

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'enseignement supérieur et de la Recherche scientifique

جامعة سعد دحلب البليدة

Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا

Faculté de Technologie

قسم الإلكترونيك

Département d'Électronique



Mémoire de Master

Filière : Télécommunication

Spécialité : Réseaux & Télécommunications

Présenté par

RABTI Yacoub

&

SLIMANE Haroun

RT7

CONCEPTION ET SIMULATION D'UNE ANTENNE MIMO POUR LES APPLICATIONS IoT

Proposé par : Dr Yacine Bennani/MCA

2024/2025

Remerciements

Nous remercions d'abord Dieu le tout puissant qui nous a donné la force, le courage et la volonté pour accomplir ce travail.

Nous tenons à exprimer nos profondes gratitude et nos sincères remerciements à notre encadreur Dr. BENNANI pour la haute qualité de son encadrement, son suivi, sa disponibilité et ses conseils. Sans vous, la réalisation de ce mémoire n'aurait pas eu lieu. Encore une fois, merci beaucoup.

Nos remerciements s'adressent à monsieur le président Dr. BENDOUMIA par l'honneur qu'il nous fait de présider ce jury de soutenance, nous lui exprimons notre gratitude profonde.

Nous tenons également à remercier Pr. HEBIB qui a aimablement accepté d'examiner et de juger notre travail et pour l'intérêt qu'il y porte.

Nous adressons nos sincères remerciements à tous les professeurs du département d'électronique .et toutes les personnes qui par leurs conseils et leurs critiques ont guidé nos réflexions et ont accepté à nous rencontrer et répondre à nos questions durant nos recherches.

Un grand merci pour nos familles, pour leur soutien permanent, leur présence et leur encouragement.

Enfin nous remercions tous ceux qui ont contribué de loin ou de près à la réalisation de ce travail.

Dédicaces

Je dédie ce modeste mémoire qui est le fruit de nombreuses années d'étude et de travail, tout en exprimant ma profonde gratitude et sympathie à toutes les personnes qui ont participé de près et de loin pour mener à bien ce projet et plus particulièrement :

A mon père qui m'a toujours épaulé, qui peut être fier de trouver ici le résultat de longues années de sacrifices et de privations pour m'aider à avancer dans la vie. Puisse dieu faire en sorte que ce travail porte son fruit. Merci pour les valeurs nobles, l'éducation et le soutien permanent venu de toi.

A ma mère, qui a œuvré pour ma réussite, de par son amour, son soutien tous les sacrifices consentis et ses précieux conseils pour toute son assistance et sa présence dans ma vie.

A mon frère «Zaid» et à ma sœur «Ibtissam» que je les aime sans limites.

A mon cher binôme Yacoub, mon ami que j'ai partagé cette dernière année d'étude.

A tous mes ami(e)s avec lesquels que j'ai partagé les bons moments.

A tous ceux qui m'ont aidé de loin ou de près.

Dédicaces

Je dédié ce travail à Mes chères parents ma mère et mon père pour leurs sacrifices, leur amour et leur présence dans les moments les plus difficiles. Merci et que Dieu vous garde.

Mes chères frères Mohamed, Khaled, Yasser, et Youcef et mes chers collègues Bensafi Lyes Adel, Laribi Abderrahim, Yakhlef Mohamed et Toutes mes amis et camarades, et à ceux qui font tous les jours notre Bonheur.

Rabti.Y

Résumé

Ce mémoire présente la conception et la simulation d'une antenne MIMO à Ultra Large Bande (ULB) destinée aux applications de l'Internet des Objets (IoT). Les résultats de simulation ont démontré que l'antenne patch conçue présente une adaptation d'impédance satisfaisante ($S_{11} < -10$ dB) sur une large bande allant de 2 à 7 GHz, avec un rayonnement stable et un gain adapté aux besoins des objets connectés. Dans sa version MIMO 2x2, l'antenne affiche un faible couplage mutuel ($S_{21}/S_{12} < -15$ dB), un coefficient de corrélation d'enveloppe (ECC) proche de zéro, et un gain de diversité (DG) proche de 10. Ces performances confirment l'efficacité de la conception pour des communications fiables, en configuration simple ou MIMO, dans des environnements IoT.

Mots clés : Antenne patch imprimée, Internet des Objets, Ultra Large Bande, Les applications IoT, Coefficient de réflexion, gain de diversité, MIMO.

ملخص

في إطار التطور المتسارع لإنترنت الأشياء، يقدم هذا البحث تصميم ومحاكاة هوائي رقعي مطبوع ذي نطاق ترددي فائق الاتساع موجه لتطبيقات متنوعة في مجال إنترنت الأشياء. تم تصميم الهوائي على ركيزة من نوع (آف آر فور)، وتم تحسين الهوائي المُغذَى بواسطة خط ميكرو شريطي من خلال عدة تقنيات، مثل إضافة الشقوق، وتقليص مستوى الأرضي، وضبط التغذية، مما سمح بنقل التردد المركزي إلى 4 غيغاهرتز وتوسيع عرض النطاق الترددي ليشمل نطاقاً يتراوح بين 2 و 7 غيغاهرتز. وقد أظهرت نتائج المحاكاة توافقاً جيداً في معامل الانعكاس على كامل النطاق، وإشعاعاً مستقرًا، وكسباً يتناسب مع متطلبات الأجهزة المتصلة. ثم تم توسيع التصميم إلى تكوين متعدد المداخل والمخارج مع دمج تقنيات العزل مثل "السنابس" (النتوءات) لتقليل التداخل المتبادل تم تأكيد أداء نظام متعدد المداخل والمخارج من خلال معامل ارتباط الغلاف القريب من الصفر وكسب التنوع قريب من 10، مما يدل على فعالية هذا التكوين في توفير اتصالات موثوقة وعالية الأداء. وبالتالي، تُعتبر الهوائي المطور مدمجاً وفعالاً ومناسباً تماماً للدمج في أجهزة إنترنت الأشياء الحديثة، سواء في التكوين الأحادي أو في نظام متعدد المداخل والمخارج.

كلمات المفاتيح:

هوائي رقعي مطبوع، إنترنت الأشياء، نطاق ترددي فائق الاتساع، تطبيقات إنترنت الأشياء، معامل الانعكاس، كسب التنوع، متعدد المداخل والمخارج.

Abstract

This thesis presents the design and simulation of an Ultra Wideband (UWB) MIMO antenna intended for Internet of Things (IoT) applications. The simulation results showed that the designed patch antenna achieves good impedance matching ($S_{11} < -10$ dB) across a wide bandwidth from 2 to 7 GHz, with stable radiation and gain suitable for IoT device requirements. In its 2x2 MIMO configuration, the antenna exhibits low mutual coupling ($S_{21}/S_{12} < -15$ dB), an envelope correlation coefficient (ECC) close to zero, and a diversity gain (DG) near 10. These performance indicators confirm the effectiveness of the design for reliable communications in both single and MIMO configurations, making it well-suited for modern IoT environments.

Keys words: Antenna, Internet of Things (IoT), Ultra Wideband (UWB or ULB), IoT Applications, Reflection Coefficient (S_{11}), Diversity Gain.

Table de matière

Introduction générale	1
1.1 Introduction	2
1.2. Définition et caractéristiques de l'internet des objets	2
1.2.1. Définition	2
1.2.2. Définition 1	3
1.2.3. Définition 2	3
1.2.4. Définition 3	3
1.3. Caractéristiques d'un système d'internet des objets	3
1.3.1. Inter-connectivite	3
1.3.2. Hétérogénéité	3
1.3.3. Changements dynamiques	4
1.3.4. Énorme échelle	4
1.3.5. Sécurité	4
1.3.6. Connectivite	4
1.4. Architecture d'un système IoT	4
1.4.1. Couche de perception	5
1.4.2. Couche de transmission	5
1.4.3. Couche application	6
1.5. Domaines d'applications des IoT	6
1.5.1. Automobile connectée	6
1.5.2. Santé	8
1.5.3. Villes intelligentes	9
1.5.4. Industrie	10
1.5.5. Agriculture	10
1.6. Architecture de l'internet des objets	11
1.6.1. Couche de perception (perception layer) :	12
1.6.2. Couche réseau (network layer)	12
1.6.3. Couche de traitement (middleware)	12
1.6.4. Couche application	12
1.6.5. Couche commercial (business layer)	12

1.7. Avantages des IoT	13
1.8. Protocoles IoT fonctionnant dans la bande 2.2 – 6.6 GHz	13
1.9 Conclusion	14
2.1. Introduction	14
2.2. Définition et historique des antennes imprimées	14
2.3. Description d'une antenne micro ruban	15
2.3.1. Structure d'une antenne imprimée	15
2.3.2. Les différentes formes du patch	16
2.4. Domaine d'application des antennes imprimées	17
2.4.1. Avantages et inconvénients des antennes imprimées	17
2.4.2. Paramètres et Caractéristiques de l'antenne patch	18
2.4.2.1. Impédance d'entrée d'une antenne	18
2.4.2.2. Directivité	19
2.4.2.3. Coefficient de réflexion (S_{11})	19
2.4.2.4. Gain	19
2.4.2.5. Bande passante	20
2.4.2.6. Diagramme de rayonnement	20
2.4.2.7. VSWR	21
2.4.2.8. Polarisation d'une onde	21
2.4.3. Techniques d'alimentations	22
2.4.3.1. Alimentation par une ligne micro ruban	22
2.4.3.2. Alimentation par sonde coaxiale	22
2.4.3.3. Alimentation couplée par fente (ouverture)	23
2.4.3.4. Alimentation par couplage de proximité	23
2.4.4. Techniques d'adaptation des antennes imprimées	24
2.4.4.1. Adaptation par ligne quart d'onde	24
2.4.4.2. Adaptation par stub	26
2.4.4.3. Adaptation avec encoche	26
2.4.5. Systèmes MIMO (Entrées Multiples Sorties Multiples)	27
2.4.5.1. Intérêt Des Systèmes MIMO	27
2.4.5.2. Historique	28
2.4.5.3. Principe de la technique MIMO	28
a. Principe De La Diversité	29
2.4.5.4 Performances des antennes MIMO en diversité	30
a. Gain en diversité	30
b. Coefficient de corrélation d'enveloppe (ECC : Enveloppe Corrélation Coefficient)	30
2.4.6. Antennes ULB	30
2.4.7. Technologie ultra large bande	31
2.4.7.1. Historique	31
2.4.7.2. Définition	32
2.4.7.3. Avantages et inconvénients de l'ultra large band	33
2.5. Conclusion	33
Chapitre 3 Conception et simulations d'une antenne rectangulaire MIMO ULB14	
3.1. Introduction	35

3.2.	Présentation de l'outil de simulation	35
3.3.	Conception et simulations d'une antenne patch rectangulaire $f_r=5\text{GHz}$	36
3.3.1.	Étapes de Conception	36
3.3.2.	Résultat de simulation	40
3.3.3.	Adaptation de l'antenne patch rectangulaire	41
3.3.4.	Détermination de la bande passante	41
3.4.	Conception et simulations d'une antenne patch rectangulaire $f_r=4\text{GHz}$	42
3.4.1.	Étapes de Conception	42
3.4.2.	Résultat de simulation	43
3.4.3.	Adaptation de l'antenne patch rectangulaire	44
3.4.4.	Élargissement de la bande passante	45
3.4.5.	Détermination de la bande passante	47
3.5.	Conception et simulations d'une antenne MIMO	47
3.5.1.	Conception d'antenne MIMO 2×2	48
3.5.2.	Coefficients de réflexion et transmission S_{11} et S_{22} , S_{12} et S_{21}	48
3.5.3.	Isolation antenne MIMO 2×2	49
3.5.4.	Résultat et simulation	49
3.6.	Coefficient de corrélation d'enveloppe (ECC : Enveloppe Corrélation Coefficient) et gain de diversité (DG : Diversity Gain)	50
3.7.	Conclusion	51

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 1. 1.ARCHITECTURE DE L'IOT [8].....	5
TABLEAU 3. 1.CAHIER DE CHARGES DE L'ANTENNE PROPOSÉE	37
TABLEAU 3. 2.TABLEAU DES CALCULSDES DIMENSIONS [27]	38
TABLEAU 3. 3.PARAMÈTRES GÉOMÉTRIQUES DE L'ANTENNE DE BASEF _R =5GHZ	40
TABLEAU 3. 4. ÉTUDES PARAMÉTRIQUES D'ADAPTATIONF _R =5GHZ	41
TABLEAU 3. 5.PARAMÈTRES GÉOMÉTRIQUES DE L'ANTENNE DE BASEF _R =4GHZ	43
TABLEAU 3. 6.ÉTUDES PARAMÉTRIQUES D'ADAPTATIONF _R =4GHZ	44
TABLEAU 3. 7.ÉTUDES PARAMÉTRIQUES D'ÉLARGISSEMENT	46

Liste des figures

FIGURE 1.1.DIFFÉRENTS DOMAINES D'APPLICATION D'IOT [10].....	6
FIGURE 1.2.DIFFÉRENTES UTILISATIONS DE LA VOITURE [12].....	8
FIGURE 1.3.UN SYSTÈME DE SANTÉ ÉLECTRONIQUE [14].....	9
FIGURE 1.4.MAISON INTELLIGENTE (SMART HOME) GRÂCEÀ L'IOT [16]	10
FIGURE 1.5.SCHÉMA CONCEPTUEL DE L'IOT DANS L'INDUSTRIE [18].....	10
FIGURE 1.6.APPLICATION DE L'IOT DANS L'AGRICULTURE INTELLIGENTE [20]	11
FIGURE 1.7.ARCHITECTURE DE L'INTERNET DES OBJETS [21]	11
FIGURE 2. 1.GÉOMÉTRIE D'UNE ANTENNE MICRO RUBAN DE FORME ARBITRAIRE [29].....	15
FIGURE 2. 2.DIVERS TYPES D'ÉLÉMENTS RAYONNANTS [27]	16
FIGURE 2. 3.ALIMENTATION PAR UNE LIGNE MICRO RUBAN [27]	22
FIGURE 2. 4. ALIMENTATION PAR SONDE COAXIALE [27].....	23
FIGURE 2. 5.ALIMENTATION COUPLÉE PAR FENTE (OUVERTURE)[27].....	23
FIGURE 2. 6 ALIMENTATION PAR COUPLAGE DE PROXIMITÉ [27].....	24
FIGURE 2. 7 TRANSFORMATEUR $\lambda_0/4$ [27]	25
FIGURE 2. 8 ADAPTATION PAR LIGNE QUART D'ONDE [32]	25
FIGURE 2. 9 ADAPTATION PAR STUB [27].....	26
FIGURE 2. 10 ADAPTATION AVEC ENCOCHE [27]	26
FIGURE 2. 11 PRINCIPE DU MIMO [32]	28
FIGURE 3. 1.GÉOMÉTRIE DE L'ANTENNE RECTANGULAIRE	38
FIGURE 3. 2.COEFFICIENT DE RÉFLEXION DE L'ANTENNE INITIALE	40
FIGURE 3. 3.COEFFICIENT DE RÉFLEXION DE L'ANTENNE PATCH RECTANGULAIRE ADAPTÉE	41
FIGURE 3. 4.COEFFICIENT DE RÉFLEXION DE L'ANTENNE PATCH ÉLARGIE	42
FIGURE 3. 5 STRUCTURE GÉOMÉTRIE DE L'ANTENNE PATCH	43
FIGURE 3. 6.COEFFICIENT DE RÉFLEXION DE L'ANTENNE DE BASE	44
FIGURE 3. 7.GÉOMÉTRIE DE L'ANTENNE RECTANGULAIRE MODIFIÉE	45
FIGURE 3. 8.COEFFICIENT DE RÉFLEXION DE L'ANTENNE PATCH RECTANGULAIRE PROPOSÉE ADAPTÉE.....	45
FIGURE 3. 9.GÉOMÉTRIE DE L'ANTENNE RECTANGULAIRE MODIFIÉE	46
FIGURE 3. 10.COEFFICIENT DE RÉFLEXION DE L'ANTENNE ÉLARGIE.....	47
FIGURE 3. 11.STRUCTURE DE ANTENNE MIMO 2×2	48
FIGURE 3. 12.COEFFICIENTS DE RÉFLEXION ET TRANSMISSION D'UNE ANTENNE MIMO 2×2.....	48
FIGURE 3. 13. STRUCTURE D'ISOLATION DE L'ANTENNE MIMO 2*2.....	49
FIGURE 3. 14.COEFFICIENTS DE RÉFLEXION ET TRANSMISSION D'UNE ANTENNE MIMO 2×2.....	49
FIGURE 3. 15.ECC ET DG DE L'ANTENNE MIMO À DEUX PORTS EN FONCTION DE LA FRÉQUENCE	51

Liste des abréviations

CST : Computer Simulation Technology

DG : Diversity Gain (Gain de diversité)

ECC : EnveloppeCorrélation Coefficient (Coefficient de corrélation d'enveloppe)

FIT : FinitéIntégration Technique

GHz : Gigahertz

IoT : Internet of Things

ISM : Industrial, Scientific and Medical

MIMO : Multiple Input Multiple Output

NoC : Network on Chip (Réseau sur puce)

RFID : Radio Frequency Identification

SISO : Single Input Single Output

SIMO : Single Input Multiple Output

MISO : Multiple Input Single Output

S-parameters / S_{11} , S_{21} : Paramètres de diffusion

ULB : Ultra Large Bande

UMTS : Universal Mobile Telecommunications System

USB : Universal Serial Bus

VSWR : Voltage Standing Wave Ratio

V2X, V2V, V2I : Vehicle-to-Everything, Vehicle-to-Vehicle, Vehicle-to-Infrastructure

Wi-Fi : Wireless Fidelity

WIMAX : Worldwide Interoperability for Microwave Access

Introduction générale

L'essor rapide des technologies de communication sans fil transforme notre monde, plaçant l'Internet des objets (IoT) au centre d'une révolution numérique. Connecter des objets physiques intelligents via des réseaux sans fil ouvre un éventail d'applications, de la santé à l'industrie. Cependant, cette croissance exponentielle des objets connectés pose des défis technologiques majeurs, notamment en termes de bande passante, de fiabilité des communications, d'efficacité énergétique et de miniaturisation.

