

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العلمي والبحث العالي  
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 2**

**Domaine : Science et Technologie**

**Filière : Télécommunication**

**Option : Réseaux et Télécommunications**

---

**ETUDE ET CONCEPTION D'UNE ANTENNE MULTISERVICE SUB 6 GHZ  
POUR APPLICATIONS 5G**

---

**Proposé par :**  
Mme BERKAT.Z  
**Co - encadreur :**  
Mr MOSBAH.A

**Présenté par :**  
HARIMA Abdellah  
TERRA Abderraouf

2020/2021

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

### ***Remerciement***

Nous remercions le dieu de nous avoir donné la force et le courage pour surmonter toutes les épreuves et obstacles rencontrés tout au long de notre travail.

Nos chaleureux remerciements vont en premier à notre promotrice Mme BERKAT Zeyneb, d'avoir accepté de diriger ce travail et pour leurs orientations tout au long de notre projet.

Nos sincères remerciements à notre Co- encadreur Mr MOSBAH Abdelkader pour son suivi, ses conseils précieux, son aide dans le cheminement de cette étude.

Les membres du jury trouveront ici l'expression de nos vifs remerciements pour avoir accepté d'examiner notre travail.

Nous sommes également très heureux de remercier nos enseignants pour les efforts qu'ils ont toujours déployé pour leur amical et efficace soutien durant tout notre parcours au sein de l'université de science et technologie SAAD DAHLEB BLIDA 1.

Nous remercions nos familles pour la patience et le soutien dont elles ont fait preuve et nos amis pour leurs encouragements.

Merci à toutes et à tous.

## *Dédicace*

Grace à Dieu le tout puissant, j'ai achevé la réalisation de ce modeste travail que je tien très chaleureusement à le dédier à :

Ma mère chérie et mon père qui m'ont encouragé et soutenu tout au long de mes études et pour leurs patiences que Dieu les protège et les garde pour moi.

A mes adorables frères, sœurs et mes grands-parents.

A ma très chère amie Ouissem Et tous mes amis sans oublier l'équipe de HIGHSAT & Cloud pour tous les moments d'échange et de débat aux personnes qui m'ont toujours aidé

HARIMA ABDELLAH

## *Dédicace*

Le succès n'est vrai que quand on le partage avec ceux qu'on aime et principalement avec ceux qui ont participé à sa réalisation.

Je dédie ce modeste travail à ceux qui m'ont offert le monde dans la main à vous mes chers parents qui m'ont comblée avec leurs tendresses et affection tout au long de mon parcours.

À qui je présente mes plus profonds remerciements qui d'ailleurs, ne suffiront jamais pour leur exprimer ma plus affectueuse gratitude pour leur soutien, leur encouragement et leurs sacrifices tout le long de mon parcours scolaire.

Merci d'avoir mis à ma disposition tous les moyens possibles afin de me donner la chance de réussir et réaliser mes rêves.

. A mes grands-parents et ma grande famille TERRA et BOUAZZA merci pour votre bénédiction et vos prières pour moi.

TERRA ABDERRAOUF

## RESUME

Les systèmes de communication sans fil de la Cinquième Génération (5G) peuvent prendre en charge tout spectre allant de 400 MHz à 90 GHz. Au début de la phase de déploiement des systèmes commerciaux 5G, les bandes inférieures à 6 GHz attirent beaucoup l'attention. Les fournisseurs de services prévoient d'utiliser les fréquences inférieures à 6 GHz (3,5 / 4,5 GHz) pour une mise en œuvre plus facile et uni des systèmes 5G surtout pendant la phase d'introduction de cette nouvelle technologie.

Dans ce contexte, nous proposons dans ce travail de concevoir et de réaliser une antenne intégrée qui rayonne dans plusieurs fréquences inférieures à 6GHz, afin d'être utilisée dans des différents services de la 5<sup>ème</sup> génération.

**Mots Clés :** réseaux d'antenne, 5G, réseau sans fil, bande sub 6GHz

## SUMMARY

Fifth Generation (5G) wireless communication systems can support any spectrum from 400 MHz to 90 GHz. At the start of the deployment phase of commercial 5G systems, the bands below 6 GHz are getting a lot of attention. Service providers plan to use frequencies below 6 GHz (3.5 / 4.5 GHz) for easier and smoother implementation of 5G systems especially during the phase of introduction of this new technology.

In this context, we propose in this work to design and produce an integrated antenna that radiates in several frequencies below 6GHz, in order to be used in various services of the 5th generation.

**Keywords:** antenna networks, 5G, wireless, bands below 6GHz

### الملخص :

يمكن لأنظمة الاتصالات اللاسلكية من الجيل الخامس 5G أن تدعم أي طيف من 400 ميغاهرتز إلى 90 جيجا هرتز. في بداية مرحلة نشر أنظمة 5G التجارية ، تحظى النطاقات الأقل من 6 جيجا هرتز باهتمام كبير. يخطط مقدمو الخدمة لاستخدام ترددات أقل من 6 جيجا هرتز (3.5 / 4.5 جيجا هرتز) من أجل تنفيذ أسهل وأكثر سلاسة لأنظمة 5G خاصة أثناء مرحلة إدخال هذه التقنية الجديدة.

في هذا السياق ، نقترح في هذا العمل تصميم وإنتاج هوائي متكامل يشع بعدة ترددات أقل من 6 جيجا هرتز ، لاستخدامه في مختلف خدمات الجيل الخامس

**كلمات البحث:** شبكات الهوائي ، الشبكة اللاسلكية ، 5G

## SOMMAIRE

<b>LISTE DES ABREVIATIONS</b> .....	
<b>LISTE DES FIGURES</b> .....	
<b>LISTE DES TABLEAUX</b> .....	
<b>INTRODUCTION GENERALE</b> .....	<b>1</b>
<b>CHAPITRE I : L 'EVOLUTION DES STANDARS DE TELECOMMUNICATION</b> ...	<b>3</b>
<b>I.1 INTRODUCTION</b> .....	<b>4</b>
<b>I.2 HISTORIQUE, EVOLUTION ET APPLICATIONS DES RESEAUX SANS FIL</b> ....	<b>4</b>
<b>I.3 PROBLEMES DE TRANSMISSIONS RADIO DANS LES RESEAUX SANS FIL</b> ..	<b>6</b>
<b>I.4 LA TECHNOLOGIE SANS FIL</b> .....	<b>8</b>
4.1 Réseaux personnels sans fil (WPAN) .....	<b>9</b>
4.2 Réseaux locaux sans fil (WLAN).....	<b>11</b>
4.3 Réseaux métropolitains sans fil (WMAN).....	<b>12</b>
4.4 Réseaux étendus sans fil (WWAN) .....	<b>13</b>
4.5 Les technologies BAN (wireless <i>body area network</i> ) .....	<b>13</b>
4.6 WiMax (IEEE802.16).....	<b>13</b>
<b>I.5 EVOLUTION DES SYSTEMES DE TELEPHONIE MOBILE</b> .....	<b>15</b>
5.1 Première Génération .....	<b>16</b>
5.2 Le GSM (2G).....	<b>17</b>
5.2.1 standard GSM (Global System for Mobile communications) .....	<b>17</b>
5.2.2 Notion de réseau.....	<b>17</b>
5.2.3 Architecture du réseau GSM.....	<b>18</b>
5.3 Le GPRS (2.5G) .....	<b>21</b>
5.3.1 INTRODUCTION AU STANDARD (GPRS) .....	<b>21</b>
5.3.2 Architecture du réseau (GPRS).....	<b>22</b>
5.4 Introduction au standard EDGE 2.75G.....	<b>22</b>
5.5 La troisième génération 3G .....	<b>22</b>
5.6 La CDMA 2000 .....	<b>23</b>
5.7 LA 3.5G : HSDPA.....	<b>23</b>
5.8 LA 3,75G : HSUPA.....	<b>24</b>
5.9 La Quatrième génération 4G (LTE) .....	<b>24</b>
5.10 La cinquième génération 5G .....	<b>25</b>
<b>I.6 CONCLUSION</b> .....	<b>26</b>
<b>CHAPITRE II : CARACTERISTIQUES DES ANTENNES</b> .....	<b>27</b>

<b>II.1 INTRODUCTION</b> .....	28
<b>II.2 ANTENNES ET MODELES DE PROPAGATION</b> .....	28
2.1 Impédance d'entrée.....	28
2.2 Directivité et gain .....	29
2.3 Fréquence de résonance et bande passante .....	30
2.4 Coefficient de réflexion .....	31
2.5 Le Rapport d'onde stationnaire.....	31
2.6 Diagramme de rayonnement .....	32
2.6.1 Antenne directive .....	33
2.6.2 Antenne sectorielle.....	33
2.6.3 L'Antenne omnidirectionnelle .....	34
2.7 L'angle d'ouverture .....	34
2.8 Polarisation.....	35
2.8.1 Définition.....	35
2.9 Déséquilibre de polarisation.....	35
2.10 L'Effacité.....	36
<b>II.3 LES DIFFERENTS TYPES D'ANTENNES</b> .....	36
3.1 L'antenne filaire .....	36
3.2 Description des antennes microbandes .....	37
3.2.1 Elément rayonnant.....	37
3.2.2 Les substrats.....	38
3.2.3 Les Avantages et les inconvénients des antennes micro ruban.....	38
3.3 Les antennes PIFA : (Planar <i>Inverted F Antennas</i> ) .....	39
<b>II.4 ALIMENTATION DES ANTENNES</b> .....	41
4.1 Alimentation coaxiale .....	41
4.2 Alimentation directe par une ligne micro ruban.....	42
4.3 L'Alimentation de proximité.....	44
4.4 Alimentation couplée par ouverture .....	45
<b>II.5 NOUVELLES TECHNIQUES POUR L'AMELIORATION DE LA BANDE PASSANTE</b> .....	47
<b>II.6 CONCLUSION</b> .....	48
<b>CHAPITRE III : CONCEPTION ET FABRICATION D'ANTENNE</b> .....	49
<b>III.1 INTRODUCTION</b> .....	50
<b>III.2 CHOIX DU SUBSTRAT UTILISE</b> .....	50



<b>III.3 CHOIX DE L'OUTIL DE SIMULATION .....</b>	<b>50</b>
<b>III.4 LA CONCEPTION DE L'ANTENNE PATCH .....</b>	<b>51</b>
4.1 La ligne coplanaire .....	51
4.2 Antenne proposée .....	51
4.3 Antenne avec modifications en deux coins .....	53
4.4 Antenne avec modifications en quarte coins .....	53
<b>III.5 ETUDE PARAMETRIQUE POUR LA CONCEPTION D'UNE ANTENNE OPTIMISEE .....</b>	<b>54</b>
1-Effet de l'espacement entre l'élément rayonnant et le plan de masse « $g$ ».....	54
2-Effet de la forme de l'élément rayonnant « $r$ » .....	55
3-Effet de la longueur du plan de masse « $L_g$ » .....	56
4-Effet de la largeur du plan de masse « $W_g$ ».....	57
5-Effet des dimensions du substrat .....	58
5.5.1 Diagrammes de rayonnement .....	60
5.5.2 Les courants de surface .....	60
5.5.3 Validation expérimentale .....	61
<b>III.6 CONCLUSION .....</b>	<b>62</b>
<b>CONCLUSION GENERALE .....</b>	<b>63</b>
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....</b>	<b>64</b>

## **LISTE DES ABREVIATIONS**

**AMPS:** Advanced Mobile Phone Service

**ASCII:** American Standard Code for Information interchange

**AUC:** Autentication Center

**AMRC:** Accès Multiple par Répartition en Code

**BLR:** Boucle Locale Radio

**BAN:** Wireless Body Area Network

**BTS:** Base Transceiver Station

**BSC:** Base Station Controller

**BSS:** Base Station Subsystem

**CST:** Computer Simulation Technologie

**CPW:** Le Guide D'onde coplanaire

**CDMA:** Code division multiple access

**DSL:** Digital Subscriber Line

**ETSI:** European Telecommunication Standards Institute

**EPS:** Evolved Packet system

**EIR:** Equipement Identity Register

**EDGE:** Enhanced Data rates for GSM Evolution

**FM:** Frequency modulation

**FEM:** Finite element method

**FDT:** Finite Difference Time Domain

**FIT:** FINITE Integration Technique

**FR-4:** Flame Resistant 4

**GSM:** Global System for Mobile

**GPS:** Global Positioning System

**GIS :** Geographic information system

**GPRS:** General Packet Radio Service

**GPIB:** General Purpose Interface Bus

**HSUPA:** High Speed up link pocket access

**HSDPA:** High Speed Down Link Packet Access

**HiperLAN:** High Performance Radio LAN

**HCMTS:** Hight Capacity Mobile Telephone System

**HomeRF:** Home Radio Frequency

**HLR:** Home Location Register

**IMT:** International Mobile Télécommunications

**IMEI:** International Mobile Equipment Identity

**IMSI:** International Mobile Subscriber Identity

**irDA:** Infrared data association

**IEEE:** Institute of Electrical and Electronics Engineers

**ISM:** Industrial Scientific and Medical

**LTE:** Long Term Evolution

**MMT:** Mode-Matching Technique

**MSC:** Mobile Switching Center

**MMS:** Multimedia Messaging Service

**M2M:** Machine To Machine

**MOM:** Method of moments

**MIMO :** Multiple Input Multiple Output

**MWS:** Micro Wave Studio

**NSS:** Network Station Subsystem

**PDA:** Personal Digital Assistant

**PIFA:** Planar Inverted F Antennas

**PCB:** Printed circuit board

**PPM:** Pulse position modulation

**ISDN:** Integrated Services Digital Network

**RF:** Radio Frequency

**ROS:** Rapport d'ondes stationnaires

**RFID:** Radio Frequency Identification

**SAE:** System Architecture Evolution

**SWR:** Standing wave ratio

**SMS:** Short Message Service

**TOS:** Taux d'ondes stationnaires

**UNII:** Unlicensed National Information Infrastructure

**UMTS:** Universal Mobile Telecommunication System

**ULB:** Ultra large bande

**UIT:** Union internationale des télécommunications

**UWB:** Ultra wide band

**VoIP:** Voice Over Internet Protocol

**VLR:** Visitor Location Register

**WPAN:** Wireless Personal Area Networks

**WLAN:** Wireless Local Area Network

**WIFI:** Wireless Fidelity

**WECA:** Wireless Ethernet Compatibility Alliance

**WMAN:** Wireless Metropolitan Area Network

**WWAN:** Wireless Wide Area Network

**WIMAX:** Worldwide Interoperability for Microwave Access

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

## **LISTE DES FIGURES**

### **CHAPITRE I**

Figure I.1 : Réseau sans fil.....	9
Figure I.2 : Image de Zigbee haute résolution.....	10
Figure I.3 : Les appareils qui peuvent soutenir le protocole ZigBee.....	11
Figure I.4 : Évolution des réseaux mobiles.....	16
Figure I.5 : La structure typique d'un réseau cellulaire.....	18
Figure I.6 : Architecture du réseau GSM dans différentes zones.....	19
Figure I.7 : antenne BTS du GSM.....	20

### **CHAPITRE II**

Figure II.1 : Circuit équivalent d'une antenne en émission.....	28
Figure II.2 : Bande passante d'une antenne.....	31
Figure II.3 : Diagramme de rayonnement en 3D.....	33
Figure II.4 : Répartitions possibles de l'énergie rayonnée dans l'espace par les antennes...33	
Figure II.5 : Antenne isotrope.....	34
Figure II.6 : Diagramme de rayonnement en coordonnées cartésiennes.....	34
Figure II.7 : Les différents types de polarisation.....	35
Figure II.8 : Structure d'une antenne patch.....	37
Figure II.9 : Antenne en F inversé typique.....	39
Figure II.10 : Antenne PIFA typique.....	39
Figure II.11 : L'utilisation d'une antenne PIFA permet de monter un module RF et d'autres composants sous l'antenne.....	40
Figure II.12 : Exemples de diagrammes de rayonnement et de polarisation d'une antenne PIFA.....	41
Figure II.13 : Alimentation par connexion directe à une ligne coaxiale.....	42
Figure II.14 : Techniques d'alimentation par ligne micro ruban.....	43
Figure II.15 : Alimentations par ligne micro-ruban : (a) axiale, (b) décalée, (c) axiale avec encoche.....	44
Figure II.16 : Alimentation par couplage électromagnétique à une ligne micro-ruban.....	45

Figure II.17 : Techniques d'alimentation par couplage par ouverture.....	46
Figure II.18 : Alimentation par couplage électromagnétique, à une ligne microbande, à travers une fente dans le plan de masse.....	46

### **CHAPITRE III**

Figure III.1 : les dimensions d'antenne initiale.....	52
Figure III.2 : (a) antenne monopole initiale proposée et (b) $S_{11}$ en fonction de la fréquence.....	52
Figure III.3 : (c) antenne monopole avec modification de deux coins et (d) $S_{11}$ en fonction de la fréquence.....	53
Figure III.4 : (a) antenne monopole avec modifications en quarte coins et (b) $S_{11}$ en fonction de la fréquence.....	53
Figure III.5 : (a) Antenne avec les dimensions initiales d'antenne (b) $S_{11}$ en fonction de fréquences.....	54
Figure III. 6 : Paramètre $S_{11}$ simulé pour différentes valeurs de $g$ .....	55
Figure III.7 : Variation de dimensions du l'élément rayonnant.....	55
Figure III.8 : Paramètre $S_{11}$ simulé pour différentes valeurs de $r$ .....	56
Figure III.9 : Variation de la longueur de plan de masse.....	56
Figure III.10 : Paramètre $S_{11}$ simulé pour différentes valeurs de $L_g$ .....	57
Figure.III.11 : Variation de la largeur du plan de masse.....	57
Figure III.12 : Paramètre $S_{11}$ simulé pour différentes valeurs de $W_g$ .....	58
Figure III.13 : Variation des dimensions du substrat.....	58
Figure III.14 : Paramètre $S_{11}$ simulé pour différentes valeurs de $x$ .....	59
Figure III.15 : Diagrammes de rayonnement aux fréquences à 3 GHz.....	60
Figure III.16 : Distribution du courant surfacique pour la fréquence 3GHz.....	60
Figure III.17 : Photographie de Monopole rectangulaire réalisé.....	61
Figure III.18 : Superposition des résultats de mesure et de simulation.....	61

## **LISTE DES TABLEAUX**

### **CHAPITRE I**

Tableau I.1 : Les différentes normes du WiMax.....	15
Tableau I.2 : Différentes technologies de téléphonie mobile.....	15

### **CHAPITRE III:**

Tableau III.1 : Les dimensions d'antenne initiale.....	52
Tableau III.2 : Les dimensions d'antenne.....	54
Tableau III.3 : Dimensions optimisées du Monopole rectangulaire.....	59

## INTRODUCTION GENERALE

De nos jours, le développement des réseaux sans fil ne cesse de croître dans le but d'optimiser le nombre de connexions sans avoir obligatoirement à réaliser des travaux coûteux en temps et en réalisation. Pour ce faire, les réseaux sans fil semblent être les plus adéquats pour relier des abonnés distants de plusieurs dizaines de mètres voire quelques kilomètres. Le support principal de cette génération de télécommunications repose sur les transmissions des ondes électromagnétiques au détriment des câbles habituels.

Ainsi les différents concepts ont permis de faire évoluer les différents systèmes sans fil, mais les industriels toujours plus gourmands, voulant minimiser les coûts, souhaitent de plus en plus augmenter les débits d'informations à l'aide d'un même système. Pour ce faire, les premières possibilités étaient d'accroître les gains et les bandes passantes des antennes afin d'améliorer les bilans de liaison.

On arrive jusqu'à la nouvelle génération de télécommunication mobile connue sous l'acronyme de cinquième génération (5G) est une technologie évolutive qui prend en charge de nouvelles fonctionnalités et répond aux besoins et aux enjeux de demain, permettant aux réseaux mobiles de faire d'énormes progrès en matière de débit, de réactivité et d'adaptabilité aux usages.

Bien que le but de la 5G ce n'est pas seulement de répondre aux déficits liés à l'augmentation de débit ou à la bande passante, mais de réduire la consommation énergétique avec un service de qualité omniprésent et d'obtenir un temps de latence ultra-court. Face à ces exigences, la cinquième génération devra combiner plusieurs technologies afin d'avoir un réseau mobile qui pourra satisfaire aux attentes. Parmi ces technologies nous pouvons citer : l'utilisation des bandes millimétriques en exploitant les fréquences au-dessus de 6GHz qui devient plus que jamais indispensable pour la 5G et facilitera l'intégration de centaines d'éléments rayonnants au niveau de la station de base grâce à leurs faibles longueurs d'ondes.

Le travail mené dans le cadre de ce mémoire s'inscrit dans ce contexte, notre objectif consiste à concevoir et simuler une antenne qui rayonne dans les bandes inférieures à 6GHz pour une application 5G. Pour ce faire, nous nous basons sur la théorie des antennes afin de déterminer les paramètres géométriques de notre antenne proposée et nous utilisons le logiciel CST MICROWAVE STUDIO (Computer Science Technology) comme outil de simulation.



Ce manuscrit est structuré comme suit :

Dans le premier chapitre, on expose un état de l'art des différents réseaux de télécommunications sans fil, aussi les bandes de fréquences tout en citant les différentes générations du réseau téléphoniques (GSM, UMTS, 4G. 5G.).

Le deuxième chapitre est consacré à la définition des caractéristiques d'antennes (bande passante, diagramme de rayonnement, polarisation, etc ..) et une présentation des différentes antennes, et il sera terminé par les différentes méthodes numériques utilisées dans l'analyse et la conception des antennes.

