

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
UNIVERSITE ABOU BEKR BELKAID -TLEMCEM -
جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان -
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE TELECOMMUNICATIONS



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme**

de **MASTER** en :

Télécommunication

Spécialité : Réseaux et Télécommunications (RT)

Par : **MANSOUR Ines** & **MESSAOUDI Mostefa**

THEME

Etude et conception d'une antenne à Ondes millimétriques pour des réseaux 5G

Soutenue, le 07/07/2021, devant le jury composé de :

Mr. BOUACHA Abdelhafid

Prof.

Univ. Tlemcen

Directeur de memoire

Mr. KHELLADI Mounir

MCA

Univ. Tlemcen

Président

Mme. BOUSALAH Faiza

MCB

Univ. Tlemcen

Examinatrice

Année universitaire : 2020-2021

REMERCIEMENT

Ce travail de mémoire a été effectué au Laboratoire de Télécommunications, Département de télécommunications (TTL) de la Faculté de Technologie de l'Université Abou-Bekr-Belkaïd Tlemcen.

Cette recherche s'est réalisée grâce au soutien et à l'encouragement de plusieurs personnes qui ont contribué chacune à leur façon à l'atteinte de l'objectif que constitue le dépôt de ce mémoire. Nous tenons à leurs adresser un très grand merci.

Avant toute chose, nous remercions Dieu tout Puissant, miséricordieux et clément, pour nous avoir donné santé, patience, Volonté et courage.

Nous tenons aussi à remercier nos chères familles pour leur soutien, leur engagement et leur amour inconditionnel.

Nous voudrions exprimer par ce modeste travail notre gratitude, notre reconnaissance, et nos grands remerciements à notre encadrant, Mr « **BOUACHA Abdelhafid** », Maître de conférences à l'Université Abou-Bekr-Belkaid-Tlemcen, pour nous avoir proposé ce sujet et pour nous avoir fait bénéficier de ses compétences scientifiques, aussi pour sa disponibilité et sa gentillesse.

Nous remercions très sincèrement tout particulièrement les membres de jury qui ont accepté d'évaluer et juger notre travail.

Nous exprimons notre gratitude à tous les professeurs et enseignants qui ont collaborés à notre formation durant notre cursus universitaire à l'Université Abou-Bekr-Belkaïd-Tlemcen

Enfin, nous ne voudrions pas oublier de remercier toute personne qui nous aidions de loin ou de près à réaliser ce travail.

Dédicace

Je dédie ce travail :

A mes chers parents, pour tous leurs sacrifices,
leurs amours, leurs tendresses, et leurs prières tous
au long de mes études,

A mes sœurs Feriel, Djihane, Widad

Et mon petit frère Mustapha

A toute ma famille pour leurs soutiens tout au long
de mon parcours universitaire,

A tous mes chères amis (e)

Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux,
et le fruit de votre soutien infaillible.

Merci d'être toujours là pour moi.

Ines

Dédicace

Je dédie ce travail :

A la lumière de ma vie, mes très chers parents, en témoignage et en gratitude de leur dévouement et leurs sacrifices illimités durant toutes mes années d'études, leur réconfort moral et tous les efforts qu'ils ont consentis pour mon éducation et mon instruction pour me voir réussir un jour.

Aucun hommage ne pourrait être à la hauteur du soutien qu'ils m'ont donné.

Que Dieu les gardes.

A mes chers frères : Housseem & Anes.

A toute ma famille.

A tous mes chères amis (e).

Merci à vous.

Mostefa

Résumé

Ces dernières années, les antennes ont suscité un grand intérêt chez les chercheurs de l'industrie des télécommunications, notamment pour les applications 5G.

Ce travail s'inscrit dans ce contexte, avec l'objectif principal de concevoir et simuler une antenne élémentaire qui réponde aux exigences de la 5G.

Tout d'abord, nous donnons un aperçu de la technologie 5G, puis nous présentons les antennes patch d'une manière générale, leur technologie d'alimentation et leurs caractéristiques.

Enfin, nous avons utilisé le logiciel CST pour simuler une antenne imprimée alimentée par une ligne microruban. Des études paramétriques ont été menées pour comprendre l'influence de divers paramètres afin de produire une structure finale efficace.

Mots-clés : cinquième génération (5G), bande d'ondes millimétriques, antenne patch, CST microwave studio.

Abstract

In recent years, antennas have aroused great interest among researchers in the telecommunications industry, especially for 5G applications.

This work is part of this context, with the main objective of designing and simulating an elementary antenna that meets the requirements of 5G.

First, we give an overview of 5G technology, then we present the patch antennas, their power technology, and their characteristics.

Finally, we used the CST software to simulate a printed antenna fed by a microstrip line. Parametric studies were carried out to understand the influence of various parameters to produce an efficient final structure.

Keywords: fifth generation (5G), millimeter wave band, patch antenna, CST microwave studio.

الملخص

في السنوات الأخيرة أثارت الهوائيات اهتمامًا كبيرًا بين الباحثين في صناعة الاتصالات وخاصة لتطبيقات الجيل الخامس

موضوع هذا البحث هو تصميم ومحاكاة هوائي التطبيقات المتنقل من الجيل الخامس

أولاً، نقدم لمحة عامة عن تقنية الجيل الخامس ثم نقدم هوائيات التصحيح بشكل عام مع تقنياتها وخصائصها

استخدمنا في هذا البحث برنامج CST لمحاكاة هوائي مطبوع يتم تغذيته بواسطة خط الشريط الصغير. أجريت دراسات بارامترية لفهم تأثير العوامل المختلفة من أجل إنتاج بنية نهائية فعالة.

الكلمات المفتاحية: الجيل الخامس (G5)، نطاق الموجة المليمترية، هوائي التصحيح، استوديو الميكروويف CST.

Sommaire

I.	Table des figures	I
II.	Liste des tableaux	III
III.	Liste des abréviations	IV
IV.	Introduction générale.....	1
Chapitre 1.	Aspect général de la 5G	3
1.1	Introduction	3
1.2	Historique de l'évolution : de la 1G à la 5G	3
1.3	Cahier de charge de la 5G.....	6
1.4	Solutions envisagées pour la 5G.....	10
1.5	Bandes de fréquences pour la 5G.....	11
1.6	Technologies émergentes pour les réseaux 5G	12
1.6.1	Bandes millimétriques	12
1.6.2	Antennes 5G	13
1.6.3	Modulation	16
1.6.4	Duplexage.....	16
1.7	Conclusion.....	17
Chapitre 2.	Antenne imprimée pour la 5G	18
2.1	Introduction	18
2.2	Historique	18
2.3	Description des Antennes Imprimées	19
2.4	Mécanisme de rayonnement	21
2.5	Avantages et inconvénients	23
2.5.1	Avantage.....	23
2.5.2	Inconvénients.....	23
2.6	Applications des Antennes Imprimées.....	24
2.7	Caractéristiques des Antennes Imprimées	24
2.7.1	L'impédance d'entrée de l'antenne	24
2.7.2	Coefficient de réflexion	25
2.7.3	Rapport d'onde stationnaire (ROS)	26
2.7.4	La directivité.....	26
2.7.5	Le gain	26
2.7.6	Diagramme de rayonnement	27
2.7.7	Fréquence de résonance et bande passante.....	28
2.8	Techniques d'alimentation d'une antenne imprimée	29
2.8.1	Alimentation par ligne microruban	29
2.8.2	Alimentation par sonde coaxial.....	30
2.8.3	Alimentation par fente	31
2.8.4	Alimentation par guides d'ondes coplanaires	31

2.9	Antenne dans la Bande Millimétrique	32
2.10	Conclusion.....	33
Chapitre 3. Conception et simulation		34
3.1	Introduction	34
3.2	Description du logiciel de simulation CST	34
3.3	Géométrie de l'antenne élémentaire	36
3.3.1	Etapas de conception de l'antenne	37
3.4	Résultats et discussions.....	38
3.5	Comparaison avec un article de recherche	46
3.6	Conclusion.....	47
Conclusion générale.....		48
V.	Bibliographie.....	VII

Table des figures

Figure 1.1: Évolution des réseaux mobiles [1]	4
Figure 1.2: Exemple d'appareil 1G	5
Figure 1.3: Logo du standard 5G	6
Figure 1.4: Les trois cas d'utilisation de la 5G.....	8
Figure 1.5: Comparaison entre la 4G et la 5G au niveau des KPI	10
Figure 1.6: Solutions envisagées pour les réseaux 5G.	11
Figure 1.7: Les bandes qui peuvent être utilisées par la 5G.....	12
Figure 1.8: Bandes millimétriques pour la 5G.	13
Figure 1.9: Illustrations à gauche d'une antenne 64T64R constituée de 192 éléments rayonnants regroupés par groupe 3 et à droite d'une antenne 32T32R constituée de 128 éléments rayonnants regroupés par groupe de 4.....	14
Figure 1.10: Illustration de la technique MIMO (Multiple Input Multiple Output).	15
Figure 1.11: Illustration du Beamforming.	15
Figure 2.1: Structure de base d'une antenne imprimée.	20
Figure 2.2: Différentes formes d'antennes patch.	21
Figure 2.3: Mécanisme de rayonnement des antennes imprimées. [11]	21
Figure 2.4: Impédance d'entrée	25
Figure 2.5: Exemple de diagramme de rayonnement.	27
Figure 2.6: Illustration de la bande passante à -10 dB d'une antenne.	28
Figure 2.7: Alimentation par ligne microruban.	30
Figure 2.8: Alimentation par sonde coaxiale.....	30
Figure 2.9: Alimentation par fente.....	31
Figure 2.10: Alimentation par guides d'ondes coplanaires.	32
Figure 3.1: CST DESIGN STUDIO suite.....	35
Figure 3.2: Illustration de la géométrie de l'antenne élémentaire.....	36
Figure 3.3: Conception d'une structure sous CST.	37
Figure 3.4: L'antenne avec ces deux encoches.....	38
Figure 3.5: L'antenne avec la première fente en forme T.	39
Figure 3.6: le coefficient de réflexion de l'antenne après l'ajout de la première fente.	39
Figure 3.7: L'antenne avec la deuxième fente en forme T.	40
Figure 3.8: le coefficient de réflexion de l'antenne après l'ajout de la deuxième fente.	40
Figure 3.9: L'antenne conçue avec l'introduction d'une troisième fente.	41

Figure 3.10: le coefficient de réflexion S11 de l'antenne après l'ajout de la troisième fente.....	41
Figure 3.11: La bande passante et le coefficient de réflexion après l'augmentation de la valeur de la hauteur de substrat hs	42
Figure 3.12: l'antenne conçue avec une fente au niveau de plan de masse.....	42
Figure 3.13: le coefficient de réflexion S11 de l'antenne conçue après l'ajout de la fente dans le plan de masse.	43
Figure 3.14: Diagramme de rayonnement polaire de l'antenne à 28 GHz pour	44
Figure 3.15: Diagramme de rayonnement polaire de l'antenne à 45 GHz pour (a) le plan E et (b) le plan H.....	45
Figure 3.16: le diagramme de rayonnement de l'antenne à 28 GHz en 3D.	46
Figure 3.17: le diagramme de rayonnement de l'antenne à 45Ghz en 3D.	46

Liste des tableaux

Tableau 1-1 : Indicateurs de performance de la 5G.....	9
Tableau 3-1: Paramètres optimisées de l'antenne.	38
Tableau 3-2 : Comparaison avec la référence [28]	47

Liste des abréviations

IOT: Internet of Things.
AMPS: Advanced Mobile Phone System.
TACS: Total Access Communication System.
ETACS: Extended Total Access Communication System.
GSM: Global System for Mobile Communications.
SMS: Short Message Service.
GPRS: General Packet Radio Services.
EDGE: Enhanced Data Rates for the GSM Evolution.
MMS: Multimedia Messaging Service.
UMTS: Universal Mobile Telecommunications System.
HSPA: High Speed Packet Access.
HSPA+: High Speed Packet Access plus.
LTE: Long Terme Evolution.
OFDM: Orthogonal frequency-division multiplexing.
UIT: Union international des télécommunications.
uRLLC : ultra Reliable Low latency Communication.
KPI: Key Performance Indicator.
UMT-2020: International Mobile Télécommunications-2020.
CDMA: Code Division Multiple Access.
TDMA: Time Division Multiple Access.
FDMA: Frequency Division Multiple Access.
OFDMA: Orthogonal Frequency-Division Multiple Access.
FFT: Fast Fourier Transform.
IFFT: Inverse Fast Fourier Transform.
CP: Cyclic Prefix.
GFDM: Generalized Frequency Division Multiplex.
UFMC: Universal Filtered Multicarrier.
FBMC: Filter Bank Multicarrier.
eMBB: Enhanced Mobile Broadband.
mMTC : massive Machine Time Communication.
IP: Internet Protocol.