Au cœur de ces systèmes, l'antenne joue un rôle crucial en convertissant les signaux électriques en ondes électromagnétiques, influençant directement les performances de communication. Pour l'IoT, les antennes doivent être compactes, efficaces, à large bande et parfois MIMO pour améliorer la vitesse et la fiabilité des transmissions.

Les antennes patch micro-ruban, en particulier celles avec des résonateurs couplés et des découpes optimisées, apparaissent comme des solutions prometteuses pour l'IoT. Leur simplicité, leur petite taille et leur intégration facile sur circuit imprimé sont des avantages clés. Les découpes permettent d'augmenter la bande passante, essentielle pour la compatibilité multi-normes.

Ce mémoire explore cette voie en proposant la conception et la simulation d'une antenne patch à résonance multiple, opérant de 2.2 GHz à 6.6 GHz avec une fréquence centrale de 4 GHz, spécifiquement pour les applications IoT. En utilisant des simulations numériques avec CST Microwave Studio, l'objectif est d'optimiser l'antenne pour obtenir une adaptation d'impédance optimale sur toute la bande de fréquences visée.

Organisation du mémoire:

Ce mémoire est structuré en trois chapitres principaux. Le premier chapitre introduit le concept de l'Internet des Objets (IoT), en mettant en évidence ses caractéristiques, son architecture, ses domaines d'application et les protocoles de communication couramment utilisés dans les bandes de fréquence ciblées. Le deuxième chapitre est consacré aux antennes imprimées à ultra large bande, en particulier les antennes MIMO, en détaillant leurs structures, leurs paramètres de performance, ainsi que les techniques d'alimentation et d'adaptation. Enfin, le troisième chapitre présente la conception et la simulation d'une antenne patch adaptée aux applications IoT, suivie de son évolution vers une structure MIMO 2×2. Cette partie s'appuie sur des outils de simulation électromagnétique, notamment CST Microwave Studio, pour analyser les performances de l'antenne à travers des paramètres tels que le coefficient de réflexion (S_{11}), le gain de diversité et le coefficient de corrélation d'enveloppe.

Chapitre 1 Internet des objets (IoT)

1.1 Introduction

L'IoT (Internet Of Things) est une technologie grandissante. C'est un concept orienté micro services, où une multitude de petits objets réalisant des tâches simples (capteurs, activateurs, ...) sont connectés par ondes radio entre eux ou à une passerelle vers le Cloud, dans lequel les données sont traitées et des décisions sont prises. De nombreux domaines d'applications existent actuellement en industrie, dans le médical ou même chez les particuliers.

Les appareils utilisés pour l'internet des objets sont généralement très modulaires afin d'être utilisés pour différentes applications et de pouvoir s'appairer facilement à un réseau. Ils ont aussi des contraintes au niveau de la durée de vie de leur batterie et embarque donc très peu de puissance de calcul.

Ces deux points évoqués ci-dessus rendent donc les réseaux IoT relativement vulnérables aux attaques. En effet, la faible puissance de calcul des objets les rend incapables de se défendre en cas d'attaques ni d'ailleurs de les détecter. De plus l'interopérabilité des objets induit des vulnérabilités au sein même du réseau.

Il serait donc intéressant de mettre en place des moyens capables d'apporter plus de sécurité dans les réseaux IoT.

L'Internet des objets représente une infrastructure qui remplit le gap entre les capteurs simples qui fournit des données bruts, bruités et imparfaites et la virtualisation basée sur des applications de haut niveau qui fournissent des services sophistiqués. Dans ce chapitre nous présentons la définition du concept et l'architecture de l'IoT.

1.2. Définition et caractéristiques de l'internet des objets

1.2.1. Définition

Il existe plusieurs définitions du concept "Internet des Objets" (en anglais : *Internet of Things* ou *IoT*). Ci-dessous, nous présentons quelques-unes de ces définitions.

1.2.2. Définition 1

L'Internet des Objets est un réseau qui connecte et intègre des objets à Internet, en utilisant des protocoles assurant leur communication et l'échange d'informations à travers une variété de dispositifs [1].

1.2.3. Définition 2

L'Internet des Objets peut également être défini comme un réseau de réseaux qui permet, grâce à des systèmes d'identification électroniques normalisés et unifiés, ainsi qu'à des dispositifs mobiles sans fil, d'identifier de manière directe et univoque des entités numériques et des objets physiques. Il rend ainsi possible la récupération, le stockage, le transfert et le traitement des données sans discontinuité entre les mondes physique et virtuel [2].

1.2.4. Définition 3

L'Internet des Objets est une extension de l'Internet actuel vers tout objet capable de communiquer, de manière directe ou indirecte, avec des équipements électroniques eux-mêmes connectés à Internet [3].

1.3. Caractéristiques d'un système d'internet des objets

Les caractéristiques fondamentales de l'IoT sont les suivantes [4] :

1.3.1. Inter-connectivité

Tout peut être interconnecté à l'infrastructure mondiale d'information et de communication Services liés aux objets connectés.

L'IoT est capable de fournir des services liés aux objets tout en respectant certaines contraintes, telles que la protection de la vie privée et la cohérence sémantique entre les objets physiques et leurs représentations virtuelles.

Afin d'assurer ces services tout en tenant compte des contraintes liées aux objets, les technologies du monde physique et celles du monde de l'information devront évoluer.

1.3.2. Hétérogénéité

Les périphériques de l'IoT sont hétérogènes, que ce soit au niveau des plates-formes matérielles ou des réseaux. Ils peuvent interagir avec d'autres appareils ou plates-formes de services via différents types de réseaux.

1.3.3. Changements dynamiques

L'état des dispositifs évolue de manière dynamique, par exemple lorsqu'ils passent en mode veille ou se réveillent, se connectent ou se déconnectent, ainsi qu'en fonction de leur contexte, notamment leur emplacement et leur vitesse. De plus, le nombre d'appareils peut également varier dynamiquement[5].

1.3.4. Énorme échelle

Le nombre de périphériques à gérer et à faire communiquer entre eux sera au moins d'un ordre de grandeur supérieur à celui des périphériques actuellement connectés à Internet. Un enjeu encore plus critique concernera la gestion et l'interprétation des données générées, en vue de leur utilisation dans diverses applications. Cela implique notamment la sémantique des données ainsi qu'une gestion efficace de celles-ci [6].

1.3.5. Sécurité

Alors que nous tirons parti des avantages offerts par l'IoT, nous ne devons pas négliger la question de la sécurité. En tant que concepteurs et utilisateurs de l'IoT, il est essentiel de mettre en place des mécanismes garantissant la sécurité. Cela inclut la protection de nos données personnelles ainsi que celle de notre intégrité physique. La sécurisation des points de terminaison, des réseaux et des données qu'ils transportent nécessite la création d'un paradigme de sécurité capable d'évoluer en permanence [6].

1.3.6. Connectivité

La connectivité permet l'accessibilité et la compatibilité du réseau. L'accessibilité se met sur un réseau alors que la compatibilité fournit la capacité commune de consommer et de produire des données [7].

1.4. Architecture d'un système IoT

En fait, il n'y a pas une définition formellement identique d'une architecture d'un système IoT adoptée par tous les projets. Dans ce mémoire on adopte celle dans le Tableau 1.1. Cette architecture est composée de trois couches [6] :

Tableau 1. 1.Architecture de l'loT [8]

Couche Application	Application IoT
	support d'application
Couche Transmission	Réseau local et étendu
	Réseau cœur
	Réseau d'accès
Couche Perception	Réseau de perception
	Nœud de perception

1.4.1. Couche de perception

La couche de perception (peut être appelé "couche de périphérique", "couche sensorielle" ou "couche de reconnaissance") qui est la couche la plus basse de l'architecture IoT, est responsable de la capture des informations du monde réel et leur représentation au format numérique. Elle inclut les technologies utilisées pour la détection (collecte des données de l'environnement), l'identification (identification d'objets), l'activation (réalisation données détectées) et la communication (établissement de la connectivité entre appareils intelligents hétérogènes) avec un minimum d'interaction humaine. Selon les fonctionnalités qu'elle assure, cette couche peut être divisée en deux sous-couches : les nœuds de perception (ou nœuds sensoriels) et le réseau de perception (comme réseau des capteurs).

1.4.2. Couche de transmission

La couche de transmission (appelée aussi «couche de transport» ou «couche réseau») est responsable de transmission des données collectées par les nœuds de perception à l'unité de traitement de l'information (ou unités de prise de décision de haut niveau) à travers un réseau ou une interconnexion des réseaux. Cette couche permet alors une intégration d'une variété de réseaux, de technologies et de protocoles hétérogènes.

Cette couche peut être divisée en trois sous-couches : réseau d'accès, réseau cœur et réseau local et étendu.

1.4.3. Couche application

C'est la couche la plus haute de l'architecture IoT visible par l'utilisateur final. La couche application a pour but de gérer et de fournir les applications globales en se basant sur là les informations collectées par la couche de perception. Elle fournit aux utilisateurs finaux un accès aux services personnalisés sur le réseau, en fonction de leurs besoins, grâce à l'utilisation de divers appareils mobiles et équipements terminaux.

Cette couche peut être divisée en deux sous-couches : couche de support d'application et applications IoT[9].

1.5. Domaines d'applications des IoT

L'IoT couvrira un large éventail d'applications et concernera presque tous les domaines de notre vie quotidienne, ce qui favorisera l'émergence d'espaces intelligents. Parmi ces espaces intelligents, on peut citer :

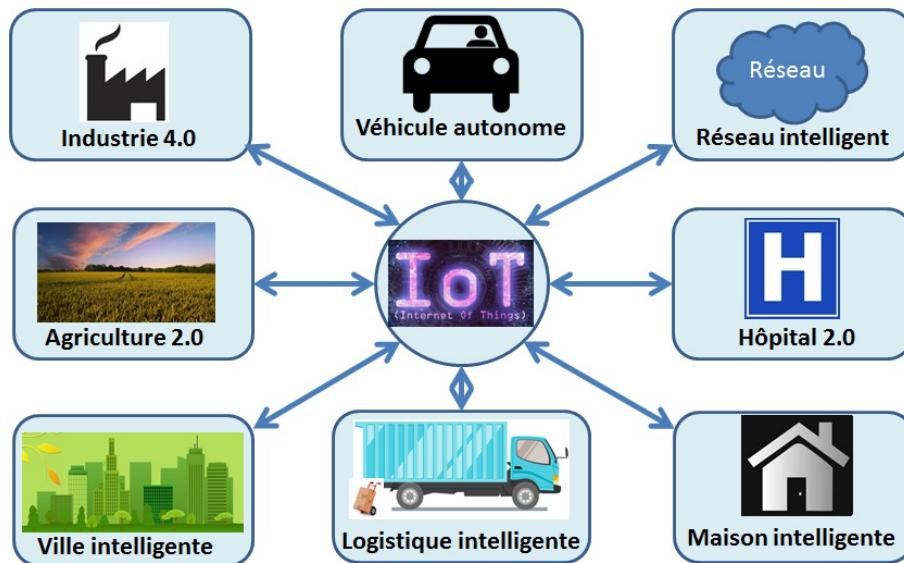


Figure 1.1. Différents domaines d'application d'IoT [10]

1.5.1. Automobile connectée

Internet des objets (IoT) a aujourd'hui gagné le secteur automobile. Après avoir touché l'info-divertissement, il s'est étendu à la fusion de capteurs, à la géolocalisation ainsi qu'aux communications cellulaires et à courte portée qui sont au

cœur des nouvelles architectures V2X qui vont améliorer l'expérience de conduite et accélérer le développement des véhicules autonomes. À un niveau élémentaire, le V2X (pour Véhicule à Véhicule, V2V, et Véhicule à Infrastructures routières V2I) permet aux automobiles de communiquer des informations critiques entre l'infrastructure et d'autres véhicules pour éviter les accidents aux intersections. Cette technologie peut aussi permettre l'envoi d'informations de localisation pour les services d'appel d'urgence (eCall) qui deviennent obligatoires dans un nombre croissant de pays. Toutefois, là où le potentiel des communications radio

Dernier domaine qui sera fortement impacté par l'arrivée des objets connectés, l'automobile. Celle-ci existe bel et bien, c'est une réalité technologique. La plus connue, la Google Car, est développée depuis quelques années aux Etats-Unis. Cette automobile intègre ainsi un radar rotatif sur le toit, un radar GPS placé sur les roues, une caméra vidéo placée au niveau du rétroviseur central, et des multiples radars sensoriels placés à différents espaces de la voiture. La voiture sans chauffeur est également une réalité chez les constructeurs traditionnels comme Renault, Volvo ou encore Audi.

De nombreux systèmes permettent dès à présent de rendre une voiture connectée à l'image du système mirrorlink. Comme l'indique son nom, il va reproduire, tel un miroir, l'interface du smartphone directement sur un écran de la voiture. L'utilisateur pourra ainsi bénéficier du GPS et de la musique présente sur le smartphone. Il existe également des interfaces adaptées aux voitures issues des constructeurs de smartphones. Ici encore Apple avec son système Carplay et Google avec le logiciel Android Auto rentrent en concurrence pour proposer des offres incompatibles. Ces deux systèmes intégrés vont permettre une connexion par voie filaire, USB, ou sans-fil, Bluetooth [11].



Figure 1.2. Différentes utilisations de la voiture [12]

1.5.2. Santé

L'internet des objets a rapidement transformé la prestation des soins. Les équipements et les capteurs sont de plus en plus « intelligents » et génèrent toujours plus de données nécessaires aux équipements médicaux, aux professionnels et profitant ainsi aux patients, en réduisant les coûts et en améliorant leur satisfaction. Les données ainsi collectées facilitent, adaptent, améliorent, anticipent ou réorganisent les soins des patients.

Dans le contexte de généralisation du traitement médical électronique, l'Internet des objets est fondamental. En effet, la conception d'un système intelligent de prise de décision clinique, matérialisé par le stockage des données collectées sur les patients et leur accessibilité universelle, procurerait au médecin un excellent appui durant la phase de traitement [13].



Figure 1.3. Un système de santé électronique [14]

1.5.3. Villes intelligentes

Grace au développement technologique dans plusieurs domaines tels que l'électronique, l'informatique, internet des objets et autres, la domotique a pris une nouvelle orientation. Ce domaine d'application a vu le jour dans les années 80 avec la vague de la miniaturisation des composants électroniques.

Une maison intelligente est un ensemble d'objets connectés entre eux et contrôlés par un système de base : microcontrôleur, FPGA ou réseau sur Puce « NoC ». Assurant diverses fonctions (éclairage, multimédia, chauffage et climatisation, volets, sécurité...). Ces nouvelles orientations permettent non seulement d'accroître les services à la personne ou le confort à domicile mais aussi de mieux gérer la consommation d'énergie et d'optimiser des ressources partagées [15].



Figure 1.4. Maison intelligente (smart home) grâce à l'IoT [16]

1.5.4. Industrie

L'industrie subit des mutations liées à l'IoT dans son fonctionnement. Dans l'industrie l'IoT permettra un suivi total des produits, de la chaîne de production, jusqu'à la chaîne logistique et de distribution en supervisant les conditions d'approvisionnement. Cette traçabilité de bout en bout facilitera la lutte contre la contrefaçon, la fraude et les crimes économiques transfrontaliers [17].