Le troisième chapitre présente l'étude et la conception d'une antenne monopole, on présente une nouvelle géométrie d'antenne monopole satisfaisant les spécifications demandées, dédiée pour la bande Sub 6GHz, obtenue à partir d'une antenne de base à laquelle on introduit certaines modifications sur l'élément rayonnant, alimenté par une ligne coplanaire. Les différentes caractéristiques de l'antenne tels que le coefficient de réflexion, les courants surfaciques ainsi que le diagramme de rayonnement sont présentés et commentés. A la fin de ce chapitre, une étude paramétrique de l'antenne proposée est effectuée. L'effet de certains paramètres de l'antenne tel que : les dimensions des troncatures et de l'encoche et du plan de masse, afin de mieux analyser l'influence de ces paramètres géométriques sur les performances de l'antenne et en particulier sur le coefficient de réflexion (adaptation de l'antenne) et le diagramme de rayonnement. Le mémoire est terminé par une conclusion générale.

# **CHAPITRE I : L'EVOLUTION DES STANDARS DE TELECOMMUNICATION**

## I.1 INTRODUCTION

Dans toutes les sociétés, l'être humain ont toujours cherché à communiquer. Mais c'est surtout au cours du siècle dernier que les humains ont pu commencer à communiquer entre eux plus aisément, depuis les années 1990, le secteur en continuelle expansion des télécommunications a encore permis de faciliter et d'accélérer la communication entre eux.

En effet les débits ont beaucoup augmenté ces dernières années favorisant de nouveaux services, aujourd'hui, les appareils électroniques tendent toujours à plus d'innovations, plus de services et le tout de faibles dimensions. On assiste à un véritable phénomène de miniaturisation des systèmes qui touche également le secteur automobile. Face à la croissance des divers standards tels que le GSM, GPS, SDARS, Bluetooth et WLAN, les nouvelles antennes doivent être capable de couvrir le maximum de bandes de fréquences correspond à ses différents services en un minimum d'encombrement.

Dans ce chapitre, nous présentons un bref historique de la radio, avec un aperçu sur le développement des télécommunications, en définissant de manière succincte et chronologique, les standards de la téléphonie mobile à travers les différentes générations qui se sont succédé.

## I.2 HISTORIQUE, EVOLUTION ET APPLICATIONS DES RESEAUX SANS FIL

L'histoire des communications radio-mobiles peut être découpée en trois grandes périodes. La première concerne les découvertes théoriques et la mise en évidence de l'existence des ondes radio. Cette période débute en 1678 avec les travaux d'Huygens sur les phénomènes de réflexion et de réfraction de la lumière. C'est Fresnel qui, en 1819 en démontre la nature ondulatoire [1].

En 1865, Maxwell établit les célèbres formules unifiant phénomènes électrique, magnétiques et lumineux mais ce n'est qu'en 1887 qu'Hertz met en évidence pour la première fois la possibilité d'émission/détection d'une onde électromagnétique entre deux points distants de quelques mètres. À la fin du siècle, en 1897, Ducretet étend cette distance en établissant une liaison radio de quelques kilomètres de portée. Après avoir montré la possibilité de communications radio-mobile entre un bateau et une île en 1898, Marconi met en place la première radio transatlantique entre l'Europe et les États-Unis trois ans plus tard. Il marque ainsi le point de départ des premiers systèmes de communications radio.

## L'ÉVOLUTION DES STANDARDS DE TELECOMMUNICATION

La deuxième période est constituée par le développement et l'évolution des équipements et des techniques mais pour des usages encore réservés à certaines catégories de la population. Les stations radio d'émission/réception sont au début du 20<sup>ème</sup> siècle de taille imposante.

Par exemple en 1902, une station radio militaire pour le télégraphe était constitué d'un moteur à essence pour tracer le système de communications consistant en générateur de 1kW monté sur une remorque suivie d'une seconde remorque pour l'émetteur et le récepteur. C'est l'évolution des techniques et des équipements (taille, poids, le porté des communications et les services radiotéléphonie, ...) qui permettront aux systèmes radios d'acquérir la dimension mobile. La Seconde Guerre mondiale va accélérer le développement des systèmes qui vont, dans les années 1950, se multiplier pour les applications civiles (compagnies de taxis et ambulances par exemple). Les équipements restent cependant encore lourds et occupent une place importante puisqu'ils sont généralement installés dans les coffres des véhicules [1].

Les progrès techniques et développement des systèmes de communication vont faire entrer les systèmes de communications sans fil et mobiles dans le domaine grand public (la troisième période). Les premiers types de systèmes de communications disponibles au plus grand nombre sont les systèmes cellulaires. Conçu comme réponse à l'augmentation de la demande et à la faible disponibilité du spectre radio, les systèmes cellulaires analogiques se développent dans la décennie 1970[1].

En 1979, le premier système cellulaire AMPS (*Advanced Mobile Phone Service*) est installé à Chicago, suivi en 1980 par le HCMTS (*High Capacity Mobile Téléphone System*) à Tokyo. La décennie 1980 va voir ainsi se généraliser l'implantation de systèmes cellulaires analogiques dans de nombreux pays. Parallèlement, les systèmes sans cordon, se développent et connaissent des taux de croissance impressionnants. Toutefois, c'est réellement le système cellulaire numérique GSM, avec les services du type ISDN (*pour Integrated Services Digital Network*) et la possibilité de roaming international, qui constitue le représentant le plus significatif de la révolution des mobiles de la décennie 1990 [1].

Les systèmes sans fil et mobiles vont toucher progressivement tous les domaines d'activités économiques et intégrer peu à peu tous les types de services de télécommunications. Comme on l'a déjà mentionné, plusieurs facteurs ont contribué à l'évolution rapide de ces dernières années. En effet, la miniaturisation des composants a permis de réduire la taille des produits électroniques sans fil en général (GPS, téléphone sans

## L'ÉVOLUTION DES STANDARDS DE TELECOMMUNICATION

fil, ...) et le matériel informatique en particulier. Les ordinateurs portables sont de plus en plus légers et puissants en même temps, génération après génération. Cette miniaturisation s'est accompagnée d'une évolution d'autonomie et une baisse de consommation. Un autre facteur important qui aide beaucoup à rendre la technologie sans fil plus populaire est la baisse des prix ainsi que la disponibilité des bandes radios ISM (*Industrial Scientific and Medical*) et UNII (*Unlicensed National Information Infrastructure*) à 800 MHz, 2.4 GHz et 5 GHz, qui peuvent être utilisées gratuitement et sans autorisation (malgré quelques différences dans la législation d'un pays à un autre). Avec la récente évolution des technologies de communication sans fil. On s'attend à un développement rapide des réseaux locaux sans fil et leur utilisation sera de plus en plus fréquente. Bien que les projets aient souvent débuté dans un cadre militaire pur, le domaine d'application des réseaux sans fil s'étend bien au-delà.

En effet, les réseaux sans fil offrent une grande flexibilité ainsi qu'une rapidité est facilité de mise en place. Ils seront d'un grand apport lors des catastrophes naturelles, des incendies, où il sera indispensable de disposer rapidement d'un réseau pour organiser les secours et les opérations de sauvetage [1].

Les réseaux sans fil sont plus faciles à implanter dans des bâtiments, où il est impossible d'installer des câbles convenablement ; tels que les vieux bâtiments, les sites classés (exemple : châteaux et monuments historiques), lors des manifestations temporaires (congrès, foires, salons, expositions, le tour de France, et autres manifestations sportives).

On peut aussi avoir recours à ce type de réseau lorsqu'on veut interconnecter des bâtiments à moindre coût (sans location d'une liaison spéciale chez un opérateur).

On peut imaginer une application industrielle, où les nœuds seront en fait des robots mobiles qui pourront se déplacer librement dans l'usine. Ou bien encore, dans des environnements hostiles à l'homme tel que des cratères de volcans pour surveiller leurs activités ou bien le long d'une faille géologique. Dans les campus universitaires, l'utilisation des réseaux sans fil peut être très utile pour les étudiants qui pourront se connecter sur leurs comptes et travailler à partir de la bibliothèque ou leurs chambres [1].

### **I.3 PROBLEMES DE TRANSMISSIONS RADIO DANS LES RESEAUX SANS FIL**

Les ondes radio (notées RF pour *Radio Frequency*) se propagent en ligne droite dans plusieurs directions. La vitesse de propagation des ondes dans le vide est de  $3 \times 10^8$  m/s.

## L'ÉVOLUTION DES STANDARDS DE TELECOMMUNICATION

Lorsqu'une onde radio rencontre un obstacle, une partie de son énergie est absorbée et transformée en énergie (thermique par exemple), une partie continue à se propager de façon atténuée et une dernière peut éventuellement être réfléchi. L'atténuation augmente avec l'augmentation de la fréquence ou de la distance. De plus lors de la collision avec un obstacle, la valeur de l'atténuation dépend fortement du matériel composant l'obstacle. Généralement les obstacles métalliques provoquent une forte réflexion, tandis que l'eau absorbe le signal [1].

Les réseaux sans fil utilisent des ondes radio ou infrarouges afin de transmettre des données. Les transmissions radios dans les réseaux sans fil sont toutefois soumises à de nombreuses contraintes, liées à la nature de la propagation des ondes radio et aux méthodes de transmission, rendant ce type de transmission non suffisante. Le signal transmis est sujet à nombreux phénomènes dont la plupart ont un effet de dégradation sur la qualité du signal. Cette dégradation se traduit en pratique par des erreurs dans les messages reçus qui entraînent des pertes d'informations pour l'utilisateur ou le système. Ces contraintes sont notamment [1] :

- ✚ le débit plus faible que celui de la filaire. La bande passante est une ressource rare, il faut minimiser la portion utilisée pour la gestion du réseau, afin de pouvoir laisser le maximum de bande passante pour les communications ;
- ✚ les brouillages dus aux interférences : les liens radios ne sont pas isolés, deux transmissions simultanées sur une même fréquence ou, utilisant des fréquences proches peuvent interférer. De plus, les interférences peuvent venir d'autres types de machine non dédiée aux télécommunications. Par exemple, les fréquences utilisées dans les fours à micro-ondes sont dans les fréquences de la bande ISM ;
- ✚ les brouillages dus au bruit ambiant (que nous distinguons des interférences), provenant d'émission d'autres systèmes par exemple ;
- ✚ les évanouissements (ou *fadings*) dans la puissance du signal dû aux nombreux effets induits par le phénomène de multi-trajets ;
- ✚ erreurs de transmission : les erreurs de transmission radio sont plus fréquentes que dans les réseaux filaires;
- ✚ les liens versatiles : les transmissions radios sont très sensibles aux conditions de propagation, ce que les rendent versatiles. Un contrôle de la qualité des liens est obligatoire afin de pouvoir les exploiter convenablement pour les communications radios;

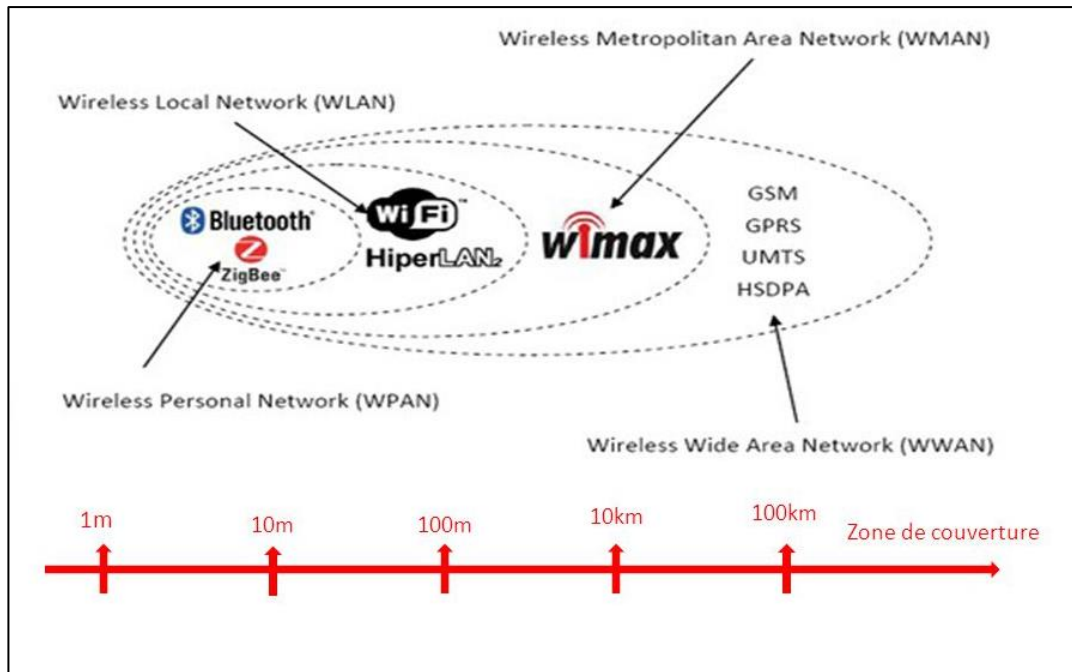
## L'ÉVOLUTION DES STANDARDS DE TELECOMMUNICATION

- ✚ la puissance du signal : la puissance du signal diminue avec la distance, et la puissance utilisée est sévèrement réglementée par les autorités compétentes des pays ;
- ✚ les pertes de propagation dues à la distance parcourue par l'onde radio, ou affaiblissement de parcours (*pathloss*) ;
- ✚ les atténuations de puissance du signal dues aux effets de masques (*shadowing*) provoqués par les obstacles rencontrés par le signal sur le trajet parcouru entre l'émetteur et le récepteur ;
- ✚ les nœuds cachés : ce phénomène est très particulier à l'environnement sans fil. Les nœuds qui ne s'entendent pas, à cause d'un obstacle qui empêche la propagation des ondes, peuvent provoquer des collisions ;
- ✚ l'impossibilité de détecter les collisions au cours d'une transmission. Pour détecter une collision, une station doit être capable de transmettre et d'écouter en même temps. Or, dans les systèmes radios, il ne peut y avoir transmission et écoute simultanée ;
- ✚ la consommation d'énergie : qui dit sans fil, dit aussi mobilité, et donc autonomie. Pour maximiser la durée de vie des batteries, il faut économiser autant que possible les transmissions inutiles ;
- ✚ la sécurité : les détecteurs des signaux et les récepteurs passifs peuvent espionner les communications radio si ces dernières ne sont pas protégées ;
- ✚ la mobilité et topologie dynamique : la disparition ou l'apparition d'un nœud ou un lien entre deux nœuds peut être le résultat d'un déplacement, c'est aussi parce que la batterie est épuisée ou lorsqu'une panne survient.

### I.4 LA TECHNOLOGIE SANS FIL

Il existe aujourd'hui de nombreuses technologies sans fil standardisées. Il n'existe pas de technologie parfaite et chacune d'elles représente un équilibre entre différents facteurs (portée, débit, etc.). Le choix d'une technologie sans fil dépend donc de l'usage que l'on souhaite en faire. Les recherches ont cependant permis d'augmenter significativement la performance des réseaux. La figure I.1 présente une classification des réseaux sans fil.

# L'ÉVOLUTION DES STANDARDS DE TELECOMMUNICATION



**Figure I.1 :** Les réseaux sans fils

## 4.1 RESEAUX PERSONNELS SANS FIL (WPAN)

Les réseaux personnels sans fil (WPAN pour Wireless Personal Area Networks) sont de 3 types : Bluetooth, Infrarouges, ZigBee.

Le réseau personnel sans fil (appelé également réseau individuel sans fil ou réseau domestique sans fil et noté WPAN pour *Wireless Personal Area Network*) concerne les réseaux sans fil d'une faible portée (de l'ordre de quelques dizaines mètres) [2]. Ce type de réseau sert généralement à relier des périphériques (imprimante, téléphone portable, appareils domestiques, caméra sans fil...) ou un assistant personnel (PDA) à un ordinateur sans liaison filaire ou bien à permettre la liaison sans fil entre deux machines très peu distantes. La principale technologie WPAN est la technologie Bluetooth, lancée par Ericsson en 1994, proposant un débit théorique de 1Mbps pour une portée maximale d'une trentaine de mètres. Bluetooth, connue aussi sous le nom IEEE 802.15.1, possède l'avantage d'être très peu gourmande en énergie, ce qui la rend particulièrement adaptée à une utilisation au sein de petits périphériques [3].

### HomeRF

HomeRF (pour *Home Radio Frequency*), lancée en 1998 par le HomeRF Working Group (formé notamment par les constructeurs Compaq, HP, Intel, Siemens, Motorola et

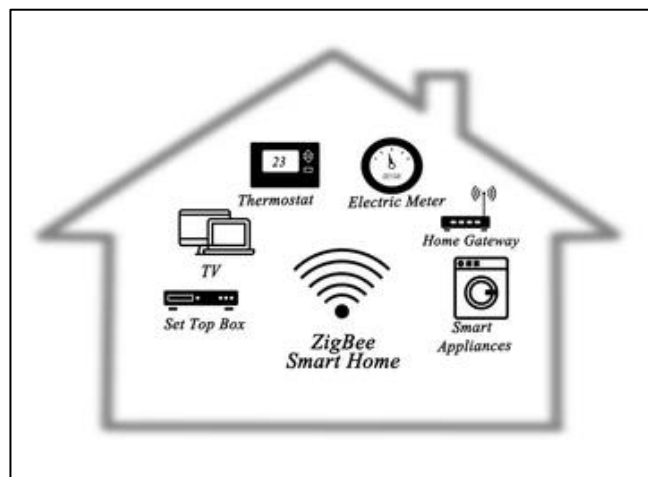


## L'ÉVOLUTION DES STANDARDS DE TELECOMMUNICATION

Microsoft) propose un débit théorique de 10 Mbps avec une portée d'environ 50 à 100 mètres sans amplificateur. La norme HomeRF soutenue notamment par Intel, a été abandonnée en Janvier 2003, notamment car les fondateurs de processeurs misent désormais sur les technologies Wi-Fi embarquées (via la technologie Centrino, embarquant au sein d'un même composant un microprocesseur et un adaptateur Wi-Fi) [4].

### ZigBee

La technologie ZigBee (aussi connue sous le nom IEEE 802.15.4) permet d'obtenir des liaisons sans fil à très bas prix et avec une très faible consommation d'énergie, ce qui la rend particulièrement adaptée pour être directement intégrée dans de petits appareils électroniques (appareils électroménagers, hifi, jouets, ...). La technologie Zigbee, opérant sur la bande de fréquences des 2,4GHz et sur 16 canaux, permet d'obtenir des débits pouvant atteindre 250 Kb/s avec une portée maximale de 100 mètres environ [1.5].



**Figure I.2 :** Image de Zigbee haute résolution.

## L'ÉVOLUTION DES STANDARDS DE TELECOMMUNICATION



Figure I.3 : Les appareils qui peuvent soutenir le protocole ZigBee.

### ✚ Liaisons Infra rouge

Enfin les liaisons infrarouges permettent de créer des liaisons sans fil de quelques mètres avec des débits pouvant monter à quelques mégabits par seconde. Cette technologie est largement utilisée pour la domotique (télécommandes) mais souffre toutefois des perturbations dues aux interférences lumineuses. L'association irDA (*infrared data association*) formée en 1995 regroupe plus de 150 membres. La technologie infrarouge a pour caractéristique principale d'utiliser une onde lumineuse pour la transmission de données. Ainsi les transmissions se font de façon unidirectionnelle, soit en "vue directe" soit par réflexion. Le caractère non dissipatif des ondes lumineuses offre un niveau de sécurité plus élevé. Il est possible grâce à la technologie infrarouge d'obtenir des débits allant de 1 à 2 Mbit/s en utilisant une modulation appelé PPM (*pulse position modulation*). [6]

### 4.2 RESEAUX LOCAUX SANS FIL (WLAN)

Le réseau local sans fil (noté WLAN pour *Wireless Local Area Network*) est un réseau permettant de couvrir l'équivalent d'un réseau local d'entreprise, soit une portée d'environ une centaine de mètres. Il permet de relier entre-eux les terminaux présents dans la zone de couverture. La communication peut se faire directement entre deux terminaux mobiles ou en passant par une station de base qui joue le rôle de routeur. Les WLAN peuvent constituer une extension ou une alternative aux réseaux locaux câblés.

Il existe plusieurs technologies concurrentes [7] :

## L'ÉVOLUTION DES STANDARDS DE TELECOMMUNICATION

### ✚ Le WIFI (*Wireless Fidelity*)

Le Wifi (ou IEEE 802.11), soutenu par l'alliance WECA (*Wireless Ethernet Compatibility Alliance*). C'est un standard pour réseau informatique à très haut débit et à couverture large. Il permet d'échanger des données sans fil avec un débit de 11Mb/s jusqu'à 54Mb/s.

Sa portée dépend de la puissance des bornes, mais peut s'étendre de 30 à une centaine de mètres. Le Wifi exploite la fréquence 2.4 GHz [6].

### ✚ L'HiperLAN (*High Performance Radio LAN*)

Standard européen initié par l'ETSI (*Européen Télécommunication Standards Institute*) en 1998. Son but est de créer des environnements sans fil à haut débit et flexibles, permettant une communication de terminal à terminal (ad-hoc) en transitant par des terminaux intermédiaires. Sa puissance d'émission est d'environ 1W [8].

Il est composé de 2 normes sans fil à haut de débit :

HiperLAN 1 : Déploiement sur des distances d'environ 50m par borne, sur une bande de fréquences entre 5,1 et 5,3 GHz, avec interfaces conventionnelles pouvant être utilisées par les LAN sans fil.

Par contre HiperLAN 2, elle est sur une distance par borne étendue à 200m, sur une bande de fréquences comprises entre 5,4 et 5,7 GHz. Communication possible sur différents débits (6, 9, 12, 18, 27, 36 et 54Mb/s) [8]. HiperLAN 2 peut aussi véhiculer la vidéo, paquets IP, voix numérisée des téléphones cellulaires.

### 4.3 RESEAUX METROPOLITAINS SANS FIL (WMAN)

Le réseau métropolitain sans fil (WMAN pour *Wireless Metropolitan Area Network*) est connu sous le nom de Boucle Locale Radio (BLR). Les WMAN sont basés sur la norme IEEE 802.16. La boucle locale radio offre un débit utile de 1 à 10 Mbit/s pour une portée de 4 à 10 kilomètres, ce qui destine principalement cette technologie aux opérateurs de télécommunications [7]-[2].