IMT: International Mobil Télécommunication.
1G: Première Génération.
2G: deuxième Génération.
3G: Troisième Génération.
4G: quatrième Génération.
5G: cinquième Génération.
MIMO: Massive Multi Input Multi Output.
Massive MIMO: Massive Multi Input Multi Output.
RAN: Radio access network.
RF: Radio Frequency.
SNR: Signal to noise ratio.
WIMAX: Worldwide interoperability for microwave access.
2D et 3D: Deux et trois dimensions.
BP: Bande Passante.
 α : Coefficient d'atténuation.
 γ : Constante de propagation.
 η : Rendement de surface en fonction de la répartition de champ.
 β : Constante de phase.
 ϵ_r : permittivité relative.
 ϵ : Permittivité diélectrique.
 λ : Longueur d'onde.
 ω : La pulsation de résonance.
 f_c : Fréquence de coupure.
 f_r : Fréquence de résonance.
 P_r : Puissance rayonnée.
 P_f : Puissance fournie.
 Q : Facteur de qualité.
 R : Résistance.
ROS : Rapport d'ondes stationnaires.
VSWR: Voltage Standing Wave Ratio.
FIT: FiniteIntegration Technique.
HF: Hautes Fréquences.
EM: électromagnétique.

CST: Computer Simulation Technology.
HFSS: High Frequency Structure Simulator.
dB: decibel par rapport à l'antenne isotropique.
W: Largeur du patch.
h: Épaisseur du substrat.
L: Longueur réelle de l'élément de rayonnement.
L_{eff}: Longueur effective du patch.
E: Champ électrique.
H: Champ magnétique.
S₁₁ (dB): Coefficient de réflexion (dB).
S₁₂ (dB): Coefficient d'Isolation (dB).
S₂₁ (dB): Coefficient de transmission (dB).
S₂₂ (dB): Coefficient de réflexion (dB) à la sortie.
Z₀: Impédance caractéristique de la ligne.
Z_{in}: Impédance d'entrée de l'antenne.
Ge: Gain de l'antenne d'émission.
Gr: Gain de l'antenne de réception.

Introduction générale

Ces dernières années, nous assistons à un développement exponentiel de nouvelles applications et technologies dans les domaines de la santé, des médias, de l'industrie, du transport, de l'énergie etc.... Cette évolution va de pair avec l'apparition de nouveaux services liés à une multiplication des objets connectés, on prévoit une explosion du nombre d'objets connectés.

Cette augmentation nécessite de nombreux progrès sur les systèmes de télécommunications mobiles. Le réseau 4G utilisé actuellement, dont le spectre de fréquence est assez surchargé ne peut pas répondre à ces exigences. Cela justifie le passage à une la nouvelle génération de réseaux mobile qui est la 5G.

La nouveauté de la 5G réside dans la grande diversité des services qui sont envisagés, on va avoir non seulement le service classique de téléphonie et de transfert de fichiers mais également tout ce qui est villes intelligentes systèmes de transport intelligents etc..., cette dernière permet aussi une forte réduction de temps de latence et l'augmentation des débits.

Face à ces exigences, la cinquième génération doit combiner plusieurs technologies pour disposer d'un réseau mobile à la hauteur des attentes. Parmi ces technologies, on peut citer : l'utilisation des Small Cells, les techniques de Beamforming ainsi que l'exploitation des ondes millimétriques en utilisant des fréquences supérieures à 6 GHz. En raison de leurs courtes longueurs d'ondes les fréquences millimétriques favorisent l'intégration de centaines d'éléments rayonnants dans les stations de base.

Dans ce contexte, le développement et la conception de nouvelles antennes qui répondent aux exigences de la 5G, restent un passage obligatoire pour la mise en œuvre de cette norme.

Le travail mené dans le cadre de ce mémoire s'inscrit dans ce contexte. Notre objectif consiste à concevoir et simuler une antenne imprimée qui réponde au cahier des charges de la 5G, notamment, des fréquences de résonnances dans la bande millimétrique ainsi qu'une bande passante qui dépasse les 800 MHz.

Pour ce faire, nous nous basons sur la théorie des antennes afin de déterminer les paramètres géométriques de notre antenne et nous utilisons le logiciel CST MICROWAVE STUDIO (Computer Science Technology) comme outil de simulation pour notre travail.

Ce manuscrit est structuré comme suit :

Le premier chapitre présente les aspects généraux de la technologie de communication 5G. Pour cela, nous présentons un bref historique de l'évolution des normes de la téléphonie mobile de la 1ère génération à la 5ème génération, puis les solutions envisagées pour la 5G et les bandes de fréquences utilisées. Enfin, les technologies clés pour les réseaux 5G.

Le deuxième chapitre est consacré aux généralités sur les antennes microruban. Nous commençons par la description des antennes patches, leur principe de fonctionnement et leurs différentes techniques d'alimentation. Après, nous évoquerons les avantages, les inconvénients et les applications de ces antennes. Par la suite, les caractéristiques des antennes patch telles que le coefficient de réflexion, le gain, le diagramme de rayonnement, etc... sont présentées.

Le troisième chapitre commence par une simple description du logiciel CST MICROWAVE STUDIO (Computer Science Technology) utilisé dans notre travail, suivi par une présentation des différents modules à réaliser ainsi que la définition du cahier des charges pour l'élaboration de notre étude. Nous présentons, aussi, dans ce chapitre la structure finale proposée ainsi que les résultats obtenus et leurs comparaison avec un article de la littérature.

Enfin, le manuscrit se termine par une conclusion générale.

Chapitre 1. Aspect général de la 5G

1.1 Introduction

La 5G c'est la cinquième génération de réseau mobile, elle s'agit d'une nouvelle norme mondiale sans fil qui ne s'intéresse pas uniquement à l'accroissement des débits et la réduction de temps de latence mais elle offre également une plus grande capacité de connexion plus de personnes pourront se connecter au même temps. Cette capacité de connexions permettrait la mise en œuvre de technologies avancées telle que l'IOT (Internet of Things), qui est une technologie qui fournit des informations en temps réel a des applications à partir d'objets intelligents, ou encore le Network Slicing, qui veut dire la capacité de découper le réseau de façon virtuelle pour adapter la bande passante à chaque utilisation.

Dans ce chapitre nous présentons l'aspect général de la 5 G. Dans ce contexte, un bref historique de l'évolution des réseaux mobiles à partir de la première génération (1G) jusqu'à la cinquième génération (5G) est donné. Dans cette même partie nous allons présenter le cahier de charge de la 5G et les différentes catégories d'usages de ce futur système de communications. La deuxième partie sera consacrée à la description des solutions envisagées pour la 5 G et les bandes de fréquences utilisées. Enfin, dans la dernière partie nous allons parler des Technologies émergentes pour les réseaux 5G.

1.2 Historique de l'évolution : de la 1G à la 5G

La première génération de téléphonie mobile sans fil est apparue dans les années 1980. Depuis l'évolution n'a pas cessé et on présente une nouvelle génération environ chaque 10 ans. La figure 1.1 illustre cette évolution.

Première génération (1G) : C'est la première génération de réseaux mobiles et elle est dédiée uniquement aux appels vocaux. Les réseaux mobiles 1G étaient des réseaux dits analogiques c'est à dire que le signal électrique correspondant à la voix récupéré à la sortie de micro était directement transformé en ondes envoyées sur le réseau.

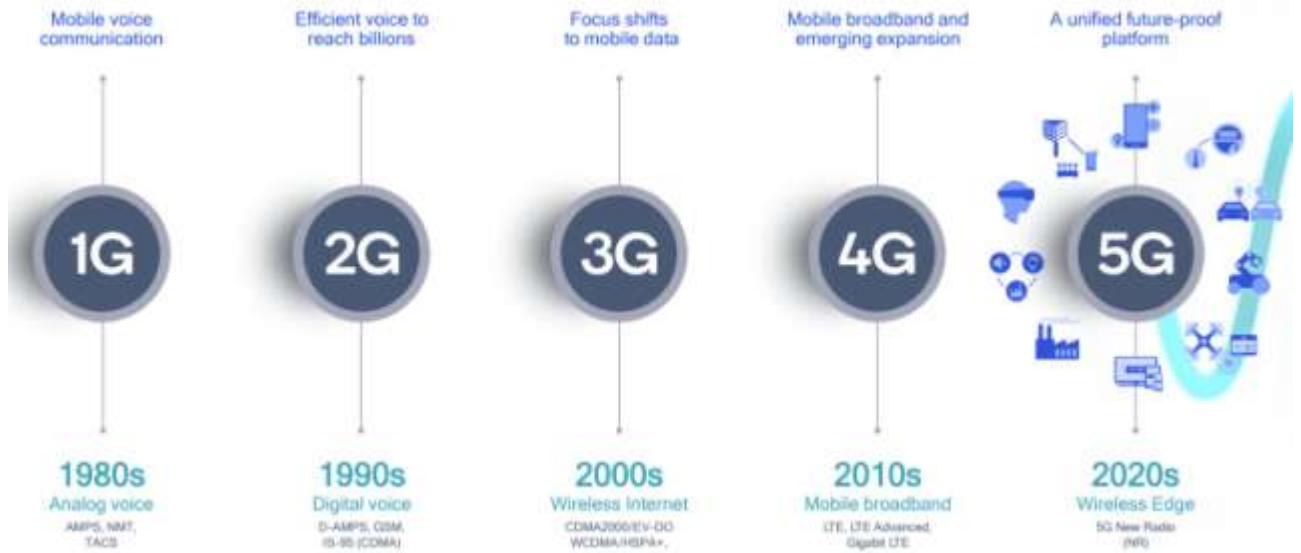


Figure 1.1: Évolution des réseaux mobiles [1]

Apparu en 1976 aux États-Unis, l'AMPS (Advanced Mobile Phone System) constitue le premier standard réseau cellulaire utilisé principalement en Outre-Atlantique, en Russie ainsi qu'en Asie. Il était facile de pirater ce système puisqu'il possédait de faibles mécanismes de sécurité rendant le piratage des lignes téléphoniques plus propices. [2]

La TACS (Total Access Communication System) est la version européenne du modèle AMPS cité ci-dessus. Ayant une bande de fréquence plus performante (900MHz), ce système fut plus utilisé notamment dans l'Angleterre, puis en Asie (Hong-Kong et Japon). [2]

Par la suite en 1983, l'ETACS (Extended Total Access Communication System) une version améliorée du standard TACS et de l'AMPS a été développée au Royaume-Uni utilisant un nombre plus important de canaux de communication. [2]

Les Limitations de la première génération étés multiples. Le service de communication mobile était médiocre et très couteux, et les réseaux cellulaires n'étaient pas en mesure d'interagir entre les pays et il n'y avait pas de roaming¹ vers l'international.

¹ Est la faculté pour l'abonné d'un réseau de téléphonie mobile de pouvoir téléphoner et échanger des données via le réseau de téléphonie mobile d'un autre opérateur, aussi bien pour un appel entrant que pour un appel sortant [<https://fr.wikipedia.org>].



Figure 1.2: Exemple d'appareil 1G

La deuxième génération (2G) : La 2G est apparue dans les années 80 avec la norme GSM qui a un mode de fonctionnement numérique, ce mode a permis d'améliorer considérablement la qualité de la voix et la capacité des réseaux. Le principe du GSM est d'utiliser une fréquence pour transmettre plusieurs communications (FDMA : Frequency Division Multiple Access) et en divisant le temps en différentes tranches chaque tranche supportant une communication (TDMA : Time Division Multiple Access) donc elle utilise une méthode d'accès multiple hybride le FDMA et le TDMA. Le GSM utilise les bandes de fréquences 900 MHz et 1800 MHz en Europe avec un débit maximale de 9.6 Kbps, et elle ne permet comme service que la téléphonie et l'échanges de SMS. La norme GSM a ensuite été étendue au GPRS et EDGE.

Le GPRS (General Packet Radio Service) ou **2.5G**, permet dans la pratique des débits de 20 kb/s qui pouvaient servir à charger des légères page web de l'époque ou encore envoyer des MMS.

Le EDGE (Enhanced Data Rates For The GSM Evolution) ou **2.75G**, est une évolution du GPRS qui permet d'atteindre un débit de 384 Kbits/s. C'est une technologie de transmission de données utilisée comme transition vers la troisième génération (3G).

