nous sommes arrivés à notre structure finale miniaturisée qui est illustrée dans la figure III.43. Elle a une forme circulaire de rayon 4.5mm et comporte un trou central constitué d'un second cercle de rayon 1.2mm. On peut également observer une entaille sur le côté de la structure, qui est formée par un demi-cercle de rayon 1.1mm. Son taux de miniaturisation est de 88%.

Les paramètres de la nouvelle structure sont illustrés ci-dessous :

Paramètres	Ws	Ls	Rayon	Taux de miniaturisation
Dimension(mm)	12	03	4.5	88%

Tableau III. 7 Dimension d'antenne circulaire miniaturisée.

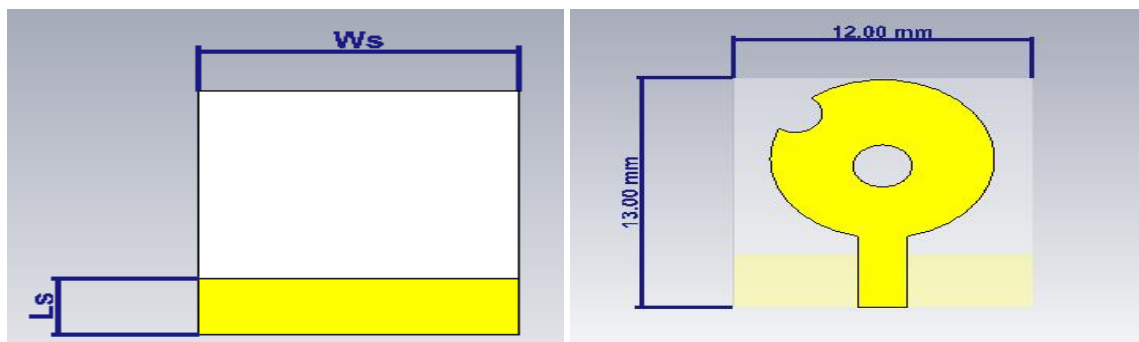
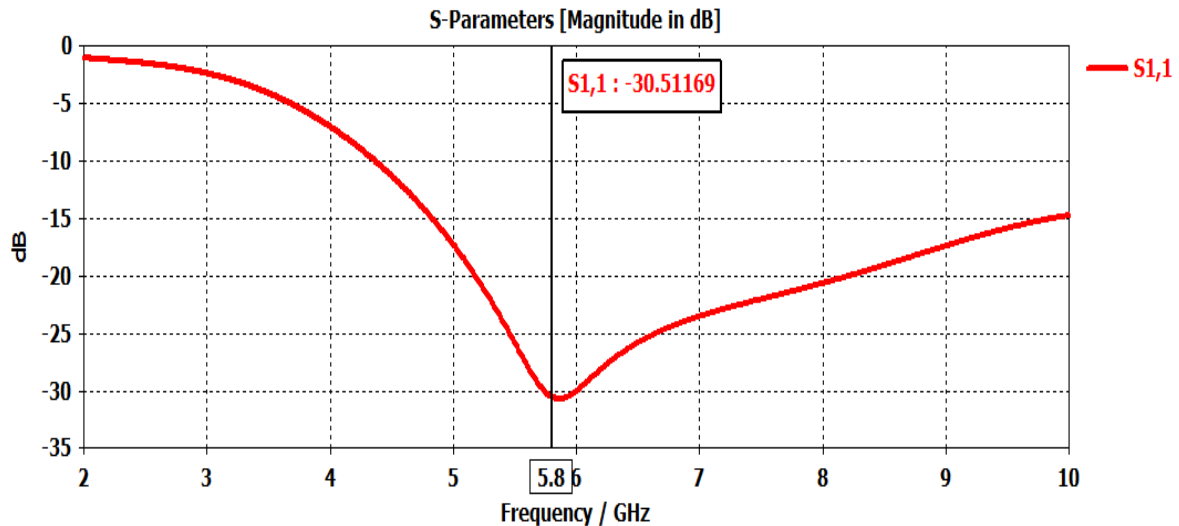


Figure III. 43 nouvelle structure de l'antenne circulaire miniaturisée (vue devant à droite/ vue derrière à gauche).

#### ➤ Coefficient de réflexion :

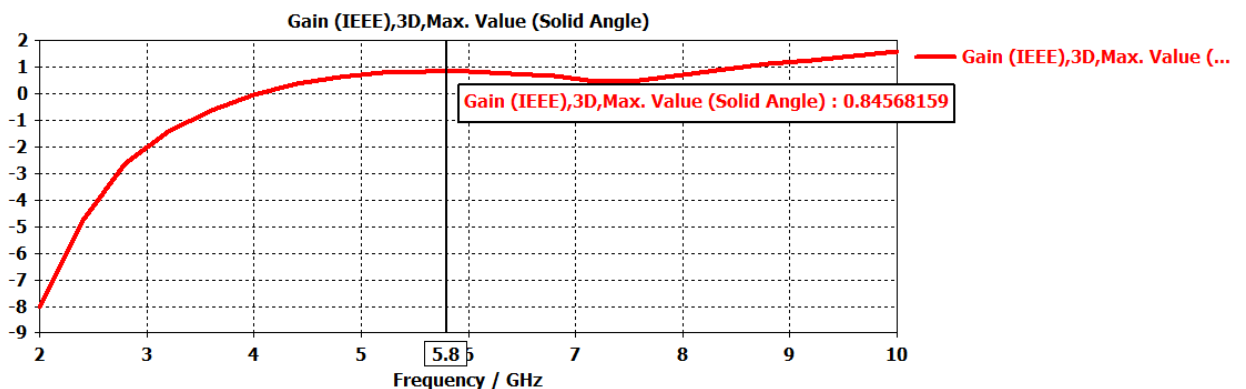
D'après la figure III.44 nous avons obtenu un S11 à -30.51 dB à la fréquence 5.8 GHz ce qui indique que cette structure d'antenne miniaturisée est bien adaptée, est résonne dans la fréquence désirée.



**Figure III. 44 coefficient de réflexion de l'antenne circulaire miniaturisée.**

➤ **Gain :**

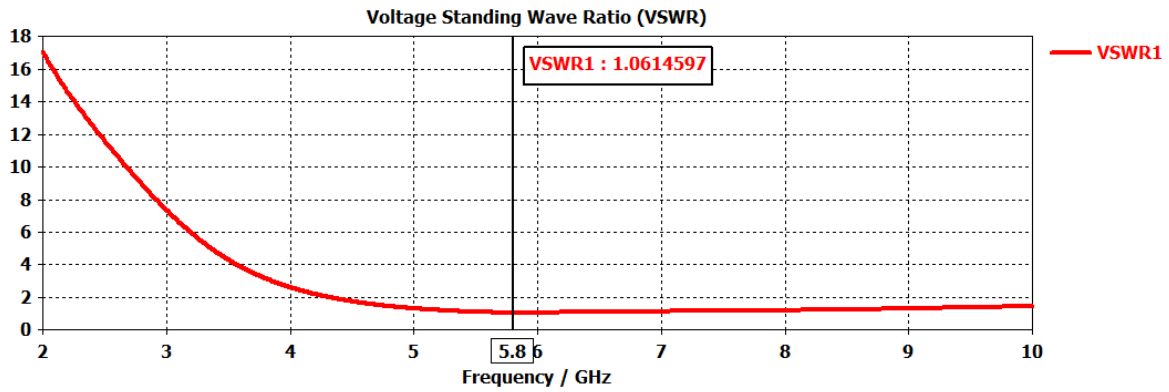
D'après la figure III.45, nous remarquons que le gain est égal à 0.85 dBi à la fréquence de résonance. Il est donc inférieur à 1. Ce résultat est loin d'être optimal pour notre étude.