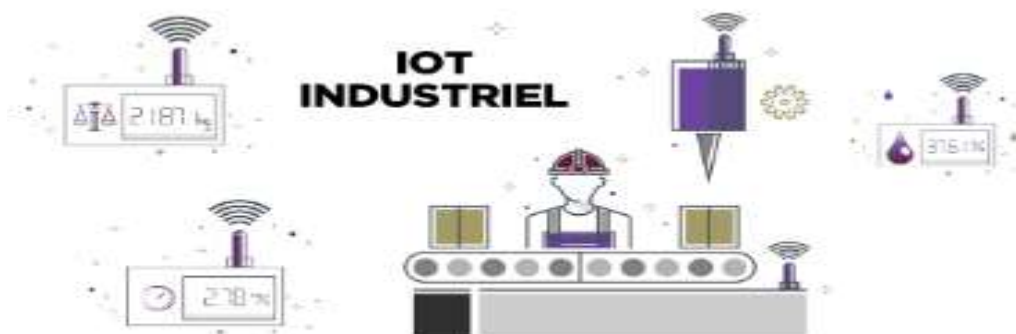


Figure 1.5. Schéma conceptuel de l'IoT dans l'industrie [18]

1.5.5. Agriculture

Dans ce domaine, des réseaux de capteurs interconnectés à l'IoT peuvent être utilisés pour la supervision de l'environnement des cultures. Ceci permettra une meilleure aide à la décision en agriculture, notamment pour optimiser l'eau d'irrigation, l'usage des intrants, et la planification de travaux agricoles. Ces réseaux

peuvent être aussi utilisés pour lutter contre la pollution de l'air, du sol et des eaux et améliorer la qualité de l'environnement en général [19].



Figure 1.6. Application de l'IoT dans l'agriculture intelligente [20]

1.6. Architecture de l'internet des objets

Un système IoT est composé d'un certain nombre de couches fonctionnelles pour faciliter la différente fonctionnalité du système tel que la détection, l'identification, l'actionnement, la communication et la gestion.

On présente ces couches comme décrit ci-dessous :

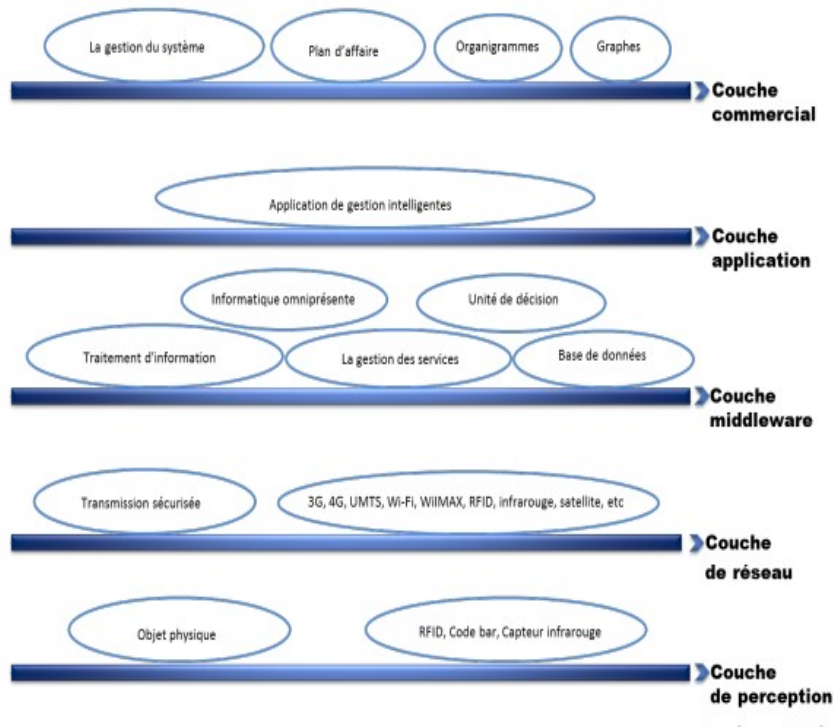


Figure 1.7. Architecture de l'internet des objets [21]

1.6.1. Couche de perception (perception layer) :

Il s'agit de la couche physique, composée de différents types de capteurs. Ceux-ci collectent diverses informations telles que l'emplacement, la vitesse du vent, les vibrations, le niveau de pH, l'humidité, la quantité de poussière dans l'air, etc., et peuvent également identifier d'autres objets intelligents présents dans l'environnement. Cette couche a pour rôle de transmettre ces données à la couche réseau via des canaux sécurisés [19].

1.6.2. Couche réseau (network layer)

Cette couche fournit un soutien au réseau de base et le transfert de données recueillies par les capteurs à travers un réseau sécurisé pour connecter entre eux tous les équipements intelligents. Cette couche est principalement responsable du transfert de l'information de la couche Perception à la couche supérieure et vice versa à travers des réseaux selon le type de capteurs, tels que 3G, 4G, UMTS, Wi-Fi, WIMAX, RFID, infrarouge, satellite, etc[19].

1.6.3. Couche de traitement (middleware)

La couche de traitement repose essentiellement sur les technologies de « middleware » telles que les bases de données, cloud computing et traitement des big data. Permettant de réunir les « hardwares » et « softwares » sur une même plateforme. Elle peut gérer et fournir un ensemble diversifié de services aux couches inférieures avec une capacité de récupérer, traiter, calculer l'information, puis décider automatiquement en fonction des résultats de calcul[19].

1.6.4. Couche application

La couche application est la plus importante en termes d'utilisateurs car elle agit comme une interface qui fournit les applications nécessaires pour visualiser, analyser, contrôler et surveiller divers aspects du système IoT au stade actuel de l'action. Ses applications peuvent être utilisées dans divers secteurs comme le transport, les soins de santé, l'agriculture, la chaîne d'approvisionnement, le gouvernement, le commerce de détail, etc[19].

Cette couche est responsable de la gestion inclusive des applications en fonction des informations traitées dans la couche Middleware.

1.6.5. Couche commercial (business layer)

Cette couche gère l'ensemble du système IoT, y compris les applications, les modèles d'affaires et de profit et la protection de la vie privée des utilisateurs.

Elle peut créer des graphiques pratiques, des modèles opérationnels, un organigramme, un rapport de la haute direction, etc. En fonction des bons résultats d'analyse, elle aidera les gestionnaires fonctionnels ou les cadres supérieurs à prendre des décisions plus précises [19].

1.7. Avantages des IoT

L'Internet des objets (IoT) est un paradigme émergent qui permet la communication entre les appareils électroniques et les capteurs via Internet afin de faciliter notre vie. L'IoT utilise des appareils intelligents et Internet pour fournir des solutions innovantes à divers défis [22].

- Réduire les coûts
- Optimisation des équipements, gestion de tournées, économie d'énergie,
- Optimisation suivi des systèmes
- Détection des pannes, des lieux d'intervention facilitée, maintenance industrielle optimisée.
- Création de nouveaux services
- Être plus proche des clients finaux, accéder en temps réel aux besoins, intervenir au moment opportun.

1.8. Protocoles IoT fonctionnant dans la bande 2.2 – 6.6 GHz

Les protocoles IoT assurent la communication entre les objets connectés via diverses technologies sans fil. Dans le contexte de ce mémoire, la plage de fréquence ciblée [2.2 GHz – 6.6 GHz] couvre de nombreux protocoles essentiels utilisés dans les architectures IoT actuelles.

Voici les principaux protocoles fonctionnant dans cette bande :

- ✓ Wi-Fi (IEEE 802.11 b/g/n/ac) : Utilisé pour les objets IoT domestiques et industriels, il fonctionne dans les bandes 2.4 GHz et 5 GHz. Il supporte les configurations MIMO et les hauts débits nécessaires à la vidéo, la télésurveillance ou la maison intelligente [23].
- ✓ Bluetooth Low Energy (BLE) : Fonctionne sur 2.4 GHz, adapté aux capteurs, wearables, dispositifs médicaux. Il permet des connexions à très basse consommation [24].

- ✓ ZigBee (IEEE 802.15.4) : Protocole léger à faible débit sur 2.4 GHz, très utilisé dans la domotique et les réseaux maillés[25].
- ✓ Thread : Variante sécurisée de 6LoWPAN fonctionnant en 2.4 GHz, idéale pour les réseaux résidentiels [26].
- ✓ LTE-M & NB-IoT et 5G (bande 3.5 GHz à 6 GHz) : Protocoles cellulaires adaptés à l'IoT longue portée, utilisés dans les systèmes intelligents de ville et d'industrie [26].

1.9 Conclusion

Pour conclure, l'Internet des Objets représente une avance technologique majeure avec un impact considérable sur de nombreux domaines. Cependant, pour réaliser pleinement son potentiel, des défis cruciaux liés à la communication sans fil doivent être relevés. L'amélioration de l'efficacité et de la fiabilité des transmissions, notamment grâce à des technologies comme le MIMO, est essentielle pour soutenir la croissance et la complexité croissante des réseaux d'objets connectés.

*Chapitre 2 : Les Antennes
Imprimées Mimo Ultra Large
Bande*

2.1. Introduction

Les systèmes de communication sans fil modernes exigent des performances accrues en termes de débit de données, de fiabilité et d'efficacité spectrale. Dans ce contexte, les antennes imprimées, notamment celles intégrant la technologie MIMO (multiple input multiple output) et fonctionnant en ultra large bande (ULB), représentent une solution prometteuse pour répondre à ces besoins. Les antenne imprimées, grâce à leur compacité, leur faible cout et leur facilite d'intégration , sont largement utilisées dans diverses application , allant des télécommunication mobiles aux radars en passant par l'internet des objets .cependant , leurs limitations, telles que la bande passante étroite et le gain modère , ont conduit au développement de configurations avancées , notamment les systèmes MIMO-ULB, qui combinent les avantages de la large bande pour améliorer les performances globales.

2.2. Définition et historique des antennes imprimées

Une antenne est définie par le dictionnaire de *Webster* comme " un dispositif généralement métallique (comme une tige ou un fil) permettant de rayonner ou de recevoir des ondes radio ". La norme IEEE Définitions des termes relatifs aux antennes (IEEE Std 145-1983), définit l'antenne comme « un moyen de rayonner ou de recevoir des ondes radio ». En d'autres termes, l'antenne est la structure de transition entre l'espace libre et un dispositif de guidage. Le dispositif de guidage ou ligne de transmission, peut prendre la forme d'une ligne coaxiale ou d'un tube creux (guide d'ondes), et sert à transporter l'énergie électromagnétique de la source émettrice à l'antenne, ou de l'antenne au récepteur. Dans le premier cas, on parle d'antenne émettrice et dans le deuxième, d'antenne réceptrice [27].

Le concept d'antenne imprimée a été initialement proposé par Deschamps aux États-Unis en 1953, puis en France par Baissinot et Gutton en 1955. Le phénomène de rayonnement discontinu de la ligne de bande a été observé et étudié par Lewin en 1960. En 1970, Byron a avancé une structure plane composée d'une plaque conductrice gravée sur un substrat diélectrique $\epsilon_r \leq 10$, la plaque conductrice étant placée sur le plan de masse. Les premiers résultats obtenus étaient principalement destinés à des applications militaires. Ensuite, dans les années 1978 et 1979,

Demeryd a approfondi l'étude des antennes micro-ruban Conventionnelles. Enmarquant ainsi une transition vers une utilisation industrielle généralisé [28].

2.3. Description d'une antenne micro ruban

Les antennes micro ruban sont devenues très populaires dans les années 1970, principalement pour les applications spatiales. Aujourd'hui, elles sont utilisées pour des applications gouvernementales et commerciales. Ces antennes sont constituées d'un patch métallique posé sur un substrat relié à la terre. Ce patch métallique peut prendre de nombreuses configurations. Cependant, les patches rectangulaires et circulaires sont les plus populaires en raison de leur facilité d'analyse et de fabrication, ainsi que de leurs caractéristiques de rayonnement intéressantes, notamment un faible rayonnement de polarisation croisée. Les antennes micro ruban sont compactes, adaptables aux surfaces planes et non planes, simples et peu coûteuses à fabriquer grâce à la technologie moderne des circuits imprimés, mécaniquement robustes lorsqu'elles sont montées sur des surfaces rigides, compatibles avec les conceptions MMIC et très polyvalentes en termes de fréquence de résonance, de polarisation, de diagramme et d'impédance. Ces antennes peuvent être montées sur la surface d'avions, d'engins spatiaux, de satellites, de missiles, de voitures et même de téléphones portables hautes performances [27].

2.3.1. Structure d'une antenne imprimée

La structure de base est rappelée sur la figure 2.1.

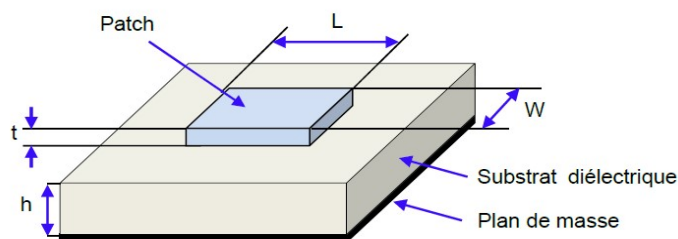


Figure 2. 1.Géométrie d'une antenne micro ruban de forme arbitraire [29]

T : épaisseur du patch.

W : Largeur du patch.

H : épaisseur du substrat.

L : Longueur du patch.

Dans sa structure de base, une antenne imprimée est constituée d'un patch métallique posé sur un substrat, lui-même relié à la masse. Le patch doit être connecté au reste du circuit à l'aide d'une ligne de transmission de type micro-ruban. Cette ligne permet également d'adapter l'impédance de l'antenne à celle du circuit, afin d'éviter les phénomènes de réflexion [27].

2.3.2. Les différentes formes du patch

L'antenne patch peut prendre plusieurs formes (rectangle, triangle, disque, anneau, ellipse...). Ces formes sont les plus courantes car elles présentent une grande facilité d'analyse et de fabrication. La Figure 2.2. Montre ces différentes formes :

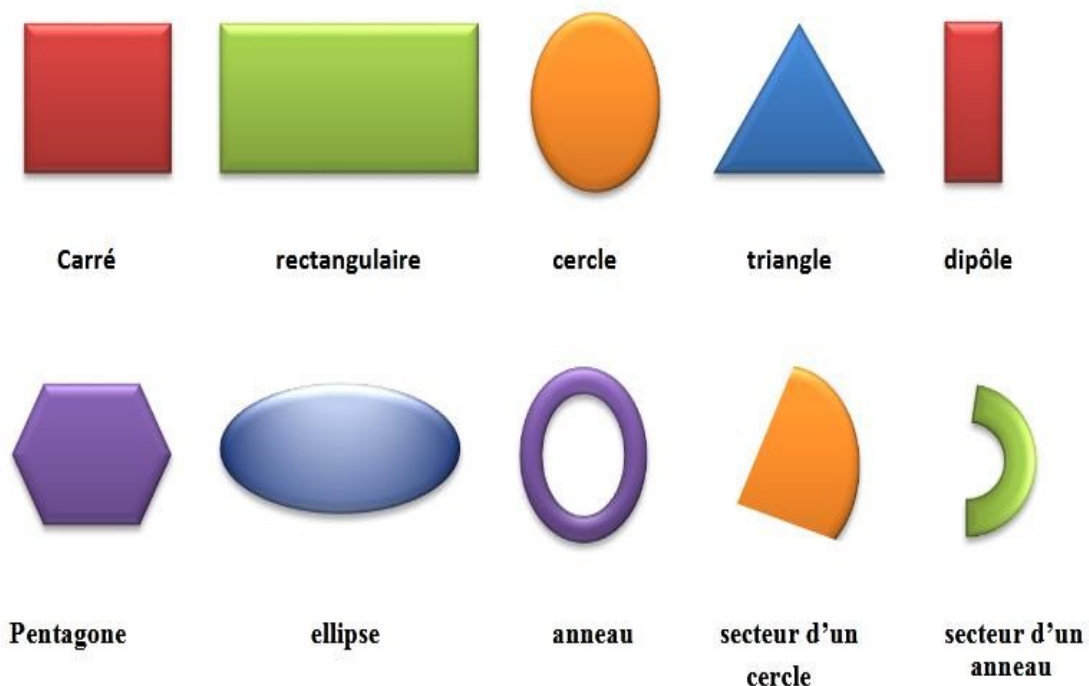


Figure 2. 2.Divers types d'éléments rayonnants [27]

Le patch rayonnant et le plan de masse sont généralement fabriqués à base d'un matériau conducteur tel que le cuivre ou l'or (à cause de leurs conductivités

élevées) et ils peuvent prendre n'importe quelle forme possible, carré, rectangulaire, en bande mince (dipôle), circulaire, elliptique, triangulaire ou de toute autre configuration. Ces formes, parmi d'autres, sont illustrées à la Figure 2.2. Les formes carrée, rectangulaire, dipôle (ruban) et circulaire sont les plus courantes en raison de leur facilité d'analyse et de fabrication, et de leurs caractéristiques de rayonnement intéressantes, notamment un rayonnement à faible polarisation croisée. Les dipôles micro ruban sont intéressants car ils possèdent une large bande passante et occupent un espace réduit, Les polarisations linéaires et circulaires peuvent être obtenues avec des éléments uniques ou des réseaux d'antennes micro ruban. Les réseaux d'éléments micro ruban, avec une ou plusieurs sources d'alimentation, peuvent également être utilisés pour introduire des capacités de balayage et obtenir des directivités plus élevées[27].

2.4. Domaine d'application des antennes imprimées

Les domaines d'applications des antennes imprimées sont de plus en plus variés, les principales applications sont :

- ✓ La téléphonie mobile.
- ✓ Les radars et les capteurs.
- ✓ Les télécommunications spatiales.
- ✓ La télémétrie des missiles et la télésurveillance.
- ✓ Guidage des missiles et télédétection.
- ✓ Applications Médicales.
- ✓ Internet des objets (IoT) [30].