La troisième génération (3G) : Dès les années 90 une nouvelle spécification a été prévu pour permette d'avoir des débits plus élevés, c'est **UMTS** (Universal Mobile Télécommunication System). La technologie utilisée pour l'UMTS est assez particulière elle repose sur le multiplexage par codes dit CDMA (Code Division Multiple Access). Ces réseaux ont été déployés à partir de 2000, 2003 et sont encore opérationnelles. L'accès qui est possible au réseau IP se fait typiquement à 1Mbps.

Le High Speed Packet Access (HSPA : 3.5G) : C'est l'évolution de la 3G. En HSPA le débit atteint 10 Mbps, en utilisant une nouvelle modulation.

Le High Speed Packet Access plus (HSPA+ : 3.75G) : c'est une évolution du HSPA permettant encore de meilleurs débits pouvant cette fois-ci monter jusqu'à 21 Mbps. Ces débits sont obtenus que dans des conditions optimales à côté de l'antenne. Les débits réels obtenus en HSPA et HSPA+ tournent le plus souvent entre 3 et 10 MBPS.

La quatrième génération (4G LTE) : Un réseau 4G se base sur la transmission de paquets IP depuis un terminal mobile vers un serveur fixe ou mobile. Le seul service fourni en 4G est donc un accès IP à haut débit, On peut monter jusqu'à 100 Mbps. Le type d'accès sur la voie radio repose sur l'OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiple Access). L'intérêt de l'OFDM est qu'il permet d'avoir un lien haut débit par la transmission de plusieurs débits moyens d'une manière parallèle.

La 4G+ : C'est une évolution de la 4G permettant à un d'utiliser plusieurs bandes de fréquences simultanément afin d'augmenter les débits, cela permet d'atteindre en situation réelle des débits montants de plus de 150 Mbps.

La cinquième génération 5G : C'est une nouvelle norme sans fil qui arrive après les réseaux 1G, 2G, 3G, 4G, elle permet un nouveau type de réseau conçu pour connecter pratiquement tout le monde et tout, y compris les machines, les objets et les appareils.

La 5G offre un débit plus élevé et une latence ultra faible elle permet d'améliorer considérablement la couverture et la réactivité des réseaux sans fil.



Figure 1.3: Logo du standard 5G

1.3 Cahier de charge de la 5G

La 5G n'est pas seulement un réseau sans fil mais un moyen de répondre aux besoins d'une société ultra connectés. L'objectif dans le système 5G est d'être capable de favoriser des nouveaux scénarios de déploiement pour répondre à des segments

de marché très divers.

Les cas d'usage de la 5G se définissent par l'UIT (sous le terme IMT- 2020) selon les trois catégories suivantes :

- **L'eMBB (enhanced Mobile Broadband) :** ce sont des communications mobiles très haut débit. Cet usage se trouve dans la continuité des précédentes générations de téléphonie mobile et permet de répondre à l'augmentation exponentielle de l'utilisation des données mobiles. [3] Les applications de cette catégorie sont typiquement des flux vidéo de qualité de plus en plus grande et aussi des applications de réalité virtuelle et augmentée. L'objectif est donc de pouvoir répondre à une demande toujours plus grande en termes de quantité de données et de vitesse de transfert.
- **Le mMTC (massive Machine Time Communication) :** ce sont les communications entre objets. L'internet des objets rentre dans cette catégorie. Il s'agit dans cette catégorie de pouvoir gérer un nombre très important de connexions (jusqu'à un million par kilomètre carré). La quantité de données à transmettre par communication est en général limitée et la rapidité de transfert peu contraignante. [3] Un domaine d'application typique est la ville intelligente avec des réseaux de capteurs pour gérer différents services.
- **L'uRLLC (ultra Reliable Low latency Communication) :** ce sont les communications dites critiques, pour lesquelles la fiabilité et le temps de réponse sont primordiaux. [3] L'application phare de cette catégorie est le véhicule autonome mais les communications des services de sécurité et d'urgence sont également concernées. Il ne doit pas y avoir d'échec ou de coupure de communication et la transmission doit être le plus rapide possible.

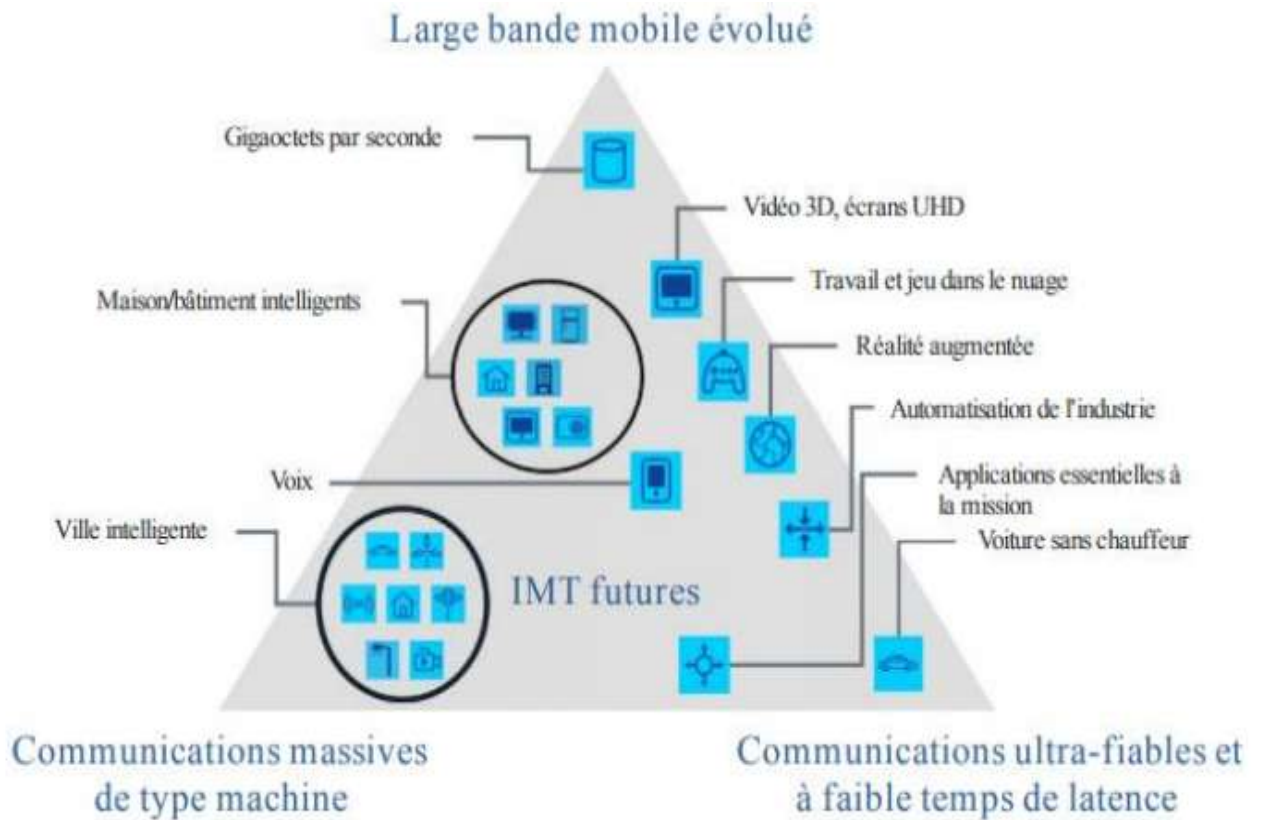


Figure 1.4: Les trois cas d'utilisation de la 5G

Ces trois catégories couvrent des usages très variés et reposent sur des critères de performances très ambitieux.

Afin de mettre en œuvre ces trois types d'usages, 8 indicateurs de performance (KPI - Key performance indicators) ont été établis par l'UIT pour préciser, quantifier et mesurer les caractéristiques de systèmes IMT-2020 (5G) :

Tableau 0-1: Indicateurs de performance de la 5G

Clé de Performances	Cas d'utilisation	5G
1. Débit maximal (crête) (Gbit/s)	eMBB	DL : 20 Gbps UL : 10Gbps
2. Débit aperçu par l'utilisateur (Mbit/s)	eMBB	DL : 100 Mbps, UL : 50 Mbps (Dense Urban)
3. Efficacité spectrale	eMBB	DL : 30 bps/Hz, UL : 15 bps/Hz
4. Mobilité (vitesse maximale) (km/h)	eMBB	500km/h
5. Latence (ms)	URLLC	1 ms for URLLC
6. Nombre d'objets connectés sur une zone (ou densité de connexion) (Quantité d'objets/km ²)	mMTC	1,000,000 devices/Km ²
7. Efficacité énergétique du réseau : (la quantité de bits d'information par unité de consommation d'énergie du module de communication (en bit/joule))	mMTC	Jusqu'à 100 fois moins énergivores
8. Débit sur une zone (capacité du réseau) (Mbit/s/m ²)	eMBB	DL : 10 Mbps/m ²

Le cahier des charges de la 5G prévoit ainsi des débits jusqu'à 10 fois supérieurs à ceux de la 4G notamment pour les applications très haut débit (eMBB), une latence (temps de réponse) de l'ordre de la milliseconde, soit 10 fois mieux que la 4G, pour les applications critiques (uRLLC) et un nombre accru d'objets connectés pour l'internet des objets (mMTC). [3]

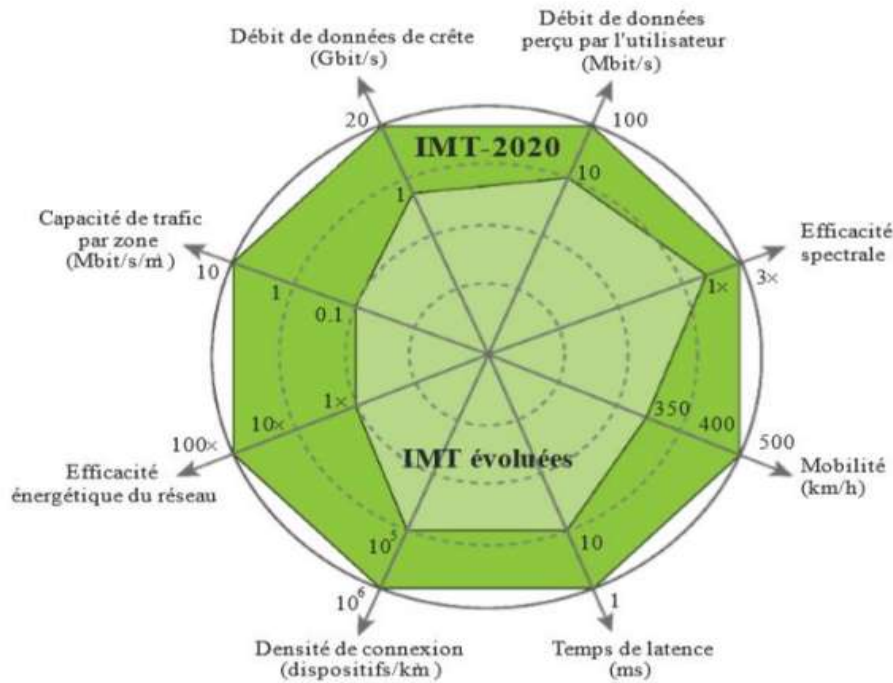


Figure 1.5: Comparaison entre la 4G et la 5G au niveau des KPI

1.4 Solutions envisagées pour la 5G

Pour atteindre les objectifs tracés pour la 5G, plusieurs technologies devront être mise en œuvre.

Pour répondre au besoin de capacité, il s'agira notamment d'accroître la variété des bandes de fréquences utilisées, en montant en fréquences pour disposer de largeurs de bandes plus grandes.

L'utilisation de bandes de fréquences de plus en plus hautes impose alors de revoir l'architecture des réseaux, on parle de densification et de réseau hétérogène. Pour compléter le réseau d'antennes actuelles de type « macro » à longue portée, des petites antennes de plus faibles portées seront installées pour densifier le réseau là où la demande sera la plus forte.