**Figure III. 45 Gain de l'antenne circulaire miniaturisée.**

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

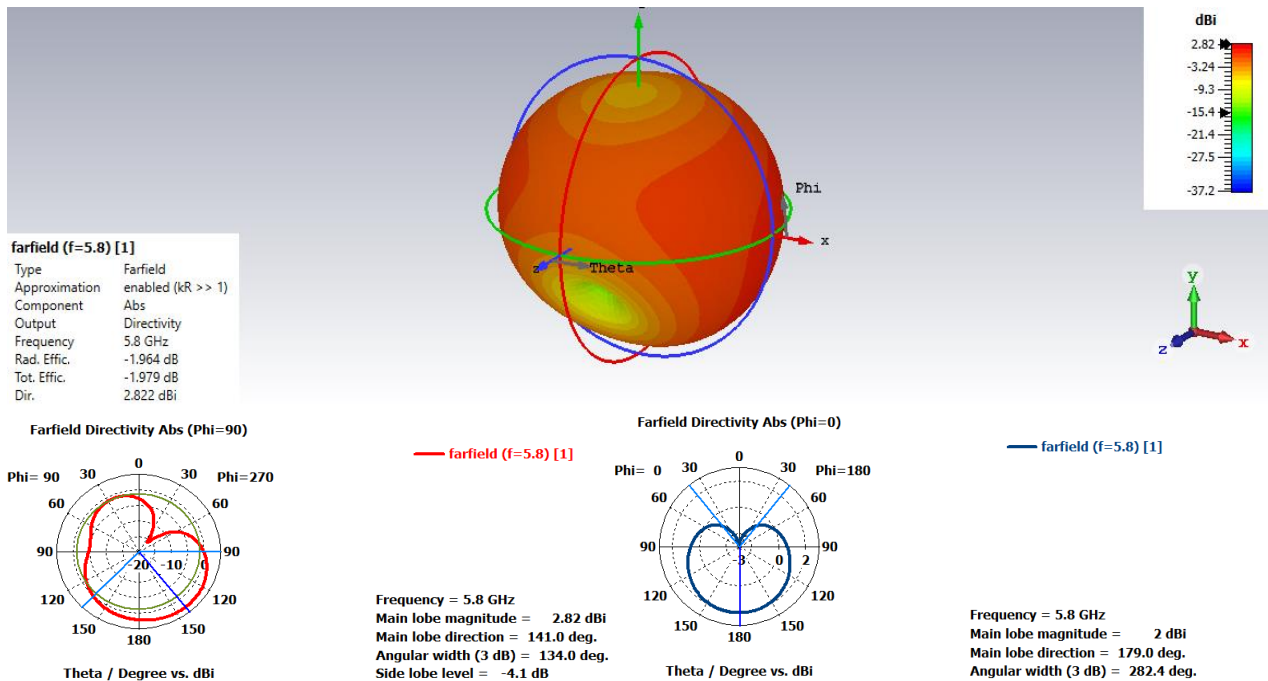
La figure III.46 représente le taux d'onde stationnaire. Comme nous pouvons le voir, il est compris entre 1 et 2, ce qui prouve que nous avons une bonne adaptation de l'impédance entre l'antenne et la ligne d'alimentation.



**Figure III. 46 VSWR de l'antenne circulaire miniaturisée.**

➤ **Diagramme de rayonnement**

Les figure ci-dessous représente le diagramme de rayonnement en 2D et en 3D à la fréquence de résonance de 5.8 GHz dans les deux plans (E et H) avec une directivité de 2.82 dBi. A partir de la figures III.47, on constate que l'antenne proposée à un diagramme de rayonnement quasi-omnidirectionnel dans les deux plans E( $\phi=0$ ) et H( $\phi=90$ ).



**Figure III. 47 Diagramme de rayonnement de l'antenne circulaire miniaturisée.**

### III.3.3.3-/Réseaux d'antenne a deux éléments

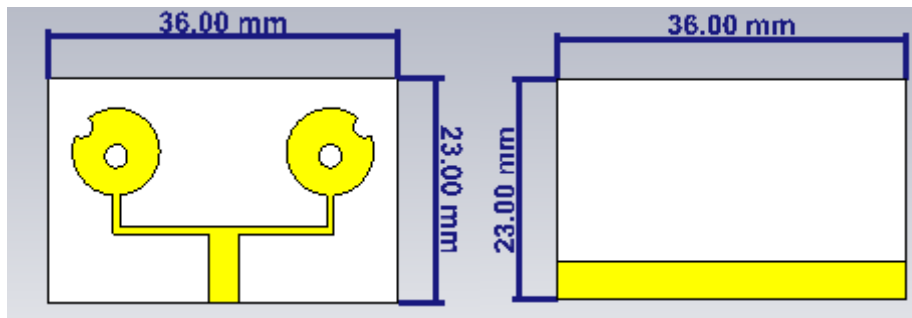


Figure III. 48 Structure d'antenne a deux éléments.

#### ➤ Coefficient de réflexion :

La figure II.49 illustre le coefficient de réflexion en fonction de la fréquence de résonance à 5.8 GHz avec une valeur de -18.72 dB. Nous constatons que les performances de notre antenne sont bonnes, cela confirme la justesse de son adaptation.

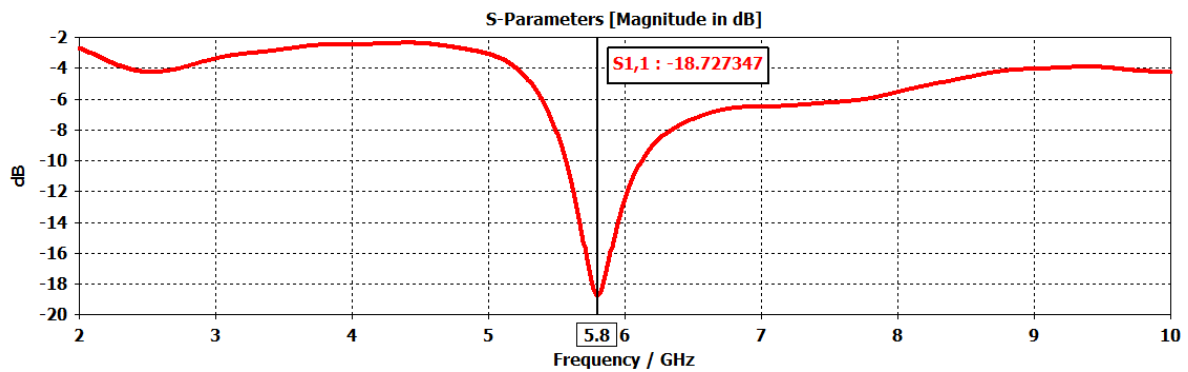


Figure III. 49 coefficient de réflexion.