## 4.4 RESEAUX ETENDUS SANS FIL (WWAN)

Le réseau étendu sans fil (WWAN pour Wireless Wide Area Network) est également connu sous le nom de réseau cellulaire mobile. Il s'agit des réseaux sans fil les plus répandus puisque tous les téléphones mobiles sont connectés à un réseau étendu sans fil.

Les principales technologies sont les suivantes [2]:

- GSM (*Global System for Mobile Communication* ou en français *Groupe Spécial Mobile*).
- GPRS (*General Packet Radio Service*).
- UMTS (*Universal Mobile Télécommunication System*).

## 4.5 LES TECHNOLOGIES BAN (WIRELESS BODY AREA NETWORK)

La technologie BAN c'est un sous-système du système WBAN de surveillance médicale [9] encore une technologie émergente, et en tant que telle, elle a une très courte histoire. La technologie BAN apparaît comme le sous-produit naturel de la technologie de réseau de capteurs et de l'ingénierie biomédicale existante. Certains des cas d'utilisation les plus courants de la technologie BAN sont [10]:

- Réseaux de capteurs corporels
- Surveillance du sport et de la condition physique
- Audio sans fil
- Intégration d'appareils mobiles
- Appareils vidéo personnels

## 4.6 WiMAX (IEEE802.16)

Ce standard permet un débit théorique de 70 Mbits/s sur un rayon de 50 km maximum.

La norme WiMax Mobile devrait permettre des services comme la communication en VoIP (Téléphonie sur Réseau IP) sur téléphone portable ou encore l'accès à des services mobiles en hauts débits. Son équivalent en Europe est le HiperMAN. Ainsi, le

## L'ÉVOLUTION DES STANDARDS DE TELECOMMUNICATION

développement rapide des communications sans fil et l'émergence des nouveaux standards sollicite la convergence vers la quatrième génération de communications mobiles, initialement prévue pour les années 2010, semblerait présenter ses toutes premières réalisations commerciales légèrement plus tôt. Cette avance par rapport aux prévisions est notamment due au fait que la quatrième génération ne sera pas l'issue d'une révolution dans les communications (comme l'ont été les secondes et troisièmes générations), mais plutôt la convergence de différents standards, applications et produits.

En effet, il semble pertinent de considérer la 4G comme la convergence des standards et des technologies couverts par la 3G et les réseaux locaux sans fil (WLAN). Le but de la "4G" est d'améliorer les performances de la troisième génération, sans changer fondamentalement le contenu ni les applications prévues au départ pour la 3G. C'est en fait la troisième génération qui n'a priori pas rempli les attentes. Par conséquent, au lieu d'un standard universel, de nombreux standards sont nés, incompatibles entre eux pour la plupart, et ce même sur un même continent.

En conclusion, l'émergence des réseaux sans fil et la téléphonie mobile ont causé une surcharge des bandes de fréquences allouées (surtout les bandes autour de 2.4 GHz et 5 GHz) à cela s'ajoute les perturbations et les interférences causées par des appareils industriels ce qui nécessite des systèmes de plus en plus robustes ayant des architectures pouvant recevoir la majorité de ces standards [11].

Plusieurs variantes de standard ont été proposées, modifiées et ratifiées comme le résume le tableau [12] :

<b>Standard</b>	<b>Description</b>	<b>Publié</b>	<b>Statut</b>
IEEE std 802.16-2001	Définit des réseaux métropolitains sans fil utilisant des fréquences supérieures à 10 GHz (jusqu'à 66 GHz)	8 avril 2002	Obsolètes
IEEE std 802.16c-2002	Définit les options possibles pour les réseaux utilisant les fréquences entre 10 et 66 GHz.	15 janvier 2003	Obsolètes
IEEE std 802.16a-2003	Amendement au standard 802.16 pour les fréquences entre 2 et 11 GHz.	1er avril 2003	Obsolètes

## L'ÉVOLUTION DES STANDARDS DE TELECOMMUNICATION

IEEE std 802.16-2004 (également désigné 802.16d)	Révision des standards de base 802.16, 802.16a et 802.16c.	1er octobre 2004	Obsolète/Actif
IEEE 802.16e (également désigné IEEE std 802.16e2005)	Apport de la solution mobile du standard, jusqu'à 60 km/h.	7 décembre 2005	Actifs
IEEE 802.16f	Spécifie la MIB (Management Information Base), pour les couches MAC et PHY	22 septembre 2005	Actifs

**Tableau I.1** : Les différentes normes du WiMax.

### I.5 ÉVOLUTION DES SYSTEMES DE TELEPHONIE MOBILE

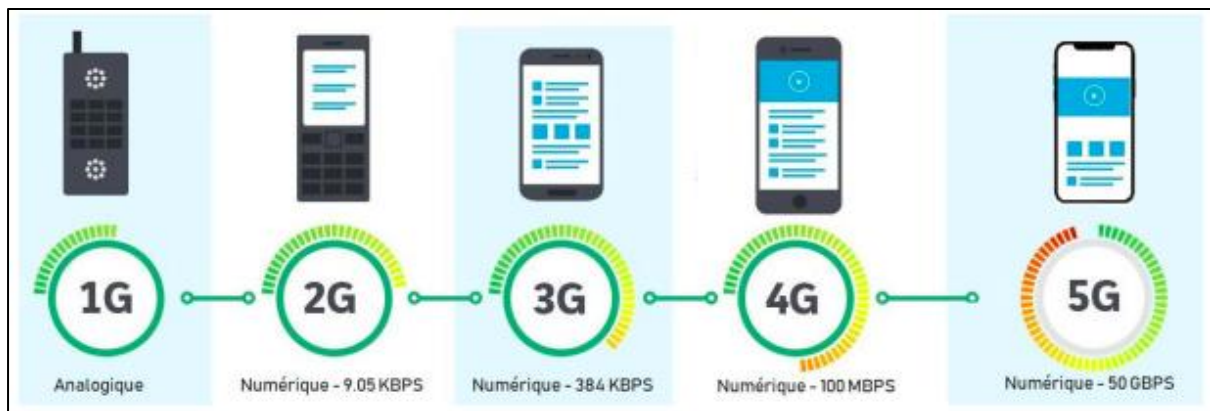
Les systèmes mobiles comptent déjà un certain nombre d'évolutions. Dans cette section, nous présentons ses différentes générations de réseaux mobiles résumées dans le tableau suivant :

Génération	Acronyme	Description	Version des normes 3GPP	Débit Théorique (download)
1G	RC2000 et NMT	Analogique		
2G	GSM	Échanges de type voix uniquement	Phase 1, Phase 2 et 96.	9,05 Kbits/s
2.5G	GPRS	Échange de données seulement	97	171,2 Kbits/s
2.75G	EDGE	Évolution du GPRS	98	384 Kbits/s
3G	UMTS	Voix et données	99	144 Kbits/s rurale, 384 Kbits/s urbaine, 2 Mbits/s point fixe
3.5G ou 3G+	HSPA	Évolution de l'UMTS	5 et 6	14,4 Mbits/s
3.75G ou 3G++ ou H+	HSPA+	Évolution de l'UMTS	7	21 Mbits/s
3.75G ou H+ Dual Carrier	DC-HSPA+	Évolution de l'UMTS	8	42 Mbits/s
4G (3.9G)	LTE	Données	8 et 9	300 Mbits/s, 150 Mbits/s, 100 Mbits/s

## L'ÉVOLUTION DES STANDARDS DE TELECOMMUNICATION

4.5G	LTE Advanced	Évolution de la LTE	10,11 et 12	1 Gbit/s à l'arrêt, 100 Mbits/s en mouvement
4.9G	LTE Advanced Pro	Évolution de la LTE	13	3 Gbits/s
5G	NR	Nouvelle technologie d'accès radio	14,15 et 16	50 Gbits/s, 25 Gbits/s (labo : 25,2 Gbits/s, 10 Gbits/s, 3,6 Gbits/s)

**Tableau I.2** : Différentes technologies de téléphonie mobile



**Figure I.4** : Évolution des réseaux mobiles.

### 5.1 PREMIERE GENERATION (1G)

La première génération de systèmes cellulaires 1G est la technologie de téléphonie mobile de première génération. Les téléphones portables étaient des téléphones analogiques et étaient introduits en 1980. En 1979, le premier système cellulaire dans le monde est devenu opérationnel par « Nippon Téléphone and Telegraph (NTT) » à Tokyo, Japon. En Europe, les deux systèmes analogiques les plus populaires étaient « Nordic Mobile Téléphone (NMT) » et « TACS », d'autres systèmes analogiques ont également été introduits dans les années 1980 à travers l'Europe.

Tous les systèmes offraient la fonctionnalité de handover et d'itinérance, mais les réseaux cellulaires n'étaient pas en mesure d'interagir entre les pays. C'était le principal inconvénient de la téléphonie mobile de première génération [13].

## 5.2 LE GSM (2G)

### 5.2.1 STANDARD GSM (GLOBAL SYSTEM FOR MOBILE COMMUNICATIONS)

Dans les années 1990, la deuxième génération de réseaux mobiles (2G) est apparue avec le GSM [14].

La technologie GSM donne accès au service du type voix en mobilité, mais aussi aux messages textes courts plus connus sous le nom de SMS (*Short Message Service*).

Le GSM est une norme mondiale qui s'appuie sur des transmissions numériques permettant de sécuriser les communications avec du cryptage. Comparé à la 1G, le système GSM autorise l'itinérance internationale et apporte une meilleure qualité de communications et une plus grande capacité tout en réduisant le coût d'accès aux services pour l'utilisateur.

Les progrès technologiques réalisés dans la conception de circuits hyperfréquences et de dispositifs de traitement numérique du signal ont permis une réduction conséquente de la taille des terminaux, offrant ainsi une réelle mobilité. La 2G a connu ainsi un énorme succès et a permis de susciter le besoin de téléphoner en tout lieu avec la possibilité d'émettre des minimessages. Devant ce succès, des bandes de fréquences supplémentaires ont été proposées aux opérateurs pour acheminer toutes les communications, et de nouveaux services sont aussi apparus, notamment les MMS (*MultiMedia Messaging Service*) et les applications M2M (*Machine To Machine*) comme par exemple la commande de produits à approvisionner dans une machine de distribution (machine à café, etc.) [14].

Cependant, le débit maximal de 9.6 kbps proposé par le GSM était insuffisant pour permettre un accès fluide et rapide aux services de données. De nouvelles techniques de modulations et de codages sont ainsi apparues telles que GPRS (*General Packet Radio Service*) et EDGE (*Enhanced Data rates for GSM Evolution*) dans le but d'accroître les débits offerts. Toutefois, à la fin des années 1990, les débits fournis par les réseaux 2G étaient encore trop limités pour que l'accès aux services de données soit suffisamment fluide. Cette limitation fut à l'origine de la troisième génération de réseaux mobiles [14].

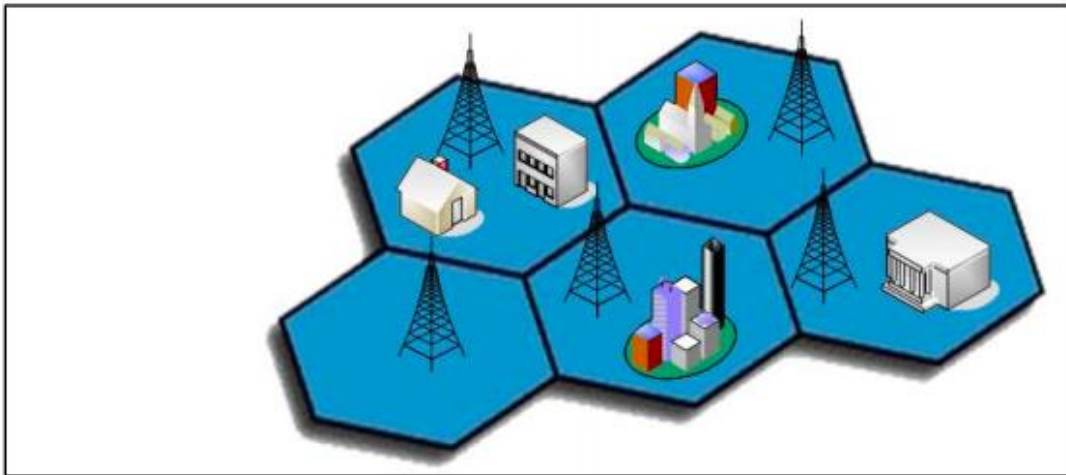
### 5.2.2 NOTION DE RESEAU

Les réseaux de téléphonie mobile sont basés sur la notion de cellules, c'est-à-dire des zones circulaires se chevauchant afin de couvrir une zone géographique [15].



## L'ÉVOLUTION DES STANDARDS DE TELECOMMUNICATION

Les réseaux de communication cellulaires donnent la possibilité d'acheminer automatiquement une communication jusqu'au destinataire quelle que soit la position où il se trouve dans la limite de couverture réseau, que le l'initiateur de communication appartient au réseau commuté ou au système cellulaire. La structure typique d'un réseau cellulaire est illustrée dans (la figure I.5). Ils assurent le maintien de cette communication au cours du déplacement. Deux générations de ces systèmes coexistent, la première dite analogique tend à disparaître au profit de la seconde qui repose, elle, sur une technologie numérique [16]



**Figure I.5 :** La structure typique d'un réseau cellulaire.

Les réseaux cellulaires reposent sur l'utilisation d'un émetteur-récepteur central au niveau de chaque cellule, appelée « station de base » (en anglais *Base Transceiver Station*, notée BTS). Plus le rayon d'une cellule est petit, plus la bande passante disponible est élevée. Ainsi, dans les zones urbaines fortement peuplées, des cellules d'une taille pouvant à voisiner quelques centaines mètres seront présentes, tandis que de vastes cellules d'une trentaine de kilomètres permettront de couvrir les zones rurales.

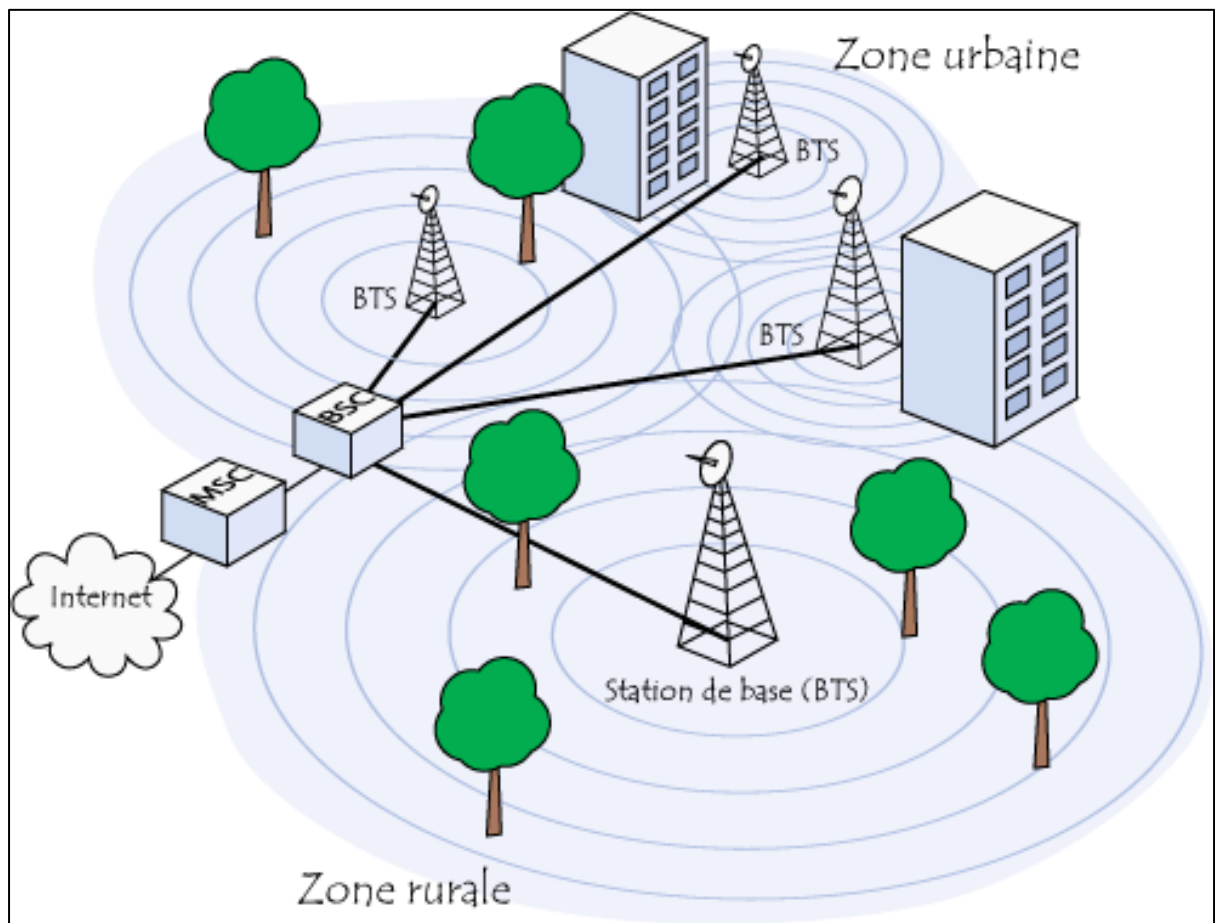
Dans un réseau cellulaire, chaque cellule est entourée de 6 cellules voisines (c'est la raison pour laquelle on représente généralement une cellule par un hexagone). Afin d'éviter les interférences, des cellules adjacentes ne peuvent utiliser la même fréquence. En pratique, deux cellules possédant la même gamme de fréquences doivent être éloignées d'une distance représentant deux à trois fois le diamètre de la cellule [17].

### 5.2.3 ARCHITECTURE DU RESEAU GSM

Dans un réseau GSM, le terminal de l'utilisateur est appelé station mobile. Une station mobile est composée d'une carte SIM (*Subscriber Identity Module*), permettant d'identifier

## L'ÉVOLUTION DES STANDARDS DE TELECOMMUNICATION

l'utilisateur de façon unique et d'un terminal mobile, c'est-à-dire l'appareil de l'utilisateur (la plupart du temps un téléphone portable) [18].



**Figure I.6 :** Architecture du réseau GSM dans différentes zones.

Les terminaux (appareils) sont identifiés par un numéro d'identification unique de 15 chiffres appelé IMEI (*International Mobile Equipment Identity*). Chaque carte SIM possède également un numéro d'identification unique (et secret) appelé IMSI (*International Mobile Subscriber Identity*). Ce code peut être protégé à l'aide d'une clé de 4 chiffres appelés codes PIN [1.18].

La carte SIM permet ainsi d'identifier chaque utilisateur, indépendamment du terminal utilisé lors de la communication avec une station de base. La communication entre une station mobile et la station de base se fait par l'intermédiaire d'un lien radio, généralement appelé interface air [18].

L'ensemble des stations de base d'un réseau cellulaire est relié à un contrôleur de stations (en anglais *Base Station Controller*, noté BSC), chargé de gérer la répartition des

## L'ÉVOLUTION DES STANDARDS DE TELECOMMUNICATION

ressources. L'ensemble constitué par le contrôleur de station et les stations de base connectées constituent le sous-système radio (en anglais BSS pour Base Station Subsystem). [18]

Enfin, les contrôleurs de stations sont eux-mêmes reliés physiquement au centre de commutation du service mobile (en anglais MSC pour *Mobile Switching Center*), géré par l'opérateur téléphonique, qui les relie au réseau téléphonique public et à internet. Le MSC appartient à un ensemble appelé sous-système réseau (en anglais NSS pour *Network Station Subsystem*), chargé de gérer les identités des utilisateurs, leur localisation et l'établissement de la communication avec les autres abonnés.



**Figure I.7** : antenne BTS du GSM.

Le MSC est généralement relié à des bases de données assurant des fonctions complémentaires [18] :

- ✚ Le registre des abonnés locaux (noté HLR pour *Home Location Register*) : il s'agit d'une base de données contenant des informations (position géographique, informations administratives, etc.) sur les abonnés inscrits dans la zone du commutateur (MSC).
- ✚ Le Registre des abonnés visiteurs (noté VLR pour *Visitor Location Register*) : il s'agit d'une base de données contenant des informations sur les autres utilisateurs que les abonnés locaux. Le VLR rapatrie les données sur un nouvel utilisateur à partir du HLR correspondant à sa zone d'abonnement. Les données sont conservées pendant

## L'ÉVOLUTION DES STANDARDS DE TELECOMMUNICATION

tout le temps de sa présence dans la zone et sont supprimées lorsqu'il la quitte ou après une longue période d'inactivité (terminal éteint).

- ✚ Le registre des terminaux (noté EIR pour *Equipment Identity Register*) : il s'agit d'une base de données répertoriant les terminaux mobiles.
- ✚ Le Centre d'authentification (noté AUC pour *Authentication Center*) : il s'agit d'un élément chargé de vérifier l'identité des utilisateurs.

Le réseau cellulaire ainsi formé est prévu pour supporter la mobilité grâce à la gestion du handover, c'est-à-dire le passage d'une cellule à une autre. [18].

Enfin, les réseaux GSM supportent également la notion d'itinérance (en anglais *roaming*), c'est-à-dire le passage du réseau d'un opérateur à un autre.

### 5.3 LE GPRS (2.5G)

#### 5.3.1 INTRODUCTION AU STANDARD (GPRS)

Le standard GPRS (General Packet Radio Service) est une évolution de la norme GSM, ce qui lui vaut parfois l'appellation GSM++ (ou GSM 2+). Étant donné qu'il s'agit d'une norme de téléphonie de seconde génération permettant de faire la transition vers la troisième génération (3G), on parle généralement de 2.5G pour classer le standard GPRS.

Le GPRS permet d'étendre l'architecture du standard GSM, afin d'autoriser le transfert de données par paquets, avec des débits théoriques maximums de l'ordre de 171,2 kbit/s (en pratique jusqu'à 114 kbit/s) [19].