La montée en fréquences permet d'envisager l'emploi d'antennes complexes, constituées de multiples antennes élémentaires de plus petites dimensions. Pilotées par logiciel, ces plaques formées d'un nombre de plus en plus grand d'antennes élémentaires permettent de focaliser instantanément la puissance émise en n'importe quel point du secteur couvert. C'est le mMIMO (massive Multiple Input Multiple Output) qui permet notamment de cibler une zone plus étroite pour interagir avec un seul utilisateur pendant un court laps de temps grâce aux techniques de formation de faisceaux (Beamforming). [3]

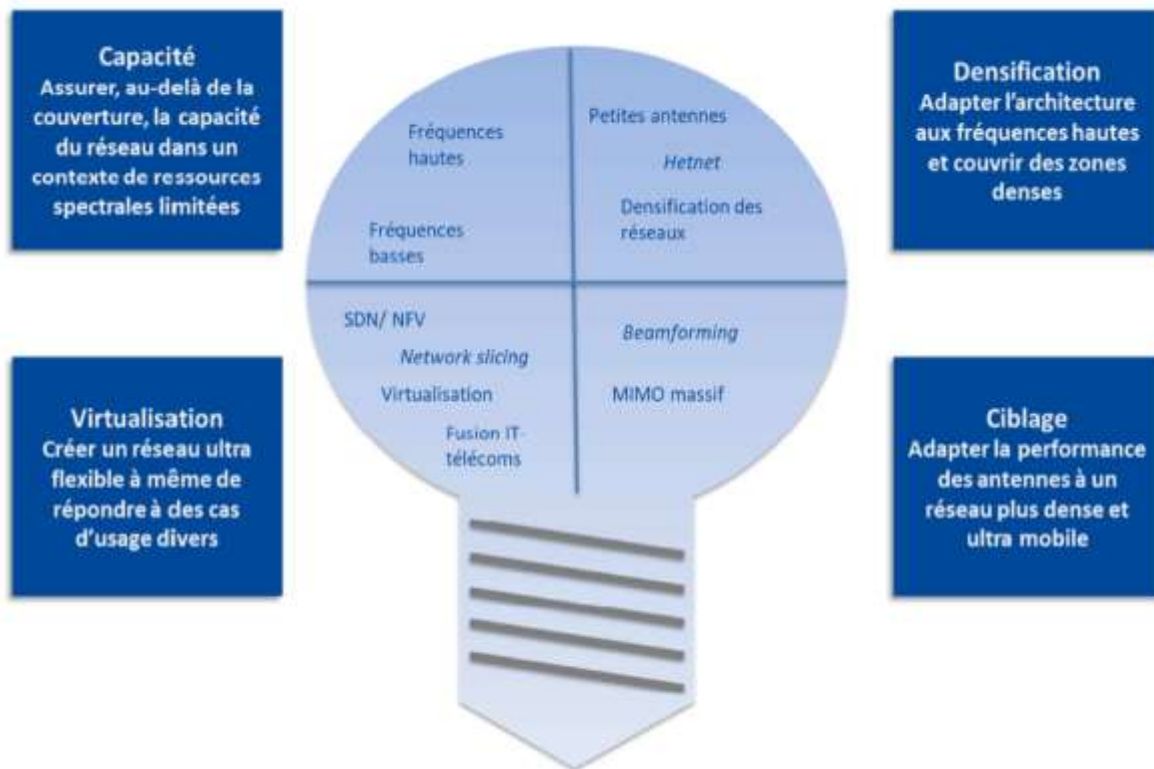


Figure 1.6: Solutions envisagées pour les réseaux 5G.

1.5 Bandes de fréquences pour la 5G

Le choix d'une bande de fréquence représente toujours un compromis entre couverture et capacité. Pour assurer une bonne couverture, les fréquences basses sont privilégiées car elles permettent d'avoir de bonnes conditions de propagation, elles ont une grande portée et une bonne pénétration à l'intérieur des bâtiments mais elles n'offrent pas un débit élevé. Pour augmenter la capacité, les fréquences hautes sont préférables car les largeurs de bandes disponibles y sont plus importantes, ce qui permet d'écouler plus de trafic. Cependant, les conditions de propagation sont plus difficiles à haute fréquence, car les hautes fréquences ont une forte atténuation dans les murs et une portée limitée, ce qui nécessite le déploiement d'un grand nombre d'antennes. [3]

Pour que la 5G soit disponible partout et assure une couverture large et permettre tous les cas d'utilisation, elle a besoin de fréquence dans trois bandes de fréquences :

- **Bandes basses (autour de 1Ghz) :** 700 MHz, 800 MHz, 900 MHz, 1.9 GHz et 2.6 GHz Ces bandes sont déjà utilisées pour les réseaux **2G**, **3G** et **4G**. La 5G les utilise pour assurer une bonne couverture car elles disposent d'une forte pénétration à l'intérieur des bâtiments, mais elles n'offrent pas une augmentation significative du débit. La portée de cette bande est de 500 m à 2 Km.

- **Bande cœur de la 5G (3.5 GHz)** : Représente un bon compromis entre le débit et la portée du signal et permettra d'éviter la saturation des réseaux actuels et répondre à la croissance et à la diversification des usages. La portée de cette bande est de 400 m à 800 m.
- **Bande millimétrique (> 26GHz)** : Ces bandes permettront d'augmenter la capacité et elles offrent un débit beaucoup plus important (jusqu'à 10 Gbps), mais leur portée est faible de 150 m à 200 m. Leur utilisation sera privilégiée en hotspot dans les gares, les centres commerciaux, les stades ou pour la communication entre objets connectés.

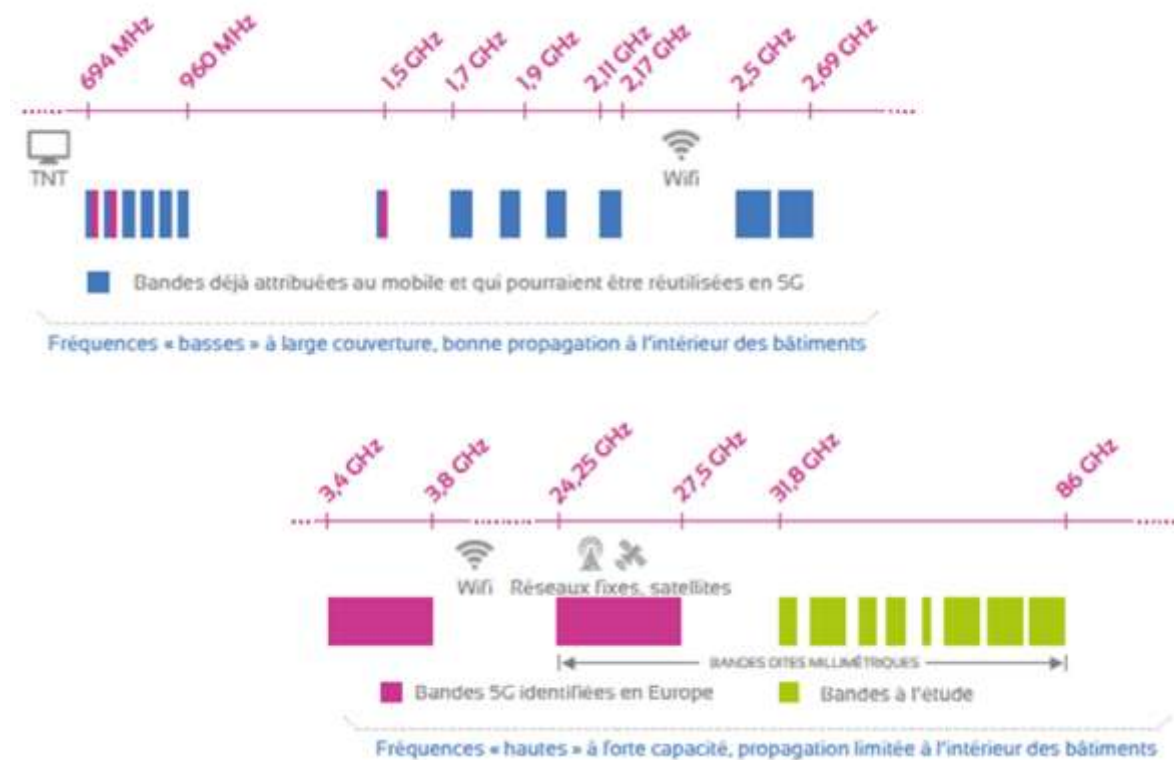


Figure 1.7: Les bandes qui peuvent être utilisées par la 5G.

1.6 Technologies émergentes pour les réseaux 5G

1.6.1 Bandes millimétriques

L'utilisation de bandes millimétriques constitue l'une des technologies de rupture de la 5G. Cette appellation correspond aux fréquences supérieures à 30 GHz qui n'ont encore jamais été prises en compte pour le déploiement des réseaux mobiles pour des raisons de maturité technologique et de qualité de propagation. Pour répondre à l'incessante augmentation des débits et des volumes de données échangés, il est nécessaire d'utiliser de nouvelles bandes disposant de très larges canalisations (plus de 100 MHz par utilisateur). [4]

Le spectre des ondes millimétriques comprend des fréquences de 30 à 300 GHz avec des longueurs d'onde de l'ordre du millimètre (de 1 à 10 mm).

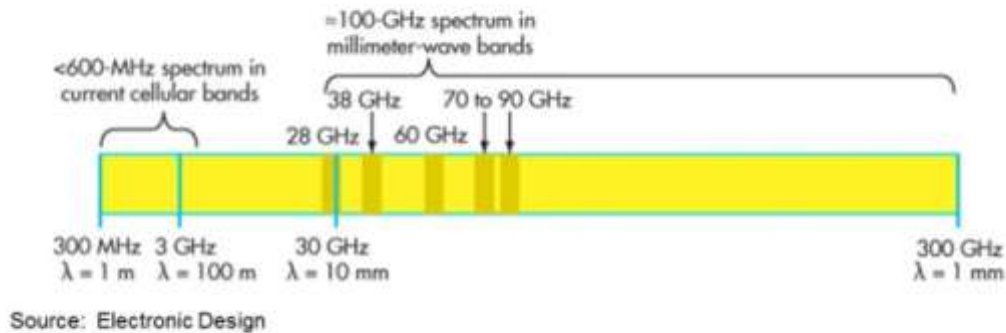


Figure 1.8: Bandes millimétriques pour la 5G.

Avantages des ondes millimétriques :

- La sécurité et la confidentialité sont meilleures en ondes millimétriques.
- La largeur de bande est plus grande ce qui permet d'atteindre des débits de données plus élevés

Inconvénients des ondes millimétriques :

- Coûts plus élevés dans la fabrication de matériel de plus grande précision en raison de composants de petite taille.
- A des fréquences extrêmement élevées, il y a une atténuation significative, donc les ondes millimétriques peuvent difficilement être utilisées pour des applications à longue distance.
- La puissance de pénétration des ondes millimétriques à travers des objets tels que les murs en béton est moindre.
- La capacité de diffraction est relativement faible.
- Il y a des interférences avec l'oxygène et les pluies à des fréquences plus élevées, c'est pourquoi des recherches supplémentaires, sont en cours pour réduire ces interférences.

1.6.2 Antennes 5G

Les antennes couramment utilisées pour les réseaux 2G, 3G et 4G sont des empilements verticaux de dipôles élémentaires. La taille d'un étage est conditionnée par la taille des dipôles élémentaires qui est de l'ordre de la moitié d'une longueur d'onde. A titre d'exemple, à 900 MHz (longueur d'onde de 33 cm), la taille d'un étage est ainsi d'environ 15 cm. En empilant typiquement une petite dizaine d'étages, le

rayonnement de ces antennes couvre une zone d'environ 65° d'ouverture horizontale et d'environ 10° d'ouverture verticale. La capacité de focalisation de ce type d'antenne, c'est-à-dire son gain, est typiquement de 17 dBi.

Les antennes 5G pour les bandes de fréquences déjà attribuées à la téléphonie mobile seront généralement semblables aux antennes existantes. En revanche, l'utilisation de bandes de fréquences plus hautes permet de construire des dipôles élémentaires de plus petites tailles, de l'ordre de 5 cm dans la bande 3 400 – 3 800 MHz (longueur d'onde médiane d'environ 9 cm) et de l'ordre de 0,5 cm dans la bande 26 GHz (longueur d'onde médiane d'environ 1,2 cm).