#### ➤ VSWR :

La figure III.50 représente le taux d'onde stationnaire. Comme nous pouvons le voir, il est compris entre 1 et 2, ce qui prouve que nous avons une bonne adaptation de l'impédance entre l'antenne et la ligne d'alimentation.

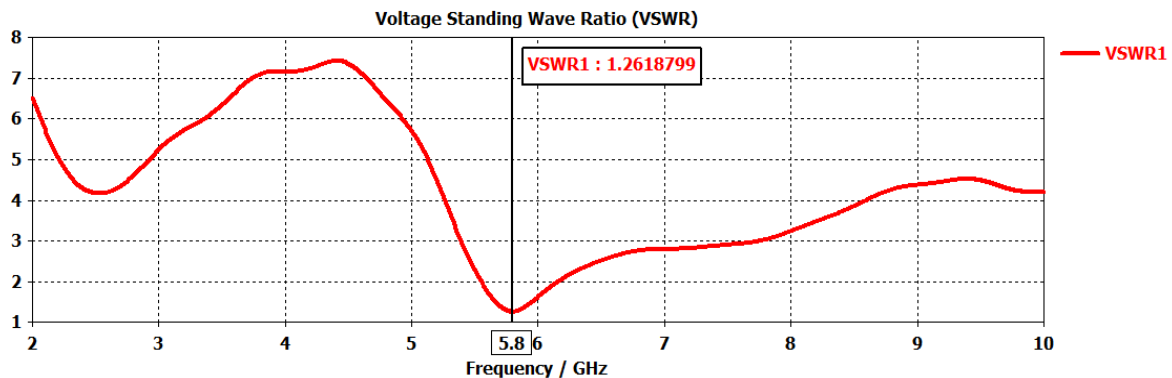
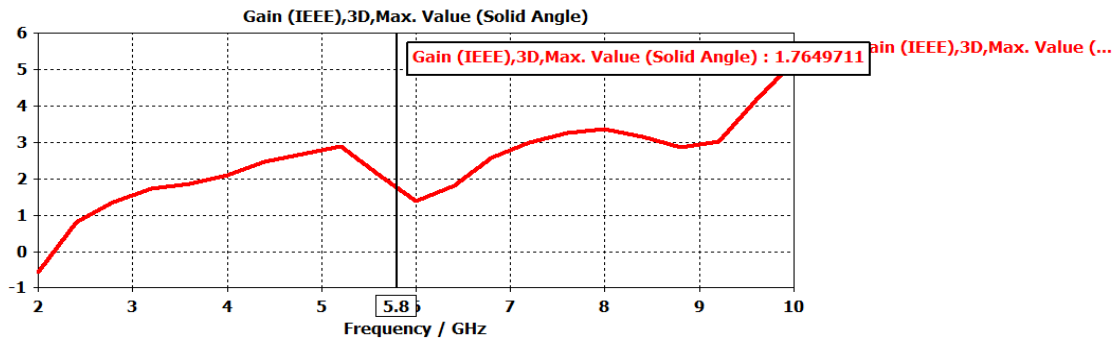


Figure III. 50 VSWR du réseau circulaire a deux éléments.

➤ **Gain :**

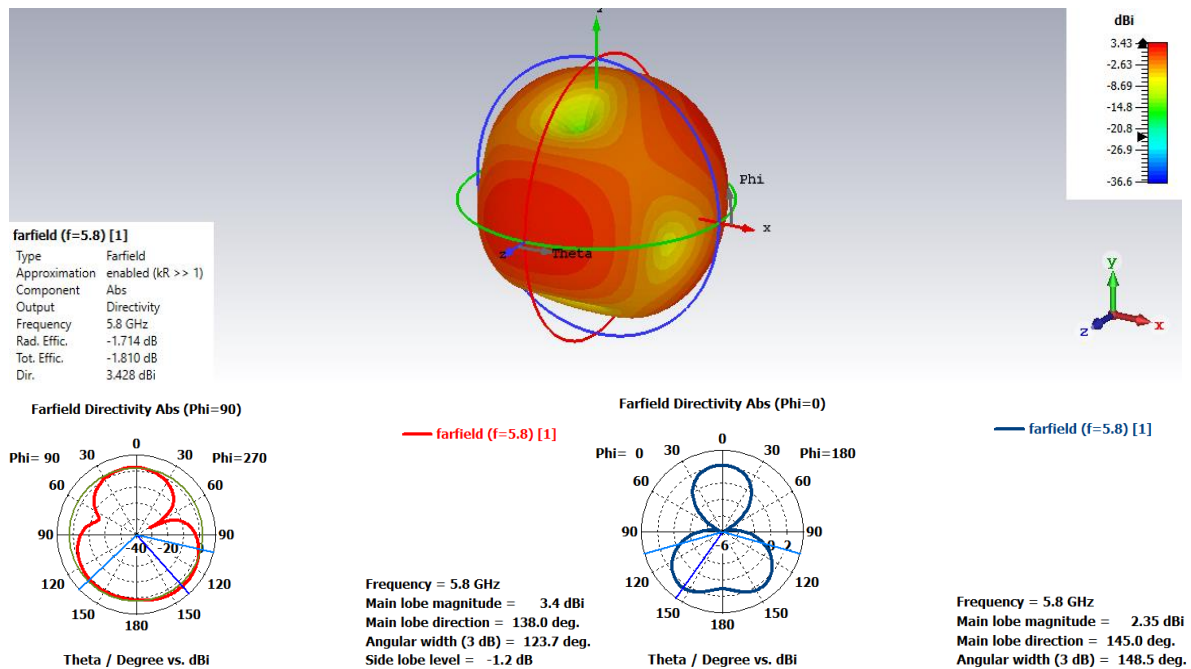
D'après la figure ci-dessous, le gain est égal à 1.76 dBi, ce qui correspond à un minimum de nos exigences.



**Figure III. 51 Gain du réseau circulaire a deux éléments.**

➤ **Diagramme de rayonnement :**

La figure III.52 représente les diagrammes de rayonnement dans les plans H( $\phi=90$ ) et E( $\phi=0$ ) à la fréquence de résonance 5.8 GHz, On constate que l'antenne ayant un bon diagramme de rayonnement dans les plans E et H. La directivité est égale à 3.42 dBi pour la fréquence à 5.8 GHz. Pour le plan H( $\phi=90$ ), un angle d'ouverture à 3 dB de 123.7 degrés, un angle du lobe principal est égal à 138 degrés. Pour le plan E( $\phi=0$ ), un angle d'ouverture à -3 dB correspondant à 148.5 degrés, un angle du lobe principal de 145 degrés.