Grâce au mode de transfert par paquets, les transmissions de données n'utilisent le réseau que lorsque c'est nécessaire.

Le standard GPRS permet donc de facturer l'utilisateur au volume échangé plutôt qu'à la durée de connexion, ce qui signifie notamment qu'il peut rester connecté sans surcoût.

Ainsi, le standard GPRS utilise l'architecture du réseau GSM pour le transport de la voix, et propose d'accéder à des réseaux de données (notamment internet) utilisant le protocole IP ou le protocole X.25 [20].

### 5. 3.2 ARCHITECTURE DU RESEAU (GPRS)

L'intégration du GPRS dans une architecture GSM nécessite l'adjonction de nouveaux nœuds réseau appelés GSN (GPRS support nodes) situés sur un réseau fédérateur (backbone) [21] :

- le SGSN (Serving GPRS Support Node, soit en français Noeud de support GPRS de service), routeur permettant de gérer les coordonnées des terminaux de la zone et de réaliser l'interface de transit des paquets avec la passerelle GGSN.
- le GGSN (Gateway GPRS Support Node, soit en français Noeud de support GPRS passerelle), passerelle s'interfaçant avec les autres réseaux de données (internet). Le GGSN est notamment chargé de fournir une adresse IP aux terminaux mobiles pendant toute la durée de la connexion.

### 5.4 INTRODUCTION AU STANDARD EDGE 2.75G

Le standard EDGE (*Enhanced Data Rates for GSM Evolution*) est une évolution de la norme GSM en modifiant le type de modulation. Tout comme la norme GPRS, le standard EDGE est utilisé comme transition vers la troisième génération de téléphonie mobile (3G) [22].

EDGE utilise une modulation différente de la modulation utilisée par GSM (EDGE utilise la modulation 8-PSK « *Phase Shift Keying* »), ce qui implique une modification des stations de base et des terminaux mobiles. Cette technologie permet ainsi de multiplier par un facteur de 3 le débit des données avec une couverture plus réduite. Les débits peuvent donc atteindre 384 kbit/s pour les stations fixes (piétons et véhicules lents) et 144 kbit/s pour les stations mobiles (véhicules rapides). En industrie, cette technologie permet une surveillance par transmission vidéo et image haute débit. Toutefois, elle n'est idéale que pour une surveillance temporaire à distance sur des périodes programmables par le biais d'un détecteur de présence ou contacteur de porte relié à une alarme [22].

### 5.5 LA TROISIEME GENERATION 3G

La troisième génération (3G) de systèmes cellulaires est une génération de systèmes mobiles labellisé IMT 2000 par l'UIT. Ce système permet des services de communications plus rapides notamment pour la voix, la télécopie, l'Internet de n'importe quel endroit et à tout moment. L'UIT IMT-2000 est la norme internationale de la 3G a ouvert la voie à de

## L'ÉVOLUTION DES STANDARDS DE TELECOMMUNICATION

nouvelles applications et services comme par exemple le divertissement multimédia, la localisation des services [1] ; La 3G de systèmes cellulaires utilise notamment les standards UMTS.

La technologie UMTS utilise des bandes de fréquences différentes des réseaux précédents : [1885-2025] MHz et [2110-2200] MHz avec des débits pouvant aller de 384Kbit/s à 2Mbit/s. Utilise un codage W-CDMA (*Wideband Code Division Multiple Access*). UMTS offre des débits variables et importants aux utilisateurs de façon à leur permettre de communiquer et de réaliser aisément des applications multimédias. Les nouveaux services devaient concerner surtout les applications vidéo telles que la transmission de vidéo, la vidéo conférence, Vidéo à la demande télévision, MMS vidéo [23].

### 5.6 LA CDMA 2000

La CDMA (*Code Division Multiple Access*) ou AMRC (Accès Multiple par Répartition en Code), selon la commission générale de terminologie et de néologie française est un système de codage des transmissions, utilisant la technique d'étalement de spectre. Il permet à plusieurs liaisons numériques d'utiliser simultanément la même fréquence porteuse [24].

Le principe est l'utilisation simultanée de plusieurs codes. Ce système est appliqué dans les réseaux de téléphonie mobile dans le segment d'accès radio, par plus de 275 opérateurs dans le monde surtout en Asie et en Amérique du Nord. Il est aussi utilisé dans les télécommunications spatiales, militaires essentiellement, et dans les systèmes de navigation par satellite comme le GPS.

Dans le domaine des services mobiles, la norme CDMA 2000 utilise CDMA. Celle-ci permet aux opérateurs de proposer à leurs abonnés notamment des services d'accès à Internet à haut débit via la norme EV-DO (*Evolution-Data Optimized*). À la fin de 2007, avec 3,1 milliards d'abonnés à l'échelle mondiale (contre seulement 431 millions d'abonnés utilisant une norme à base de CDMA), la norme concurrente GSM est dominante sur le marché des services de base 2G/2.5G [25].

### 5.7 LA 3.5G : HSDPA

HSDPA (*High Speed Down Link Packet Access*), parfois appelé 3.5G, 3G+, H, ou encore turbo 3G dans sa dénomination commerciale, est un protocole pour la téléphonie mobile.

## L'ÉVOLUTION DES STANDARDS DE TELECOMMUNICATION

Il offre des performances dix fois supérieures à la 3G, dont il est une évolution logicielle. Cette évolution permet d'approcher les performances des réseaux DSL (*Digital Subscriber Line*). Il permet de télécharger (débit descendant) théoriquement à des débits de 1,8 Mbit/s, 3,6 Mbit/s, 7,2 Mbit/s et 14,4 Mbit/s.

Il est basé sur la technologie de communication WCDMA (*Wideband-Code Division Multiple Access*) définie par la norme WCDMA 3GPP Rel. 99 (3rd *Génération Partner hip Project Release 99*). Il concerne la liaison descendante du réseau vers le terminal à haut débit en mode paquets [26].

### 5.8 LA 3,75G : HSUPA

HSUPA (*High Speed Up Link Pocket Access*) est une norme de haut-débit mobile de troisième génération dont les standards ont été définies et diffusées par le 3GPP dans la sixième édition du référentiel UMTS (Release 6 de l'UMTS).

HSUPA présenté comme un successeur de la technologie HSPDA, vient d'améliorer le débit sur la voie montante (Up Link) qui peut atteindre à ce niveau 5,8 Mbit/s alors que le débit descendant (Down Link) reste le même que celui de son prédécesseur (HSPDA) qui atteint 14 Mbit/s [27].

### 5.9 LA QUATRIEME GENERATION 4G (LTE)

LTE est la norme de communication mobile la plus récente qui est proposée par l'organisme 3GPP dans le contexte de la 4G [28].

Elle propose des débits élevés pour le trafic temps-réel, avec une large portée. Théoriquement, le LTE peut atteindre un débit de 50 Mb/s en lien montant et 100 Mb/s en lien descendant.

En réalité, l'ensemble de ce réseau s'appelle EPS (Evolved Packet System), et il est composé des deux parties :

- ✚ Le réseau évolué d'accès radio LTE.
- ✚ Le réseau cœur évolué appelé SAE (System Architecture Evolution).

Le seul inconvénient de cette nouvelle technologie est l'installation de ses nouveaux équipements qui sont différents de ceux des normes précédentes, et le développement des terminaux adaptés [28].



## L'ÉVOLUTION DES STANDARDS DE TELECOMMUNICATION

La technologie 4G LTE permet d'aboutir à un réseau mobile de très haut débit, qui marque une grande différence avec la 3G. Les objectifs à atteindre pour la LTE consistent en une amélioration de l'efficacité spectrale qui permettra le transfert des données à très haut débit [28].

### 5.10 LA CINQUIÈME GÉNÉRATION 5G

La 5G est la cinquième génération de standards pour la téléphonie mobile, faisant suite à la 4G les réseaux de nouvelle génération permettront d'augmenter les débits. Avec la 5G l'échelle devient le multi-gigabit par seconde, contre des centaines de mégabits pour la 4G. Le temps de latence sera aussi réduit (moins d'une milliseconde), pour une meilleure réactivité.

La 5G a le potentiel de transformer de nombreux aspects de notre vie quotidienne, à la maison, en déplacement et au travail,...etc. Des divers secteurs sont susceptibles de tirer parti des applications de plus en plus sophistiquées départage d'informations reposant sur la 5G comme les villes intelligentes (Smart Cities), la santé, la finance, les voitures connectées (Connected Cars),...etc. [29].

En se concentrant sur l'internet des objets la 5G visée donc à :

- ✚ Assurer un accès internet haut débit depuis un smart phone ou tablette.
- ✚ Atteindre les meilleurs débits (1 Gb par seconde).
- ✚ Avoir de plus gros forfaits data : le volume de données devra être 1000 fois plus élevé.
- ✚ Obtenir un délai de transmission inférieur à 10 ms.
- ✚ Avoir un temps de « latence » plus court qui donne l'impression que le réseau est très Réactif.
- ✚ Avoir moins d'antennes : le nombre de terminaux pouvant être connectés par antenne
- ✚ Devra être 100 fois supérieure, mais le nombre d'antennes dépend surtout des fréquences utilisées.



### II.6 CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons présenté un état de l'art sur l'évolution des standards de télécommunication, après l'introduction. Nous avons parlé sur l'historique, évolution et application des réseaux sans fil, puis nous avons traité les problèmes de transmission radios dans les réseaux sans fil.

Ensuite nous avons donné une définition sur la technologie sans fil tels quelles technologies : WPAN, WLAN, WMAN, WWAN, WBAN et WiMax.

Après nous avons présenté l'évolution du système mobile, aussi leurs gammes de fréquences citant par exemple les différentes générations du réseau téléphonique (GSM, UMTS, 4G...), et finalement la 5eme génération.

## **CHAPITRE II : CARACTERISTIQUES DES ANTENNES**

## III.1 INTRODUCTION

L'explosion du marché de l'électronique grand public au cours de la dernière décennie a mis entre les mains des utilisateurs une multitude d'appareils aux fonctionnalités diverses, intéressantes, utiles, voire aujourd'hui totalement indispensables. Les progrès réalisés par la recherche et l'industrie ont permis de miniaturiser et perfectionner ces appareils. Ils possèdent généralement des fonctionnalités sans fil et s'interconnectent grâce à des standards ou des technologies propriétaires de télécommunications.

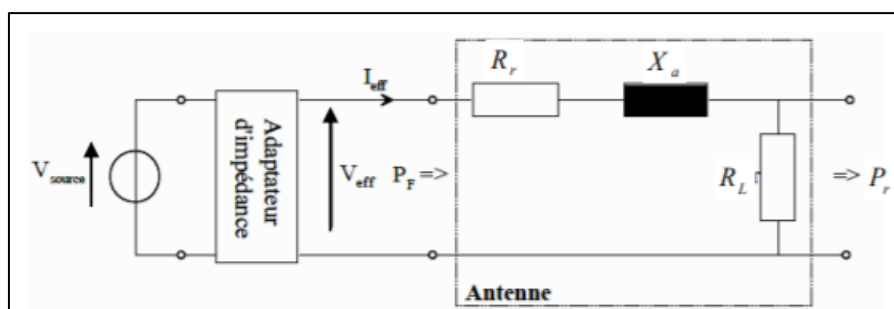
Ces millions d'objets communicants en fonctionnement dans le monde possèdent tous un point commun : une antenne. Élément indispensable pour établir des communications sans fil, l'antenne est une structure physique rayonnante relativement encombrante à l'heure de la nanoélectronique. Bien que de nombreuses avancées aient permis de réduire progressivement leurs dimensions, elles restent toujours un élément séparé connecté au reste du système électronique.

Sans entrer dans les détails de la physique et des propriétés électromagnétiques, nous établirons tout d'abord un panorama des principaux paramètres qui permettent de caractériser une antenne. Ils seront utilisés tout au long de nos travaux pour comparer les performances obtenues. Nous ferons ensuite un état de l'art du monde des antennes, Enfin, nous listerons les différentes méthodes numériques utilisées dans les logiciels de simulation.

## II.2 ANTENNES ET MODELES DE PROPAGATION

### 2.1 IMPEDANCE D'ENTREE

L'impédance d'entrée d'une antenne caractérise la charge apportée par cette antenne au circuit d'excitation (figure II.1).



**Figure II.1** : Circuit équivalent d'une antenne en émission.

Au sens de la théorie des circuits, l'antenne est représentée par un dipôle, dont l'impédance d'entrée serait :

$$Z_a = R_a + jX_a = R_L + R_r + jX_a \dots\dots\dots (1)$$

**R<sub>a</sub>** et **X<sub>a</sub>** : représentent respectivement la résistance et la réactance de l'antenne à son entrée.

**R<sub>r</sub>** : est la résistance de rayonnement. C'est une caractéristique dépendante du champ lointain qui permet de représenter la puissance active rayonnée par l'antenne.

**R<sub>l</sub>** : est la résistance de pertes de l'antenne (la puissance dissipée dans l'antenne). Elle permet de représenter les pertes électriques et diélectriques. [30]

L'expression précédente permet de définir le rendement **E<sub>cd</sub>** (dû aux pertes électrique et diélectrique) sous la forme d'un rapport de résistances :

$$E_{cd} = \frac{R_r}{R_r + R_l} \dots\dots\dots (2)$$

## 2.2 DIRECTIVITE ET GAIN

La directivité d'une antenne dans une direction donnée est par définition le rapport de son intensité de rayonnement dans cette direction sur l'intensité de rayonnement d'une antenne de référence. L'antenne de référence est généralement la source isotrope.

La directivité maximale est le paramètre le plus souvent utilisé. Elle caractérise la directivité dans la direction du rayonnement maximum.

Le gain est une autre mesure utile décrivant la performance d'une antenne. Bien qu'il soit étroitement lié à la directivité, c'est une mesure qui tient en compte l'efficacité de l'antenne aussi bien que ses capacités directionnelles.

Le gain d'une antenne est le rapport de l'intensité, dans une direction donnée, à l'intensité de rayonnement qui serait obtenue si la puissance reçue par l'antenne étaient rayonnée isotropiquement. L'intensité de rayonnement correspondant à cette puissance est égale à la puissance reçue par l'antenne (la puissance d'entrée) divisée par  $4\pi$  [32].

Sous forme d'équation ceci peut être exprimé par :

$$\mathbf{G} = 4\pi \frac{\text{intensité de rayonnement}}{\text{puissance totale d'entrée (recue)}} = 4\pi \frac{U(\theta, \phi)}{P_{in}} \dots\dots\dots (3)$$

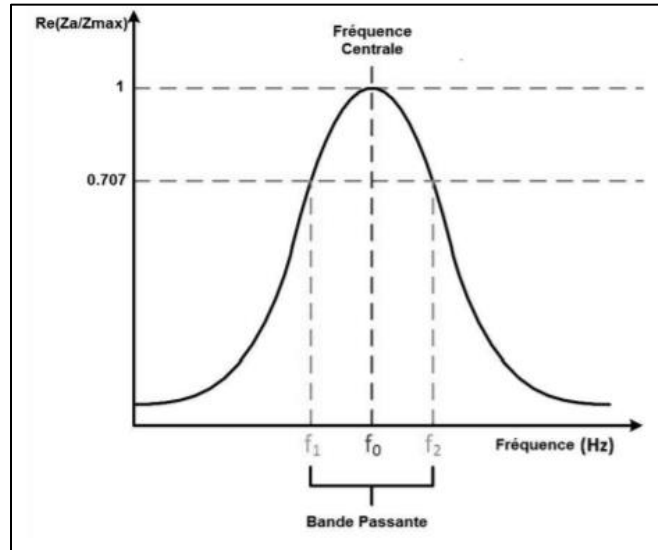
### 2.3 FREQUENCE DE RESONNANCE ET BANDE PASSANTE

La fréquence de résonance de l'antenne dépend d'abord de ses dimensions mais aussi des éléments qui lui sont ajoutés. Par rapport à la fréquence de résonance centrale de l'antenne on peut tolérer un certain affaiblissement (généralement 3 décibels) qui déterminent la fréquence minimum et la fréquence maximum d'utilisation, la différence entre ces deux fréquences est la bande passante.

Il est fréquent qu'une antenne soit utilisée en réception largement en dehors de sa bande passante, c'est le cas des antennes d'autoradio dont la fréquence de résonance se situe souvent à plus de 200 MHz et que l'on utilise pour l'écoute de la bande de radiodiffusion "FM" vers 100 MHz [32].

La bande passante d'une antenne est la bande de fréquences pour laquelle les performances radioélectriques de cette antenne restent conformes à une norme imposée. Par exemple, l'impédance d'entrée dont la considération est fondamentale pour les problèmes d'adaptation (transfert d'énergie). La bande passante est alors celle pour laquelle la partie réelle de l'impédance d'entrée est supérieure ou égale à 0.707 fois sa valeur maximale (Figure II.2). Il est souvent plus commode de considérer la représentation de l'impédance d'entrée normalisée en abaque de Smith et de définir la bande passante comme étant la bande de fréquences pour laquelle cette représentation reste confinée dans un cercle de TOS (taux d'ondes stationnaires) égale à une certaine valeur imposée [32].

## CARACTERISTIQUES DES ANTENNES



**Figure II.2 :** Bande passante d’une antenne.

### 2.4 COEFFICIENT DE REFLEXION

Le coefficient de réflexion, noté ( $\Gamma$ ), exprime le rapport des amplitudes complexes B par rapport à A : c’est un nombre complexe qui exprime donc l’effet de réflexion, en module (intensité de la réflexion, nulle à totale) et en phase (déphasage de la tension réfléchiée par rapport à la tension incidente, au point de réflexion) [30].

On note:

$$\Gamma = \rho e^{j\phi} = \frac{B}{A} \dots\dots\dots (4)$$

D’où :  $Z_t = R_c \frac{1+\Gamma}{1-\Gamma}$

Équivalent à :  $\Gamma = \frac{Z_t - R_c}{Z_t + R_c}$

### 2.5 LE RAPPORT D'ONDE STATIONNAIRE

Le rapport d'ondes stationnaires (ROS) ou *standing wave ratio* (SWR) en anglais, exprime la qualité de l'adaptation d'antenne, à une ligne de transmission, coaxiale ou bifilaire.

## CARACTERISTIQUES DES ANTENNES

Dans une ligne de transmission coexistent une onde incidente, d'amplitude  $V_i$ , et une onde réfléchie, d'amplitude  $V_r$ .

La superposition de ces deux ondes va produire une onde résultante dont l'amplitude va varier le long de la ligne.

On observera des maxima aux endroits où l'onde incidente et l'onde réfléchie produisent des interférences constructives, on a donc :

$$V_{max} = V_i + V_r$$

Réciproquement, on observera des minima aux endroits où les deux ondes produisent des interférences destructives, on a donc :

$$V_{min} = V_i - V_r$$

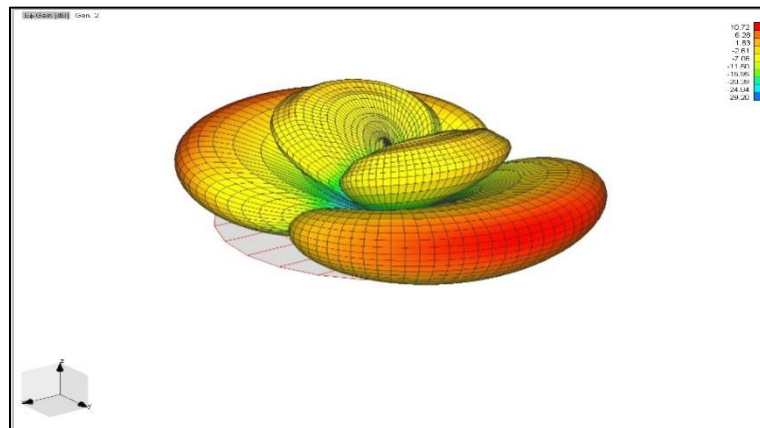
Le ROS est défini comme le rapport des extrema [33] :

$$ROS = \frac{V_{max}}{V_{min}} = \frac{V_i + V_r}{V_i - V_r} \dots\dots\dots (5)$$

### 2.6 DIAGRAMME DE RAYONNEMENT

Le diagramme de rayonnement d'une antenne montre les variations du champ ou de la densité de puissance dans l'espace du rayonnement de l'antenne à une distance fixe  $r$ . Le diagramme de rayonnement peut aussi, représenter la variation spatiale de l'intensité de rayonnement.

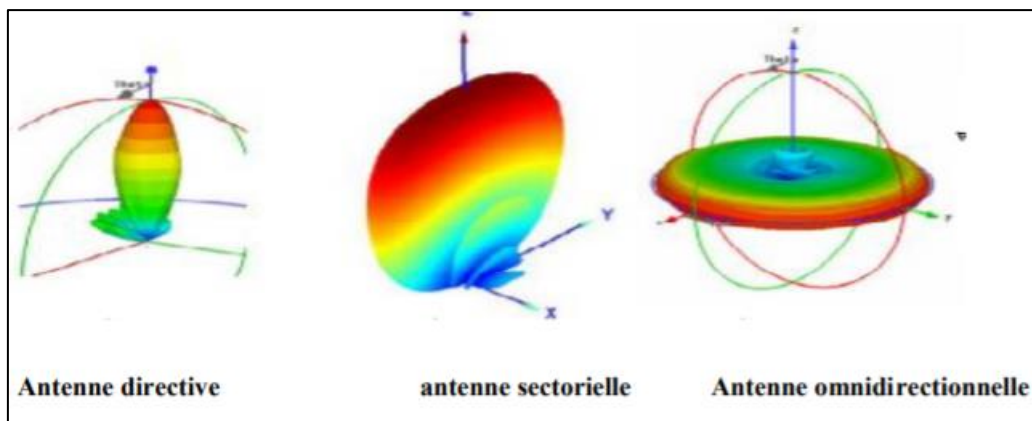
Le diagramme de rayonnement d'une antenne permet de visualiser les lobes d'émission dans les trois dimensions, dans le plan horizontal ou dans le plan vertical incluant le lobe le plus important. La proximité et la conductibilité du sol où des masses conductrices environnant l'antenne peuvent avoir une influence importante sur le diagramme de rayonnement. Les mesures sur les antennes sont effectuées en espace libre [33].