2.4.1. Avantages et inconvénients des antennes imprimées

Grâce à leurs applications qui s'étendent sur une vaste gamme de fréquences, allant de 100MHz à 100GHz, les antennes micro-rubans gagnent en popularité. Une caractéristique qui fait qu'elles sont très recherchées dans les téléphones mobiles. Certains avantages sont les suivants :

- Faible poids.
- Volume réduit.

- Faible coût de fabrication, production en masse possible.
- Polarisation linéaire et circulaire pour les télécommunications.
- La tendance à grouper plusieurs patches identiques pour construire des antennes réseaux [31].
- Peuvent être facilement intégrés dans les circuits micro-ondes intégrés (MIC).
- Capables de fonctionner en double ou triple fréquence.

Alors que, ce type d'antennes a aussi des limitations telles que :

- Bande passante étroite.
- Généralement faible gain (6 dB).
- La plupart des antennes rayonnent uniquement dans le demi-plan.
- Supportent uniquement des faibles puissances (100 W).

Ces limitations restent toujours près des modifications par les nouvelles recommandations [32].

2.4.2. Paramètres et Caractéristiques de l'antenne patch

Pour décrire les performances d'une antenne, il est nécessaire de définir divers paramètres. Certains sont interdépendants et il n'est pas nécessaire de les spécifier tous pour une description complète des performances de l'antenne. Les définitions des paramètres seront données dans ce chapitre. La plupart des définitions entre guillemets sont tirées de la norme IEEE 145-1983 (Définitions des termes pour les antennes). Il s'agit d'une révision de la norme IEEE 145-1973[16].

2.4.2.1. Impédance d'entrée d'une antenne

L'impédance d'entrée est définie comme « l'impédance présentée par une antenne à ses bornes ou le rapport de la tension au courant à une paire de bornes ou le rapport des composantes appropriées des champs électriques et magnétiques en un point », définit l'impédance de l'antenne comme suit [27] :

$$Z_e = \frac{V_e}{I_e} = R + jX \quad (2.1)$$

Où :

Z_e : L'impédance d'entrée.

V_e : le rapport de la tension.

I_e : le courant présentée à l'entrée.

R : la résistance de l'antenne.

X : Réactance de l'antenne.

2.4.2.2. Directivité

La directivité d'une antenne est définie comme le rapport entre l'intensité du rayonnement émis par l'antenne dans une direction donnée et l'intensité moyenne du rayonnement toutes directions confondues, Il s'exprime par la relation suivante[16] :

$$D = \frac{U}{U_0} = \frac{4\pi U}{P_{rad}} \quad (2.2)$$

Où :

D : directivité.

U : Intensité de rayonnement (W/unité d'angle solide).

U_0 : Intensité de rayonnement de la source isotrope (W/unité d'angle solide).

P_{rad} : Puissance totale rayonnée (W).

2.4.2.3. Coefficient de réflexion (S_{11})

Le coefficient de réflexion S_{11} met en évidence l'absorption de l'énergie par l'antenne. C'est sur ce paramètre que l'on se base lors de l'adaptation, Il s'exprime par la relation suivante [27] :

$$s_{11} = \Gamma = \frac{Z_e - Z_c}{Z_e + Z_c} \quad (2.3)$$

Où :

Z_c : l'impédance caractéristique.

Z_e : l'impédance d'entrée.

2.4.2.4. Gain

Une autre mesure utile pour décrire les performances d'une antenne est le gain. Bien que le gain de l'antenne soit étroitement lié à la directivité, il prend en compte l'efficacité de l'antenne ainsi que ses capacités directionnelles. Rappelons

que la directivité est une mesure qui décrit uniquement les propriétés directionnelles de l'antenne et qu'elle est donc uniquement contrôlée par le diagramme de rayonnement. Il s'exprime par la relation suivante [27] :

$$G=4\pi \frac{U}{P_{in}} \quad (2.4)$$

Où :

U : Intensité de rayonnement (W/unité d'angle solide).

P_{in} : Puissance totale d'entrée (acceptée).

2.4.2.5. Bande passante

La bande passante d'une antenne est définie comme « la plage de fréquences dans laquelle les performances de l'antenne, par rapport à certaines caractéristiques, sont conformes à une norme spécifiée ». La bande passante peut être considérée comme la plage de fréquences, de part et d'autre d'une fréquence centrale (généralement la fréquence de résonance d'un dipôle), où les caractéristiques de l'antenne (telles que l'impédance d'entrée, le diagramme, la largeur de faisceau, la polarisation, le niveau des lobes secondaires, le gain, la direction du faisceau et l'efficacité de rayonnement) se situent dans une plage acceptable par rapport à la fréquence centrale. Pour les antennes à large bande, la bande passante est généralement exprimée comme le rapport entre les fréquences supérieures et inférieures de fonctionnement acceptable. Il s'exprime par la relation suivante [27] :

$$BP(\%) = \frac{f_{max}-f_{min}}{f_r} \times 100 \quad (2.5)$$

Où :

f_{max} : La fréquence maximale.

f_{min} : La fréquence minimale.

f_r : La fréquence de résonance.

2.4.2.6. Diagramme de rayonnement

Un diagramme de rayonnement d'antenne, ou diagramme d'antenne, est défini comme « une fonction mathématique ou une représentation graphique des

propriétés de rayonnement de l'antenne en fonction de coordonnées spatiales. Dans la plupart des cas, le diagramme de rayonnement est déterminé en champ lointain et représenté en fonction des coordonnées directionnelles. Les propriétés de rayonnement comprennent la densité de flux de puissance, l'intensité du rayonnement, l'intensité du champ, la directivité, la phase ou la polarisation » La propriété de rayonnement la plus importante est la distribution spatiale bidimensionnelle ou tridimensionnelle de l'énergie rayonnée en fonction de la position de l'observateur sur une trajectoire ou une surface de rayon constant [27].

2.4.2.7. VSWR

VSWR est l'acronyme de Voltage Standing Wave Ratio , aussi elle est une fonction du coefficient de réflexion , qui décrit l'estimation du degré d'adaptation entre une charge (comme une antenne) et la ligne de transmission (comme un câble coaxial) qui la relie à l'émetteur ou au récepteur .Il est défini comme le rapport de l'amplitude maximale à l'amplitude minimale de l'onde stationnaire de tension sur la ligne de transmission ,et il est exprimé sous la forme d'un rapport de tension suivant [27]:

$$VSWR = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} \quad (2.6)$$

Où :

Γ : Coefficient de réflexion de tension aux bornes d'entrée de l'antenne.

2.4.2.8. Polarisation d'une onde

La polarisation d'une antenne dans une direction donnée est définie comme « la polarisation de l'onde transmise (rayonnée) par l'antenne. Remarque : Lorsque la direction n'est pas précisée, la polarisation est considérée comme la polarisation dans la direction du gain maximal ». En pratique, la polarisation de l'énergie rayonnée varie avec la direction à partir du centre de l'antenne, de sorte que différentes parties du diagramme peuvent avoir des polarisations différentes.

La polarisation d'une onde rayonnée est définie comme « la propriété d'une onde électromagnétique décrivant la direction et l'amplitude relative du vecteur champ électrique, variant dans le temps ; plus précisément, la figure tracée en fonction du temps par l'extrémité du vecteur en un point fixe de l'espace [27].

2.4.3. Techniques d'alimentations

Il existe plusieurs techniques pour l'alimentation des antennes micro rubans, ces techniques peuvent être soit par contact direct soit par couplage, les plus courantes utilisées sont l'alimentation par ligne micro ruban, par sonde coaxiale, par couplage de proximité ou par fente [27].

2.4.3.1. Alimentation par une ligne micro ruban

La ligne d'alimentation micro ruban est également une bande conductrice, généralement de largeur bien inférieure à celle du patch. Elle est facile à fabriquer, à adapter en contrôlant sa position et à modéliser. Cependant, avec l'épaisseur du substrat, les ondes de surface et le rayonnement parasite augmentent, ce qui, pour les conceptions pratiques, limite la bande passante (généralement de 2 à 5 %)[27].

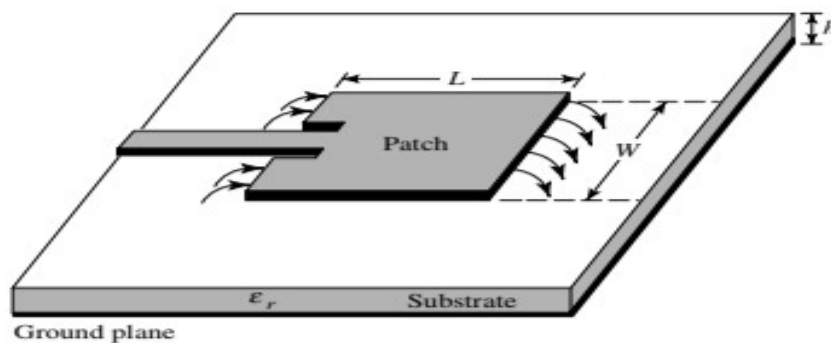


Figure 2. 3. Alimentation par une ligne micro ruban [27]

2.4.3.2. Alimentation par sonde coaxiale

Les lignes coaxiales, dont le conducteur interne est fixé au patch de rayonnement tandis que le conducteur externe est connecté au plan de masse, sont également largement utilisées. L'alimentation de la sonde coaxiale est également facile à fabriquer et à adapter, et présente un faible rayonnement parasite. Cependant, sa bande passante est étroite et sa modélisation est plus difficile, notamment pour les substrats épais ($h > 0,02\lambda_0$)[27].

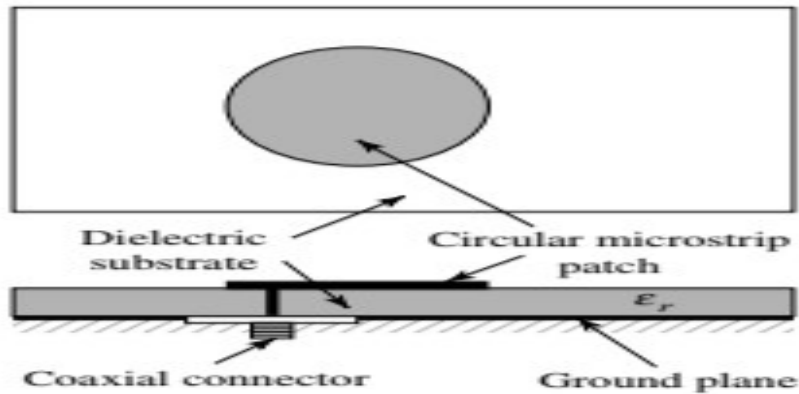


Figure 2. 4. Alimentation par sonde coaxiale [27]

2.4.3.3. Alimentation couplée par fente (ouverture)

Le couplage d'ouverture de la Figure 2.5. Est le plus difficile à fabriquer des quatre et présente également une bande passante étroite. Cependant, il est légèrement plus facile à modéliser et présente un rayonnement parasite modéré. Le couplage d'ouverture est constitué de deux substrats séparés par un plan de masse. Sur la face inférieure du substrat inférieur se trouve une ligne d'alimentation micro ruban dont l'énergie est couplée au patch via une fente sur le plan de masse séparant les deux substrats. Cette configuration permet une optimisation indépendante du mécanisme d'alimentation et de l'élément rayonnant [27]

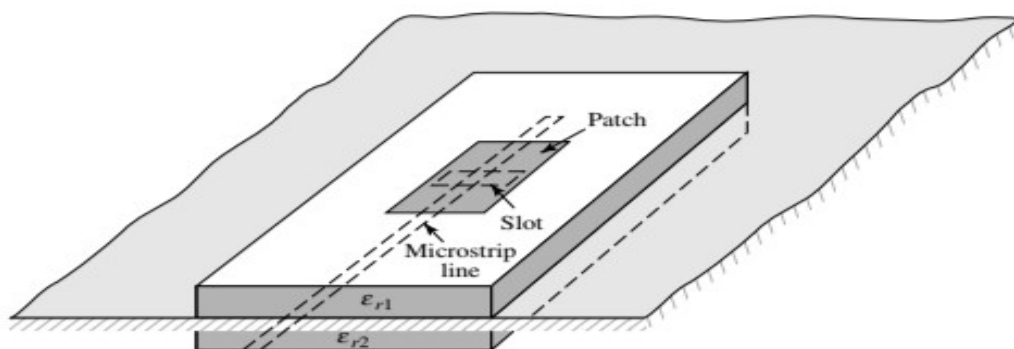


Figure 2. 5. Alimentation couplée par fente (ouverture)[27]

2.4.3.4. Alimentation par couplage de proximité

Parmi les quatre sources décrites ici, le couplage de proximité présente la bande passante la plus large (jusqu'à 13 %), est relativement facile à modéliser et présente un faible rayonnement parasite. Cependant, sa fabrication est un peu plus

complexe. La longueur du tronçon d'alimentation et le rapport largeur/ligne du patch peuvent être utilisés pour contrôler l'adaptation[27].

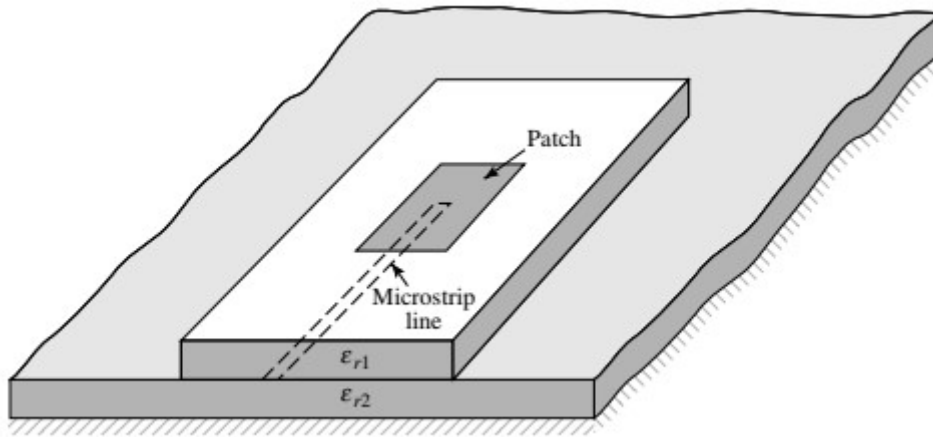


Figure 2. 6 Alimentation par couplage de proximité [27]

2.4.4. Techniques d'adaptation des antennes imprimées

Le fonctionnement d'un système d'antenne sur une plage de fréquences donnée ne dépend pas entièrement de la réponse en fréquence de l'élément d'antenne lui-même, mais plutôt des caractéristiques fréquentielles de la combinaison "ligne de transmission-élément d'antenne". En pratique, l'impédance caractéristique de la ligne de transmission est généralement réelle, tandis que celle de l'élément d'antenne est complexe. De plus, la variation de chacune en fonction de la fréquence n'est pas la même. Il est donc nécessaire de concevoir des réseaux de couplage-adaptation efficaces, qui tentent d'adapter les caractéristiques des deux dispositifs sur la plage de fréquences souhaitée.

De nombreux réseaux de couplage-adaptation peuvent être utilisés pour connecter la ligne de transmission à l'élément d'antenne et peuvent être conçus pour offrir des caractéristiques fréquentielles acceptables. Seul un nombre limité d'entre eux sera présenté ici [27].

2.4.4.1. Adaptation par ligne quart d'onde

Cette technique permettant d'adapter l'antenne à la ligne de transmission consiste à utiliser un transformateur $\lambda/4$. Si l'impédance de l'antenne est réelle, le transformateur est directement fixé à la charge. En revanche, si l'impédance de

l'antenne est complexe, le transformateur est placé à une distance " s_0 " de l'antenne, comme illustré à la Figure 2.7.

La distance " s_0 " est choisie de manière à ce que l'impédance d'entrée vers la charge à " s_0 " soit réelle et désignée par " R_{in} ". Pour assurer l'adaptation, l'impédance caractéristique Z_1 du transformateur doit être égale à $Z_1 = \sqrt{R_{in}Z_0}$, où Z_0 est l'impédance caractéristique (réelle) de la ligne de transmission d'entrée. Le transformateur est généralement une autre ligne de transmission présentant l'impédance caractéristique souhaitée.

Les impédances caractéristiques de la plupart des lignes de transmission standard étant limitées en termes de portée et de valeurs, la technique du transformateur quart d'onde est la plus adaptée aux lignes de transmission micro ruban. Dans le micro rubans, l'impédance caractéristique peut être modifiée en faisant simplement varier la largeur du conducteur central[27].