**Figure III. 52 Diagramme de rayonnement du réseau a deux éléments.**

### III.3.3.4-/Réseaux d'antenne à quatre éléments

Nous passons maintenant au réseau d'antennes à quatre éléments pour augmenter notre gain au maximum.

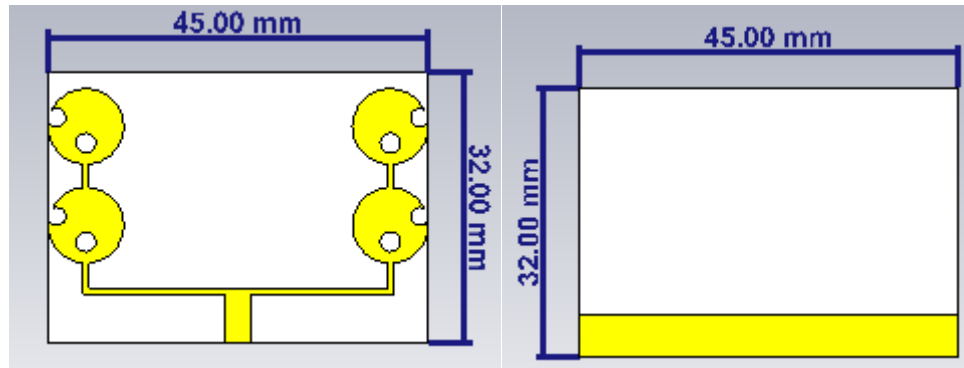


Figure III. 53 Nouvelle structure à quatre éléments.

#### ➤ Coefficient de réflexion :

D'après la figure III.54 nous avons un S11 multibande à 10.2 dB pour la fréquence de résonance autour de 3.4, un S11 de valeur -21,56 dB pour une fréquence de résonance autour de 5,8 GHz et un S11 de valeur -18 pour la bande de fréquence 9.2 GHz a 9.4 GHz indiquant un réseau d'antennes optimisé et bien adapté, capable d'émettre et de recevoir efficacement des signaux à ces fréquences.

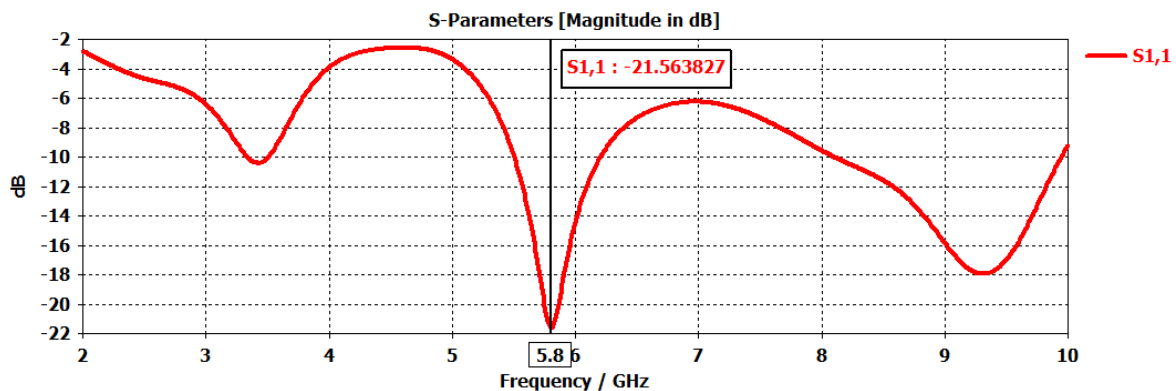
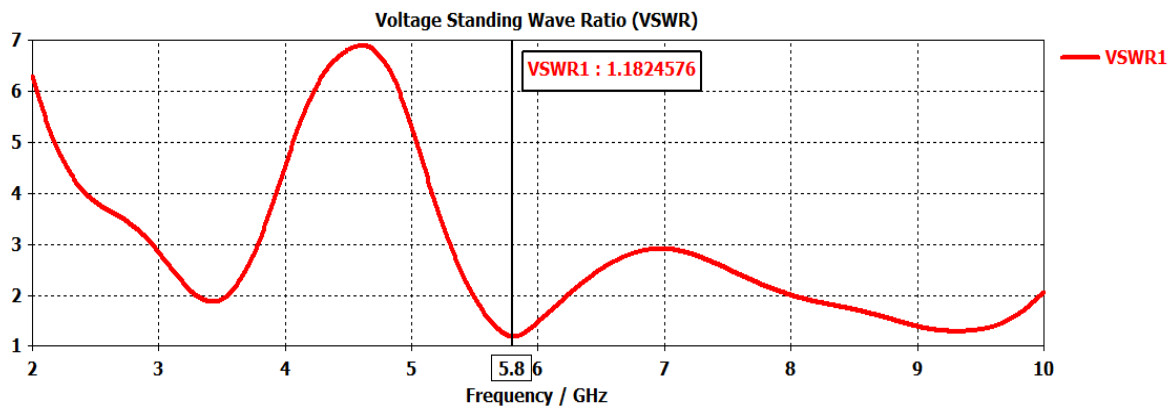


Figure III. 54 Coefficient de réflexion du réseau circulaire a 4 éléments.

#### ➤ VSWR :

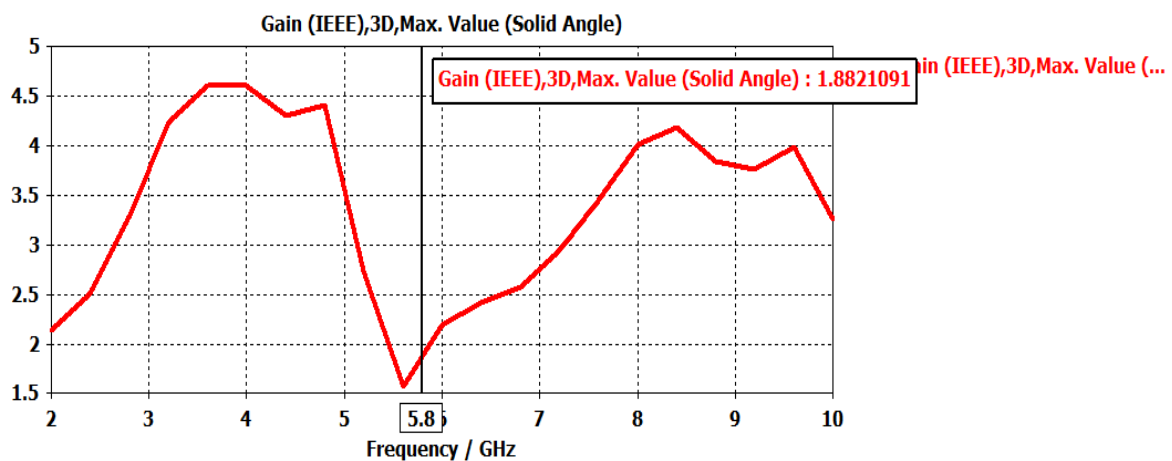
La figure III.55, nous indique le Rapport d'Onde Stationnaire de valeur à 1.18 qui est une valeur proche de l'idéale 1, ce qui montre une bonne adaptation d'impédance entre l'antenne et la ligne de transmission.