Les antennes 5G dans ces bandes de fréquences seront des réseaux deux dimensions comportant un grand nombre de dipôles élémentaires permettant de bénéficier de plusieurs émetteurs/récepteurs. Un émetteur/récepteur peut être soit une antenne élémentaire (également appelé élément rayonnant) soit un regroupement d'antennes élémentaires. Par exemple (Figure 1.9), une antenne 5G peut être constituée de 192 éléments rayonnants organisés sur 8 colonnes, 12 lignes et 2 polarisations croisées pour former 64 émetteurs/récepteurs (64T64R) en regroupant verticalement par trois les éléments rayonnants. [3]

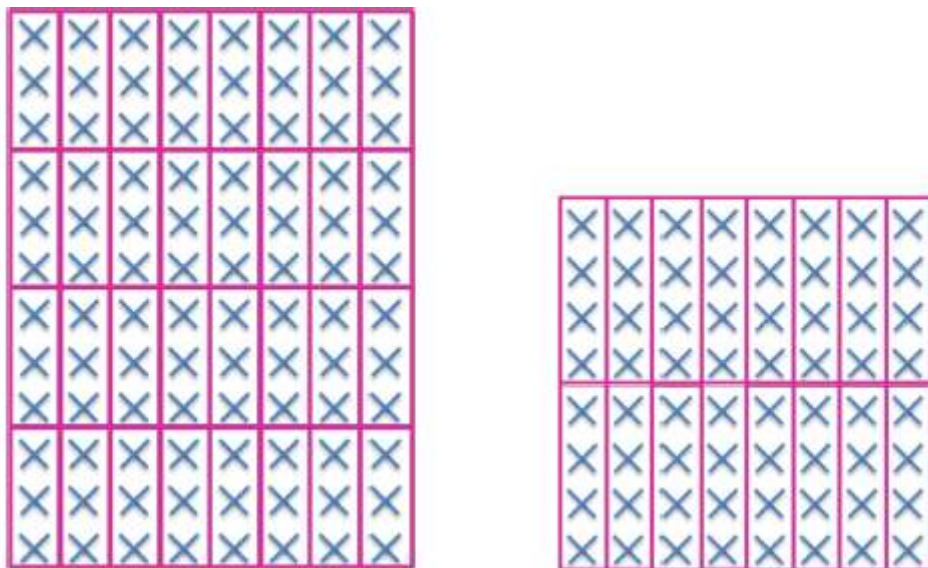


Figure 1.9: Illustrations à gauche d'une antenne 64T64R constituée de 192 éléments rayonnants regroupés par groupe 3 et à droite d'une antenne 32T32R constituée de 128 éléments rayonnants regroupés par groupe de 4.

Ce grand nombre d'émetteurs/récepteurs permet d'utiliser des techniques de massive MIMO « Multiple Input Multiple Output » et un contrôle beaucoup plus fin du rayonnement global de l'antenne. L'effet MIMO permet de profiter de la diversité spatiale du canal de propagation en envoyant plusieurs flux simultanés.

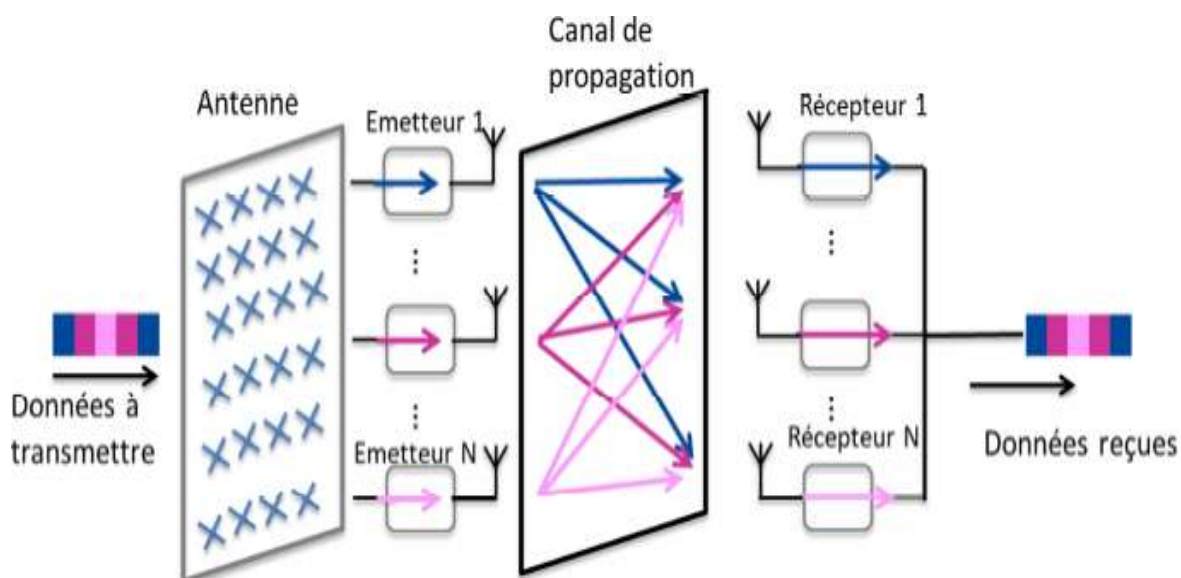


Figure 1.10: Illustration de la technique MIMO (Multiple Input Multiple Output).

Les antennes massives MIMO permettent également de focaliser le rayonnement de façon beaucoup plus efficace dans une direction donnée. Le gain des antennes 5G dans la bande (3 400 MHz - 3 800 MHz) est de l'ordre de 24 dBi, c'est-à-dire environ 5 fois plus que pour une antenne 2G-3G-4G classique. Le rayonnement est concentré dans un faisceau beaucoup plus fin qu'actuellement, c'est ce que l'on appelle le Beamforming ou antenne à formation de faisceaux. L'antenne pourra gérer indépendamment plusieurs faisceaux et les orienter dans la direction des utilisateurs. [3]



Figure 1.11: Illustration du Beamforming.

1.6.3 Modulation

L'OFDM et l'OFDMA sont les techniques de modulation et les stratégies d'accès multiple adoptées dans la quatrième génération (4G). [5] L'OFDM et l'OFDMA ont succédé à la CDMA, employé dans les réseaux de troisième génération (3G), pour plusieurs raisons telles que : la possibilité de réaliser une modulation multi-porteuse grâce à l'utilisation de blocs de transformée de Fourier (FFT) et de blocs de FFT inverse (IFFT), la capacité de diminuer les distorsions par trajets multiples, l'orthogonalité des sous-porteuses qui élimine l'interférence intercellulaire ; la possibilité d'adapter la puissance émise ; et la facilité d'intégration avec le matériel multi-antennes. [6]

Mais malgré tous, l'efficacité spectrale de l'OFDM est limitée par la nécessité d'un préfixe cyclique (CP) et par ses grands lobes secondaires, [7] et l'impossibilité d'avoir une synchronisation stricte des fréquences entre les sous-porteuses fait que l'OFDM et l'OFDMA ne sont pas vraiment des techniques orthogonales.

Les systèmes cellulaires de cinquième génération vont utiliser des nouvelles stratégies par rapport aux systèmes LTE existant tels que : l'adoption de petites cellules, l'utilisation d'ondes millimétriques (mm), le massive MIMO, le Beamforming, et le full duplex. [8]

Toutes ces stratégies seront influencées par le format de modulation utilisé dans la couche physique.

D'une autre part, les réseaux cellulaires 5G auront des exigences plus strictes que le LTE en termes de latence, d'efficacité énergétique et de débits de données, qui sont également influencés par le schéma de modulation adopté. [6]

Pour cela des nouvelles techniques de modulation et d'accès multiple sont utilisées dans la 5G tel que : la **GFDM** (Generalized Frequency Division Multiplex), **FBMC** (Filter Bank Multicarrier) ou encore l'**UFMC** (Universal Filtered Multicarrier).

1.6.4 Duplexage

Le « duplexage » est le mode de circulation utilisé pour transmettre les données à la fois dans le sens descendant « Downlink » donc de l'antenne relais vers l'utilisateur et dans le sens montant « Uplink » donc dans le sens de l'utilisateur vers la station de base.

Pour la 2G, 3G et 4G, un duplexage fréquentiel, dit FDD (Frequency Division Duplexing), est utilisé, il s'agit d'un mode de circulation à double sens, chaque voie à

sa bande de fréquences réservée. Des blocs de fréquences sont ainsi réservés pour les transmissions Downlink et d'autres pour les transmissions Uplink. Dans les bandes de fréquences déjà allouées à la téléphonie mobile, la 5G continuera d'utiliser ce duplexage FDD, fondé sur une séparation en fréquences.

En 5G, pour les nouvelles bandes de fréquences ouvertes, un duplexage temporel, dit TDD (Time Division Duplexing), a ainsi été retenu pour notamment mieux tirer parti de tout le spectre disponible dans le sens descendant. Il s'agit d'un mode de circulation à sens unique avec circulation alternée. Les antennes relais et les terminaux utiliseront donc la même bande de fréquences mais le sens de transmission variera au cours du temps.

L'utilisation du duplexage temporel TDD présente notamment l'avantage de permettre une grande flexibilité sur la répartition Downlink/Uplink ; mais il provoque des interférences entre antennes et entre terminaux qui nécessitent de mettre en place des techniques spécifiques pour y remédier. [3]

1.7 Conclusion

La 5G a été conçue pour satisfaire les besoins croissants de communication toujours plus rapides entre individus, mais également, pour pouvoir servir les grands secteurs économiques de la société.

Dans ce chapitre nous avons présenté la 5G ainsi que ses différentes exigences. Nous avons étalé les différentes technologies parfois complémentaires permettant de répondre à certaines de ses exigences. Parmi ces technologies les Massive MIMO reste une solution prometteuse, cependant, leurs mises en œuvre passe forcément par la conception d'antenne élémentaire performante pour toutes les gammes de fréquences proposées pour la 5G.

De ce fait, le chapitre suivant sera consacré à l'étude théorique des antennes imprimées qui peuvent être utilisées pour la 5G.

Chapitre 2. Antenne imprimée pour la 5G

2.1 Introduction

Dès l'origine, l'antenne est l'élément qui est utilisé pour diffuser les ondes électromagnétiques par rayonnement. Elle joue deux rôles réciproques : la transmission et la réception.

Une antenne d'émission est un dispositif qui assure la transmission de l'énergie entre un émetteur et l'espace libre où cette énergie va se propager. Réciproquement, une antenne de réception est un dispositif qui assure la transmission de l'énergie d'une onde se propageant dans l'espace à un appareil récepteur, ainsi, dans une chaîne de communications sans fil, elle est toujours le premier élément dans une chaîne de réception ou le dernier élément d'une chaîne d'émission. Il y a une grande variété de techniques pour réaliser les antennes, chacune d'elles possède ses propres caractéristiques et sert à une application bien déterminée.

Dans les applications des télécommunications, le faible volume, le faible poids, le faible coût, les hautes performances et la facilité de mise en œuvre sont les principales exigences, les antennes faiblement profilées sont une nécessité d'où l'avènement des antenne imprimées.

Ce chapitre se propose de présenter la technologie imprimée de manière générale. On commence tout d'abord par la description des antennes imprimées, citée un bref aperçu des domaines d'application et quelques avantages et inconvénients. Par la suite, les caractéristiques ainsi que les techniques d'alimentation sont abordées. On clôture le chapitre par un bref aperçu sur les antennes Patch dans la bande millimétrique.

2.2 Historique

Le concept des antennes microruban fut initialement proposé en 1953 par **Georges Deschamps** aux Etats Unis d'Amérique et en France Le premier brevet reprenant ce concept d'antenne Patch fut déposé en 1956 par **Henri Gutton** et **Georges Boissinot**. Un peu plus tard le phénomène de rayonnement provenant des discontinuités dans les strip-lines fût observé et étudié par Lewin en 1960. En 1970, **Byron** a réalisé des premiers prototypes d'antennes.

Par la suite et exactement en 1972, **John Howell** réalisa des antennes imprimées à polarisations linéaire et circulaire en bande L et UHF pour la NASA, de son côté, **Weinschel** développa plusieurs géométries de patchs microruban pour

l'usage en réseau cylindrique. Les travaux additionnels sur les éléments basiques du microruban furent publiés en 1975. Le travail de **Nunson** dans le développement des antennes microruban a montré que celui-ci était un concept pratique s'étalant à d'autres problèmes relatifs à d'autres systèmes d'antennes.

2.3 Description des Antennes Imprimées

Une antenne à éléments rayonnants imprimés, communément appelée antenne patch est une ligne microruban (micro-strip) de forme particulière. Elle effectue ainsi deux fonctions fondamentales qui définissent le principe d'antenne de manière générale, il s'agit bien du rayonnement (émission) et de la réception d'une onde électromagnétique.

Dans sa forme la plus simple, une antenne microruban est constitué d'un élément conducteur appelé patch imprimé sur la face supérieure d'un substrat diélectrique, la face inférieure complètement métallisée constitue le plan de masse. L'élément rayonnant peut être de forme arbitraire, cependant les formes rectangulaire, circulaire, triangulaire et leurs dérivées sont les plus communément utilisées vue leur facilité d'analyse.