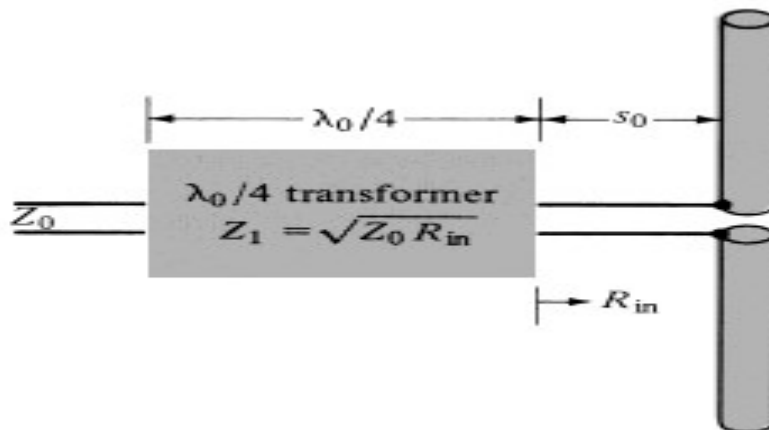


Figure 2. 7 Transformateur $\lambda_0/4$ [27]

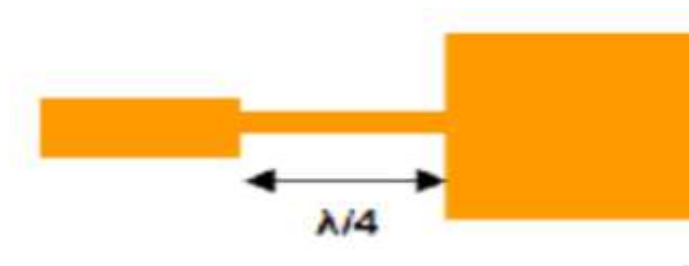


Figure 2. 8 Adaptation par ligne quart d'onde [32]

2.4.4.2. Adaptation par stub

Une adaptation idéale à une fréquence donnée peut être obtenue en plaçant un tronçon de dérivation court-circuité ou ouvert à une distances'' de la connexion ligne de transmission-élément d'antenne. En supposant une impédance caractéristique réelle, les longueurs'' est contrôlée de manière à ce que la partie réelle de l'impédance de l'élément d'antenne soit égale à l'impédance caractéristique. La longueur '' l '' de la ligne de dérivation est modifiée jusqu'à ce que la susceptance du tronçon soit égale en amplitude, mais en opposition de phase, à la susceptance d'entrée de la ligne au point de connexion ligne de transmission-élément de dérivation[27].

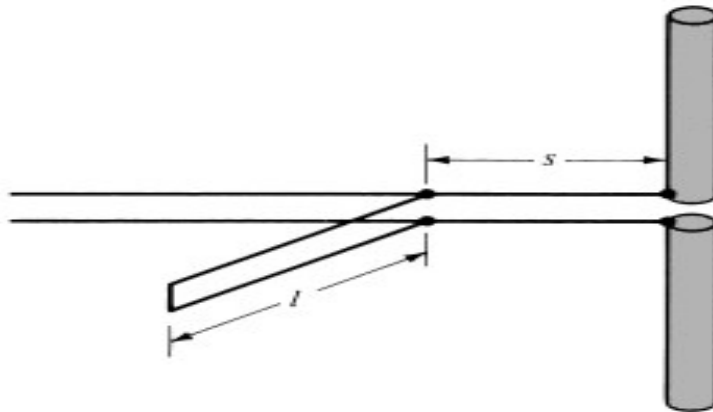


Figure 2. 9 Adaptation par stub [27]

2.4.4.3. Adaptation avec encoche

Pour adapter l'antenne, on utilise des encoches, il suffit de modifier la géométrie du Patch ou les dimensions des encoches[27].

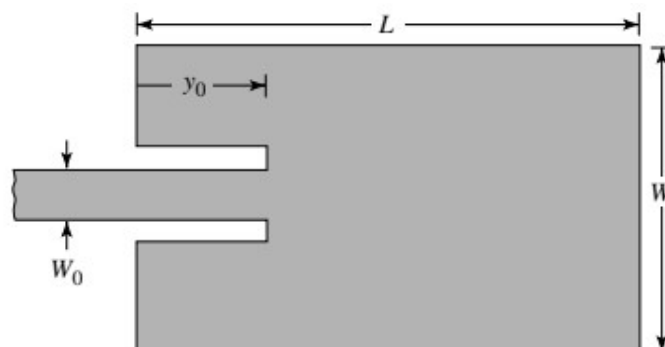


Figure 2. 10 Adaptation avec encoche [27]

2.4.5. Systèmes MIMO (Entrées Multiples Sorties Multiples)

2.4.5.1. Intérêt Des Systèmes MIMO

Dans les systèmes conventionnels, il y a une antenne en émission et une antenne en réception. Ces systèmes sont appelés systèmes SISO (Single Input Single Output). Ils souffrent d'inconvénients en termes de capacité de canal selon les critères de Shannon et Nyquist [31].

Les systèmes MIMO (Multiple Input Multiple Output), des systèmes de communications sans fil avec des antennes multiples aux deux extrémités de la liaison (Figure 2.11.) sont apparus comme la technologie la plus prometteuse dans ces cas. Ils permettent d'augmenter la capacité du canal considérablement, sans pour autant augmenter la puissance de transmission ni la bande passante et exploitent ainsi la technique de diversité spatiale[33].

Par autre part, l'utilisation de nombreuses antennes en réception a été mise en œuvre depuis longtemps pour profiter de la diversité obtenue (dans ce cas, nous pouvons parler des systèmes SIMO : une entrée et plusieurs sorties). L'utilisation d'antennes de transmission multiples (systèmes MISO : entrées multiples et sorties individuelles) est appliquée classiquement pour former le package qui combine plusieurs éléments radiologiques dans une antenne réseau afin d'augmenter le gain de rayonnement dans une direction régulière ou variable. Il peut également apporter une diversité en émission grâce à l'utilisation de codes spatio-temporels, par exemple.

Ensuite, nous notons que N_t est le nombre d'antennes de transmission et que N_r est le nombre d'antennes de réception. L'utilisation de plusieurs antennes dans la transmission et la réception (MIMO) peut fournir deux types de gains à envoyer dans un canal présentant du fading, un gain en débit et un gain de diversité[34].

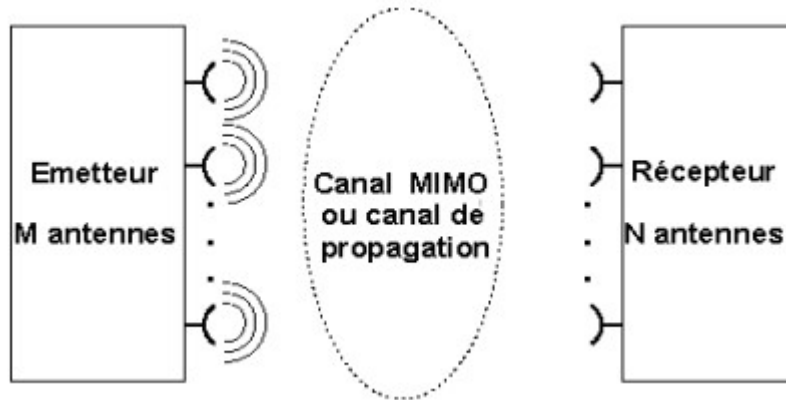


Figure 2. 11 Principe du MIMO [32]

2.4.5.2. Historique

Les systèmes Multiple Input Multiple Output (MIMOs) ont fait l'objet de plusieurs recherches depuis la dernière décennie du vingtième siècle. Les premiers travaux ont été publiés en 1984 par Jack Winters du Bell Labs et ont présenté une étude de limites fondamentales des débits des systèmes à antennes multiples dans un environnement à trajets multiples avec un fading de Rayleigh. La progression des études de systèmes MIMOs a abouti à l'apparition du premier système MIMO commercial qui a été développé en 2001 par Iospan Wireless Inc. A partir de 2006, plusieurs sociétés telles que Broadcom et Intel ont adopté de nouvelles techniques de communication utilisant la technologie MIMO application à des réseaux LANs (Local Area Network) [35].

2.4.5.3. Principe de la technique MIMO

Le principe de la technologie MIMO dépend principalement de la technique de la diversité spatiale et des avantages de l'environnement multi trajet, en utilisant les différents canaux de propagation créés par réflexion et /ou par diffraction des ondes. Il s'agit d'augmenter la capacité de transmission, d'où l'intérêt d'obtenir des signaux indépendants sur les antennes. Cette technique utilise diverses fonctions de signalisation, telles que la combinaison linéaire des signaux, le codage spatio-temporel et le multiplexage spatiale [34].

a. Principe De La Diversité

Pour lutter contre les effets des multi trajets qui constituent la base du phénomène d'évanouissements du signal envoyé et d'augmenter le signal sur bruit (SNR), il est nécessaire d'augmenter la puissance de la transmission ou l'utilisation de techniques de diversité.

Étant donné que la première solution est soumise aux réglementations, les techniques de diversité sont largement utilisées. Les techniques de diversité dépendent du principe selon lequel plusieurs versions sont statistiquement corrélées au signal envoyé atteint la réception, chacune portant les mêmes informations. Elles sont ensuite combinées de façon adéquate de façon à ce que le signal résultant soit moins évanouissant. Ces systèmes permettent d'obtenir de la diversité sans toutefois compenser le problème des interférences. Il existe deux types de diversité : la micro diversité et la macro diversité [32].

a.1. Micro diversité

C'est la technique de diversité utilisée pour atténuer les effets d'évanouissement multi trajets, on a plusieurs micros diversité.

- La Diversité De Polarisation.
- La Diversité Spatiale.
- Diversité De Diagramme De Rayonnement.
- La Diversité Angulaire.
- La Diversité Temporelle.
- La Diversité Fréquentielle [32].

a.2. Macro diversité

C'est la méthode la plus efficace pour lutter contre ces types d'évanouissement. Elle consiste à émettre et/ou recevoir le même signal par des stations de base différentes. Elle permet d'atteindre de débits élevés [32].

2.4.5.4 Performances des antennes MIMO en diversité

a. Gain en diversité

Dans un canal avec fading, les signaux sont répartis sur différents trajets et le signal de réception est une combinaison de différentes versions, peut-être déformées et bruitées, d'un même signal d'origine. Le même signal peut au maximum être envoyé par N_r de chemins différents, et le gain de diversité est égal au plus $N_t N_r$ [34].

b. Coefficient de corrélation d'enveloppe (ECC : Enveloppe Corrélation Coefficient)

Le coefficient de corrélation d'enveloppe (Enveloppe Corrélation Coefficient (ECC)) est considéré comme un indicateur clé de la performance. Une valeur faible de ECC entre deux ports signifie une diaphonie faible lors d'une opération simultanée. Cela signifie également une meilleure performance en termes de diversité dans le cas d'une utilisation en MIMO. L'ECC peut être calculé à partir des diagrammes de rayonnement de l'antenne par la formule :

$$P_{ij} = \frac{|\iint F_i - F_j * d\Omega|^2}{\iint |F_i|^2 d\Omega \iint |F_j|^2 d\Omega} \quad (2.7)$$

Et F_i est le champ lointain rayonné par le port numéro i . Dans le cas d'antennes sans perte, et en supposant que les ondes entrantes soient uniformément réparties, le ECC peut être calculé à partir des paramètres S de l'antenne à l'aide de la formule (2.8), qui se simplifie dans le cas d'une antenne à deux ports, à la formule [32].

$$P_{ij} = \frac{|\sum S_{in} * S_{nj}|^2}{\prod_{m=i,j} (1 - \sum |S_{nm}|^2)} \quad (2.8)$$

2.4.6. Antennes ULB

Le principe des communications radio utilisant la technique large bande (ULB) est aujourd'hui bien connu et a fait de nombreuses études sur ce sujet pour

identifier et réaliser des circuits électroniques pour ces applications. Récemment, la FCC a identifié les règles d'utilisation du spectre de fréquences en personnalisant la plage entre [3.1-10.6] GHz pour les applications ULB liées à localisation et aux systèmes de communication sans fil. L'antenne ultra large bande(ULB) est un élément rayonnant dont les caractéristiques désirées restent inchangeables sur une large bande de fréquence de fonctionnement [36].

2.4.7. Technologie ultra large bande

2.4.7.1. Historique

La technologie Ultra Large Bande est une appellation relativement récente pour décrire une technologie bien plus ancienne. En effet, le plus ancien système pouvant être considéré comme tel pourrait être l'émetteur « spark gap » de Marconi introduit en 1897 ,car il induisait des signaux « pulsés » ayant de très large bandes passantes .Cependant, à l'époque, ce type de transmissions créait beaucoup d'interférences, et ne permettait pas un partage coordonné du spectre de fréquence ; Ainsi le monde des communications sans fil abandonna le large bande pour des système bandes étroites, accordés, plus faciles à réguler et coordonner [37] .

Ce n'est que récemment – une dizaine d'années – que le concept d'ultra large bande a retrouvé un intérêt principalement suscité par le développement des transmissions à courte distance.

Si le terme "ultra large bande" est relativement récent - une dizaine d'années- le concept lui-même est par contre bien plus ancien :

- La grande majorité des techniques de transmission actuelles utilisent des modulations avec porteuses (bluetooth, ...). Dès la fin du 19ème siècle, Heinrich Hertz – avait eu l'idée d'utiliser des décharges électriques pour produire des ondes électromagnétiques. C'était la base de la technique Ultra large bande.

- Dans les années 60, Ross et Bennett étudient pour la première fois la propagation d'ondes électromagnétiques d'un point de vue temporel plutôt que d'un point de vue fréquentiel. Dans leur publication, apparaissent pour la première fois, des applications liées à cette nouvelle technique : les communications et les radars.

- Dans les années 1970-1994, la majorité des travaux vise à améliorer certains sous- systèmes de cette nouvelle technique. A cette époque, on lui donne plusieurs noms : technologie "sans porteuse", ou en "bande de base" ou encore technologie "impulsionnelle". C'est en 1989 que le terme ultra large bande apparaît dans une publication du ministère de la Défense aux Etats-Unis. Les travaux concernant cette technologie sont effectués, pour la plupart, dans le cadre de programmes confidentiels américains (militaires).

- En 1994, la confidentialité des travaux liés à l'ultra large bande est levée : La recherche se développe de façon importante aussi bien dans l'industrie que dans les universités.

- En 2002, la FCC (Federal Communication Commission) [17], l'organisme de régulation des communications américain, réglemente l'Ultra large bande : Elle en donne une définition précise, et définit les niveaux de puissance maximale autorisés (- 41 dBm /MHz pour la bande haute)[38].

2.4.7.2. Définition

La définition de l'Ultra large bande donnée par la FCC en février 2002 est la suivante. Un signal est dit ultra large bande si :

- sa bande passante est au minimum de 500 MHz (à -10 dB)
- Sa bande passante relative est supérieure à 0.2 :

$$BP_{relative} = 2 \cdot \frac{f_h - f_l}{f_h + f_l} > 2 \quad (2.9)$$

Où f_h et f_l désignent respectivement les fréquences limites basses et hautes du spectre de signal, fréquences prises -10dB. Les deux conditions ne sont pas forcément remplies en même temps.

La plupart des concepteurs de systèmes ULB adoptent une autre définition, à savoir une bande passante – 10 dB supérieure à 1.5 GHz (ou une bande passante fractionnelle supérieure à 0.25 par rapport à la fréquence centrale du système). Un exemple pratique est un système radio centré à 2 GHz, de bande passante à -10 dB de 1.6 GHz[38].

2.4.7.3. Avantages et inconvénients de l'ultra large band

a. Avantages

Notre objectif est de couvrir un large spectre de fréquences pour atteindre les objectifs suivants :

- Offrir des débits importants.
- Multiplier les normes accessibles.
- Faible susceptibilité à l'évanouissement du à la propagation par trajets multiples.
- Une sensibilité moindre au brouillage.
- Communications protégées.
- Propriétés de pénétration.
- Capacité d'un canal de transmission[39].

b. Inconvénients

Le principal inconvénient de cette technologie réside dans les interférences causées par l'utilisation de fréquences déjà exploitées par d'autres systèmes [40].

2.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié en détail les antennes imprimées, en particulier les antennes patch micro-ruban, largement utilisées dans les systèmes de communication modernes pour leur compacité, leur faible coût et leur facilité d'intégration. Nous avons présenté leurs structures, leurs paramètres fondamentaux (bande passante, gain, impédance, polarisation...), ainsi que les différentes techniques d'alimentation et d'adaptation permettant d'améliorer leurs performances. En parallèle, nous avons introduit la technologie MIMO (Multiple Input Multiple Output), qui joue un rôle crucial dans l'amélioration du débit et de la fiabilité des communications sans fil, notamment dans les environnements complexes comme ceux de l'Internet des objets (IoT). Les avantages offerts par les systèmes MIMO à large bande, tels que l'augmentation de la capacité du canal, la diversité spatiale et

la réduction de l'interférence, ont également été abordés. Ainsi, ce chapitre constitue une base théorique solide pour aborder, dans la suite de ce mémoire, la conception et la simulation pratique d'antennes imprimées MIMO à large bande adaptées aux besoins des réseaux IoT

*Chapitre 3 Conception et
simulations d'une antenne
rectangulaire MIMO ULB*

3.1. Introduction

Ce chapitre présente une étude détaillée de la conception et de la simulation d'une antenne patch imprimée à ultra large bande (ULB), spécifiquement conçue pour les systèmes de communication IoT. L'objectif est d'explorer différentes étapes de conception afin d'améliorer les performances électromagnétiques de l'antenne tout en maintenant une structure compacte et compatible avec les dispositifs modernes.