**Figure III. 55 VSWR du réseau circulaire a 4 éléments.**

➤ **Gain :**

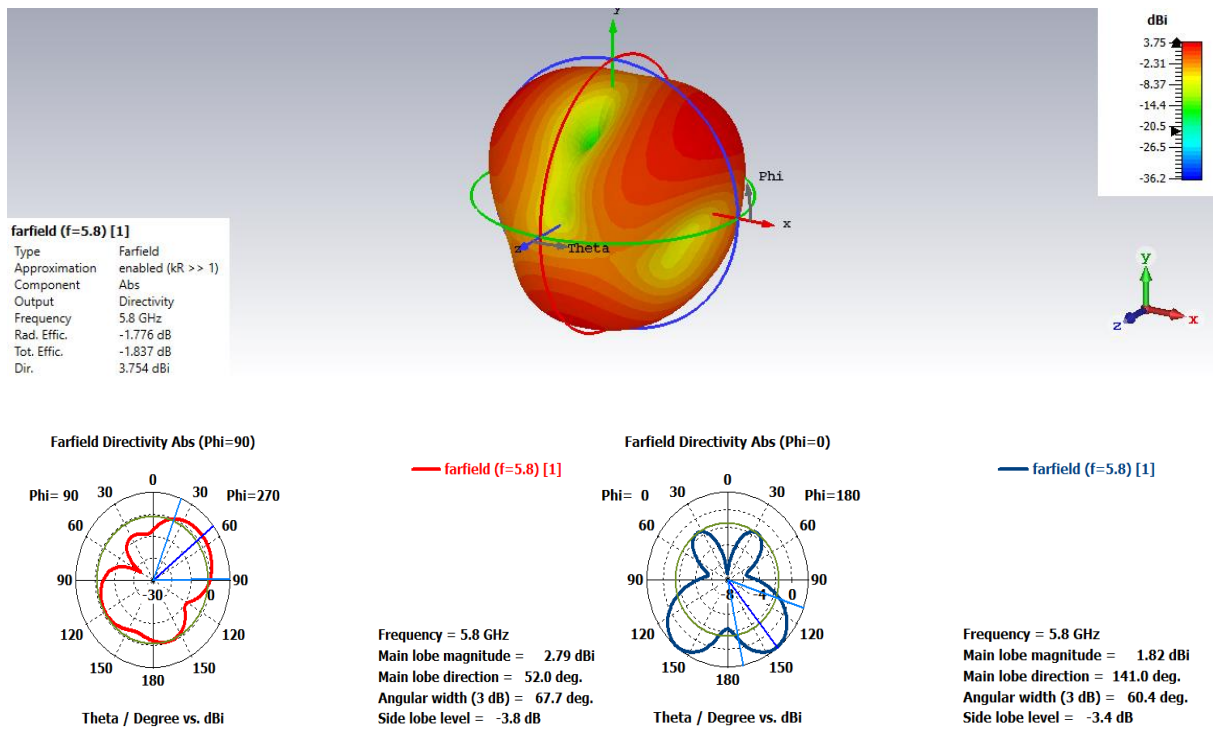
D'après la figure III.56, le gain est amélioré à 1.88 dBi. Ce résultat correspond à l'attente de notre application.



**Figure III. 56 Gain du réseau circulaire a 4 éléments.**

➤ **Le diagramme de rayonnement :**

Ce diagramme de rayonnement en 2D et 3D avec une directivité de 3.75 dBi. Nous remarquons que pour le plan E ( $\phi=0$ ) la magnitude du lobe principal de l'antenne est de 1.82dBi, la direction du lobe principal à 141degrés, une largeur angulaire de 60.4 degrés avec lobe latéral de -3.8 dB avec un rayonnement quasi-omnidirectionnel. Pour le plan H( $\phi=90$ ) nous avons une magnitude du lobe principal de 2.79 dBi avec une direction du lobe principale de 52 degrés, une largeur angulaire de 67.7 degrés, avec un rayonnement quasi-omnidirectionnel aussi.



**Figure III. 57 Diagramme de rayonnement.**

**III.3.3.5- /Etude comparative**

Antenne	Gain(dB)	Adaptation(dB)	VSWR	La bande passante	Dimension (Taux de miniaturisation)
Antenne circulaire (un seul élément rayonnant)	0.86	-15.62	1.39	5.17%	34x38
Antenne miniaturisée	0.85	-30.51	1.06	44.82%	12x13 (88%)
Antenne à deux éléments	1.75	-18.72	1.26	13.79%	36x23.05 (85%)
Antenne à quatre éléments	1.88	-21.56	1.18	15.51%	45x32 (83%)

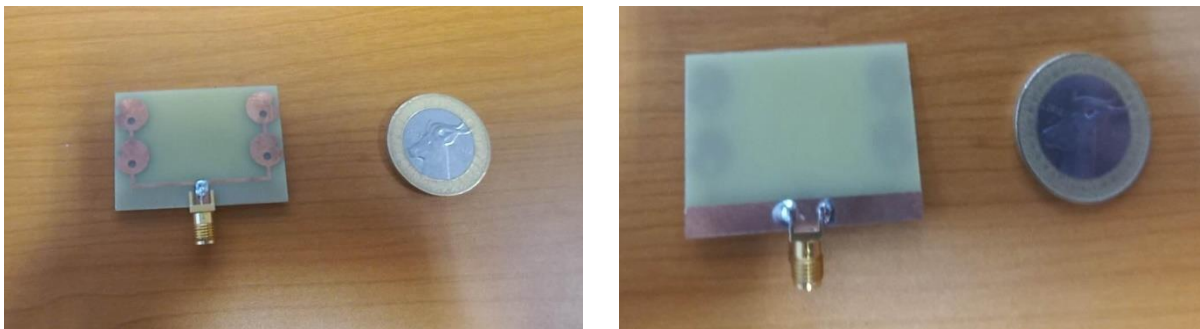
**Tableau III. 8 Comparaison d'antenne circulaire.**

Il est clair à partir des résultats ci-dessus et du tableau de comparaison que les résultats des différents paramètres d'antenne se sont améliorés en appliquant la méthode du DGS et d'insertion des fentes, les problèmes des dimensions et du faible gain sont résolus avec succès. En utilisant aussi les réseaux d'antennes de quatre éléments

nous avons obtenue de meilleurs résultats en terme de gain avec une taille miniaturisée.

### **III.4-/ Réseau expérimentaux**

Après l'achèvement des circuits imprimés (patch et plan de masse) par la société ALMITECH située à Kouba à Alger en Algérie, nous avons procédé à l'assemblage d'une antenne réseaux à quatre éléments rayonnent 2X2.