**Figure II.3 :** Diagramme de rayonnement en 3D

## 2.6.1 ANTENNE DIRECTIVE

On dit qu'une antenne est directive quand elle concentre l'énergie qu'elle rayonne dans une direction de l'espace. Par analogie avec la lumière, on peut comparer une antenne directive à un projecteur qui concentre la lumière en un faisceau étroit alors qu'un lustre a pour mission d'éclairer la totalité d'une pièce. [35]



**Figure II.4 :** Répartitions possibles de l'énergie rayonnée dans l'espace par les antennes.

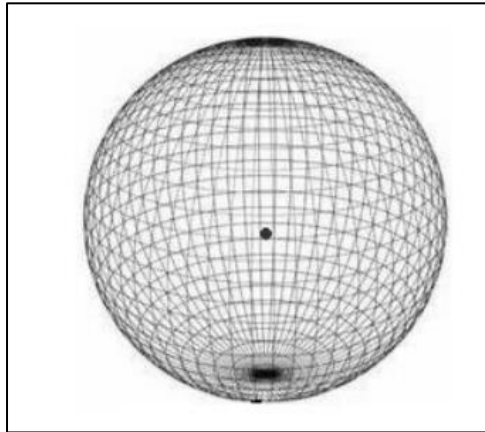
## 2.6.2 ANTENNE SECTORIELLE

Les antennes sectorielles peuvent couvrir une zone donnée, plus précisément, elles peuvent couvrir des secteurs angulaires de  $45^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $90^\circ$  ou  $120^\circ$  Dans le plan horizontal [36].



## 2.6.3 L'ANTENNE OMNIDIRECTIONNELLE

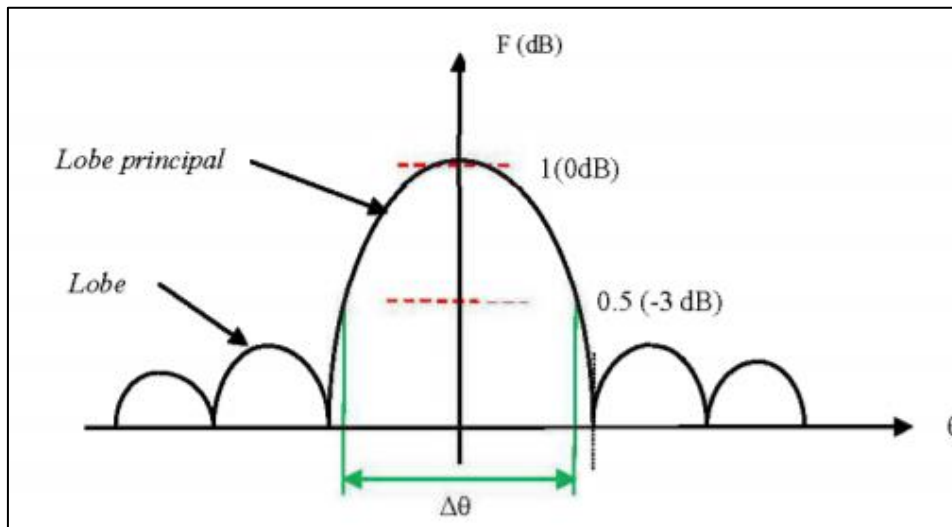
L'antenne isotrope qui rayonne d'une façon équivalente (omnidirectionnelle) dans toutes les directions de l'espace est une antenne hypothétique qui sert comme antenne de référence pour l'étude d'autres types d'antennes. Son diagramme de rayonnement se présente sous forme d'une sphère [33].



**Figure II.5 :** Antennes isotrope

## 2.7 L'ANGLE D'OUVERTURE

L'angle d'ouverture est l'angle que font entre elles les deux directions du lobe principal selon lesquelles la puissance rayonnée est égale à la moitié de la puissance rayonnée dans la direction du rayonnement maximal. La figure suivante présente un exemple de présentation diagramme de rayonnement en coordonnées cartésiennes [35].



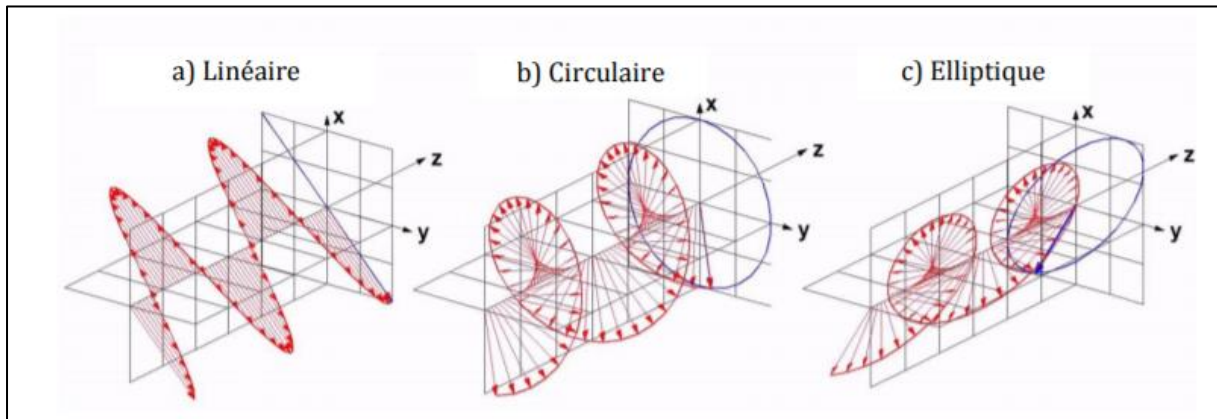
**Figure II.6 :** Diagramme de rayonnement en coordonnées cartésiennes.

## 2.8 POLARISATION

### 2.8.1 DEFINITION

La polarisation d'une antenne est la propriété décrivant la variation temporelle de la direction et du module du champ électrique rayonné par cette antenne. Elle est caractérisée par la courbe décrite dans le temps par l'extrémité du vecteur champ électrique et observé à partir de la direction de propagation

La polarisation peut être linéaire, circulaire ou elliptique .Dans le cas général, le champ électrique décrit une ellipse et la polarisation est alors dite elliptique [36].



**Figure II.7** : Les différents types de polarisation.

### 2.9 DESEQUILIBRE DE POLARISATION

Afin de transférer la puissance maximal entre une antenne de transmission et une antenne de réception, les deux antennes doivent avoir la même orientation spatiale, le même sens de polarisation et le même rapport axial.

Lorsque les antennes ne sont pas alignées ou n'ont pas la même polarisation, il y aura une réduction de transfert de puissance entre elles. Cette réduction de transfert de puissance réduira l'efficacité globale du système.

Lorsque les antennes de transmission et de réception sont toutes deux linéairement polarisées, une déviation de l'alignement physique de l'antenne entraînera une perte par déséquilibre de polarisation, ce qui peut être calculé en utilisant la formule suivante :

$$\text{Perte (dB)} = 20 \log (\cos \theta) \dots\dots\dots (6)$$

Où  $\theta$  est la différence dans l'angle d'alignement entre les deux antennes. Pour  $15^\circ$  la perte est approximativement de 0,3dB, pour  $30^\circ$  nous perdons 1,25dB, pour  $45^\circ$  nous perdons 3dB et pour  $90^\circ$  nous avons une perte infinie.

En résumé, plus le déséquilibre dans la polarisation entre une antenne de transmission et de réception est grand, plus la perte apparente est grande [33].

### 2.10 L'EFFICACITE

La détermination de l'efficacité constitue l'une des étapes fondamentales pour quantifier les performances d'une antenne. Ce paramètre indique la quantité de puissance qui sera réellement rayonnée par l'antenne par rapport à la puissance fournie à cette même antenne. Le rapport du gain de l'antenne sur la directivité pour une direction donnée donne également l'efficacité dans cette direction. Selon la définition choisie pour le gain, on peut inclure dans les pertes de l'antenne à la fois les pertes dans les parties métalliques et diélectriques mais également les pertes par désadaptation entre l'antenne et sa ligne d'alimentation. On comprend bien qu'ici, il est bien souvent indispensable de prendre en compte l'environnement réel de l'antenne (circuit d'adaptation, radôme ou la proximité d'un usager dans le cas d'antennes pour mobiles) car celui-ci aura un impact direct sur l'efficacité [36].

## II.3 LES DIFFERENTS TYPES D'ANTENNES

Afin de comprendre comment s'effectue cette transformation entre la puissance guidée et la puissance rayonnée, nous allons présenter un certain nombre d'antennes. Il n'est pas question dans ce paragraphe de présenter tous les types d'antennes, mais d'en introduire certains des plus utilisés.

En conclusion, nous aboutirons à un classement des antennes selon le type de la source rayonnante qui apparaîtra soit comme un courant électrique, soit comme une surface caractérisée par un champ électrique

### 3.1 L'ANTENNE FILAIRE

C'est l'un des éléments rayonnants les plus vieux, l'un des plus connus, l'un des plus simples et l'un des meilleurs marchés. C'est une antenne très utilisée car elle est très simple à

fabriquer et elle permet d'assurer la couverture de zones très larges. L'antenne la plus connue de ce type est le dipôle 1/2 onde (ou en  $\lambda/2$ ). C'est une ligne de transmission terminée par un circuit ouvert (CO) dont la longueur est égale au quart de la longueur. Lorsque cette ligne est dépliée, elle mesure alors une demi-longueur d'onde. Elle se compose donc de 2 brins métalliques, d'égale longueur, qui sont reliés à une pièce centrale appelée "balun" [37].

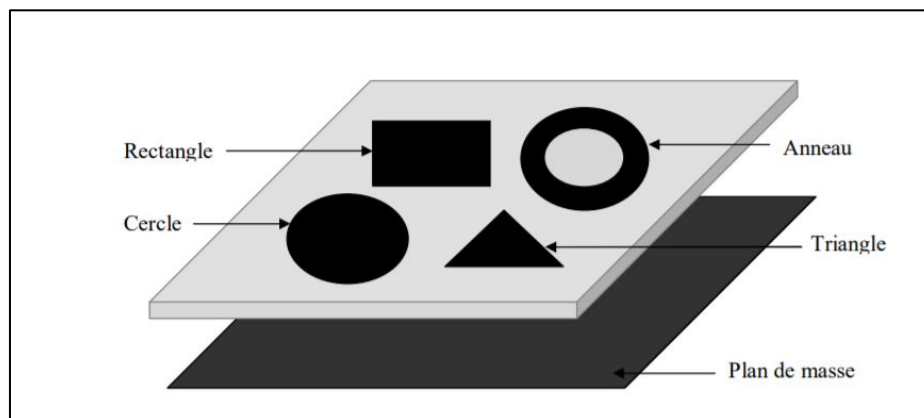
### 3.2 DESCRIPTION DES ANTENNES MICROBANDES

Les antennes microbandes sont devenues très populaires dans diverses applications civiles ou militaires. Les domaines d'utilisation privilégiés de ces antennes sont les télécommunications spatiales, le téléguidage des missiles, ainsi que dans le domaine des applications biomédicales. Les systèmes multi-émetteurs et multi-récepteurs (MIMO) et les systèmes RFID (Radio Frequency Identification) .Ces antennes sont également utiles dans les applications WLAN, UWB, LTE, les systèmes de positionnement global (GPS) et les systèmes de communication mobile et sans fil [38].

#### 3.2.1 ELEMENT RAYONNANT

En pratique, il existe plusieurs formes géométriques du patch rayonnant : rectangulaire, carré circulaire, annulaire et triangulaire figure (II.7). Cependant, les formes rectangulaires et circulaires sont les plus utilisées car elles sont faciles à analyser. En outre la forme rectangulaire permet une compréhension aisée des mécanismes de rayonnement des antennes microbandes.

Toutefois, des géométries plus élaborées sont employées pour répondre à des contraintes spécifiques sur l'antenne (en particulier pour générer de la polarisation circulaire) [38].



**Figure II.8 :** Structure d'une antenne patch.

### 3.2.2 LES SUBSTRATS

Les substrats exploités dans la conception des antennes imprimées sont nombreux. Leurs permittivités relatives varient de 1 à 12 ( $1 < \epsilon_r < 12$ ).

Parfois, il est préférable d'utiliser des substrats diélectriques de grandes épaisseurs et de basse permittivité dans le but d'avoir une grande efficacité, une large bande passante. Mais dans ce cas la perte par onde de surface augmente et l'antenne devient de plus en plus encombrante.

Au contraire, l'utilisation de minces substrats de permittivités élevées est conseillée pour les circuits micro-ondes parce qu'elle minimise les ondes de surface, les radiations non désirées et le volume de l'antenne. Toutefois, l'efficacité et la bande passante diminuent à cause de la grande perte dans le substrat [39].

### 3.2.3 LES AVANTAGES ET LES INCONVENIENTS DES ANTENNES MICRO RUBAN

Les antennes micro-rubans sont devenues de plus en plus populaires grâce à leurs applications qui couvrent un large domaine de fréquences : 100MHz à 100 GHz [40]. Une caractéristique qui les rend extrêmement demandées dans les téléphones portables.

Certains avantages sont les suivants [39] :

- 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.
- Peuvent être facilement intégrés dans les circuits micro- ondes intégrés.
- Capables de fonctionner en double ou triple fréquence.

Toutefois, les antennes micro-rubans ont également 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).

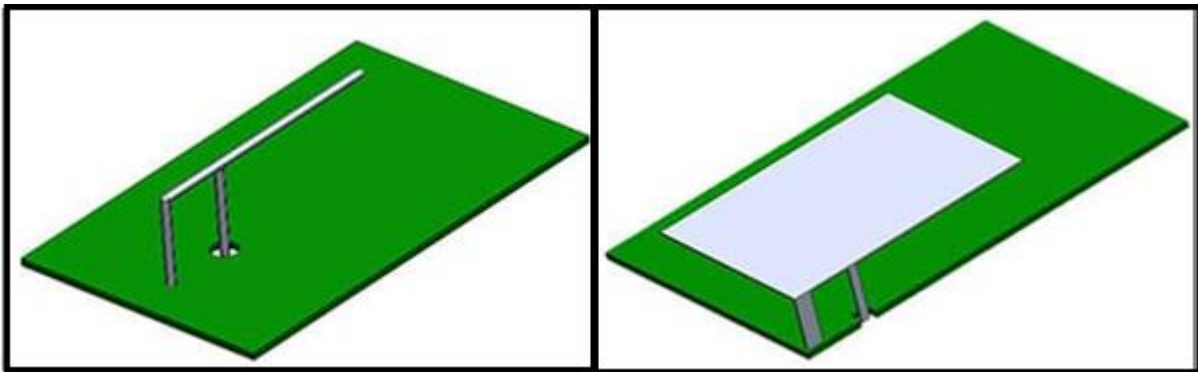
Ces limitations sont connues depuis plusieurs années et des progrès considérables ont été réalisés depuis pour améliorer les performances des antennes patch. Notamment, leur bande passante peut être augmentée jusqu'à 70 % en utilisant une configuration multicouche et leur gain peut s'accroître de 30 % en mettant en réseau plusieurs antennes [41].

### 3.3 LES ANTENNES PIFA : (PLANAR INVERTED F ANTENNAS)

Sur le marché de l'électronique actuel, la connectivité sans fil est devenue une fonctionnalité de plus en plus importante. Il en résulte une demande accrue de composants associés à la communication sans fil, notamment les antennes.

L'antenne PIFA est une antenne unipolaire spécialisée (avec une dérivation de court-circuit) basée sur l'antenne en F inversé (Figure II.9).

L'antenne PIFA (Figure II.10) est un type d'antenne en F inversé équipée d'une plaque supérieure au lieu d'un seul fil.



**Figure II.9** : Antenne en F inversé typique.

**Figure II.10** : Antenne PIFA typique.

Les antennes patch et les antennes PIFA sont similaires au sens où elles sont naturellement à bande étroite. Cependant, l'intégration de différentes techniques, comme des éléments parasites à la masse et des fentes de découpe dans la plaque, peut élargir la bande passante d'une antenne PIFA. De plus, l'utilisation de ces techniques permet de modifier la taille de la plaque supérieure, ce qui permet de créer des antennes plus petites et de réduire l'espace requis sur la carte.

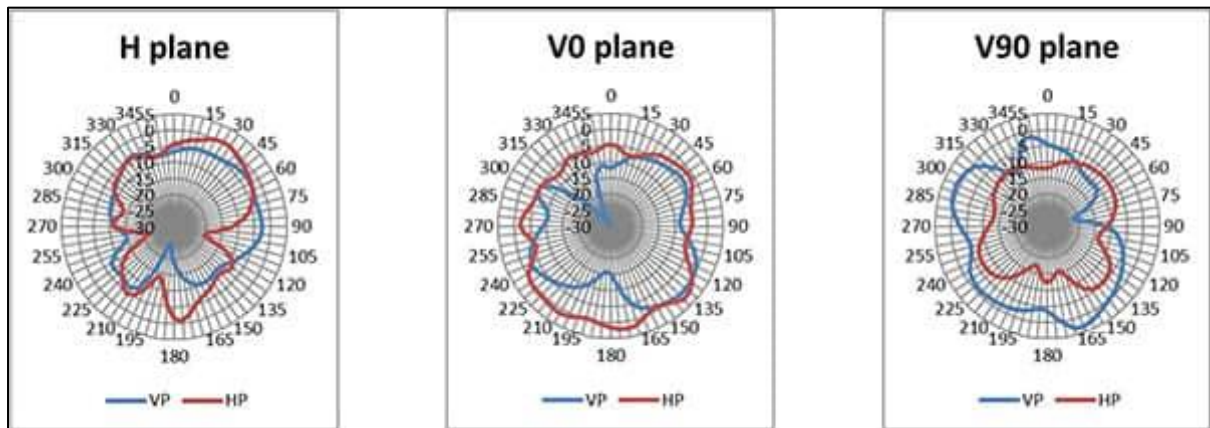


**Figure II.11** : L'utilisation d'une antenne PIFA

Vous pouvez également modifier la taille de l'antenne PIFA en utilisant des charges supérieures. Cependant, cela a des conséquences. Pour atteindre des fréquences plus basses, il est possible d'ajouter de petites capacités à l'extrémité de l'antenne. Néanmoins, cela dégrade les capacités de rayonnement. L'utilisation de cette méthode peut aider à atteindre un équilibre optimal entre la taille et les performances pour une application donnée.

L'antenne étant placée parallèlement et au-dessus de la carte à circuit imprimé, l'emplacement des broches de montage constitue le seul espace requis sur la carte. Il s'agit d'un gros avantage de l'utilisation des antennes PIFA. De plus, il n'existe aucun dégagement requis avec le sol ou d'autres éléments métalliques. Cela signifie qu'il est possible de monter d'autres composants sous l'antenne sur les deux faces de la carte à circuit imprimé (Figure II.11).

La dérivation de court-circuit, mentionnée précédemment, sert à adapter l'impédance de l'antenne au reste du circuit. Les antennes unipolaires, étant naturellement capacitives, nécessitent l'ajout d'une inductance afin de pouvoir adapter l'antenne à l'impédance optimale (généralement  $50 \Omega$ ). La dérivation de court-circuit fournit cette inductance d'adaptation d'impédance. Moins de composants passifs sont donc nécessaires pour adapter l'impédance. Avec moins de composants, il y a moins de pertes parasites et donc un rendement de rayonnement plus élevé.



**Figure II.12 :** Exemples de diagrammes de rayonnement et de polarisation d'une antenne PIFA.

Selon l'application, les antennes PIFA ont tendance à présenter une largeur de bande modérée à élevée et un diagramme de rayonnement omnidirectionnel à polarisation mixte (Figure II.12). De plus, les antennes PIFA résistent parfaitement aux changements environnementaux grâce à leur solide connexion sur le plan de masse du circuit imprimé via la dérivation de court-circuit. Les antennes PIFA ont donc tendance à maintenir un diagramme de rayonnement efficace, tandis que les autres types d'antennes ont tendance à dériver en fréquence et à perdre des capacités de rayonnement en cas de changements environnementaux sous-optimaux (par exemple, en cas de fonctionnement à proximité du métal) [42].

## II.4 ALIMENTATION DES ANTENNES

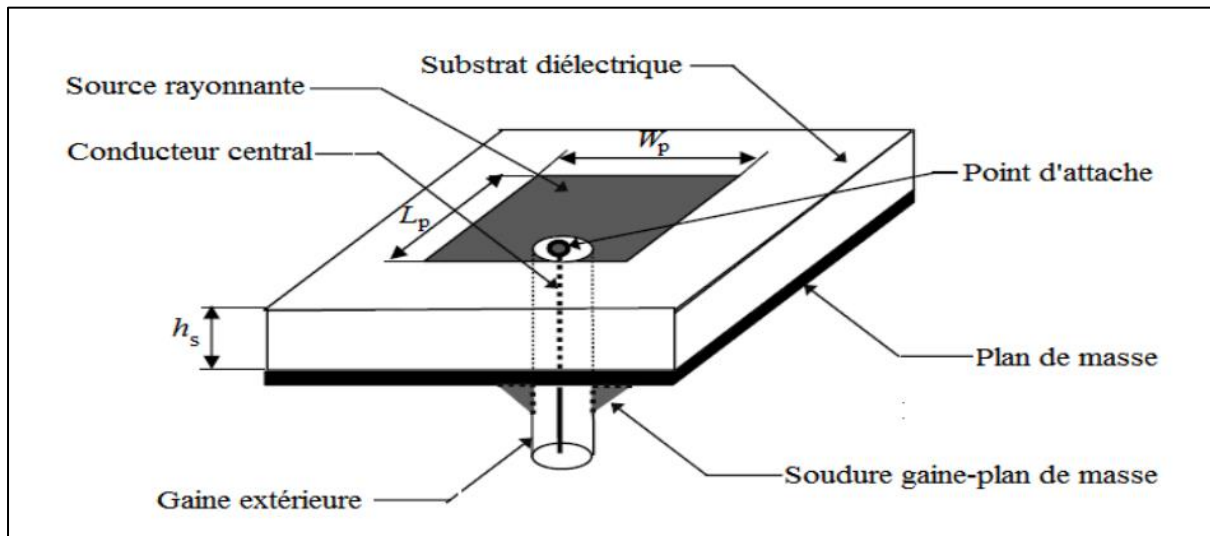
Il existe plusieurs techniques pour l'alimentation des antennes micro-rubans, ces techniques peuvent être soit par contact direct soit par couplage, les plus communément utilisées est l'alimentation par ligne micro-ruban, par sonde coaxiale, par couplage de proximité ou par ouverture.