Dans un premier temps, le logiciel de simulation CST Microwave Studio est introduit pour modéliser les structures proposées. Ensuite, une première version d'antenne patch rectangulaire centrée sur 5 GHz est conçue, suivie d'une deuxième version optimisée autour de 4 GHz, afin d'élargir la bande passante.

Chaque étape inclut l'étude des paramètres d'adaptation, des résultats de simulation et des techniques d'optimisation employées (ajout de fentes, modification du plan de masse, ajustement de l'alimentation).

Par la suite, la conception est étendue vers une configuration MIMO 2x2, permettant d'améliorer la robustesse du lien de communication par la diversité spatiale. Cette partie traite des paramètres S (S_{11} , S_{21} ...), de l'isolation entre éléments, et des performances globales du système. Enfin, les indicateurs de diversité tels que le coefficient de corrélation d'enveloppe (ECC) et le sont analysés pour valider l'efficacité de l'architecture MIMO.

3.2. Présentation de l'outil de simulation

Microwave Studio de CST (Computer Simulation Technology) est un logiciel, utilisant la méthode des intégrales finies (FIT, Finite Integration Technique) développée par Weiland en 1977, qui consiste à faire une discrétisation spatiale des équations de Maxwell sous leur forme intégrale. La FIT procède par la description des équations de Maxwell sur un espace de grille, en préservant les propriétés de conservation d'énergie, et en constituant des équations différentielles particulières telles que celle de Poisson ou l'équation d'onde. Il s'agit d'une approche très sophistiquée, qui peut être utilisée dans le domaine temporelle et/ou le domaine fréquentielle. Donc l'utilisateur est amené à représenter la structure de l'antenne,

indiquer les caractéristiques des matériaux, définir les ports, valider et simuler le modèle dans le logiciel. La solution logicielle offerte par CST Microwave Studio, est une option très intéressante pour la conception d'antenne en micro ruban. Des fonctions comme l'optimisation, l'édition en 3D, la modélisation par variable, la mise à la terre finie et la possibilité de définir les conditions aux bornes, en font un logiciel très intéressant pour la tâche à effectuer dans le cadre de ce travail. Cet outil est très complet pour le développement de composante micro-onde allant de composante en micro-ruban aux composantes coaxiales.

3.3. Conception et simulations d'une antenne patch rectangulaire $f_r=5\text{GHz}$

3.3.1. Étapes de Conception

Dans cette section, nous allons réaliser une simulation d'une antenne patch rectangulaire alimentée par une ligne micro-ruban à 50Ω

Le cahier de charge suivant a été utilisé :

Tableau 3. 1. Cahier de charges de l'antenne proposée

Critère	Exigence / Spécification
Type d'antenne	Antenne patch rectangulaire
Substrat	FR-4 ($\epsilon_r = 4.4$, hauteur = 1.5 mm, pertes modérées, faible coût)
Fréquence centrale ciblée	4 GHz
Bande de fréquences visée	2.2 GHz à 6.6 GHz (applications IoT : BLE, ZigBee, Wi-Fi, NB-IoT, LTE-M, etc.)
Méthode d'alimentation	Ligne micro-ruban
Impédance d'entrée	50 ohms
Paramètre S_{11} (réflexion)	< -10 dB sur toute la bande
Technique de simulation	CST Microwave Studio 2019
Structure du système MIMO	2 éléments (2x2) – possibilité d'extension 4x4
Couplage mutuel (S_{21} , S_{12})	< -15 dB (faible interférence entre éléments)
ECC (Envelope Correlation Coefficient)	< 0.5 (idéalement proche de 0)
DG (Diversity Gain)	Proche de 10 dB (efficacité maximale de diversité)
Compacité et intégration	Structure compacte et intégrable dans des objets connectés
Rayonnement	Stable et omnidirectionnel souhaité sur la bande utile

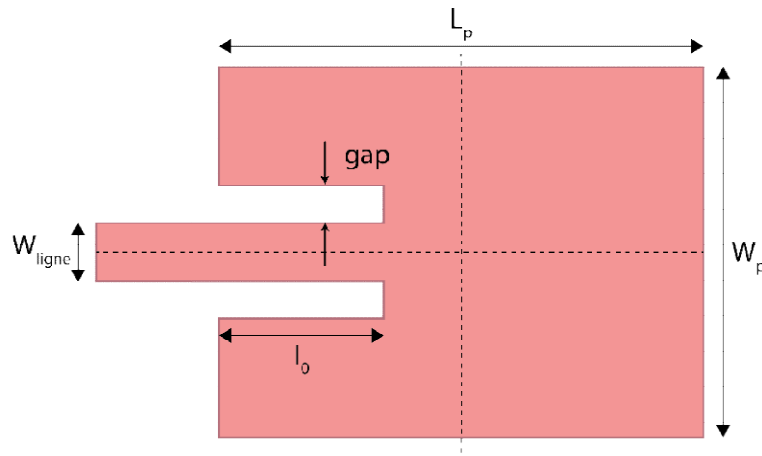


Figure 3. 1.Géométrie de l'antenne rectangulaire

La géométrie de l'antenne simulée est présentée sur la Figure 3.1.

Les équations suivantes permettent de calculer les dimensions de l'antenne patch rectangulaire :

Tableau 3. 2.Tableau des calculs des dimensions [27]

	Les parametres	Equations
Dimensions du patch	La largeur W	$W = \frac{c}{2 + f_r} + \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}}$
	La longueur L	$L = L_{eff} - 2\Delta L$
	Longueur effective L_{eff}	$L_{eff} = \frac{C}{2 * f_r \sqrt{\epsilon_{eff}}}$
	Lextension de la longueur ΔL	$\Delta L = 0.412 * h \frac{(\epsilon_{eff} + 0.3)(\frac{w}{h} + 0.264)}{(\epsilon_{eff} - 0.258)(\frac{w}{h} - 0.8)}$

	Constante dielectrique effective ϵ_{eff}	$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + 12 * \frac{h}{w} \right)^{-1/2}$
Dimensions de la ligne d'alimentation	La largeur de la ligne d'alimentation W_f	$\frac{wf}{h} = \left(\frac{e^H}{8} - \frac{1}{4 * e^H} \right)^{-1}$ $H = \frac{Z_c \sqrt{2 * (\epsilon_r + 1)}}{119.9} + \frac{1}{2} * \frac{(\epsilon_r - 1)}{\epsilon_r + 1} * \left(\ln \frac{\pi}{2} + \frac{1}{\epsilon_r} * \ln \frac{\pi}{2} \right)$
	La longueur de la ligne d'alimentation L_f	$L_f = \frac{\lambda}{4} - \left(\frac{\lambda_0}{4 * \sqrt{\epsilon_{eff}}} \right) \lambda_0 = \frac{c}{f_r}$
Dimensions de la ligne d'adaptation	La longueur d'adaptation (Matching line) l_{fm}	$l_{fm} = \frac{c}{4f_r \sqrt{\epsilon_{eff}}}$
	La largeur d'adaptation (Matching line) W_{fm}	<p>Si :</p> $\frac{W_{fm}}{h} \leq 2$ <p>Alors :</p> $Z_0 = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln \left(\frac{8h}{W_{fm}} + \frac{W_{fm}}{4h} \right)$ <p>Sinon (si $\frac{W_{fm}}{h} > 2$) :</p> $Z_0 = \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon_r} \left(\frac{W_{fm}}{h} + 1.393 + 0.667 \ln \left(\frac{W_{fm}}{h} + 1.444 \right) \right)}$

Avec :

C : Vitesse de la lumière (3×10^8 m/s)

f_r : Fréquence de résonance

ϵ_r : Permittivité relative du substrat

h :Épaisseur du substrat

W:Largeur du patch

L :Longueur du patch

Les valeurs des dimensions de l'antenne patch sont données dans leTableau 3.3.

Tableau 3. 3.Paramètres géométriques de l'antenne de base $f_r=5$ GHz

	Patch		Substrat			Ligne d'alimentation		
Dimensions	L_p	W_p	L_s	W_s	h	W_{ligne}	l_0	gap
Valeurs théoriques	14.46	18.42	28.92	36.84	1.5	2.98	11.2	1.5

3.3.2. Résultat de simulation

Le coefficient de réflexion de l'antenne initiale est donné par la Figure 3.2.

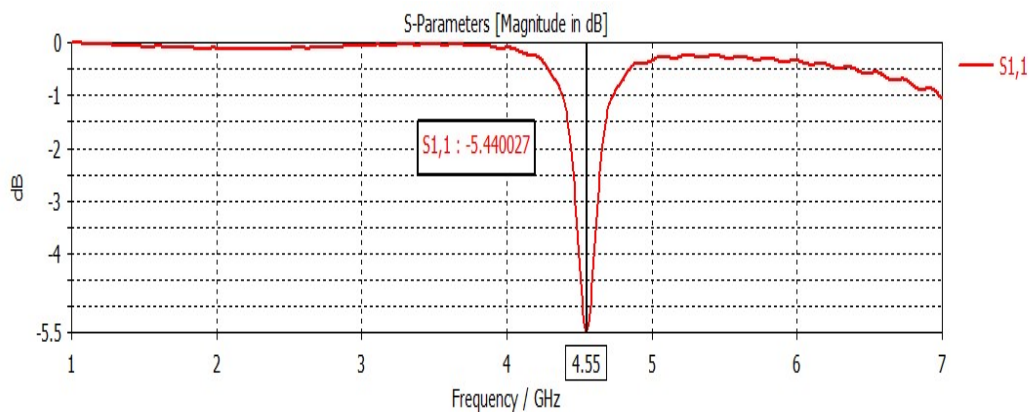


Figure 3. 2.Coefficient de réflexion de l'antenne initiale

La Figure 3.2.montre un coefficient de réflexion de -5.44 dB à une fréquence de 4.55 GHz, l'antenne n'est pas adaptée pour des applications de l'IoT.

3.3.3. Adaptation de l'antenne patch rectangulaire

(Afin de répondre aux besoins de cahier des charges imposé dans le cadre de ce travail). Nous avons fait une étude paramétrique sur les encoches et les dimensions (l_0 , l_p) de l'antenne de la Figure 3.1. les valeurs retenues sont présentés dans le Tableau 3.4.

Tableau 3. 4. Études paramétriques d'adaptation $f_r=5\text{GHz}$

	Patch		Substrat			Ligne d'alimentation		
Dimensions	L_p	W_p	L_s	W_s	h	W_{ligne}	l_0	gap
Valeurs théoriques	13.8	18.42	28.92	36.84	1.5	2.98	4.6	1.5

Le résultat de la simulation est présenté sur la Figure 3.3.

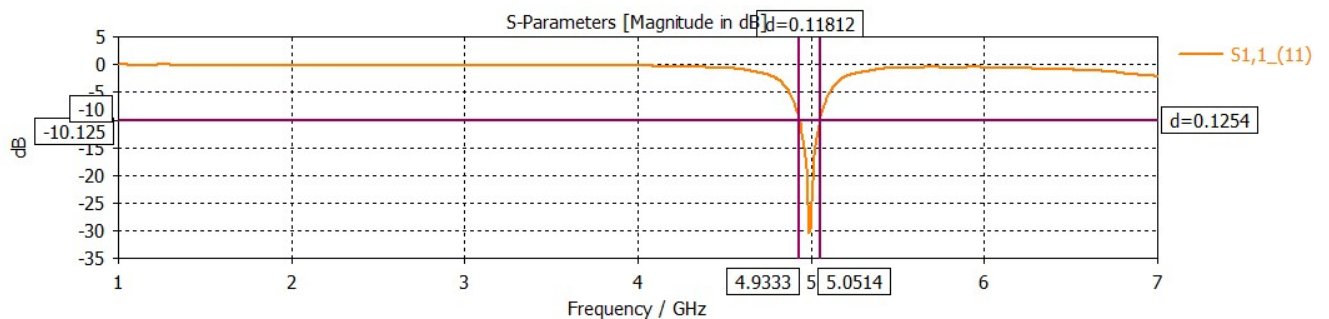


Figure 3. 3.Coefficient de réflexion de l'antenne patch rectangulaire adaptée

Nous constatons qu'une bonne adaption est obtenue à la fréquence de 5 GHz avec un coefficient de réflexion $S_{11} = -30.17333\text{dB}$.

3.3.4. Détermination de la bande passante

$$BP(\%) = \frac{f_2 - f_1}{f_r} \text{ ce qui donne } BP(\%) = \frac{5.0514 - 4.9333}{5} \times 100 = 2.3$$

Nous constatons que la bande la bande passante est étroite pour couvrir toute les fréquences considérées dans le cadre de ce travail.

Afin de remédier à ce problème nous procédons dans ce qui suit à l'élargissement de la bande passante pour que notre antenne réponde aux besoins de notre objectif et couvrir les différentes fréquences opérant dans l'loT.

3.3.5. Élargissement de la bande passante

Dans cette partie nous avons travaillé sur l'élargissement de la bande passante pour couvrir plusieurs fréquences (fonctionne dans plusieurs applications loT). Dans ce cas-là nous avons essayé de faire plusieurs technique d'élargissement comme la technique de plan de masse partiel et la technique des fonts.

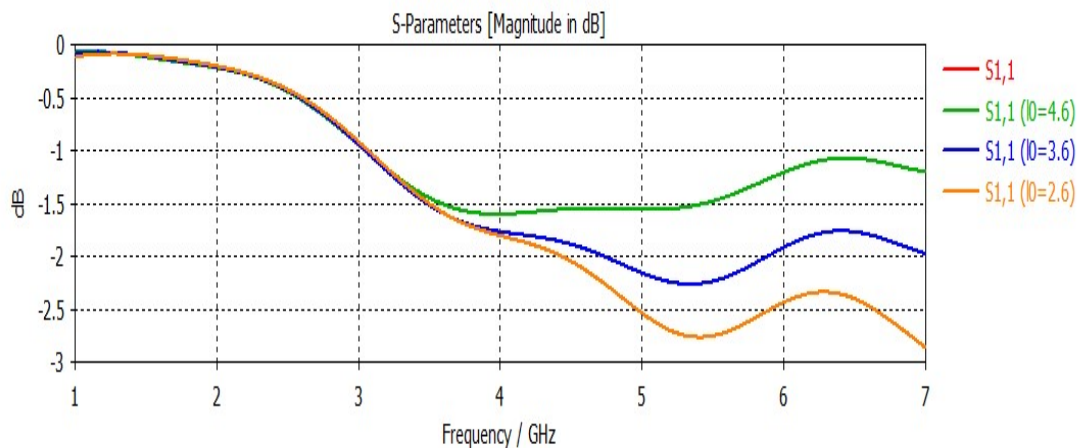


Figure 3. 4.Coefficient de réflexion de l'antenne patch élargie

Malgré l'utilisation de plusieurs techniques d'élargissement de la bande passante, l'objectif d'augmentation de la bande passante n'a pas été atteint, ce qui montre que d'autres optimisations ou approches plus avancées restent nécessaires.

3.4. Conception et simulations d'une antenne patch rectangulaire $f_r=4\text{GHz}$

Dans cette nouvelle étape, afin de mieux répondre aux exigences d'élargissement de la bande passante, nous avons choisi de modifier la fréquence de résonance de l'antenne, en la déplaçant vers 4 GHz. La conception sera donc adaptée à cette nouvelle fréquence, avec pour objectif de couvrir efficacement une bande de fréquences approximative allant de 2 à 7 GHz.

3.4.1. Étapes de Conception

Dans cette section, nous allons réaliser une simulation d'une antenne patch rectangulaire alimentée par une ligne micro-ruban (quart-d'ond) à 50 Ω .

Voici ci-dessous la structure de l'antenne patch :

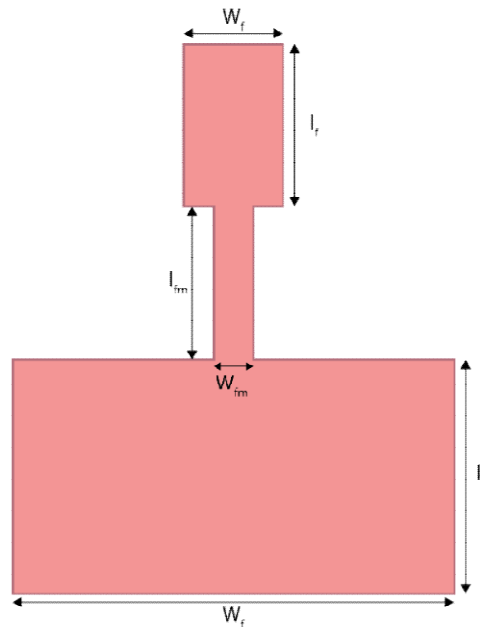


Figure 3. 5 Structure Géométrie de l'antenne patch

Les équations du Tableau 3.3. Nous permettons de calculer les dimensions de l'antenne patch rectangulaire :

Tableau 3. 5. Paramètres géométriques de l'antenne de base $f_r=4\text{GHz}$

Dimension	Patch		Substrat			Ligne d'alimentation			
	L_p	W_p	L_s	W_s	h	W_{fm}	L_{fm}	L_f	W_f
Valeursthéoriques	16.7	32	52	46	1.5	1	9.04	9.04	3.1

3.4.2 Résultat de simulation

Le coefficient de réflexion de la nouvelle antenne présentée dans la Figure 3.6.