Elle est constituée de:

- **Plan de masse** : une surface conductrice (cuivre) recouvrant la partie inférieure du substrat. Elle permet de faire rayonner la partie supérieure.
- **Un substrat** : composé d'un matériau isolant, d'épaisseur généralement faible devant la longueur d'onde et de permittivité relative ($2,2 < \epsilon_r < 12$). Il est utilisé pour augmenter la puissance rayonnée par l'antenne et réduire les pertes par effet de Joule et améliorer la bande passante de l'antenne. Parfois, il est préférable d'utiliser des substrats diélectriques d'épaisseur importante et de faible permittivité pour avoir une grande efficacité et une large bande passante.
- **Élément rayonnant** : une partie métallique de forme et de taille à définir selon l'application, à géométrie variable (circulaire, rectangulaire, triangulaire, etc..). Il doit être relié au reste du circuit par une ligne de transmission (microruban) qui doit être adaptée d'impédance à l'antenne et au reste du circuit afin d'éviter le phénomène de réflexion. Dans la pratique, le rectangle et le disque représentent les formes de l'élément rayonnant les plus utilisées. Il est constitué d'une partie conductrice qui va rayonner. La forme et les dimensions conditionnent la fréquence de fonctionnement de l'antenne. [9]

L'élément rayonnant et le plan de masse sont en général faits avec des très bons conducteurs :

- Cuivre (conductivité= $5,8 \times 10^7$ S/m).
- Argent (conductivité= $6,2 \times 10^7$ S/m).
- Or (conductivité= $4,1 \times 10^7$ S/m).

La structure de base est rappelée sur la figure 2.2.1:

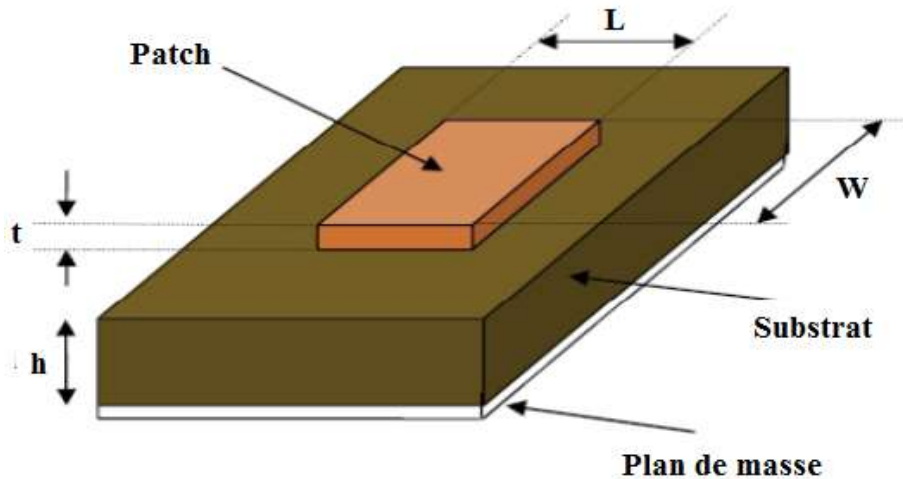


Figure 2.1: Structure de base d'une antenne imprimée.

L : Longueur du patch **t** : épaisseur du patch.

W : Largeur du patch **h** : épaisseur du substrat.

Pour augmenter la puissance rayonnée par l'antenne, il faut :

- Réduire les pertes par l'effet joule.
- Améliorer la bande passante de l'antenne.

L'antenne patch peut prendre plusieurs formes qui peuvent être rectangulaire, carré, circulaire ou simplement un dipôle. Ces formes sont les plus courantes car elles présentent une grande facilité d'analyse et de fabrication, mais également un diagramme de rayonnement très intéressant. La figure 2.2 illustre ces différentes formes. [10]

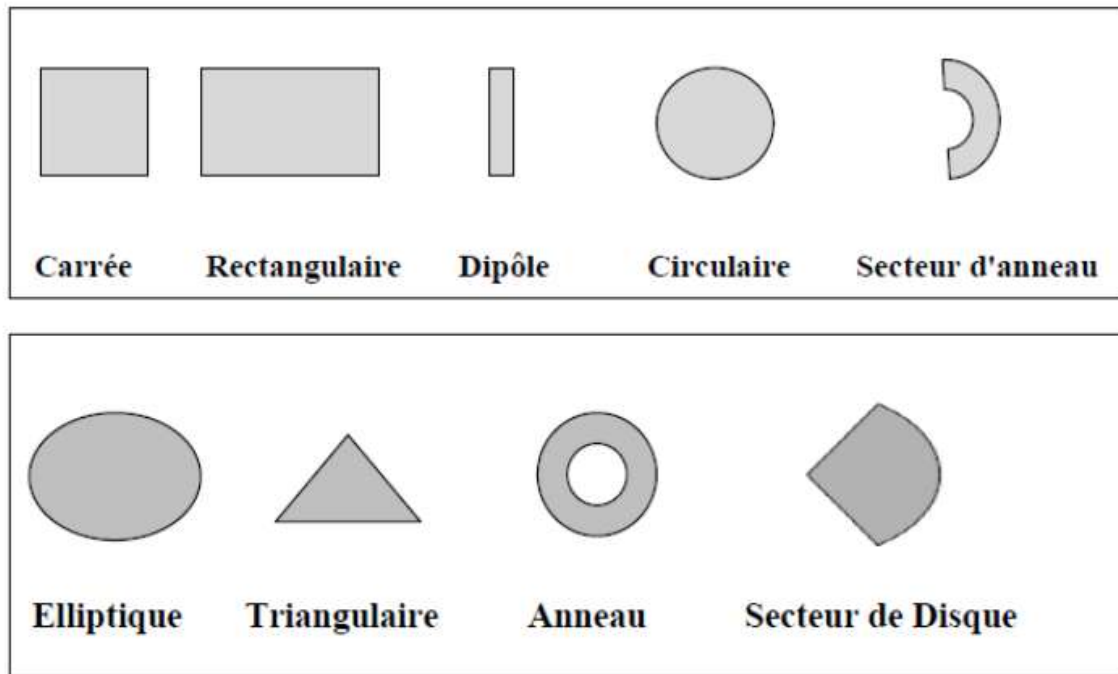


Figure 2.2: Différentes formes d'antennes patch.

2.4 Mécanisme de rayonnement

Pour comprendre comment fonctionne une antenne microbande, considérons la coupe donnée dans la figure 2.1. Au point « a » du conducteur supérieur, on a déposé une source ponctuelle (densité de courant de surface), qui rayonne dans toutes les directions. Une partie du signal émis est réfléchié par le plan de masse, puis par le conducteur supérieur et ainsi de suite. Certains des rayons aboutissent sur l'arête du conducteur (point « b »), qui les diffracte.

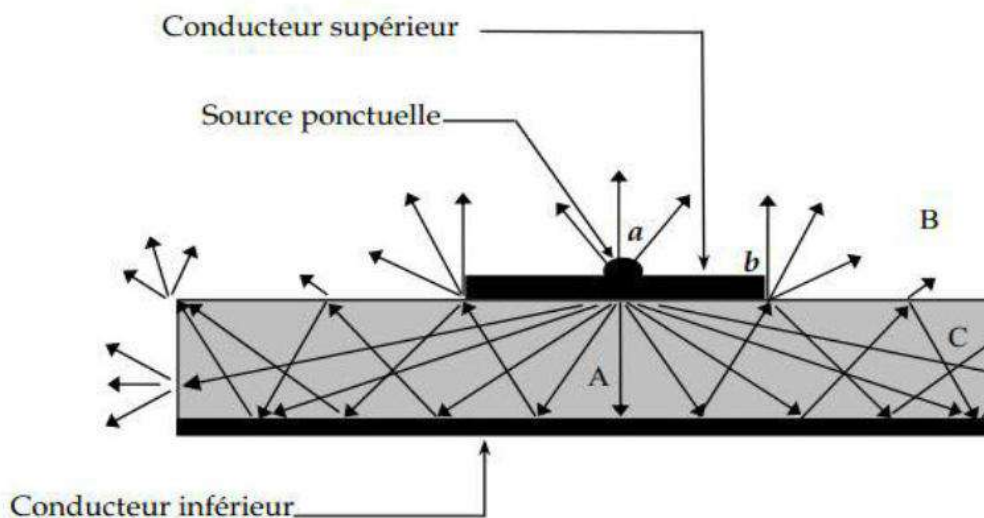


Figure 2.3: Mécanisme de rayonnement des antennes imprimées. [11]

La figure 2.3 peut être divisée en trois régions distinctes :

Région A : dans le substrat, entre les deux plans conducteurs, les rayons sont de plus en plus concentrés. Le champ électromagnétique s'accumule dans cette région de l'espace. Cette propriété est très utile pour la propagation du signal le long d'une ligne microruban.

Région B : dans l'air, au-dessus du substrat, le signal se disperse librement dans l'espace et contribue au rayonnement de l'antenne. Comme les courants de surface circulent surtout sur la face inférieure du conducteur supérieur (coté diélectrique), le rayonnement paraît surtout être émis par le voisinage immédiat des arêtes. Certains modèles simplifiés mettent à profit cette constatation : ils considèrent le rayonnement d'un ensemble de fentes fictives, situées sur le pourtour de l'antenne.

Région C : certains rayons atteignent les surfaces de séparation avec une incidence rasante et restent piégés à l'intérieur du diélectrique. Il s'agit du mécanisme de la réflexion totale, dont font usage les fibres optiques. Une onde de surface est alors guidée par le bord du diélectrique, ne contribuant pas directement au rayonnement de l'antenne. Toutefois, quand cette onde atteint le bord du substrat (point c), elle est diffractée et génère un rayonnement parasite. Dans le cas d'une antenne en réseau, l'onde de surface crée un couplage entre les éléments du réseau. Le diagramme de rayonnement de l'antenne peut être perturbé par la présence d'ondes de surface, notamment au niveau des lobes secondaires. On pourrait en principe faire usage des ondes de surface pour alimenter les éléments d'un réseau.

On peut associer des plages de fréquence aux trois régions précédentes :

Plage de fréquence A : en basse fréquence, les champs restent surtout concentrés dans la région A. il y a alors propagation sans rayonnement. La structure qui en résulte est une ligne de transmission ou un des éléments dérivés.

Plage de fréquence B : à plus haute fréquence, le rayonnement dans l'air devient significatif et la structure se comporte comme une antenne. Il reste néanmoins une importante concentration des champs entre les deux conducteurs (énergie réactive emmagasinée dans la zone du champ proche). Comme les diélectriques présentent toujours certaines pertes, il en résulte une absorption du signal. Le rendement d'une antenne microbandes reste de ce fait assez modeste.

Plage de fréquence C : bien qu'une onde de surface puisse, en principe, se propager quelle que soit la fréquence du signal, c'est surtout au-dessus d'une certaine fréquence limite que ces ondes jouent un rôle significatif. La structure

devient alors un lanceur d'ondes de surface. Elle ne peut plus être utilisée comme antenne, à moins que l'on ne dispose d'une transition adéquate, qui effectue le passage d'une onde de surface à une onde rayonnée.

2.5 Avantages et inconvénients

Les antennes imprimées présentent de nombreux avantages et inconvénients comparés aux antennes micro-ondes classiques.

2.5.1 Avantage

Les antennes Patch ont de nombreux avantages comparés aux antennes micro-ondes classiques et par conséquent plusieurs applications dans la large gamme de fréquences allant de 100 MHz à 50 GHz sont réalisables. Parmi ces avantages, on peut citer :

- Faible poids, volume réduit.
- Faible épaisseur, encombrement réduit.
- Configurations conformes possibles sur les surfaces planaire et non-planaire (avec les substrats minces).
- Antennes multi bandes, capable de fonctionner en double et triple fréquence.
- Antennes multi polarisations possibles. Polarisation linéaire et circulaire pour les télécommunications.
- Réseaux d'alimentation et d'adaptation fabriqués simultanément avec l'antenne.
- Faible cout de fabrication (facile à fabriquer).
- Production en masse possible.
- La possibilité de regrouper plusieurs Patch identiques pour construire un réseau.

2.5.2 Inconvénients

Cependant, les antennes microruban ont aussi quelques inconvénients comparés aux antennes classiques tels que :

- Puissance d'émission et de réception limitée.
- Faible pureté de polarisation (mélange entre deux polarisations linéaire et circulaire).
- Faible efficacité de rayonnement.

- Bande passante souvent étroite de l'ordre de 1 à 5% (pour les éléments résonants de géométrie simple)
- Rendement limité.
- Faible directivité.
- L'isolation entre les éléments rayonnants et l'alimentation est médiocre.
- Un faible gain (le gain légèrement inférieur comparé aux antennes conventionnelles à micro-ondes).
- Effet de couplage du rayonnement de l'alimentation
- Problèmes de tolérances de fabrication si les motifs imprimés sont petits.