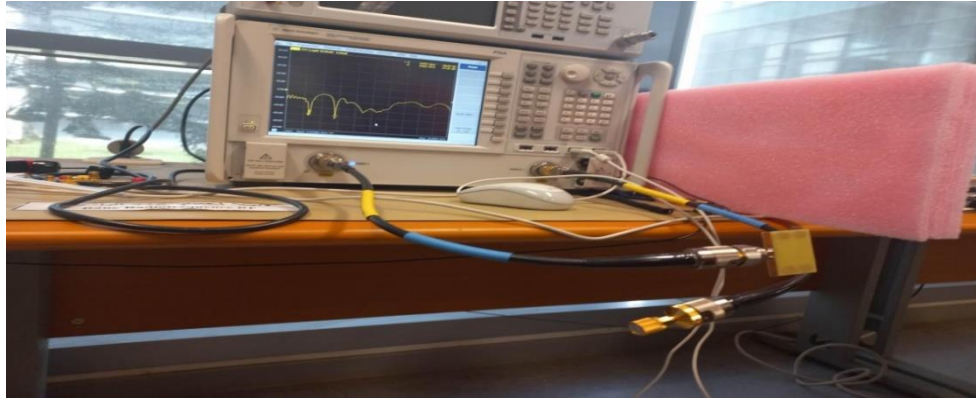
**Figure III. 58** réseau d'antennes réalisé (vue de face gauche/ vue derrière droite)

#### **III.4.1-/ Mesure expérimental**

##### **III.4.1.1-/Mesure du coefficient de réflexion S11**

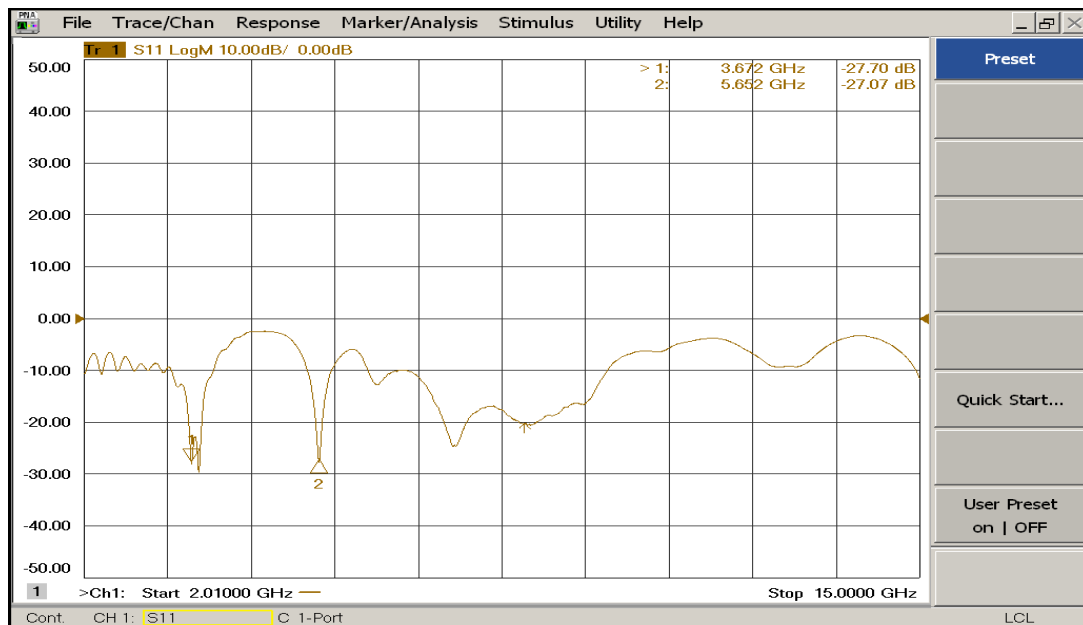
Les mesures du coefficient de réflexion de l'antenne ont été effectuées en utilisant l'analyseur réseau PNA n5222a de la technologie Agilent Network Analyzer qui est disponible au centre du développement des satellites (à Oran). Cet appareil à deux ports qui permette de mesurer une bande passante qui varie entre 10 MHz jusqu'à 26.5 GHz avec un calibrage de 2 et 3 GHz.

Dans ce but, les connecteurs de type SMA ont été soudés sur les points d'excitation de l'antenne. Qui a été caractérisée en la connectant avec un câble coaxial de type SMA comme illustré dans la figure ci-dessous :



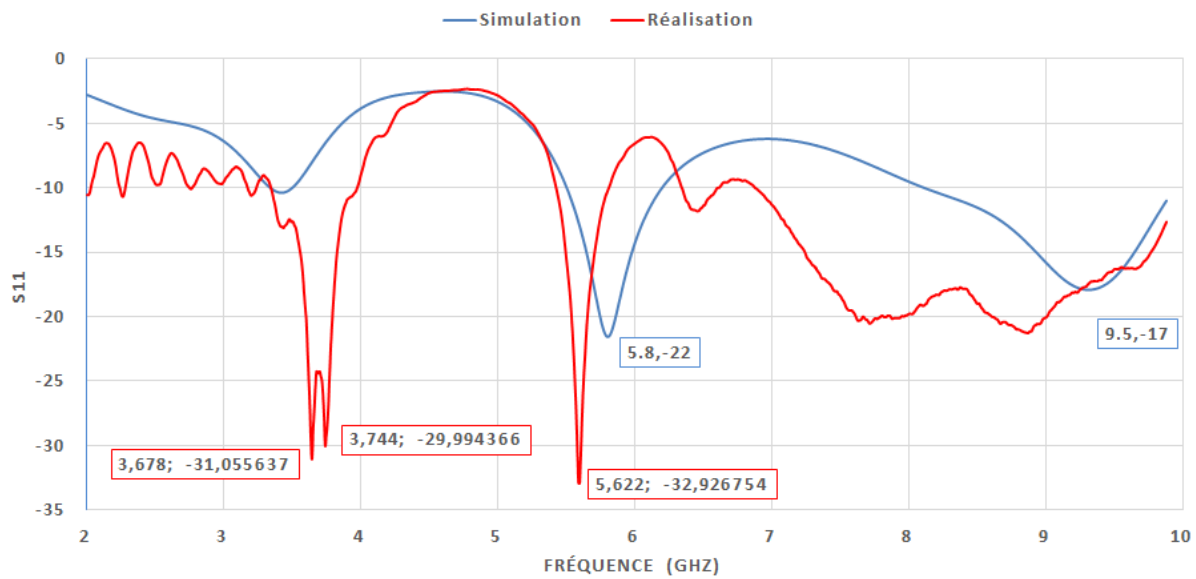
**Figure III. 59 Teste du réseau d'antenne réalise**

Après la calibration de l'analyseur de réseau sur la plage de fréquence de 2 GHz à 10 GHz, nous avons obtenu les résultats suivants :



**Figure III. 60 Coefficient de réflexion mesuré du réseau d'antennes**

La Comparaison entre le S11 simulé et mesuré est présentée dans la figure III.61 ci-dessous :



**Figure III. 61 Comparaison entre S11 simulé et mesuré**

Nous remarquons d'après la figure III.61 que les résultats de simulation et de mesure sont presque identiques pour les deux fréquences résonantes à 3.45 GHz et 5,8 GHz avec une meilleure adaptation en réalisation. Concernant le S11 mesuré nous remarquons qu'il a trois fréquences de résonance avec une très bonne adaptation à 3.678 GHz avec un S11 de valeur -31.05 dB et à 3.744 GHz avec un S11 presque égale à -30 dB et pour la fréquence de 5.622 GHz avec un S11 de -32.92 dB en revanche pour S11 simulé nous remarquons que nous avons deux fréquences de résonance la première avec une bonne adaptation à 5.8 GHz avec un S11 de valeur -22 dB et la deuxième fréquence de 9.5 GHz à -17 dB. Ces résultats montrent que notre réseau d'antennes réalisé présente une très bonne adaptation comparée à celle simulé et un avantage de multi résonance pour plusieurs applications qui travaillent dans les fréquences des IoT.