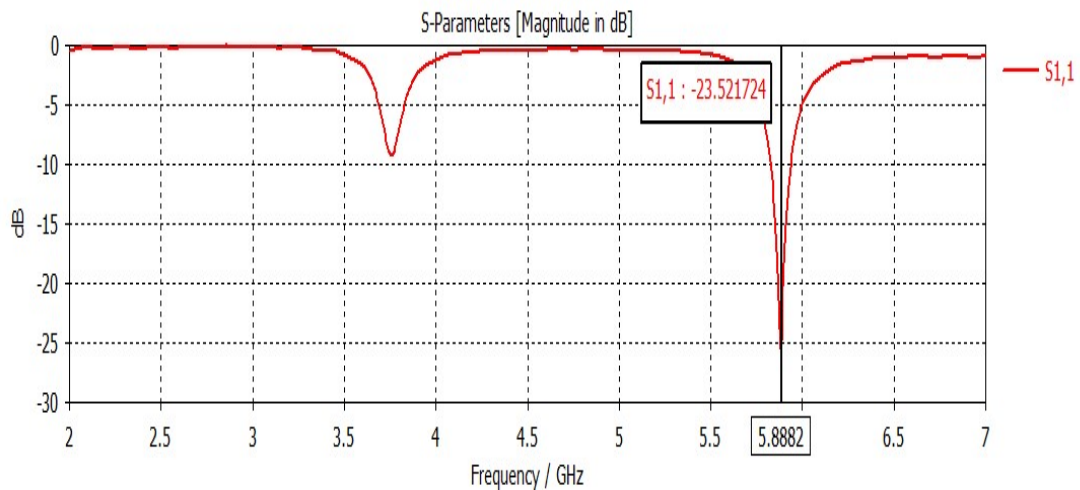


Figure 3. 6.Coefficient de réflexion de l'antenne de base

LaFigure 3.6. Montre un coefficient de réflexion vaut à -23.521724 dB à la fréquence 5.8882 GHz, l'antenne n'est pas adaptée pour les protocoles IoT.

3.4.3 Adaptation de l'antenne patch rectangulaire

Nous avons fait une étude paramétrique sur les dimensions (L_p, W_p) de l'antenne patch de la Figure 3.5. et la longueur de la ligne d'alimentation (L_f, L_{fm}), les valeurs retenues sont présentées dans le Tableau 3.6.

Tableau 3. 6.Études paramétriques d'adaptation $f_r=4$ GHz

Dimension	Patch		Substrat			Ligned'alimentation			
	L_p	W_p	L_s	W_s	h	W_{fm}	L_{fm}	L_f	W_f
Valeursthéoriques	16	23.02	52	46	1.5	1	11.20	10.88	3.1

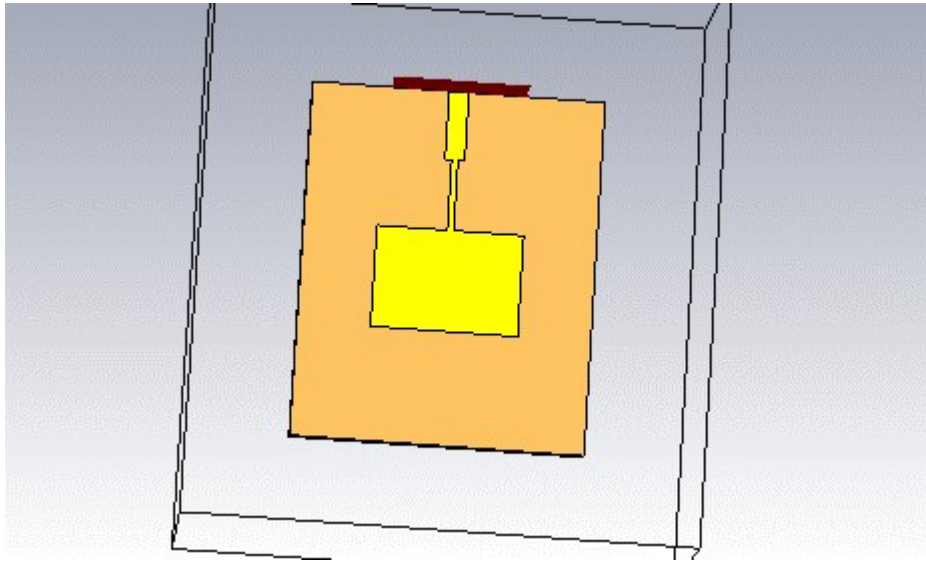


Figure 3. 7.Géométrie de l'antenne rectangulaire Modifiée

Le résultat de la simulation est présenté dans la Figure 3.8.

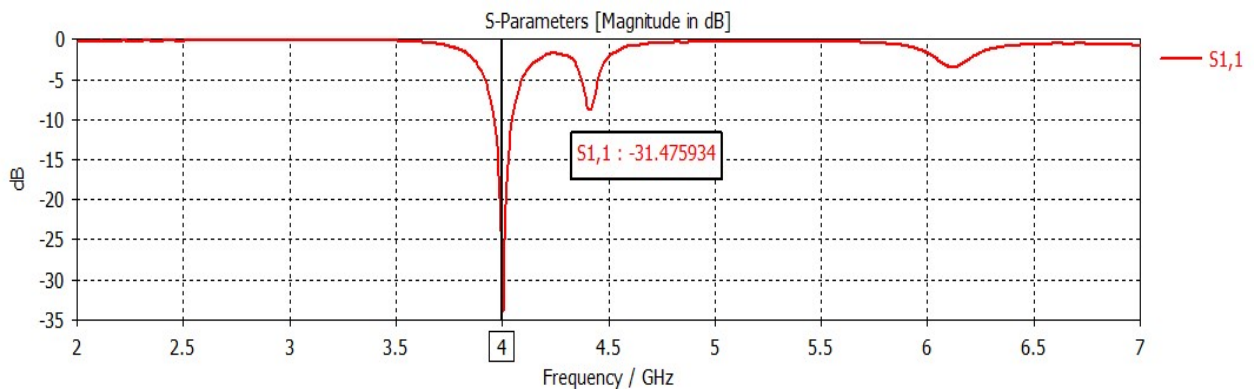


Figure 3. 8.Coefficient de réflexion de l'antenne patch rectangulaire proposée adaptée

La figure montre que la meilleure adaptation est obtenue avec un coefficient de réflexion $S_{11} = -31.475934$ dB à 4 GHz.

3.4.4. Élargissement de la bande passante

Dans cette partie, il est nécessaire d'élargir la bande passante afin de permettre le fonctionnement de l'antenne avec plusieurs protocoles IoT. Pour cela, nous avons combiné plusieurs techniques d'élargissement, notamment l'utilisation d'un plan de masse partiel, l'ajout de fentes sur le patch, ainsi qu'une modification de la largeur de la ligne d'adaptation. (W_{fm}).

Voici le tableau des nouveaux paramètres après la modification de l'antenne adaptée pour l'élargissement de la bande passante :

Tableau 3. 7. Études paramétriques d'élargissement

	Patch		Substrat			Ligned'alimentation			
dimension	L_p	W_p	L_s	W_s	H	W_{fm}	L_{fm}	L_f	W_f
Valeur théorique	16	23.02	52	46	1.5	3.1	11.20	10.88	3.1

Voici ci-dessous la structure de l'antenne patch rectangulaire modifiée :

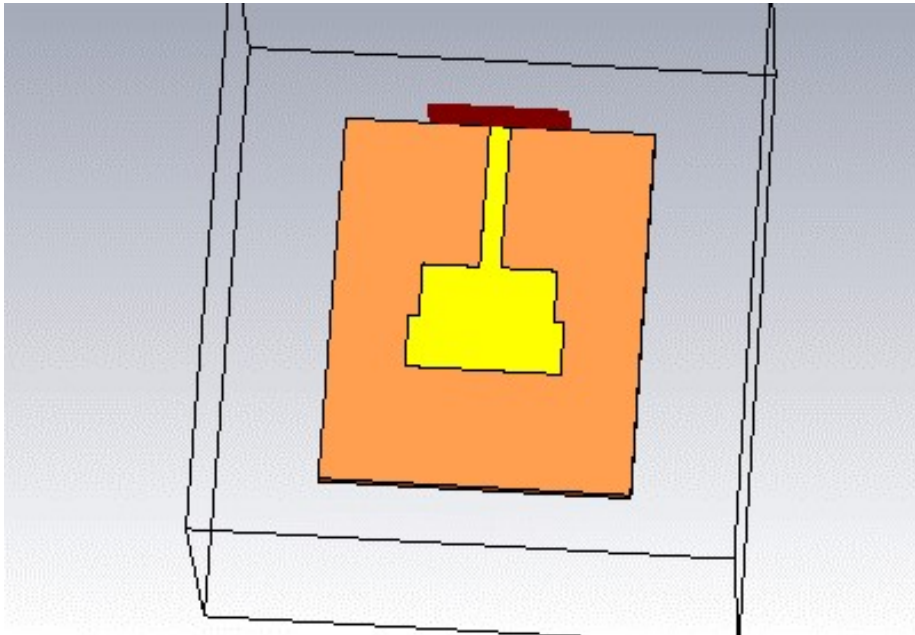


Figure 3. 9. Géométrie de l'antenne rectangulaire Modifiée

Le résultat de la simulation est présenté dans la Figure 3.10.

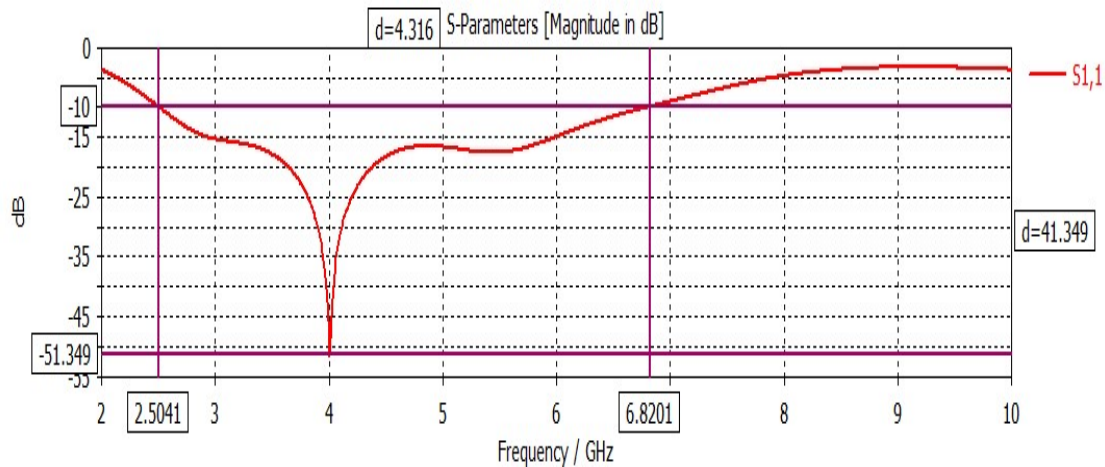


Figure 3. 10. Coefficient de réflexion de l'antenne élargie

Les résultats de simulation ont montré un bon coefficient de réflexion sur toute la plage de fréquences avec un rayonnement stable, ces performances confirment que l'antenne conçue pour des protocoles IoT.

3.4.5. Détermination de la bande passante

$$BP(\%) = \frac{f_2 - f_1}{f_r}$$

$$BP(\%) = \frac{6.8201 - 2.5041}{4} \times 100$$

$$BP(\%) = 107.9 \%$$

Nous constatons que la bande la bande passante est très élargie pour couvrir toute les fréquences considérées dans le cadre de ce travail.

3.5. Conception et simulations d'une antenne MIMO

Afin d'améliorer les performances du système de communication sans fil nous avons étendu la conception de l'antenne a une configuration MIMO (multiple input multiple output), cette technologie permet d'augmenter le débit et la fiabilité du lien sans fil en exploitant plusieurs antennes à la transmission et à la réception.

Une MIMO 2×2 a été conçue en utilisant l'antenne patch optimisée précédemment avec $f_r=4$, l'objectif principale et maintenir une bonne adaptation d'impédance.

3.5.1. Conception d'antenne MIMO 2×2

A partir de l'antenne de départ, nous avons conçues une configuration MIMO à deux antennes avec deux ports, imprimées sur le même substrat FR-4 de dimensions : $2W_s \times L_s$

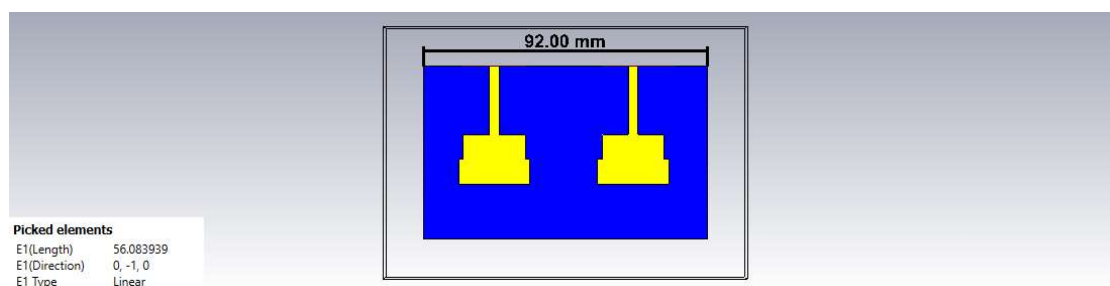


Figure 3. 11. Structure de antenne MIMO 2×2

3.5.2. Coefficients de réflexion et transmission S_{11} et S_{22} , S_{12} et S_{21}

Voici Les résultats dans la Figure 3.12. de la simulation de la structure de la Figure 3.11.

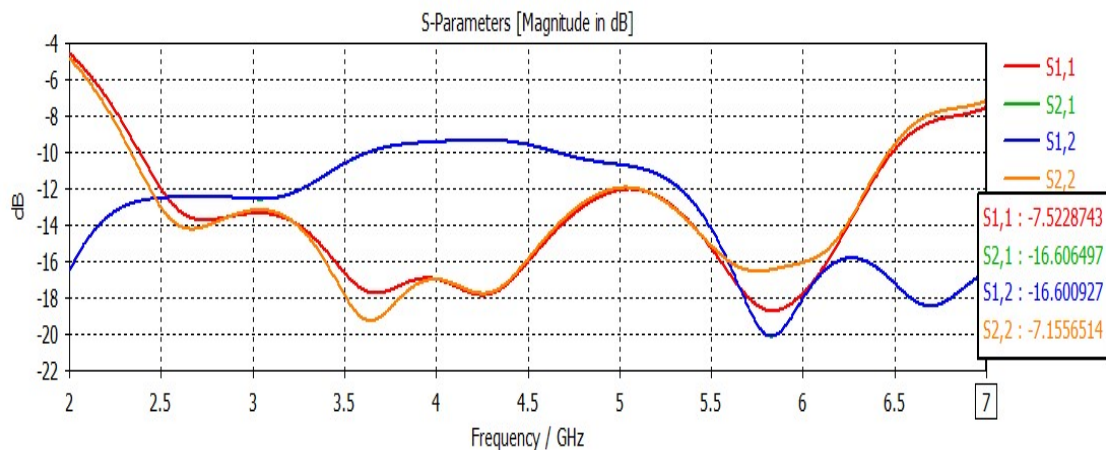


Figure 3. 12. Coefficients de réflexion et transmission d'une antenne MIMO 2×2

La Figure 3.12. Présente les paramètres de la structure MIMO à deux ports (S_{11} , S_{22} , S_{12} , S_{21}).

Les Coefficients de réflexion S_{11} et S_{22} indiquent que l'antenne est relativement bien adaptée sur l'ensemble de la bande.

Les Coefficients de transmission S_{21} et S_{12} sont supérieures à -15dBce qui signifie qu'il existe un couplage mutuel entre les deux antennes.

3.5.3. Isolation antenne MIMO 2×2

Dans cette partie, il est nécessaire d'introduire une isolation à l'aide de stubs entre les deux antennes, afin de réduire ou d'éliminer le couplage mutuel entre elles.