### 4.1 ALIMENTATION COAXIALE

Ce type d'alimentation, nommé aussi alimentation coaxiale, est usuellement employé dans les patchs circulaires et rectangulaires pour générer une polarisation circulaire [43]. Le conducteur intérieur du connecteur coaxial s'étend à travers le diélectrique pour être soudé au patch rayonnant, alors que le conducteur extérieur est branché au plan de masse

(Fig. (II.13)) [44-45].





**Figure II.13 :** Alimentation par connexion directe à une ligne coaxiale.

Les principaux avantages de ce système d'alimentation sont [44-45] :

- La possibilité d'installer la sonde coaxiale à n'importe quel emplacement, à l'intérieur du patch, afin d'effectuer l'adaptation.
- En plus de sa facilité de réalisation, cette technique présente un faible rayonnement parasite et la ligne d'alimentation ne cause aucune perte par rayonnement.
- Un câble peut être installé en dessous du plan de masse pour réduire le couplage entre le patch et l'alimentation.

Les inconvénients majeurs de cette technique sont [46] :

- Elle présente une bande passante étroite et elle est difficile à modéliser.
- L'augmentation de la longueur de la sonde, pour des substrats épais, remet l'impédance d'entrée plus inductive.

#### 4.2 ALIMENTATION DIRECTE PAR UNE LIGNE MICRO RUBAN

Dans cette technique d'alimentation, un ruban conducteur est branché directement au bord du patch rayonnant (Fig. (II.14)).

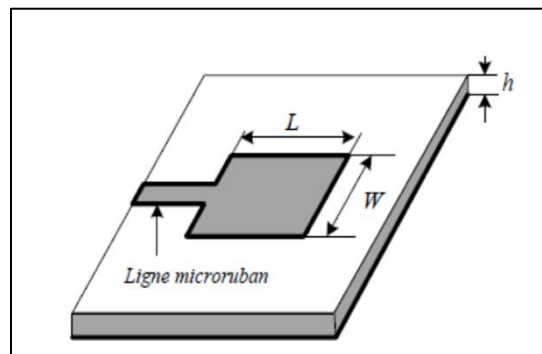
Les importants avantages de ce type d'alimentation sont :

## CARACTERISTIQUES DES ANTENNES

- Pour obtenir une structure plane, l'alimentation est gravée sur le même substrat et considérée comme une extension du patch. C'est la technique la moins coûteuse et la plus simple à réaliser [47].
- L'impédance interne peut être facilement vérifiée en ajustant le point de contact entre la ligne d'alimentation et le patch [46].
- Sa réalisation est facile car la ligne d'alimentation et le patch sont gravés sur le même substrat [46].
- Une faible impédance (quelques Ohms) est acquise si le point de contact est proche du centre du patch [46].
- Cette technique est facile à modéliser, principalement pour un substrat fin [46].

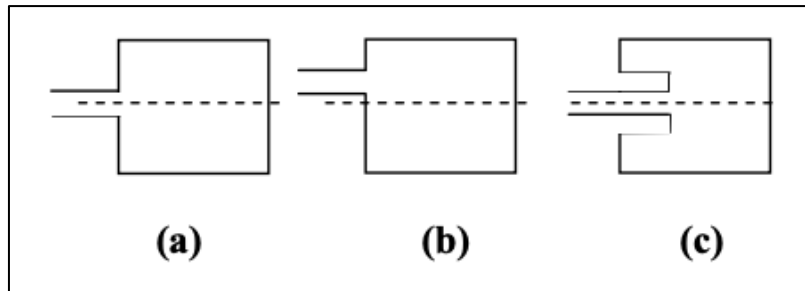
Quant aux inconvénients de cette technique on peut les citer dans ce qui suit :

- L'augmentation de l'épaisseur du substrat diélectrique engendre une augmentation des ondes de surface et des rayonnements parasites de l'alimentation, ce qui se traduit par un abaissement de la bande passante de l'antenne. En plus, ce rayonnement parasite de l'alimentation donne lieu à un rayonnement indésirable dû à la polarisation croisée.
- La modification de la position de l'alimentation peut engendrer un léger décalage de la fréquence de résonance (à cause du changement du couplage entre la ligne d'alimentation et l'antenne) mais le diagramme de rayonnement reste inchangé. Ce décalage de la fréquence de résonance peut être équilibré par un léger ajustement des paramètres de l'antenne.
- Du fait que le réseau d'alimentation n'est pas déconnecté de l'antenne quand celle-ci rayonne, un fort rayonnement parasite du circuit d'alimentation est remarqué [48].



**Figure II.14 :** Technique d'alimentation par ligne micro ruban.

Il est à noter que l'alimentation peut aussi se faire par une connexion directe à la ligne microbande (Fig. (II.15)). Le point de jonction peut se repérer sur l'axe de symétrie de l'élément ou décaler par rapport à cet axe, si cela permet une meilleure adaptation d'impédance. L'alimentation axiale avec encoche donne de bons résultats. Elle est très employée dans les réseaux d'antennes imprimées de différentes formes [49].



**Figure II.15** : Alimentations par ligne micro-ruban : (a) axiale, (b) décalée, (c) axiale avec encoche [49].

Dans une excitation par ligne microbande, la connexion entre la source d'alimentation et l'antenne est en principe réalisé par une ligne coaxiale dont la sonde est fixée sur la ligne microbande à une distance de quelques longueurs d'onde du bord du contact antenne ligne microbande. Quant au problème d'adaptation, il est résolu par un choix convenable de la longueur du tronçon de ligne micro-ruban servant à l'excitation [50].

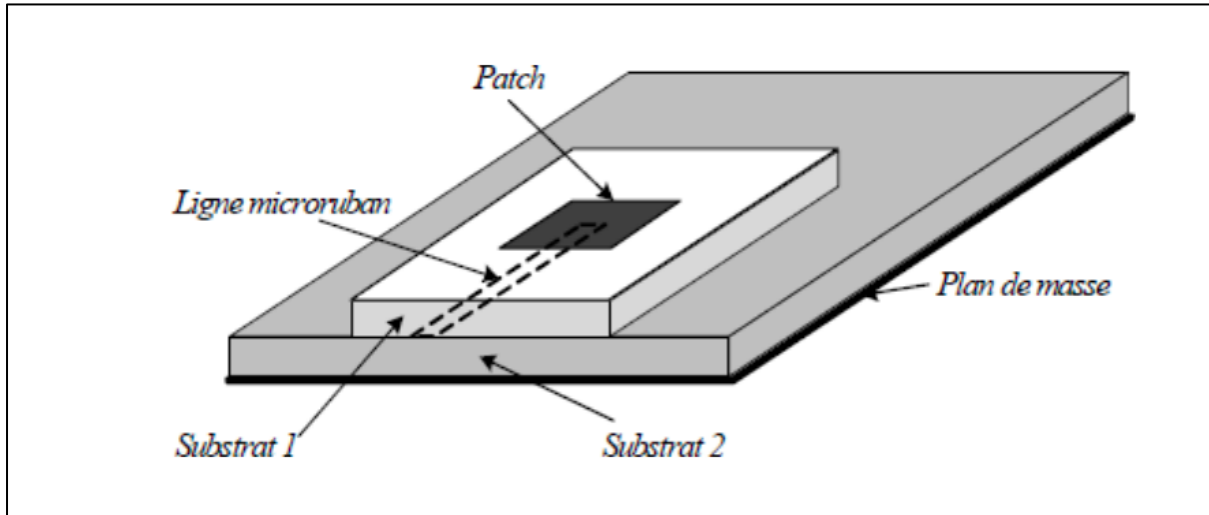
### 4.3 L'ALIMENTATION DE PROXIMITE

Cette technique est surnommée alimentation par couplage électromagnétique. Comme le montre la figure (II.16), la ligne d'alimentation se trouve entre deux substrats diélectriques superposés, tandis que le patch est gravé sur le substrat supérieur [44]. Les primordiaux avantages de ce type d'alimentation sont [44-51] :

- Elimination radicale du rayonnement de la ligne d'alimentation.
- Ne nécessite pas un contact physique entre la ligne d'alimentation et le patch.
- Peut offrir une large bande passante à cause d'un espacement plus grand entre le patch et le plan de masse.
- L'optimisation des performances de l'antenne est plus facile à cause d'un plus grand choix de la combinaison des deux diélectriques. L'adaptation peut être effectuée en contrôlant la profondeur de la ligne d'alimentation sous le patch et la largeur du patch.

Les inconvénients sont [44] :

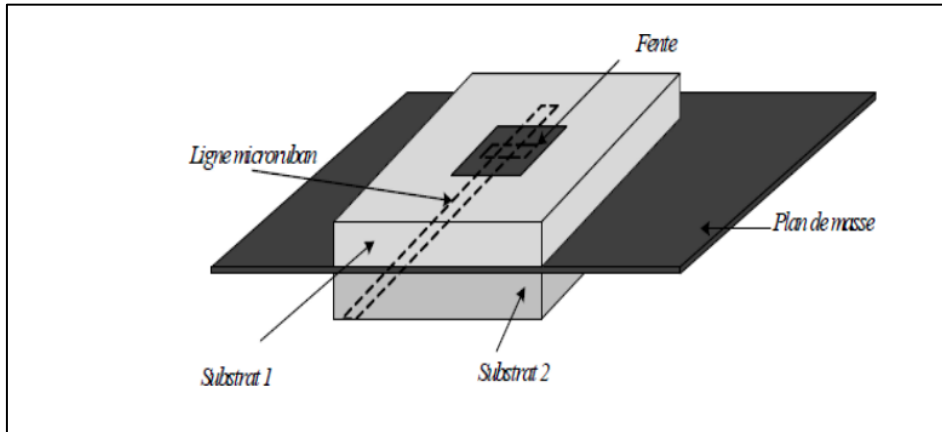
- Fabrication difficile en raison des deux couches diélectriques qui requièrent un alignement adéquat.
- Augmentation de l'épaisseur globale de l'antenne et de son coût.



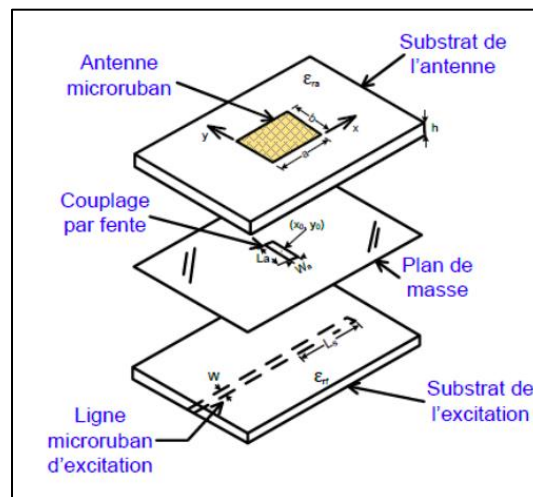
**Figure II.16 :** Alimentation par couplage électromagnétique à une ligne micro-ruban [52].

#### 4.4 ALIMENTATION COUPLEE PAR OUVERTURE

Dans cette technique d'alimentation, qui permet un minimum de rayonnement parasite, l'élément rayonnant et la ligne d'alimentation sont séparés par le plan de masse (Fig. (II.18)). Le couplage entre ces deux éléments est réalisé grâce à une fente, insérée dans le plan de masse. La fente est généralement centrée sous le patch, entraînant ainsi une baisse de polarisation croisée à cause de la symétrie de la configuration. Le degré de couplage, est décidé par la forme, la taille et l'emplacement de la fente. En règle générale, afin d'optimiser le rayonnement du patch, une constante diélectrique élevée et une faible épaisseur sont utilisées pour le substrat inférieur, tandis qu'une épaisseur plus grande et une constante diélectrique plus petite sont utilisées pour le substrat supérieur [53].



**Figure II.17 :** Techniques d'alimentation par couplage par ouverture.



**Figure II.18 :** Alimentation par couplage électromagnétique, à une ligne microbande, à travers une fente dans le plan de masse [54].

Le plan de masse élimine le rayonnement parasite de l'alimentation qui, en interférant avec celui de l'antenne, affecte la pureté de la polarisation. Cette géométrie a au moins quatre degrés de liberté : les dimensions de la fente, sa position, les paramètres du substrat et la largeur de la ligne d'alimentation. L'adaptation est améliorée par une optimisation simultanée des dimensions de la fente de couplage et de la largeur de la ligne d'alimentation. L'inconvénient majeur de cette configuration est sa difficulté de fabrication, en raison des couches multiples qui augmentent également l'épaisseur du dispositif et son coût [44-55].

### II.5 NOUVELLES TECHNIQUES POUR L'AMELIORATION DE LA BANDE PASSANTE

Dans beaucoup de cas, la largeur de bande étroite (2% à 5%) de l'antenne micro-ruban traditionnelle et son sérieux inconvénient, empêche son utilisation dans beaucoup d'applications micro-ondes pratiques. Ainsi de grands efforts sont allés vers le développement et la création de techniques pour améliorer cette largeur de bande [56].

La plupart des méthodes directes utilisées pour augmenter la largeur de bande de l'élément micro-ruban doivent utiliser un substrat épais avec un constant diélectrique faible. Mais comme discuté ci-dessus, ceci mène inévitablement à l'inacceptable faux rayonnement d'alimentation, génération des ondes de surface...etc.

Il est possible de concevoir un réseau assorti d'impédance planaire pour augmenter la largeur de bande. Ainsi des largeurs de bande de 9%-12% [57], et de 15% [58], ont été obtenues de cette manière pour les éléments alimentés par sonde et par une ligne micro-ruban, une largeur de bande de 13% a été réalisée pour un élément de patch couplé par proximité [59]. Une des meilleures manières, également, d'augmenter la largeur de bande est d'utiliser deux patches empilés : le patch supérieur et couplé par proximité au patch inférieur, qui peut être alimenté par n'importe laquelle des méthodes discutées plus haut, des largeurs de bande de 10%-20% ont été réalisées avec des patches empilés alimentés via une sonde [60]-[61], et des largeurs de bande de 18%-23% ont été réalisées avec des patches empilés couplés par ouverture [62], [63].

La dernière méthode qu'on va citer permet d'obtenir des largeurs de bandes au-dessus de 20% et ceci en rallongeant la fente d'accouplement d'un patch micro-ruban couplé par ouverture simple [64], [65]. Chacune de ces méthodes, qui font partie de plusieurs techniques développées pour augmenter la largeur de bande de l'antenne microbande, à ses propres avantages et inconvénients, donc le choix de l'une ou de l'autre dépend essentiellement de l'application désirée.

L'autre alternative développée pour dépasser cette limitation est de mettre en réseau plusieurs antennes employant des éléments couplés par proximité [66], [67] qui ont l'avantage d'augmenter la bande passante et de réduire relativement les faux rayonnements, ou en

utilisant des patchs couplés par ouverture [68], qui minimisent encore plus les faux rayonnements puisque les lignes d'alimentation sont protégées par le plan de masse.

### **II.6 CONCLUSION**

Dans ce chapitre nous nous sommes attachés à définir ce qu'était une antenne et ses modes de propagations, Nous avons également présenté les types d'antennes couramment utilisées dans les objets communicants et que nous avons mises à profit pour concevoir des systèmes présentant de la diversité d'antennes ainsi que leur alimentation. Par la suite les nouvelles technique pour l'amélioration de la bande passante.

Le prochain chapitre sera consacré à la conception et la simulation d'une antenne imprimée sous CST destinée à une application de la technologie 5G dans la bande sub 6GHz.

## **CHAPITRE III : CONCEPTION ET FABRICATION D'ANTENNE**



## III.1 INTRODUCTION

Dans ce chapitre, on présente le travail effectué dans la partie simulation, conception et la réalisation du prototype étape par étape, ainsi que les mesures des performances effectuées de l'antenne planaire réalisée.

## III.2 CHOIX DU SUBSTRAT UTILISE

Dans le cadre de ce travail, on a opté pour les structures planes des substrats, sous forme de feuilles, caractérisées par une épaisseur  $h$ , une permittivité relative  $\epsilon_r$  et des pertes diélectriques représentées par le paramètre  $\text{tg}\delta$ . Ces substrats qui constituent la partie diélectrique des antennes sont le foyer de la propagation des ondes électromagnétiques, qui se fait entre un plan de masse métallique et une autre partie métallique avant que celles-ci ne soient rayonnées vers l'espace libre [II.5].

Le choix du substrat utilisé dans ce travail est principalement guidé par la disponibilité au niveau du laboratoire et le faible coût qui est le FR-4 qui est à base de verre époxy, caractérisé par une permittivité relative  $\epsilon_r = 4.3$ , un  $\text{tg}\delta = 0.0018$  et une épaisseur  $h = 1.6 \text{ mm}$ .

## III.3 CHOIX DE L'OUTIL DE SIMULATION

Micro wave studio de CST (computer Simulation Technologie) le logiciel que nous employons, fait usage de la méthode des intégrales finies (FIT : FINITE Integration Technique) développée par Weiland en 1977 [69].

La manipulation du logiciel se résume dans les étapes suivantes : la sélection de l'environnement dans lequel la structure sera créé, concrètement, il est question de sélectionner les unités, le matériaux, l'environnement voisin, les conditions aux limites, ainsi que la plage de fréquence dans laquelle on analyse le problème, pour le cas des antennes planaires imprimées, il faut que les conditions aux limites soient sélectionnées de telle sortes que toutes les faces accèdent à l'espace libre, excepté celle où sera défini le plan de masse, la face opposée au patch .

## III.4 LA CONCEPTION DE L'ANTENNE PATCH

Entre la ligne micro ruban (Microstrip) et le guide d'onde coplanaire (CPW) les deux technologies principales, la distinction fondamentale est que le plan de masse est localisé en face arrière en technologie micro ruban et en face avant en technologie CPW, dans ce qui suit, nous n'insistons que sur un patch rectangulaire alimenté par la technologie CPW.

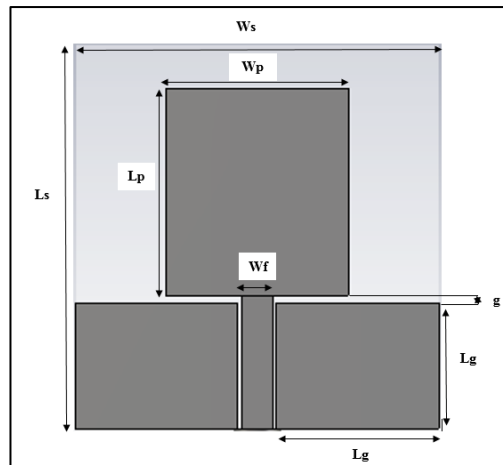
### 4.1 LA LIGNE COPLANAIRE

La nécessité de produire des antennes dans la bande sub 6GHz vient surtout de la prolifération des communications sans fil, et les antennes micro ruban sont les plus sollicitées, des lors la ligne coplanaire (introduite par Wen en 1967 [69], pour les applications dans les radars et dans les systèmes de communication) plus avantageuse, s'est positionnée comme solution de rechange Vis-à-vis de la ligne micro ruban et la ligne coaxiale, elle a beaucoup d'avantage, Son plan de masse offre la possibilité d'installer aisément les composants actifs et localisés [70] :

- Il est plus facile de faire des mises à la masse de composant actif à la surface, sans passez par des vias, ce qui supprime les parasites provenant des vias à des fréquences élevées.
- Il y a un plan de masse entre les lignes adjacentes et la connexion des éléments actifs, ce qui a pour conséquence la minimisation des effets de couplages.
- Les lignes coplanaires n'ont pas besoin d'être minces pour obtenir des impédances élevées .
- Pour une impédance quelconque, on a plusieurs degrés de liberté.
- Entre la ligne CPW et les autres lignes de transmission, la transition est aisée.