2.6 Applications des Antennes Imprimées

L'émergence de nouvelles technologies exigeantes dans le domaine des télécommunications ainsi que l'évolution des recherches scientifiques concernant les antennes imprimées, ont conduit au remplacement des antennes classiques par les antennes imprimées dans la plupart des applications. Parmi ces applications on peut citer :

- Les télécommunications par satellites.
- La commande et contrôle.
- Les radars Doppler et d'autres types de radars.
- La navigation aérienne ou terrestre.
- Surveillance de locaux ou carrefours.
- Radiation biomédicale.
- La télémétrie.
- Les équipements portatifs.
- Les éléments d'alimentation dans les antennes complexes.
- Les antennes d'émission utilisées en médecine.
- Les récepteurs satellite de navigation.

2.7 Caractéristiques des Antennes Imprimées

Les paramètres électriques définissent l'antenne comme élément du circuit dans lequel elle est connectée. Ils permettent d'évaluer la charge apportée par l'antenne au circuit d'excitation et ainsi, de caractériser l'efficacité du transfert de puissance entre le système radioélectrique et le milieu de propagation. Plusieurs paramètres peuvent servir à cette caractérisation, nous définirons les principaux paramètres :

2.7.1 L'impédance d'entrée de l'antenne

L'impédance d'entrée de l'antenne que l'on souhaite la plus proche possible de 50Ω en partie réelle, et nulle en partie imaginaire, dépend du type d'alimentation.

On sait que pour une alimentation par connecteur, l'impédance varie avec la position du contact de la sonde avec le patch. Pour une alimentation par fente, c'est la largeur et la position de la fente qui vont permettre de s'approcher de l'adaptation idéale.

D'une manière générale, il s'agit d'un problème complexe qui doit être traité au cas par cas par des simulations numériques, et dont la solution est souvent guidée par l'expérience.

L'impédance d'entrée Z_e est définie comme étant l'impédance présentée par une antenne à ses bornes ; elle est égale au rapport de la tension V_e sur le courant I_e présenté à l'entrée.

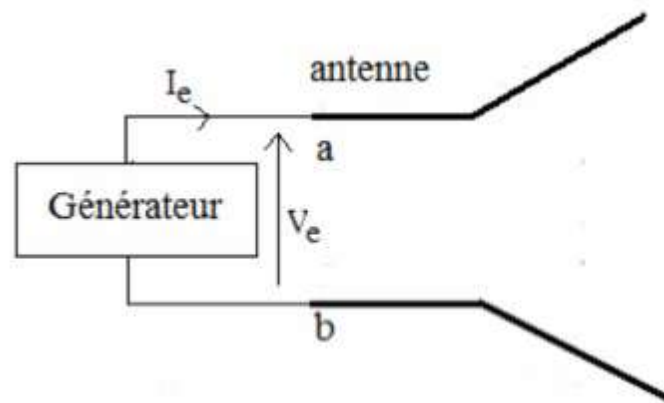


Figure 2.4: Impédance d'entrée

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

Avec :

Z_e : Impédance d'entrée.

R : Résistance de l'antenne.

X : Réactance de l'antenne.

2.7.2 Coefficient de réflexion

Le coefficient de réflexion est un paramètre qui permet de quantifier la quantité du signal réfléchi par rapport au signal incident [12], Généralement ce coefficient Γ est lié à l'impédance d'entrée de l'antenne Z_e et l'impédance caractéristique Z_c par la relation :

$$\Gamma = \frac{Z_e - Z_c}{Z_e + Z_c} \quad (2.2)$$

Signalons qu'on peut représenter Γ sous forme de paramètre S en dB tel que :

$$S_{11} (dB) = 20 \log(\Gamma) \quad (2.3)$$

2.7.3 Rapport d'onde stationnaire (ROS)

Le Rapport d'Onde Stationnaire (ROS) ou, en anglais, VSWR pour Voltage Standing Wave Ratio tout comme le coefficient de réflexion traduit l'adaptation ou la désadaptation d'impédance entre deux éléments. Lorsque l'adaptation n'est pas parfaite, la partie de l'onde réfléchiée se superpose à l'onde incidente pour ne former qu'une seule onde, appelée onde stationnaire. Il se définit comme le rapport des valeurs maximales (+V) et minimales (-V) de l'amplitude de l'onde stationnaire, il est donné par la relation suivante [13] :

$$ROS = \frac{(+v) + (-v)}{(+v) - (-v)} \quad (2.4)$$

Il est lié au coefficient de réflexion Γ par la relation :

$$ROS = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} \quad (2.5)$$

2.7.4 La directivité

La directivité d'une antenne est le rapport de la puissance rayonnée par unité d'angle solide dans la direction (θ, ρ) à la puissance que rayonnerait la source isotrope de référence par unité d'angle solide pour une même puissance totale rayonnée.

La directivité est exprimée :

$$D(\theta, \rho) = \frac{U(\theta, \rho)}{U_0} = 4\pi \frac{P(\theta, \rho)}{Pr} \quad (2.6)$$

Avec :

$P(\theta, \rho)$: La puissance rayonnée par unité d'angle solide (θ, ρ) .

Pr : la puissance totale rayonnée.

La directivité indique dans quelles directions la densité de puissance est meilleure ou moins bonne que celle de l'antenne isotrope.

2.7.5 Le gain

Le gain d'une antenne dans une direction donnée est la quantité descriptive

de la performance de l'antenne, c'est la quantité d'énergie rayonnée dans cette direction comparée à l'énergie qu'une antenne isotrope rayonnerait dans la même direction avec la même puissance d'entrée.

Le gain est proportionnel à la directivité. Il porte la même information sur les directions de rayonnement.

Le gain s'exprime en décibel (dB). On utilise quelquefois la notation dBi pour préciser la référence au rayonnement isotrope. Si l'antenne est omnidirectionnelle et sans pertes, son gain vaut 1 ou 0 dB [10]. Le gain G peut s'écrire comme suit :

$$G(\theta, \varphi) = 4\pi \frac{P(\theta, \varphi)}{P_a} \quad (2.7)$$

$P(\theta, \varphi)$: La puissance rayonnée.

P_a : La puissance d'alimentation.

2.7.6 Diagramme de rayonnement

La représentation graphique de la fonction caractéristique de l'antenne porte le nom de diagramme de rayonnement. La direction du maximum de rayonnement est appelée **l'axe de rayonnement** de l'antenne.

La représentation de cette fonction donne les caractéristiques dans l'espace. Classiquement, on a pris l'habitude de représenter le diagramme de rayonnement dans deux plans perpendiculaires qui sont : **le plan E et le plan H**. Le plan E est défini comme le plan contenant l'axe de l'antenne et le champ électrique. Le plan H est défini comme le plan contenant l'axe de l'antenne et le champ magnétique. [14]

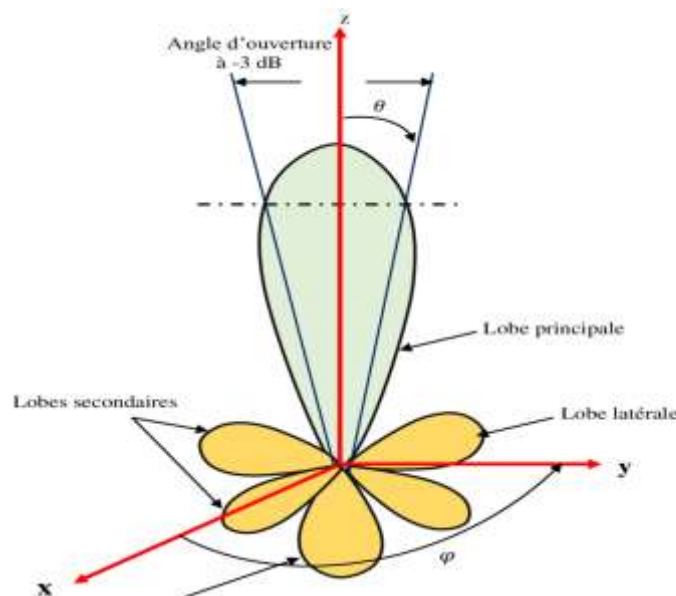


Figure 2.5: Exemple de diagramme de rayonnement.

2.7.7 Fréquence de résonance et bande passante

La bande passante d'une antenne définit donc la plage de fréquence dans laquelle le coefficient de réflexion est inférieur à un seuil fixé arbitrairement. Généralement la bande passante correspond à la plage de fréquence pour laquelle le coefficient de réflexion est inférieur de -10dB. Mais dans certaines applications, ce niveau peut être relevé à -6 dB ce qui permet de relâcher certaines contraintes lors de la conception d'une antenne, c'est le cas, par exemple, pour certaines antennes de téléphone mobile. Il est cependant communément admis que si le seuil auquel est considéré la bande passante n'est pas précisé, il s'agit de la bande passante pour un S_{11} inférieur à -10dB. La figure 2.6 montre le paramètre S_{11} d'une antenne en fonction de la fréquence et met en évidence la bande passante à -10 dB. Dans cet exemple la bande passante qui s'exprime en Hertz (Hz) est de 226 MHz. [14]

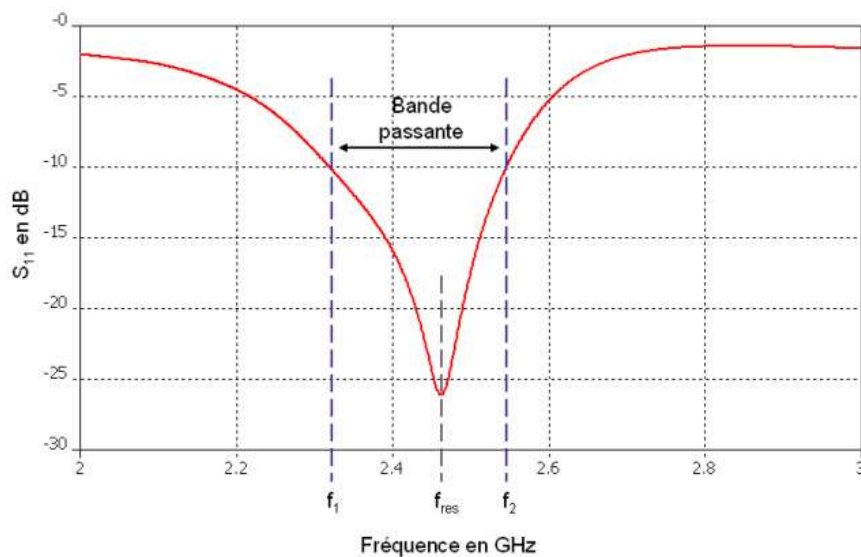


Figure 2.6: Illustration de la bande passante à -10 dB d'une antenne.

La fréquence de résonance correspond à la fréquence pour laquelle l'antenne est la mieux adaptée, c'est-à-dire pour laquelle le coefficient de réflexion est le plus faible. Sur une bande passante donnée, il est possible d'observer plusieurs minima donc plusieurs fréquences de résonance.

La bande passante est définie par la formule suivante [15]:

$$BW = \frac{f_2 - f_1}{f_c} \quad (2.8)$$

Avec f_2 et f_1 la fréquence maximale et la fréquence minimale entre lesquelles le coefficient de réflexion est inférieur à -10 dB (voire -6dB) et f_c la fréquence centrale. [16]

Afin de comparer des structures d'antennes, on exprime souvent la bande passante, BP, d'une antenne en pourcentage par rapport à la fréquence de résonance.

$$BW(\%) = \frac{f_2 - f_1}{f_c} \times 100 \quad (2.9)$$

2.8 Techniques d'alimentation d'une antenne imprimée

L'alimentation joue un rôle très important dans la conception des antennes, elle peut influencer potentiellement le rayonnement et modifier ses performances.