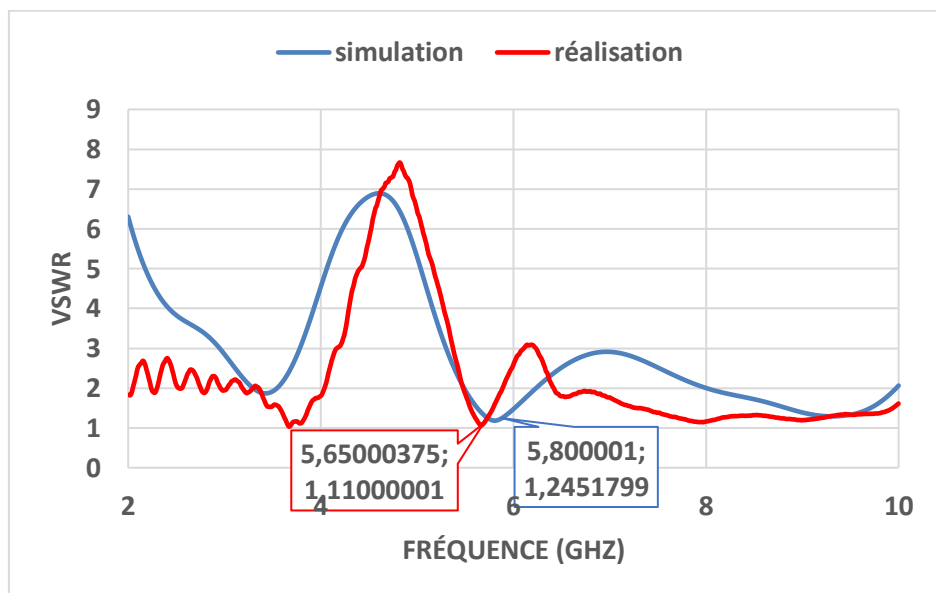
#### **III.4.1.2- / Mesure du VSWR**

La figure ci-dessous représente le résultat de mesure du VSWR



**Figure III. 62 VSWR du réseau d'antenne**

Nous remarquons que le VSWR est entre 1 et 2 dans les deux fréquences de résonance à 3.45 GHz et 5.8 GHz ce qui indique une bonne adaptation de l'antenne et la ligne de transmission.



**Figure III. 63 Comparaison entre VSWR simule et mesure**

D'après cette figure nous remarquons que le rapport d'onde stationnaire VSWR est presque identique pour les deux fréquences 3.45 GHz et 5.8 GHz.

### III.5- Conclusion

L'objectif de ce PFE était de concevoir un modèle d'antenne miniaturisée pour les réseaux radio cognitifs à une fréquence de résonance utiles pour les applications IoT (dans notre cas c'est à 5.8 GHz), permettant d'acquérir de meilleures performances et

d'apporter de nouvelles possibilités pour le développement de la radio cognitive et de l'internet des objets IoT.

Afin d'atteindre la miniaturisation nous avons utilisé plusieurs techniques de miniaturisation en nous focalisant sur les plus connues (l'insertion des fentes sur l'antenne et sur le plan de masse, les métamatériaux et le DGS), qui nous ont permis de miniaturiser des antennes patch et circulaire.

En utilisant le logiciel CST, nous avons conçu toutes les antennes proposées précédemment. Elles sont dotées de nombreux avantages, tels qu'une taille réduite, d'excellents diagrammes de rayonnement et un gain acceptable répondant aux exigences des applications de l'internet des objets (IoT) et à la fin nous avons fait la réalisation et les mesures d'un réseau d'antenne miniaturisé hybride afin de valider les résultats simulés.

# **Conclusion générale**

L'internet des objets (IoT) est une révolution technologique qui transforme notre façon de vivre et de travailler en connectant des milliards d'objets physiques à travers le monde. Cependant, pour que l'IoT fonctionne efficacement, une infrastructure de communication solide est nécessaire.

Les réseaux radio cognitifs sont une évolution des réseaux sans fil traditionnels, conçus pour exploiter de manière optimale le spectre radio disponible. Ils sont capables de détecter et d'analyser leur environnement radio, puis de prendre des décisions intelligentes pour utiliser les fréquences disponibles de manière efficace. Cette capacité cognitive permet une meilleure utilisation du spectre radio, réduisant les interférences et améliorant la qualité des communications.

Les antennes miniaturisées reconfigurables en fréquence sont un autre élément clé de l'infrastructure IoT. Ces antennes sont conçues pour être compactes et flexibles, ce qui les rend idéales pour une utilisation dans des appareils IoT de petite taille.

Les réseaux radio cognitifs fournissent l'intelligence nécessaire pour optimiser l'utilisation du spectre radio, tandis que les antennes miniaturisées reconfigurables en fréquence offrent la flexibilité et la compatibilité nécessaires pour connecter les appareils IoT à ces réseaux.

L'objectif de ce mémoire était d'étudier l'impact de la miniaturisation sur les caractéristiques d'une antenne pour les réseaux radio cognitifs, en mettant l'accent sur leur application dans le contexte de l'Internet des Objets (IoT).

Nous avons étudié dans le premier chapitre un état de l'art sur la radio cognitive et l'internet des objets avec leurs définition, architecture, caractéristiques et la relation entre les deux.

Dans le deuxième chapitre, nous avons exposé les caractéristiques des antennes et leurs différents types. Nous avons aussi discuté des techniques de miniaturisation, l'utilisation de matériaux et de structures spécifiques, ainsi que des méthodes d'optimisation pour améliorer les performances des antennes tout en réduisant leur taille.

Dans le troisième chapitre, nous avons conçu des antennes patch miniaturisée dont nous avons pu valider leurs performances en termes d'adaptation, de gain et de directivité. Les résultats obtenus ont confirmé la faisabilité de la conception de mini-antennes adaptées aux besoins des réseaux radio cognitifs pour les applications IoT.

Notre perspective est d'implémenter ces antennes miniaturisées dans des systèmes IoT pour améliorer la qualité de service des utilisateurs en radio cognitive.