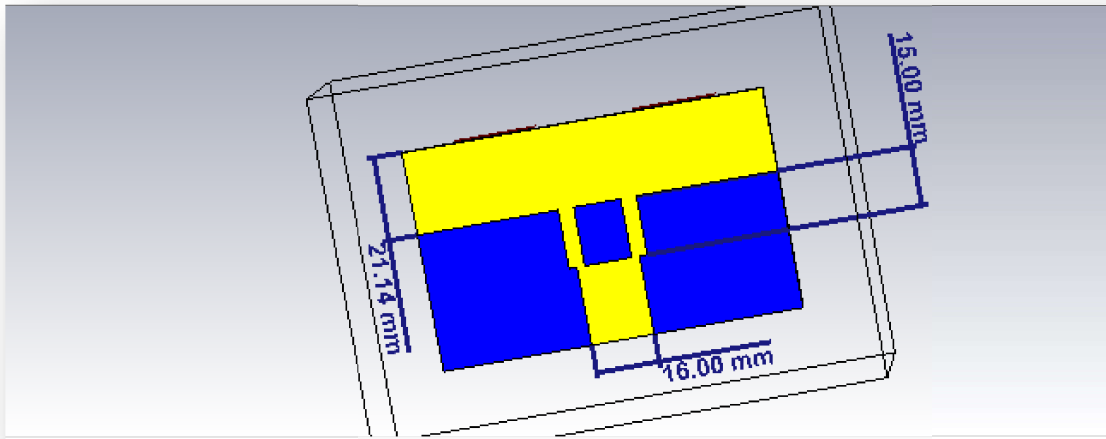


Figure 3. 13. Structure d'isolation de l'antenne MIMO 2*2

3.5.4. Résultat et simulation

Les résultats de la simulation sont présentés dans la Figure 3.14.

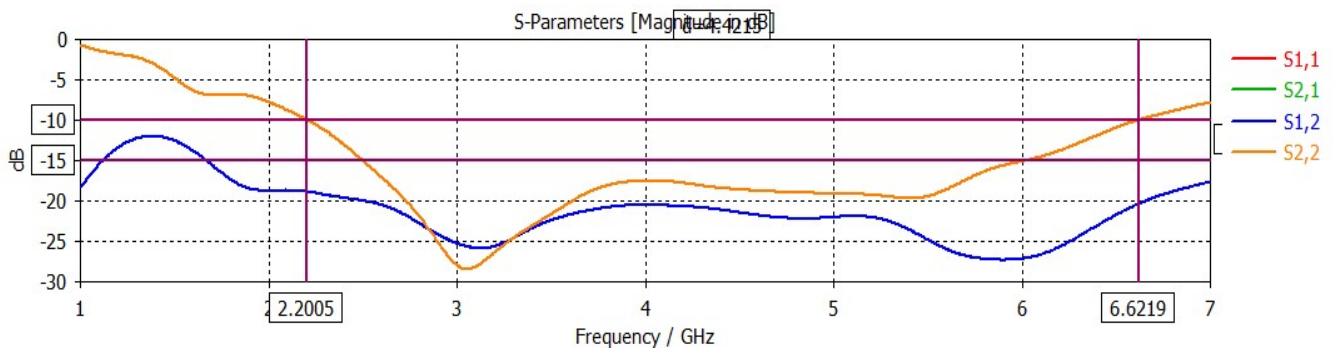


Figure 3. 14. Coefficients de réflexion et transmission d'une antenne MIMO 2×2

Les Coefficients de réflexion S_{11} et S_{22} sont inférieures à -10 dB dans la bande de fréquence approximative de [2.2 - 6.6]GHz ce qui indique une bonne adaptation d'impédance sur cette plage, cela montre que l'antenne rayonne efficacement sur cette plage sans pertes.

Les Coefficients de transmission S_{21} et S_{12} entre les deux ports sont largement inférieurs à -15 dB sur tout l'ensemble de la bande de fréquence [2.2 - 6.6]GHz ce qui indiquant un faible couplage mutuel entre les deux antennes, donc on a une bonne adaptation d'impédance.

3.6. Coefficient de corrélation d'enveloppe (ECC : Enveloppe Corrélation Coefficient) et gain de diversité (DG : Diversity Gain)

Dans les antennes multiports, le coefficient de corrélation d'enveloppe (Enveloppe Corrélation Coefficient (ECC)) est considéré comme un indicateur clé de la performance. Une valeur faible de ECC entre deux ports signifie une diaphonie faible lors d'une opération Chapitre III Conception et analyse d'une nouvelle structure d'antenne MIMO 2×2 simultanée. Cela signifie également une meilleure performance en termes de diversité dans le cas d'une utilisation en MIMO. L'ECC égale à zéro dans le cas idéal. Elle doit être inférieure à 0.5. Une approximation du gain de diversité (diversity gain (DG)) par sélection dans le cas d'une antenne à 2 ports i, j , à un niveau de probabilité d'interruption de 1% (0.01). La valeur idéale de DG égale à 10. Le ECC et le DG peuvent être calculés à partir des paramètres S par le logiciel CST Microwave studio.

La Figure 3.15. Montre des valeurs typiques de ECC (= 0) et de DG (=10) sur toute la bande de fréquences, ce qui montre la performance de l'antenne proposée.

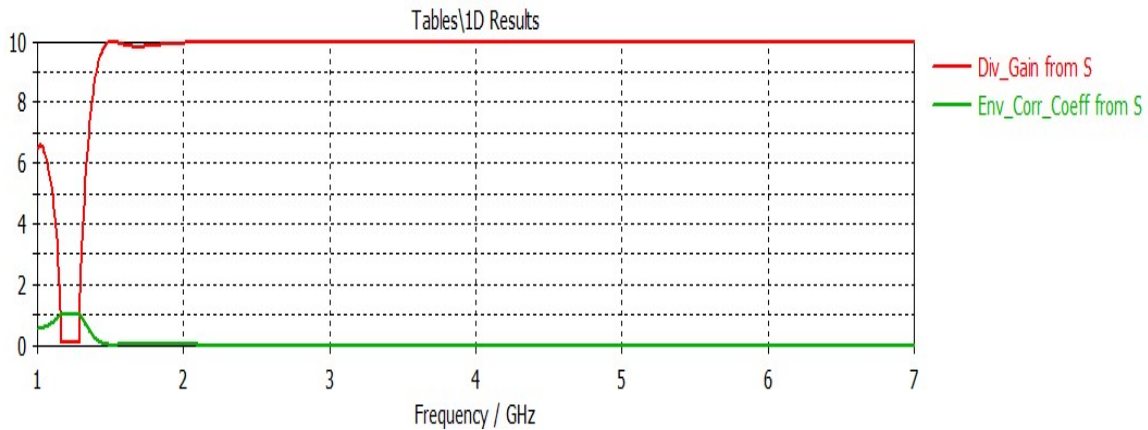


Figure 3. 15.ECC et DG de l'antenne MIMO à deux ports en fonction de la fréquence

3.7. Conclusion

À la fin de ce chapitre, nous avons réussi à générer et à simuler une antenne patch rectangulaire pour l'loT. Ces modèles sont générés à partir de la structure fondamentale alimentée par la ligne micro-ruban. Certaines étapes sont prises pour réaliser les objectifs fixés précédemment comme l'adaptation en impédance, réaccordant la fréquence de résonance à 4 GHz, élargir la BP sur la plage approximative [2–7] GHz.

Différentes techniques ont été utilisées pour améliorer les performances de l'antenne, telles que le marquage de différents types de fentes, le changement de Ground plane et le redimensionnement de l'alimentation. Lesdites optimisations ont conduit à une antenne bien adaptée avec S_{11} toujours en satisfaisant les exigences d'adaptation de -10dB tout au long d'une large bande et son rayonnement stable à travers la plage de fréquences.

Dans un deuxième temps, pour améliorer les performances globales du système et exploiter l'opportunité offerte par la diversité spatiale, la conception a été étendue à une configuration MIMO 2×2. Les résultats de simulation ont montré une bonne adaptation d'impédance, une isolation acceptable entre les éléments ($S_{21}S_{12} < -15$ dB), ainsi que de très bonnes performances en diversité avec un coefficient de corrélation d'enveloppe (ECC) proche de zéro et un gain de diversité (DG) proche de la valeur idéale de 10.

Ainsi, les résultats démontrent que l'antenne conçue qu'elle soit utilisée seule ou intégrée dans une architecture MIMO constitue une solution efficace et

adaptée aux systèmes de communication IoT, offrant une forme compacte, une bande passante suffisamment large et de bonnes performances électromagnétiques.

Conclusion générale

Conclusion générale

Ce mémoire a porté sur la conception et la simulation d'antennes micro-ruban destinées aux applications de l'Internet des objets (IoT), en s'articulant autour de trois chapitres complémentaires.

Le premier chapitre a présenté le concept de l'IoT, ses caractéristiques, son architecture, ainsi que ses domaines d'application, en mettant en évidence les exigences croissantes en termes de connectivité, de fiabilité et de consommation énergétique.

Le deuxième chapitre a été consacré aux antennes imprimées, en particulier les antennes patch, ainsi qu'à la technologie MIMO, qui permet d'augmenter le débit et la robustesse des communications sans fil grâce à l'exploitation de la diversité spatiale.

Le troisième chapitre a détaillé la conception, l'optimisation et la simulation d'une antenne patch rectangulaire large bande, opérant entre 2 et 7 GHz, suivie de son intégration dans une configuration MIMO 2×2.

À travers l'utilisation du logiciel CST Microwave Studio, les résultats de simulation ont démontré une bonne adaptation d'impédance, un rayonnement stable et une faible corrélation entre les antennes, répondant ainsi aux besoins spécifiques des systèmes IoT.

En perspective, la réalisation pratique du prototype proposé constitue une étape essentielle pour valider les performances simulées, et une extension vers une architecture MIMO 4×4 pourrait permettre d'améliorer davantage la capacité et la fiabilité du système, notamment pour les futurs réseaux de communication à haute densité et à faible latence.

Références Bibliographique

- [1] ZWAENEPOEL, P., &LE BARS, J.-M. « L'agriculture de précision ». Ingénieries EAT, (12), 67–79(1997).
- [2] YILMAZ, Ö, &ERDUR, R. C. iConAwa – An intelligent context-aware system. Expert Systems with Applications, 39(3), 2907–2918(2012).
- [3] BENGHOZI, P.-J., BUREAU, S., MASSIT-FOLLEA, F., WAROQUIERS, C., &DAVIDSON, S. L'internet des objets : Quels enjeux pour l'Europe (66 p.). Éditions de la Maison des sciences de l'homme(2009).
- [4] WEILL, M., &SOUISSI, M. L'internet des objets : concept ou réalités industrielles, (8), 90–96(2010, novembre).
- [5] FARIDAH, SMITH, &LEE A comprehensive review of IoT applications and future prospects. IEEE Internet of Things Journal, 10(4), 1234–1267 (2023).
- [6] CHRISTIAN. Avec les objets connectés, le changement c'est maintenant [Billet de blog]. Fnac(2017, mars).
- [7] VERMESAN, O., &FRIESS, P. (Eds.). Internet of Things – From research and innovation to market deployment. River Publishers(2014).
- [8] Dr. OVIDIU VERMESAN SINTEF, Norway, Dr. Peter FriessEU, Belgium, "Internet of Things– From Research and Innovation to Market Deployment", river publishers' series in communications, 2014.
- [9] LEE, M., HWANG, J., &YOE, H. Agricultural production system based on IoT. In 2013 16th International Conference on Computational Science and Engineering (CSE) (pp. 833–837). IEEE (2013, December).
- [10] GUBBI, J., BUYYA, R., MARUSIC, S., &PALANISWAMI, M. Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions. Future Generation Computer Systems, 29(7), 1645–1660 (2013).
- [11] DJOUADI, A. L'étude de l'Internet des objets et contrôle d'accès aux données [Mémoire de licence, Université virtuelle de Tunis]. Mémoire Online(2019).
- [12] HARTENSTEIN, H., &LABERTEAUX, K. A tutorial survey on vehicular ad hoc networks. IEEE Communications Magazine, 46(6), 164–171(2008).
- [13] HADJADJ, W. L'utilisation de N-Version de programmation pour la prise en charge des fautes dans un environnement IoT : Étude de cas sur un système

médical domotique contrôlé par un SMA (Mémoire de Master, Université Larbi Ben M'hidi, Oum El Bouaghi). pp. 13–19(2018).

- [14] HOSSAIN, M. S., &MUHAMMAD, G. Cloud-assisted Industrial Internet of Things (IIoT)–enabled framework for health monitoring. *Computer Networks*, 101, 192–202(2016).
- [15] GRABOWSKI, M., &DZIWOKI, G. The IEEE wireless standards as an infrastructure of smart home network. In *Communications in Computer and Information Science* (Vol. 39, pp. 302–309). Springer (2009).
- [16] ALAA, S., &HAMOUDA, A. A comprehensive survey on smart home automation systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 102, 234–249 (2019).
- [17] ATZORI, L., IERA, A., &MORABITO, G. The Internet of Things: A survey. *Computer Networks*, 54(15), 2787–2805(2010).
- [18] XU, L. D., HE, W., &LI, S. Internet of Things in industries: A survey. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 10(4), 2233–2243 (2014).
- [19] TIZZAOU, Y. Internet des Objets (IoT) – Application : Industrie 4.0 (Mémoire de Master, Université Abderrahmane Mira de Béjaïa, Algérie)(2017).
- [20] ZOUNIS, A., KATSOULAS, N., BARTZANAS, T., &KITTAS, C. Internet of Things in agriculture: Recent advances and future challenges. *Biosystems Engineering*, 164, 31–48 (2017).
- [21] MIORANDI, D., SICARI, S., De PELLEGRINI, F., &CHLAMTAC, I. Internet of things: Vision, applications and research challenges. *Ad Hoc Networks*, 10(7), 1497–1516(2012).
- [22] GHEZAL, A., &CHIMI, K. IoT monitoring : État de l'art des solutions existantes (Thèse de doctorat, Université Ibn Khaldoun de Tiaret, Algérie)(2019).
- [23] MATHUR, P., KUMAR, P., GUPTA, R., &SINGH, V. Dual MIMO antenna system for 5G mobile phones, 5.2 GHz WLAN, 5.5 GHz WiMAX and 5.8/6 GHz WiFi applications. *IEEE Access*, 9, 104567–104575 (2021).
- [24] AI-SHAREEDA, M. A., HABAEBI, M. H., &BASHIR, A. K. Bluetooth Low Energy for IoT: A review. *International Journal of Electrical, Electronics and Computer Systems (IJEECS)*, 28(1), 18–26(2023).

- [25] ZIGBEE ALLIANCE. ZigBee specification (Document No. 053474r17). ZigBee Alliance. Basé sur la norme IEEE 802.15.4(2007).
- [26] ADAMO, I. H., AYAD, M. Y., ALWAN, Z. S., & ISMAEL, B. Comparative study on LPWAN: NB-IoT and LTE-M. ITM Web of Conferences, 55, 03002 (2023).
- [27] BALANIS, C. A. Antenna theory: Analysis and design (3rd ed.). John Wiley & Sons, Inc(2005).
- [28] MAOUI, A. Conception et réalisation d'une antenne à base de métamatériaux pour les applications sans fil 5G (Mémoire de Master, Université Belhadj Bouchaib d'Aïn Témouchent, Algérie)(2024).
- [29] DEGHEFEL, W., & MERZOUGUI, R. Étude et conception d'une antenne patch ultra large bande (ULB) à bande rejetée (Mémoire de Master, Université Mohamed Boudiaf de M'Sila, Algérie)(2017).
- [30] BENKHIRA, A. Conception d'une antenne UHF ISM pour l'IoT (Mémoire de Master, Université Belhadj Bouchaib d'Aïn Témouchent, Algérie)(2023).
- [31] PROAKIS, J. G. Digital communications (4th ed.). McGraw-Hill(2000).
- [32] LAHEG, CH. Étude et conception d'une antenne MIMO reconfigurable (Mémoire de Master académique, Université 8 Mai 1945 de Guelma, Algérie)(2022).
- [33] OESTGES, C., & CLERCKX, B. MIMO wireless communications: From real-world propagation to space-time code design (1st ed.). Academic Press(2007).
- [34] BELLANGER, M. Les antennes : Théorie, conception et application. Dunod(2009).
- [35] BENZID, M. Emploi de techniques de traitement de signal MIMO pour des applications dédiées aux réseaux de capteurs sans fil (Thèse de doctorat, Université Grenoble Alpes, France)(2012).
- [36] NACHOUANE, H. Contribution à la conception et à la réalisation d'antennes reconfigurables large bande à diversité pour les systèmes de communication radio cognitive de la quatrième génération (Thèse de doctorat, Institut National des Postes et Télécommunications, Maroc)(2017).

- [37] FORTINO, N. Conception et caractérisation d'antennes imprimées pour systèmes ultra-large bande impulsions (Thèse de doctorat, Université Nice Sophia Antipolis, France)(2006).
- [38] BABOUR, L. Étude et conception d'antennes ultra large bande miniaturisées en impulsions (Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble – INPG, France)(2009).
- [39] DAHEL, F. Z., &BOULANOUAR, F. Conception d'une antenne fractale miniature et large bande (Mémoire de Master, Université Belhadj Bouchaib d'Aïn Témouchent, Algérie)(2022).
- [40] FEGHOL, M. N., &ZAARIR, A. Conception, simulation et réalisation d'un système antenne ULB pour application MIMO (Mémoire de Master, Université Saad Dahlab de Blida, Algérie)(2017).