### 4.2 ANTENNE PROPOSEE

La structure initiale choisie est une antenne patch simple de la de forme rayonnante rectangulaire dont les dimensions sont mentionnées dans la figure suivante :

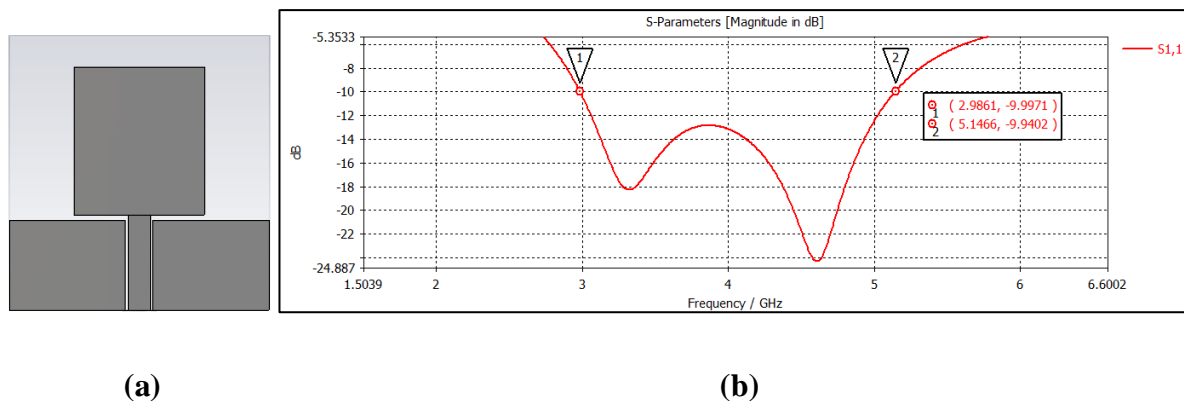


**Figure III.1** : Les dimensions d'antenne initiale

Paramètres	$L_s$	$W_s$	$L_p$	$W_p$	$L_g$	$W_f$	$g$
Dimensions (mm)	34	34	14	14	9.7	2	0.4

**Tableau III.1** : Les dimensions d'antenne initiale

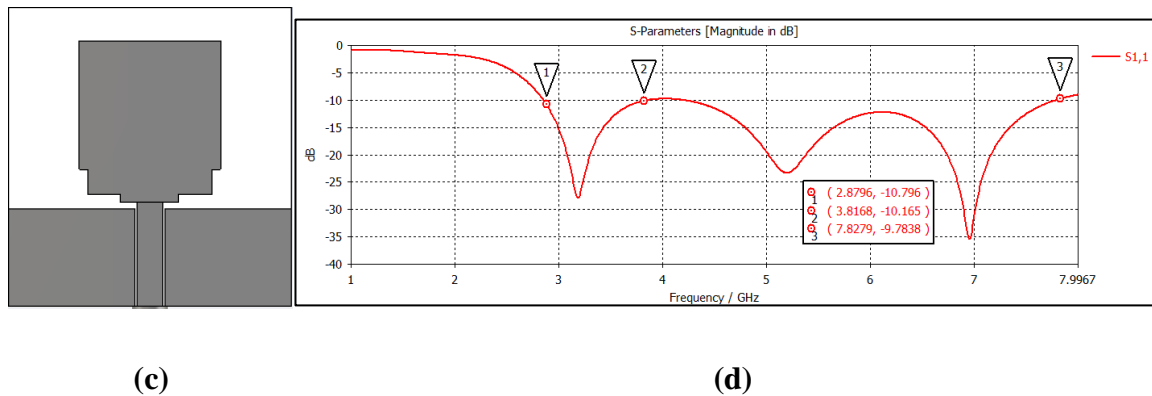
Comme le montre la figure III.1 le rectangle avec la longueur  $L_p$ , largeur  $W_p$  et une ligne CPW ( $50 \Omega$ ) a été conçue,  $W_f$  est la largeur de la ligne,  $L_s$  et  $W_s$  dénotent la largeur et la longueur de substrat, respectivement.



**Figure III.2** : (a) Antenne monopole initiale proposée et (b)  $S_{11}$  en fonction de la fréquence

On peut visualiser dans la figure III.2 (b) que l'antenne à une largeur de bande maximale de 2.088 GHz dans l'intervalle [3 ; 5.088] GHz.

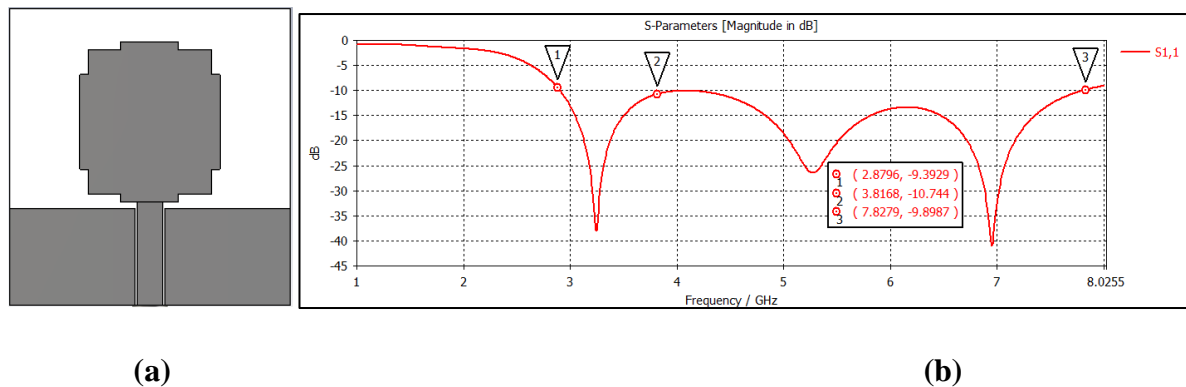
## 4.3 ANTENNE AVEC MODIFICATIONS EN DEUX COINS



**Figure III.3 :** (c) Antenne monopole avec modification de deux coins et (d)  $S_{11}$  en fonction de la fréquence.

Dans la figure III.3, on remarque que le coefficient de réflexion  $S_{11}$  a deux bandes de fréquences, une bande étroite à 3.3GHz et une bande large entre 4 GHz et 7.6 GHz.

## 4.4 ANTENNE AVEC MODIFICATIONS EN QUARTE COINS



**Figure III.4 :** (a) Antenne monopole avec modifications en quarte coins et (b)  $S_{11}$  en fonction de la fréquence

Pour le coefficient de réflexion de l'antenne avec modifications en quarte coins (figure III.4 (a)(b)), les résultats de simulation montrent que l'ajout des encoches sur l'élément rayonnant améliore légèrement l'adaptation de l'antenne, en particulier pour la fréquence 3.3GHz, la modification remarquable sera au niveau de la première fréquence de résonance, où on a obtenu une valeur de -37 dB au lieu de -28dB pour l'antenne avec deux encoches, qui présente une bonne adaptation.

### III.5 ETUDE PARAMETRIQUE POUR LA CONCEPTION D'UNE ANTENNE OPTIMISEE

Afin d'améliorer l'adaptation de notre antenne, La figure III.5 montre les dernières modifications conçues sur l'élément rayonnant, Cette antenne présente un coefficient de réflexion de -10dB sur toute la bande de fréquences [2.98 ; 3.8 GHz] (figure III.5(b)). L'influence de cette dernière modification n'a pas donnée une grande amélioration dans l'adaptation. Cependant, comparé à l'antenne sans encoche, dont le coefficient de réflexion est supérieur à -10dB dans certaines bandes de fréquences, cette antenne présente une meilleurs adaptation. Mais on préfère passer dans l'étape suivante à une étude paramétrique.

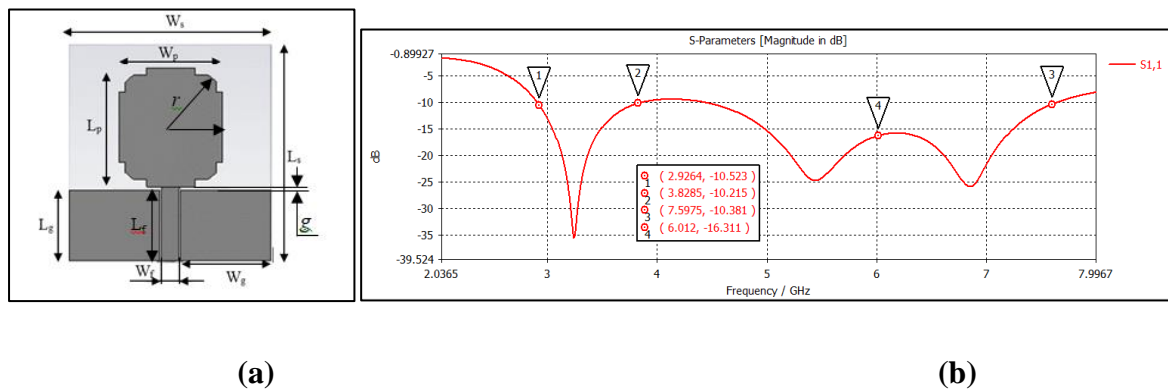


Figure III.5 : (a) Antenne avec les dimensions initiales d'antenne (b) S11 en fonction de la fréquences

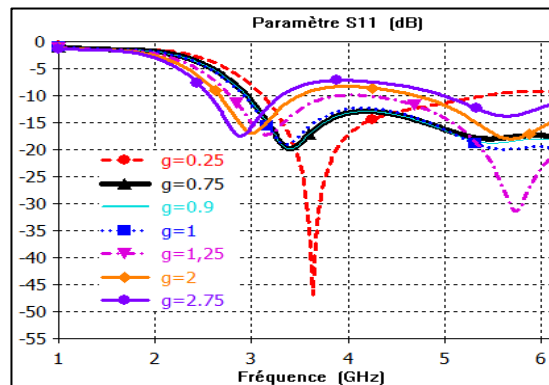
Paramètres	$L_s$	$W_s$	$L_p$	$W_p$	$L_g$	$w_f$	$r$
Dimensions (mm)	34	34	14	14	9.7	2	10.5

Tableau III.2 : Les dimensions d'antenne

#### 1- EFFET DE L'ESPACEMENT ENTRE L'ELEMENT RAYONNANT ET LE PLAN DE MASSE « G »

Pour étudier l'effet de l'espacement entre l'élément rayonnant et le plan de masse sur les performances de l'antenne, on a fait varier le paramètre  $g$  et tracé le paramètre  $S_{11}$  correspondant à chaque valeur. Cette variation est faite de manière à garder les mêmes

dimensions de l'élément rayonnant et du plan de masse. Figure III.6 donne la superposition des courbes de  $S_{11}$  correspondant aux valeurs de  $g$  allant de 0.25 à 2.75 mm.



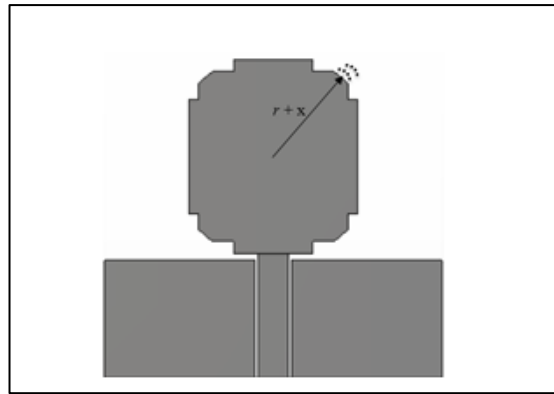
**Figure III. 6 :** Paramètre  $S_{11}$  simulé pour différentes valeurs de  $g$ .

D'après la figure III.6, on constate que le paramètre  $g$  a une influence importante sur l'adaptation d'impédance de l'antenne. Les meilleures valeurs pour avoir une bonne adaptation sur toute la bande désirée, sont entre 0.75 et 1 mm, qui est expliqué par le fait que le paramètre  $S_{11} < -10$  dB.

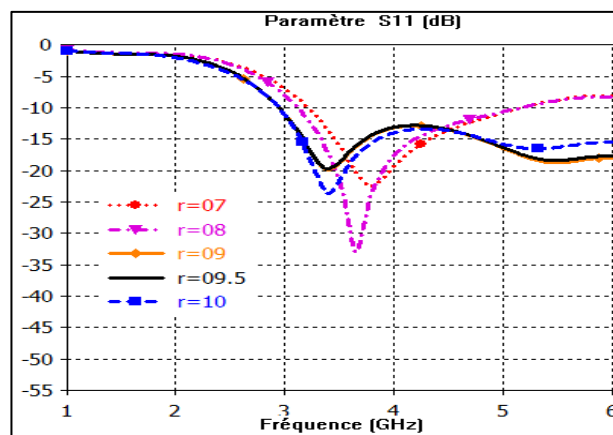
On remarque aussi que plus la valeur de  $g$  augmente, plus la limite inférieure de la bande passante diminue. Ceci s'explique par le fait que la longueur  $g$  fait partie de l'élément rayonnant ; donc plus  $g$  augmente, plus la longueur de ce dernier augmente, donc plus la première fréquence de résonance diminue.

## 2- EFFET DE LA FORME DE L'ÉLÉMENT RAYONNANT « R »

Pour voir l'effet de la forme de l'élément rayonnant sur les performances de l'antenne, on a fait varier le paramètre  $r$  ; les courbes correspondantes à chaque valeur sont superposées dans Figure III.7. On tient à signaler que la variation de  $r$  est faite de manière à garder le même espacement entre l'élément rayonnant et le plan de masse (même paramètre  $g$ ).



**Figure III.7 :** Variation de dimensions du l'élément rayonnant.

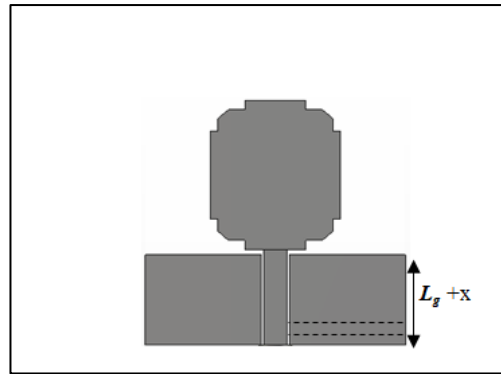


**Figure III.8:** Paramètre  $S_{11}$  simulé pour différentes valeurs de  $r$ .

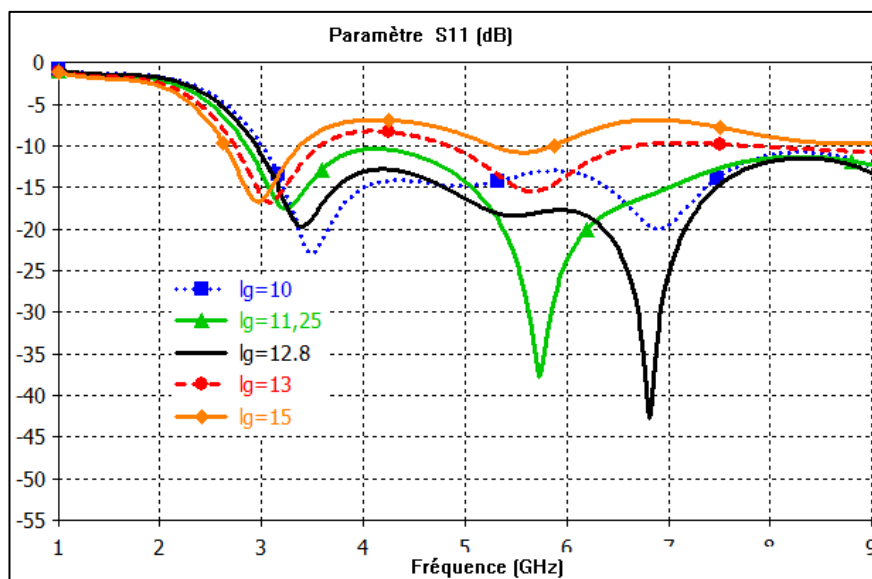
On remarque d'après la figure III.8 que plus la valeur de  $r$  augmente, plus la première fréquence de résonance de l'antenne diminue. Cette constatation était prévisible compte tenu que l'augmentation de  $r$  fait augmenter les dimensions de l'élément rayonnant, ce qui diminue la fréquence de résonance. On constate aussi qu'à partir de la valeur  $r = 9$  mm, l'antenne est globalement bien adaptée en impédance.

### 3- EFFET DE LA LONGUEUR DU PLAN DE MASSE « $L_G$ »

De même que pour le rayon de l'élément rayonnant, l'effet de la longueur du plan de masse  $L_g$  sur le paramètre  $S_{11}$  est investigué en le faisant varier de 9 à 13 mm et puis on trace les courbes correspondantes. La figure III.9 montre le schéma de l'antenne avec la longueur  $L_g$ .



**Figure III.9 :** Variation de la longueur de plan de masse.



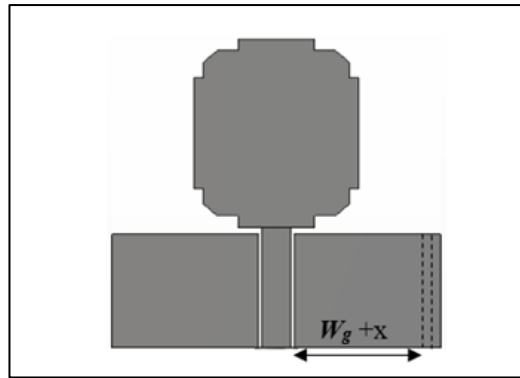
**Figure III. 10 :** Paramètre  $S_{11}$  simulé pour différentes valeurs de  $L_g$ .

D'après la figure III. 10, on constate que le paramètre  $L_g$  a une influence importante sur l'adaptation d'impédance de l'antenne. Les meilleures valeurs pour avoir une bonne adaptation sur toute la bande désirée, sont entre 12 et 13 mm, qui est expliqué par le faite que le paramètre  $S_{11} < -10$  dB. On remarque aussi que plus la valeur de  $L_g$  augmente, plus la limite inférieure de la bande passante diminue. Ceci s'explique par le fait que plus  $L_g$  augmente, plus la longueur de l'élément rayonnant augmente, donc plus la première fréquence de résonance diminue

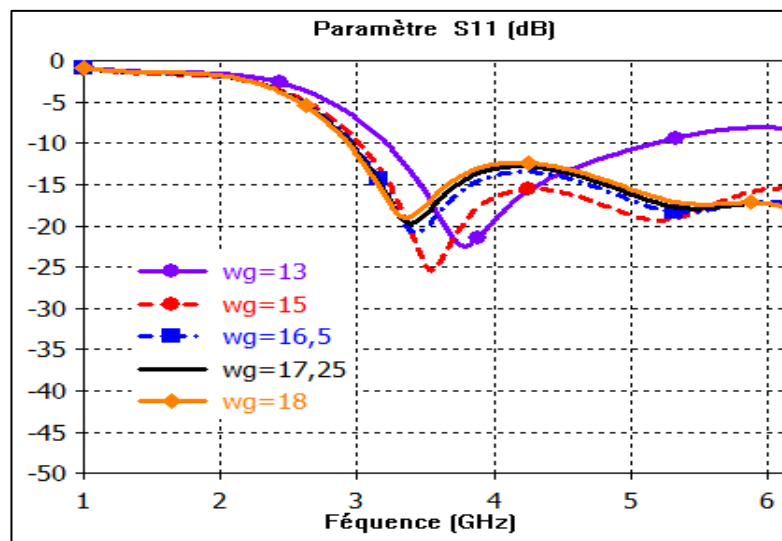
#### 4- EFFET DE LA LARGEUR DU PLAN DE MASSE « $W_g$ »

De même que pour la longueur du plan de masse, l'effet de la largeur du plan de masse  $W_g$  sur le paramètre  $S_{11}$  est étudié en faisant varier  $W_g$  de 13 à 18 mm et puis on trace les courbes correspondantes. Figure III.11 montre le schéma de l'antenne avec la largeur  $W_g$ .





**Figure III.11 :** Variation de la largeur du plan de masse.

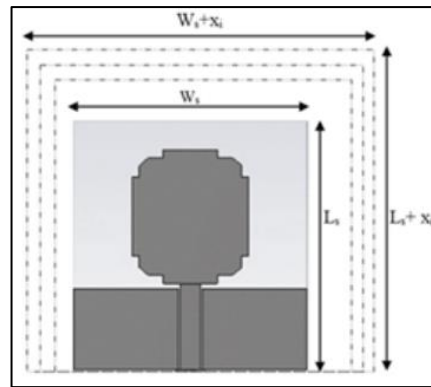


**Figure III.12 :** Paramètre  $S_{11}$  simulé pour différentes valeurs de  $W_g$ .

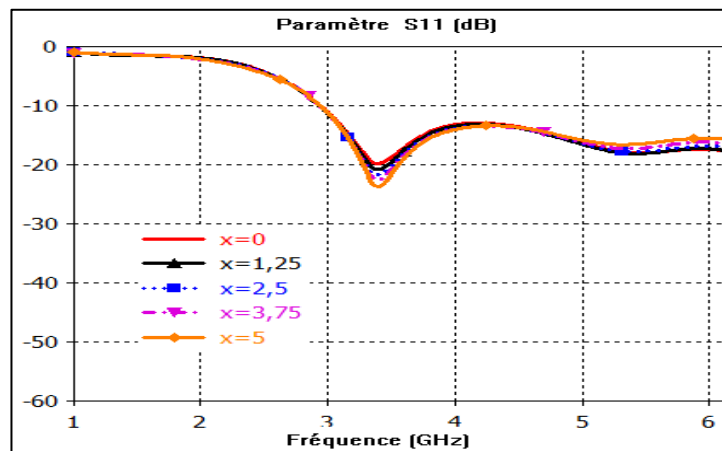
D'après la figure III.12 on constate que, jusqu'à la valeur 15 mm, l'influence de  $W_g$  est importante. A partir de  $W_g = 16.5$  mm, l'influence l'effet de l'élargissement du plan de masse devient négligeable. Ceci s'explique par le fait que le plan de masse est responsable de créer l'image du monopôle. Lorsque les dimensions du plan de masse sont inférieures grossièrement à  $\lambda/4$ , l'image qu'il crée est diminuée. A partir de cette valeur, l'image que produit le plan de masse est complète et l'élargissement au-delà ne donne aucun effet. On signale aussi qu'à partir de 16.5 mm, l'antenne est bien adaptée en impédance.

## 5- EFFET DES DIMENSIONS DU SUBSTRAT

Dans cette section, on veut étudier l'effet des dimensions du substrat sur les performances de l'antenne. Pour cela, on augmente ces dimensions carré de  $x$  millimètres, de 0 à 5 mm plus des dimensions du substrat qui sont  $36 \times 38$  mm<sup>2</sup> sans toucher aux différentes parties conductrices de l'antenne, tel qu'illustré dans la figure III.13.



**Figure III.13 :** Variation des dimensions du substrat.



**Figure III.14 :** Paramètre  $S_{11}$  simulé pour différentes valeurs de  $x$ .

D'après Figure III.14 qui présente les courbes de  $S_{11}$  correspondantes aux valeurs de  $x$  les plus significatives, on constate que les parties du substrat ajoutées ont un effet négligeable sur la réponse fréquentielle de l'antenne pour les valeurs de  $x$  supérieures à 0, c'est-à-dire, si on augmente les dimensions du substrat par rapport à la largeur du plan de masse. Ceci s'explique par le fait que les ondes électromagnétiques se propagent, dans le substrat, entre le plan de masse et la ligne de transmission. Donc, toute partie du substrat qui ne rentre pas dans la propagation des ondes dans le substrat ou dans leur rayonnement ne devrait pas avoir d'effet important sur les performances de l'antenne.