# Bibliographies

- [1] Xie, J., Niu, Y., Jiang, Y., Li, Y., Hou, S., Fang, S., & Fan, Y. (2023, April). "Signal modulation based on software radio platforms". In Ninth Symposium on Novel Photoelectronic Detection Technology and Applications (Vol. 12617, pp. 855-863). SPIE.
- [2] Mitola, J., & Maguire, G. Q. (1999). Cognitive radio: making software radios more personal. *IEEE personal communications*, 6(4), 13-18.
- [3] Tidjani, S., & Hammoudi, Z. (2022). "Optimisation de l'utilisation du spectre par les techniques de la radio cognitive dans les systèmes de communication sans fil". Mémoire de fin d'étude, Université Frères Mentouri-Constantine 1.
- [4] Grace, D., & Zhang, H. (Eds.). (2012). "Cognitive Communications: Distributed Artificial Intelligence (DAI), Regulatory Policy and Economics, Implementation". John Wiley & Sons.
- [5] Tarek, D., Benslimane, A., Darwish, M., & Kotb, A. M. (2020). "Survey on spectrum sharing/allocation for cognitive radio networks Internet of Things". *Egyptian Informatics Journal*, 21(4), 231-239.
- [6] Benmammar, B., & Amraoui, A. (2014). "Réseaux de radio cognitive: Allocation des ressources radio et accès dynamique au spectre". *arXiv preprint arXiv:1407.2705*.
- [7] Arslan, H. (Ed.). (2007). "Cognitive radio, software defined radio, and adaptive wireless systems". Springer Science & Business Media.
- [8] Joseph III, M. (2006). "Cognitive Radio Architecture: The Engineering Foundation of Radio XML". New Jersey US: John Wiley & Sons.
- [9] Ahmad, A., Ahmad, S., Rehmani, M. H., & Hassan, N. U. (2015). "A survey on radio resource allocation in cognitive radio sensor networks". *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 17(2), 888-917.
- [10] Kassri, N., Ennouaary, A., Bah, S., & Baghdadi, H. (2021). "A Review on SDR, Spectrum Sensing, and CR-based IoT in Cognitive Radio Networks". *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 12(6).
- [11] Dias Santana, G. M., Cristo, R. S. D., & Lucas Jaquie Castelo Branco, K. R. (2021). "Integrating cognitive radio with unmanned aerial vehicles: An overview". *Sensors*, 21(3), 830.

- [12] Biglieri, E., Goldsmith, A. J., Greenstein, L. J., Mandayam, N. B., & Poor, H. V. (2013). *"Principles of cognitive radio"*. Cambridge University Press.
- [13] Suresh, P., Daniel, J. V., Parthasarathy, V., & Aswathy, R. H. (2014, November). *"A state of the art review on the Internet of Things (IoT) history, technology and fields of deployment"*. In 2014 International conference on science engineering and management research (ICSEMR) (pp. 1-8). IEEE.
- [14] Korade, S., Kotak, V., & Durafe, A. (2019). *"A review paper on internet of things (IoT) and its applications"*. Int. Res. J. Eng. Technol, 6(6), 1623-1630.
- [15] Saqlain, J. (2018). *"IoT and 5G: History evolution and its architecture their compatibility and future"*.
- [16] Lohiya, R., & Thakkar, A. (2020). *"Application domains, evaluation data sets, and research challenges of IoT: A Systematic Review"*. IEEE Internet of Things Journal, 8(11), 8774-8798.
- [17] Balanis, C. A. (2016). *"Antenna theory: analysis and design"*. John wiley & sons..
- [18] Belmassaoud, D. (2020). *" Etude de nouvelles antennes planaires en tenant compte des surfaces sélectives en fréquence "*.Mémoire de fin d'étude, Université de M'sila.
- [19] Kdrouci, A. (2021) *" Conception d'une antenne patch inspirée des méta-matériaux pour les applications RFID "*. Mémoire de fin d'études. Université de Tlemcen.
- [20] Abdelati, R. E. H. A., BARROU, O., & Abdelkebir, E. L. (2016). *"Le Comportement Des Antennes Fractales De Types «Courbe De Sierpinski» "*. Revue Méditerranéenne des Télécommunications, 6(2).
- [21] Byrne, B., Raveu, N., Capet, N., Le Fur, G., & Duchesne, L. (2015, June). *"Nouvelle Méthodologie de Conception d'Antennes Cornets à Métaparois"*. In Journée Nationale Micro-ondes, JNM'2015.
- [22] Benomar, A. (2013) *"Etude des antennes à Résonateurs Diélectriques. Application aux Réseaux de Télécommunication"*. Thèse de Doctorat. Université européenne de Bretagne.

- [23] Benderradji, R., Gouidmi, H., & Beghidja, A. (2018). "*Effet de Diamètre d'un Concentrateur Solaire Parabolique Sur la Distribution du Flux*". Mémoire de fin d'étude, Université d'Eloued.
- [24] Guezzou, M. (2021). "*Miniaturisation Des antennes ULB à fentes pour une bande de fréquence reconfigurable*". Mémoire de fin d'étude, Université de Bordj Bou Arreridj
- [25] Cherif, A., Himdi, M., Dakhli, S., Castel, X., & Choubani, F. (2022, June). "*Conception d'une antenne Vivaldi large bande et reconfigurable en diagramme de rayonnement pour les communications 5G*". In *JNM 2022*.
- [26] Abdallaoui, I. A. (2018). "*Contribution à l'analyse CEM globale de structures et de circuits. Application aux antennes Vivaldi en présence d'un système non linéaire pour la récupération d'énergie: une approche FDTD*". Thèse de Doctorat, Normandie Université.
- [27] Debab, M. (2020). "*Contribution à l'étude et à la conception d'antennes destinées aux télécommunications Multi-Bandes et Large-Bande*". Mémoire de fin d'étude, Université de Sidi Bel Abès.
- [28] Deghfel, W & Merzougui, R. (2017). "*Etude et conception d'une antenne patch ultra large bande ULB à bande rejetée*". Mémoire de fin d'étude, Université Mohamed Boudiaf - M'SILA.
- [29] Barkat, O., & Benghalia, A. (2009). "*Etude et synthèse des caractéristiques de réseaux d'antennes imprimées supraconductrices dans la bande millimétrique*". Thèse de Doctorat, Université Mentouri, Constantine.
- [30] Sarrazin, F., Pflaum, S., & Delaveaud, C. (2017, May). "*Optimisation de l'efficacité de rayonnement d'une antenne miniature chargée par une capacité*". In *20ème Journées Nationales Microondes*.
- [31] Valleau, J. (2016). "*Miniaturisation d'antennes très large bande pour application spatiales*". Thèse de Doctorat. Université de Toulouse.
- [32] Lynda, B., & Lila, C. (2018). "*Miniaturisation de l'antenne PATCH sous CST*". Mémoire de fin d'étude, Université Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou.

[33] Saraswat, R. K., & Kumar, M. (2020). "*A quad band metamaterial miniaturized antenna for wireless applications with gain enhancement*". *Wireless Personal Communications*, 114(4), 3595-3612.

[34] Kenane, E. H. (2018). "*Contribution à l'optimisation d'un réseau d'antennes intelligentes au système UMTS*". Mémoire de fin d'étude, Université Farhat Abbas, Setif.

[35] Madani Yousfi, Z. ( 2022). "*Réseau d'antennes Vivaldi pour des applications médicales*". Mémoire de fin d'études, Université de Tlemcen.

[ 36] STUDIO, CST MiCrowave. *C st studio suite 2013*. Computer Simulation Technology AG, 2013.