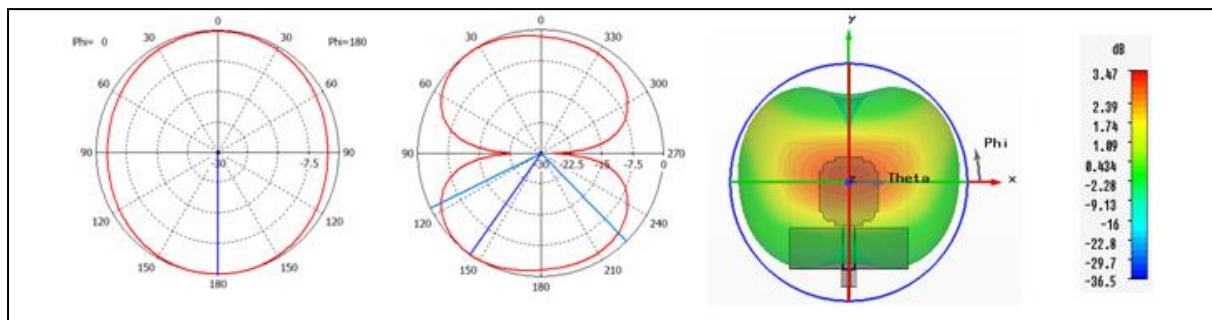
Finalement, suite à cette étude paramétrique, on a déterminé les valeurs des paramètres de l'antenne qui donnent une bonne adaptation d'impédance sur toute la bande Ultra Large Bande (ULB) qui est de 3 à 11 GHz. Ces valeurs sont données dans le Tableau III.3 ci-dessous :

Paramètres	$W_s$	$L_s$	$W_g$	$L_g$	$W_f$	$L_f$	$r$	$g$
Dimensions (mm)	40	37	17.25	12.8	03	13.55	9.5	0.75

**Tableau III.3 :** Dimensions optimisées du Monopole rectangulaire.

### 5.5.1 DIAGRAMMES DE RAYONNEMENT

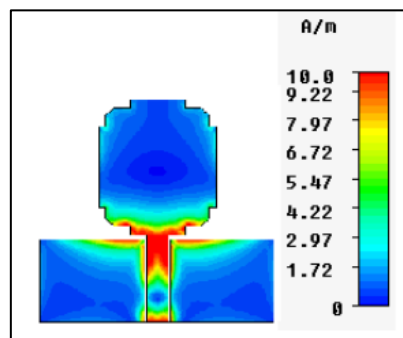
Une fois les valeurs de l'antenne déterminées, on a procédé au calcul des diagrammes de rayonnement de l'antenne à travers toute la bande d'intérêt. Ceci est réalisé en utilisant le logiciel CST qui donne les champs lointains de l'antenne aux fréquences désirées. Figure III. 15 donne les diagrammes de l'antenne au début de la bande.



**Figure III.15 :** Diagrammes de rayonnement aux fréquences à 3 GHz.

On remarque d'après Figure III.15 que l'antenne monopole présente des diagrammes de rayonnement différents dans les différentes parties de la bande. Ceci était prévisible parce qu'il est bien connu que ces antennes utilisent différents modes de rayonnement au long de la bande d'opération. Au début de la bande, l'antenne rayonne en utilisant le premier mode, ce qui se traduit par un diagramme de rayonnement composé d'un seul lobe seulement comme montré dans la Figure III.15 pour la fréquence de 3 GHz.

### 5.5.2 LES COURANTS DE SURFACE

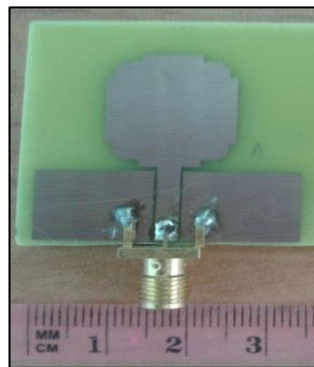


**Figure III.16 :** Distribution du courant surfacique pour la fréquence 3GHz.

On constate que le courant est principalement concentré et distribué le long de la ligne d'alimentation et au bord de l'élément rayonnant pour l'antenne excitée (figure III.16).

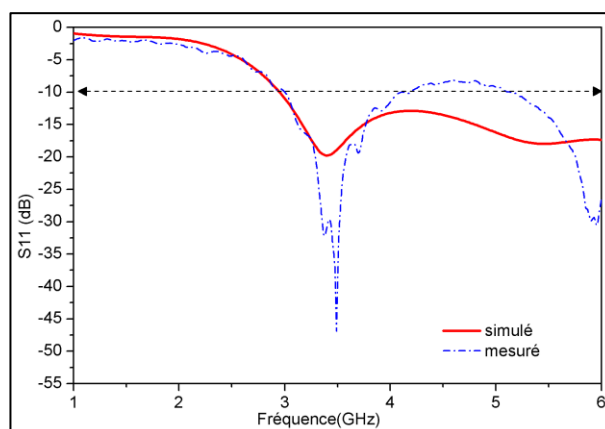
### 5.5.3 VALIDATION EXPERIMENTALE

Afin de valider expérimentalement l'approche utilisée pour la conception de l'antenne, un prototype d'antenne a été fabriqué. Sa photo est donnée dans la Figure III.17.



**Figure III.17 :** Photographie de Monopole rectangulaire réalisé.

Pour mesurer le paramètre  $S_{11}$ , on a utilisé un analyseur de réseau de type HP8719ES fonctionnant dans la bande 50 MHz-13.5 GHz relié à un ordinateur via un port GPIB (General Purpose Interface Bus). Les résultats de mesure sont sauvegardés dans des fichiers de données en format ASCII qui, par la suite, sont tracés par le logiciel *Origine pro 8*. Figure III. 18 donne la superposition des résultats de simulation et de mesure.



**Figure III. 18 :** Superposition des résultats de mesure et de simulation.

La comparaison des résultats de simulation de  $S_{11}$  avec ceux mesurés montrent une bonne concordance satisfaisante et ce, malgré une légère détérioration aux alentours de 4.5 GHz. Cette détérioration, qui se caractérise par des valeurs de  $S_{11}$  supérieures à -10 dB, est probablement due aux tolérances de fabrication d'une part et à celles de la permittivité relative du substrat. Cependant, les performances obtenues restent acceptables surtout si on apprend que dans l'industrie on tolère des valeurs de  $S_{11}$  jusqu'à -6 dB.

Au vu des résultats obtenus, le prototype d'antenne fabriqué peut être candidat pour son utilisation dans des applications de la 5G.

### III.6 CONCLUSION

Afin de concevoir une antenne rectangulaire modifiée, Pour ce but des techniques de conception et d'optimisation ont fait l'objet d'étude paramétrique effectuée à l'aide du logiciel CST pour avoir la bande passante désirée et avoir une bonne adaptation.

Les antennes planaires sont des structures couvrant toute la bande passante Sub 6 GHz, et elles possèdent de bonnes qualités de rayonnement et les résultats obtenus sont globalement satisfaisants et elles rependent aux critères envisagés.

## CONCLUSION GENERALE

Le travail réalisé dans le cadre de ce mémoire est dédié à la conception, et la réalisation d'une antenne monopole rectangulaire alimentée par une ligne coplanaire, résonnant dans la bande sub 6 GHz, afin d'atteindre cet objectif, nous avons utilisé pour la simulation, le logiciel du studio CST MWS, ce qui nous a permis de modéliser et d'analyser l'antenne rapidement et avec précision.

Les principaux avantages de la technologie d'antenne micro-ruban sont une production simple et un faible coût de fabrication. Pour cette raison, nous avons démontré d'abord la rationalité du choix d'une antenne imprimée rectangulaire alimentée par une ligne Coplanaire, pour les applications 5G, en présentant les définitions d'ensemble des termes antenne imprimée, les techniques d'alimentation, la différente forme d'élément rayonnant en mettant l'accent sur les avantages et les performances de ce type d'antenne.

Ensuite et grâce à la théorie des antennes, nous avons déterminé les paramètres géométriques du motif imprimé. Avant d'arriver à évaluer les performances de l'antenne conçue, nous avons vu un ensemble de modifications sur la structure d'antenne en termes d'insertion des encoches sur l'élément rayonnant, qui a conduit à une bonne adaptation de l'antenne.

Pour conclure les antennes planaires sont des structures qui couvrent toute la bande passante sous 6GHz, elles ont une bonne qualité de rayonnement, et les résultats obtenus sont globalement satisfaisants et répondent aux normes envisagées.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Badis Hakim, «Etude et conception d'algorithmes pour les réseaux mobiles et ad-hoc».Thèse de doctorat, Université Paris Sud - Paris XI, 2005.
- [2] Guy PUJOLLE, « Les réseaux », EdsEyrolles 2ème tirage, 2000.
- [3] Philippe ATELIN, « Wi-Fi : réseaux sans fil 802.11, technologie, déploiement, sécurité », Eds ENI, 2006.
- [4] Malek RAHOUAL et Patrick SIARRY, « Réseaux informatiques : conceptions et optimisation », EdsTechnip, 2006.
- [5] Guy PUJOLLE, Olivier SALVATORI, « Les réseaux », EdsEyrolles, 2011.
- [6] Bruno GARGUET-DUPORT, « Les réseaux sans fil (Wifi) », EdsTechni.cités, 2004
- [7] Samuel PIERRE, « Réseaux et systèmes informatiques mobiles : fondements, architectures et applications », Presse internationale Polytechnique.
- [8] Edouard RIVIER, « Communication audio-visuelle », Eds Springer, 2003.
- [9] Ali MAKKE, « Détection d'attaques dans un système WBAN de surveillance médicale à distance », Université Paris Descartes, 2014
- [10] Meriem Mhedhbi, « Contribution to deterministic simulation of Body area network channels in the context of group navigation and body motion analysis», thèse de doctorat en Traitement du signal et télécommunications, Rennes, 2015
- [11] Oussama Frioui, Fayrouz Haddad, Lakhdar Zaid, Wenceslas Rahajandraibe, « Evolution des standards / architectures pour les communications sans fil Application aux systèmes multistandards en technologie CMOS », Schedae, 2007 Prépublication n° 17 Fascicule n° 2
- [12] Aurélie Schell, « Le WiMax - La norme 802.16 », Université de Marne-la-Vallée, Février,2007
- [13] Mohammad Meraj ud in, M., et al. (2015) « Evolution of Mobile Wireless Technology from 0G to 5G », International Journal of Computer Science and Information Technologies, 6(3), 2545-2551
- [14] Pape Abdoulaye Fam, « Modélisation, analyse et optimisation de réseaux hybrides unicast-broadcast pour la diffusion de services multimédias linéaires et non linéaires »,

Réseaux et télécommunications [cs.NI]. INSA de Rennes, 2017, Français.

[15] Grégoire Bourguignon, « Le Concept de réseau cellulaire », Astel, Janvier 2003.

[16] TAHAR ABBES Mounir, « Proposition d'un protocole à économie d'énergie dans un réseau hybride GSM et AD HOC », Spécialité Informatique, université d'Oran, 2011

[17] Narcisse Nya Kamtchoum, « Modèles multicellulaires pour les réseaux mobiles 4G. Réseaux et télécommunications », (cs.NI), Sorbonne Université, 2018. Français.

[18] Soulemanou Nsangou Mounngnutou, « Etude d'une offre technique innovante de téléphonie sur IP à Camtel Cameroun», Université de Maroua Cameroun, Ingénieur en télécommunications et réseaux, 2012.

[19] Selon B. Fassi, « communication personnelle [Support de cours], 2018 », Réseaux d'opérateurs.

[20] Fabrice MFUAMBA, « Etude portant sur l'implantation d'un réseau sans fil (wifi). Cas de Green Wispot S. P. R.L », Institut supérieur des techniques appliquées de Kinshasa, Ingénieur technicien en électronique, 2012

[21] Rodrigue Monjouo Mounjouopou, « Conception d'un service vidéo pour terminaux portables de type », Ecole Supérieure Multinationale de Télécommunication, Licence Professionnelle / Ingénieur des Travaux de Télécommunication, 2009

[22] Safa Saadaoui, Conception d'un système de communication sans fil industriel basé sur la transformée en ondelettes. Automatique. Université de Lorraine, 2019. Français.

[23] Jonathan BISIMWA Ngabo, « Exploitation des failles de sécurité et étude des méthodes de protection du réseau wifi de micro-finance. Cas de la COOPEC Nyawera. », Université Biosadec - Licence 2015.

[24] Jeremy Laine et Philippe Vigneron, « Télécommunications numériques le CDMA », 2000- 2001.

[25] ZOUNDOH Venceslas, « Déploiement de la technologie CDMA dans la téléphonie mobile : cas du SRT Borgou/Alibori », Université Polytechnique Internationale du Bénin (UPIB) - Diplôme Universitaire de Technologie (DUT) ,2002

[26] Alban Houston, « Etudes des performances des réseaux 4G », UATM GASA FORMATION, Licence Professionnelle, 2015

[27] Mourad Jallali, « Conception et développement d'une plateforme pour le Monitoring de la QoS (Quality of Service) Data des réseaux radio 2G/ 3G », Université Tunis El Manar, Ingénieur en télécommunications, 2012



- [28] Tarek BCHINI, « Gestion de la Mobilité, de la Qualité de Service et Interconnexion de Réseaux Mobiles de Nouvelle Génération », INPT-ENSEEIH de Toulouse & SUP'COM de Tunis, juin 2010
- [29] Mlle. Haddouche Khayra, « Développement d'un outil d'optimisation pour l'analyse des fichiers de traçage de l'opération Drive Test des réseaux 2G/3G », Mémoire PFE, Université de Tlemcen, 2019.
- [30] Université de Versailles-Saint-Quentin-en-Yvelines réseaux de radiocommunication avec le mobile domaine : sciences et technologies mention : physique-sciences pour l'ingénieur antennes bases théoriques r. de Oliveira
- [31] Canaux de transmission propagation guidée lignes de transmission fibres optiques I3 : année 2012-13 isabelle sirot alain fromentel
- [32] Université hassiba benbouali de chlef faculté de technologie département d'électronique polycopie de cours antennes zitouni Ahmed septembre, 2018
- [33] Université Mohamed Seddik ben Yahia de Jijel support de cours propagation d'ondes et antennes réalise par : Dr. Boukerroum Fayçal
- [34] Hedi ragad, « étude et conception de nouvelles topologies d'antennes a résonateur diélectrique dans les bandes UHF et SHF», Université de Tunis El Manar, 2013
- [35] CHORFI Hamid, « conception d'un nouveau système d'antenne réseau conforme en onde millimétrique », Mémoire, Bibliothèque du Cégep de l'Abitibi-Témiscamingue, Université du Québec en Abitibi-TÉMISCAMINGUE, 2012
- [36] Maurice Bellanger, « les antennes théorie, conception et applications », Paris : Dunod, 2009.
- [37] Gregory beddeleem, « Antennes multistandards combinées à polarisations multiples pour les applications spatiales », Université Nice Sophia Antipolis, 2008
- [38] Chouti Leila, « caractérisation d'une antenne microbande couplée par une ouverture de forme rectangulaire. Application à la réalisation d'une antenne multi bande », 2018
- [39] Alaeddine al-fawal, « conception et réalisation de réseaux d'antennes pour les mesures de propagation et de transmission application aux réseaux de communication sans fil UMTS », WLAN, WLL ET HIPERLAN/2 2001

- [40] D. Khedrouche, « Modélisation des antennes microbandes par une analyse tridimensionnelle rigoureuse en utilisant une méthode intégrale », Thèse de Doctorat, Université de Constantine, 06/ 2009.
- [41] Mourad HASSAD, « Modélisation d'une antenne patch réalisée sur un substrat à tenseurs de permittivité et de perméabilité diagonaux », Université de Batna, 2009
- [42] Rich Miron, « Planar Inverted-F Antennas (PIFA) », Note technique ProAnt, 23 aout 2016
- [43] D. Gorodetsky, « An investigation of on-chip antenna characteristics related to energy Harvesting applications », Thèse de master présentée à l'université de Pittsburgh, United States, 2002.
- [44] Z. Harouni, « Conception et caractérisation d'une antenne à double polarisation Circulaire à 2.45 GHz », Thèse de doctorat de l'université Paris-Est et de la faculté des Sciences de Tunis, Tunisie, 2011.
- [45] M. Ammann, « Design of rectangular microstrip patch antennas for the 2.4 GHz Band », Applied Microwave & Wireless, vol. 9, no. 6, 24 - 34, and 1997.
- [46] V. Azman, « Conformal antenna arrays for 3G cellular base stations », Thèse de Doctorat présentée à l'université de Queensland Brisbane, Australia, 2002.
- [47] S. Singh, N. Agarwal, N. Nitin and A. K. Jaiswal, « Design consideration of microstrip patch antenna », International Journal of Electronics and Computer Science Engineering, vol. 2, no. 1, 306–316, 2013.
- [48] M. T. Kawser, « Investigation of a novel dual band micro-strip/ waveguide hybrid antenna element », thèse de master présentée à l'institut polytechnique de Virginia, United States, 2005.
- [49] B. Mekimah, « Etude du fonctionnement en mode bi fréquence des patchs micro-bandes empilés et excentrés », Mémoire de magister présenté à l'université Kasdi Merbah Ouargla, Algérie, 2007.
- [50] J. George, C. Aanandan, P. Mohanan, and K. Nair, « Analysis of a new compact micro-strip antenna », Antennas and Propagation, IEEE Transactions on, vol. 46, no. 11, pp. 1712–1717, Nov 1998.

- [51] B. Belentepe, "Modeling and design of electromagnetically coupled micro-strip patch Antennas and antenna arrays", IEEE Antennas and Propagation Magazine, vol. 37, no. 1, 31–39, 1995.
- [52] Y. Tighilt, "Identification des antennes micro-rubans multicouches par la méthode spectrale et les réseaux de neurones", Thèse de doctorat présentée à l'université de Sétif, Algérie, 2011
- [53] CHAABANE Abdelhalim « CONCEPTION D'UNE ANTENNE BIP LARGE BANDE A FORT GAIN », Thèse de doctorat présentée à l'université de Sétif, 2017
- [54] A. Fouque, « Contribution à la Conception d'un récepteur mobile faible coût et faible Consommation dans la bande Ku pour le standard DVB-S », Thèse de doctorat présentée à l'université de Bordeaux 1, France, 2012
- [55] D. M. Pozar, « Microstrip antennas », Proceedings of the IEEE, vol. 80, no. 1, 79–91, 1992.
- [56] A. Henderson, J. R. James, and C. M. Hall, « Bandwidth Extension Techniques in Printed Conformal Antennas », Military Microwaves, MM 86, pp. 329-334, 1986.
- [57] H. F. Pues and A. R. Van de Capelle, “An Impedance Matching Technique For Increasing The Bandwidth Of Microstrip Antennas”, IEEE Trans. Antennas Propagat., vol. AP-37, pp. 1345-1354, Nov. 1989.
- [58] J. J. Schuss, J. D. Hanfling, and R. L. Bauer, “Design Of Wideband Patch Radiator Phased Arrays”, in IEEE Antennas Propagation Symp. Dig., pp. 1220-1223, 1989.
- [59] D. M. Pozar, “A Microstrip Antenna Aperture Coupled to a Microstrip Line”, Electronics Letters, Vol. 21, pp.49-50, Jan 17, 1985.
- [60] A. Sabban, “A New Broadband Stacked Two-Layer Microstrip Antenna”, in IEEE Antennas and Propagation Symp. Dig., pp. 63-66, 1983.
- [61] R. Q. Lee, K. F. Lee, and J. Bobinchak, “Characteristics Of A Two-Layer Electromagnetically Coupled Rectangular Patch Antenna”, Electron. Lett. vol. 23, pp. 1070-1072, Sept. 1987.

- [62] C. H. Tsao, Y. M. Hwang, F. Kilburg, and F. Dietrich, "Aperture-Coupled Patch Antennas with Wide-Bandwidth and Dual Polarization Capabilities", in IEEE Antennas and Propagation Symp. Dig., pp. 936-939, 1988
- [63] A. Ittipiboon, B. Clarke, and M. Cuhaci, "Slot-Coupled Stacked Microstrip Antennas", in IEEE Antennas and Propagation Symp. Dig., pp. 1108-1111, 1990.
- [64] J.-F. Zurcher, "The SSFIP: A Global Concept for High Performance Broadband Planar Antennas", Electron. Lett., vol
- [65] F. Croq, A. Papiernik, and P. Brachat, "Wideband Aperture Coupled Micro-strip Subarray", in IEEE Antennas and Propagation Symp. Dig., pp. 1128-1131, 1990.
- [66] N. K. Das and D. M. Pozar, "Analysis And Design Of Series-Fed Arrays of Printed Dipoles Proximity Coupled to a Perpendicular Micro-strip line", IEEE Trdns. Antennas Propagat. vol. 37, pp. 43.5444, Apr. 1989.
- [67] H. Y. Yang, N. G. Alexopoulos, P. M. Lepeltier, and G. J. Stem, "Design Of Transversely Fed Emc Micro-strip Dipole Array Including Mutual Coupling", IEEE Trans. Antennas Prooarrat.. 1" I vol. 38, pp. 145-151: Fe. 1990.
- [68] C. Wu, J. Wang. R. Fralich, and J. Litva. "Study on A Series-Fed ~~ Aperture-Coupled Microstrip Patch Array," in IEEE Antennas and Propagation Symp. Dig., pp.1762-1765, 1990.
- [69] Adil Kamil « conception d'une antenne patch ultra-large bande (3.1 GHz-10.6 GHz) », thèse de pour l'obtention du grade du Maitre ès sciences Université du Québec, 2011.
- [70] Chouti leila, « Contribution à l'étude d'antennes imprimées rectangulaires double bande et multi bandes tenant compte de l'effet de couplage. », Thèse de magister .Université Mentouri-Constantine,20