Il existe plusieurs méthodes d'excitation des antennes imprimées et qui sont classées en deux catégories :

1. Avec contact
 - Alimentation par ligne microruban
 - Alimentation par sonde coaxial

2. Sans contact
 - Alimentation par couplage électromagnétique (ligne)
 - Alimentation par couplage à ouverture (fente). [17]

2.8.1 Alimentation par ligne microruban

Dans ce type d'alimentation, une ligne conductrice (généralement d'impédance 50Ω), de largeur plus petite que celle du patch, est connectée à l'un des bords de ce dernier. Ce type d'alimentation est facile à fabriquer et simple à adapter à la résonance (choix judicieux de la position d'alimentation ou insertion d'encoches), mais elle présente plus de pertes que la hauteur du substrat augmente à cause de l'apparition des ondes de surface et la génération de rayonnement parasite. [18], [19], [20] et [21]

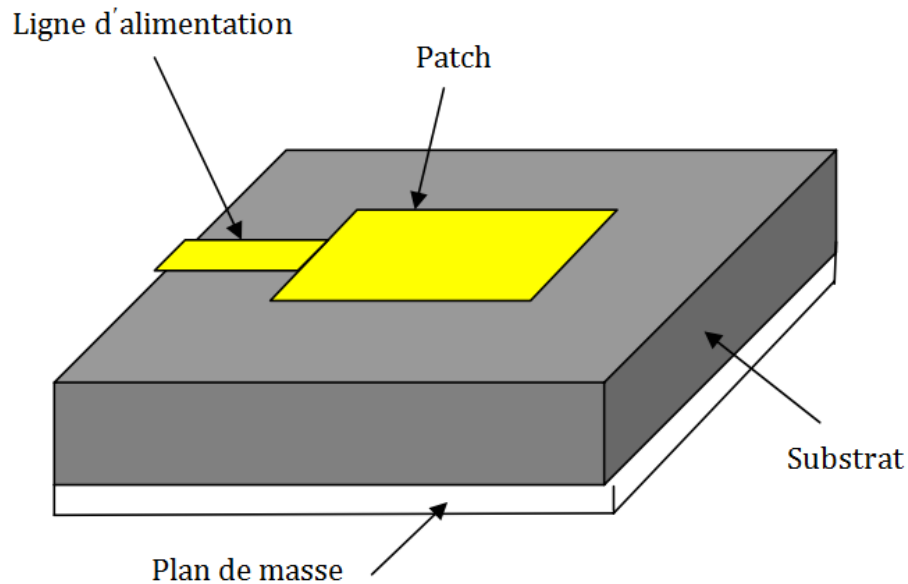


Figure 2.7: Alimentation par ligne microruban.

2.8.2 Alimentation par sonde coaxial

Dans cette technique, le conducteur interne du connecteur coaxial est soudé au patch en traversant le milieu diélectrique tandis que le connecteur extérieur est connecté au plan de masse.

Parmi les avantages de cette méthode : la possibilité d'exciter l'élément rayonnant à n'importe quel endroit pour assurer l'adaptation, la réduction de rayonnement parasite et simplicité de fabrication.

Cependant, son inconvénient majeur est la diminution de la bande passante (bande étroite) ainsi que la difficulté de modélisation du probe pour un substrat épais ($h > 0.02\lambda$). [10], [19], [21], [22]

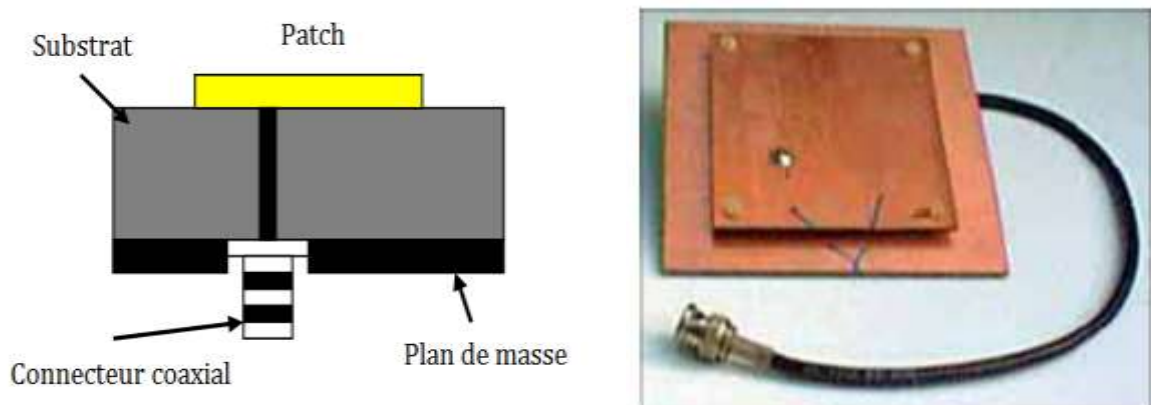


Figure 2.8: Alimentation par sonde coaxiale

L'équation suivante donne une estimation de l'impédance caractéristique Z_c d'un câble coaxial de rayons intérieur a , extérieur b et un milieu caractérisé par μ et ε .

$$Z_c = \sqrt{\frac{\mu \ln(b/a)}{\varepsilon}} \quad (2.10)$$

2.8.3 Alimentation par fente

Dans l'alimentation par couplage à ouverture ou couplage par fente, le patch et la ligne d'alimentation sont séparés par le plan de masse. Ce dernier, contient une fente qui assure le couplage entre la ligne microruban de l'alimentation et l'élément rayonnant.

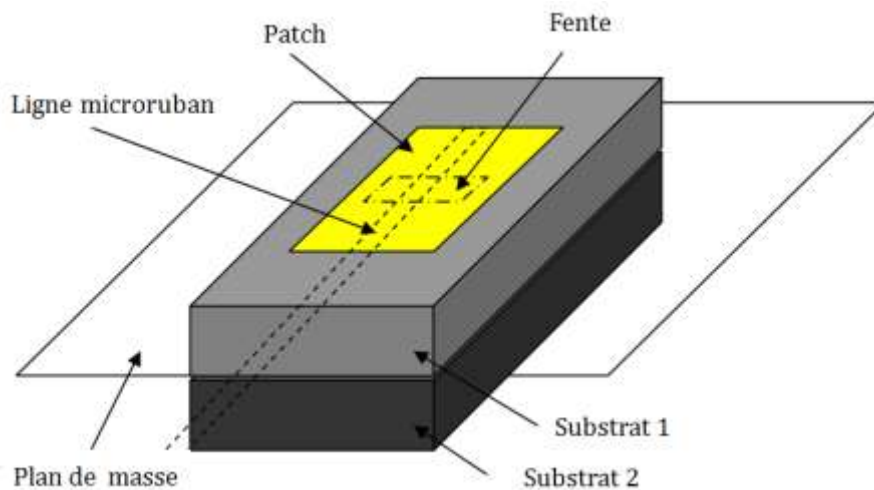


Figure 2.9: Alimentation par fente.

Pour minimiser le rayonnement parasite, le substrat inférieur doit être choisis mince et de permittivité élevée, tandis que le substrat supérieur doit être épais et de faible permittivité. [21]

L'inconvénient majeur de ce procédé réside dans la difficulté de fabrication due à l'utilisation de deux couches diélectriques ce qui engendre également l'augmentation de l'épaisseur de l'antenne. On note que la bande passante générée est étroite. [22], [10], [23] et [24]

2.8.4 Alimentation par guides d'ondes coplanaires

Le guide d'ondes coplanaire est une ligne de transmission efficace largement utilisée, qui présente l'avantage de placer la ligne d'alimentation au même niveau que le plan de masse. Il est constitué d'un ruban central métallique placé entre deux plans de masse parallèles entre eux, déposés sur la même face d'un substrat diélectrique.

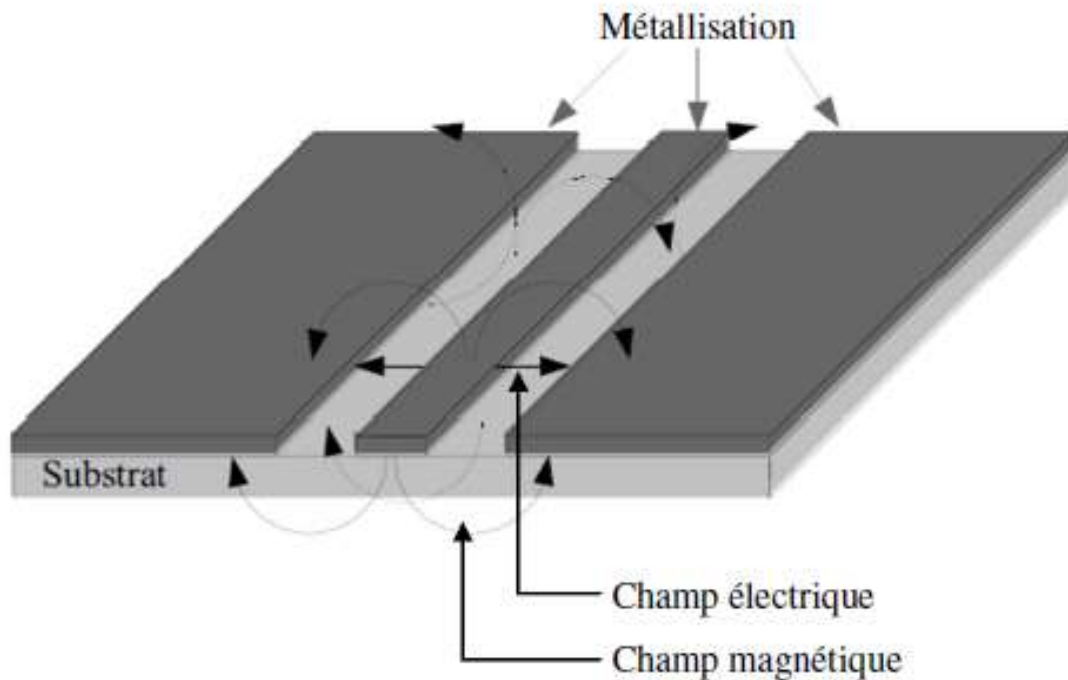


Figure 2.10: Alimentation par guides d'ondes coplanaires.

2.9 Antenne dans la Bande Millimétrique

Comme on l'a déjà mentionné dans le chapitre précédent, l'une des solutions proposées pour la 5G est l'exploitation de la bande millimétrique.

La conception et la réalisation ainsi que les performances des antennes imprimées dans la bande millimétrique présentent plusieurs défis. D'un côté, les dimensions de l'antenne qui sont inversement proportionnelles à la fréquence posent des problèmes de conception. D'un autre côté, la propagation et les affaiblissements dans la bande millimétrique sont des limitations importantes.

Toutefois, plusieurs fréquences ont été identifiées comme présentant un compromis entre conception et performance. Plus particulièrement, la bande Ka de 27 GHz à 40 GHz présente plusieurs avantages en termes de faible absorption atmosphérique, de conditions de propagation et d'affaiblissement.

Dans ce travail nous proposons la conception d'une antenne patch qui travaille dans cette bande. [25]

2.10 Conclusion

La technologie microruban en général, et les antennes microruban en particulier connaissent un succès croissant auprès des industriels et des professionnels de télécommunication, qu'elle soit spatiale ou terrestre. Il est nécessaire de bien définir l'intégralité des paramètres des antennes, afin de prévoir son comportement avant même la réalisation d'une part, et de s'assurer qu'elle se conformera aux exigences des systèmes d'autre part.

Les antennes ont des propriétés et des caractéristiques, selon lesquelles elles sont valorisées. Plusieurs techniques existent pour les réaliser et pour assurer un bon fonctionnement il faut choisir celle qui est la plus adaptée à l'application envisagée.

Dans notre travail, le choix s'est porté sur la technologie des **antennes imprimées**, leurs avantages nombreux permettent de les utiliser dans divers secteurs et surtout les communications mobiles.

Dans ce chapitre, nous avons présenté l'évolution technologique des antennes imprimées, on a donné une petite description, quelques applications et les principales caractéristiques.

Dans le chapitre suivant nous proposons la conception d'une antenne imprimée pour des applications dans la bande millimétrique.

Chapitre 3. Conception et simulation

3.1 Introduction

La bande millimétrique fait partie des solutions proposées pour la mise en fonction de la 5G car elle rend possible l'utilisation d'une largeur de bande passante supérieure à 800 MHz et l'obtention d'un gain élevé allant jusqu'à 12 dB.

L'objectif de ce chapitre est la conception d'une antenne imprimée bi-bande qui fonctionne dans la bande millimétrique pour des applications 5G.

Dans ce contexte le logiciel de simulation électromagnétique CST MICROWAVE STUDIO (MWS), était le choix idéal car il a l'avantage d'analyser rapidement et précisément des structures de hautes fréquences (HF) tels que les antennes.

La première partie de ce chapitre présente une brève la description du logiciel de simulation CST. La partie suivante est consacrée à la description des étapes de conceptions et l'évaluation des performances de l'antenne en termes de coefficient de réflexion, diagramme de rayonnement et gain.

En fin de ce chapitre une comparaison des résultats obtenus avec un article de la littérature spécialisée est présentée.

3.2 Description du logiciel de simulation CST

CST Microwave Studio est un logiciel de simulation électromagnétique de structure passives en 3 dimensions basée sur la résolution des équations de Maxwell suivant la technique des équations intégrales finies FIT (Finité Intégration Technique). Cette méthode numérique offre une discrétisation de l'espace permettant la description directement en 3 dimensions de tous les composants des systèmes décrits, ce qui lui permet d'être appliqué à de nombreux problèmes électromagnétiques allant de la statique aux hyperfréquences en analyses temporelle et fréquentielle. [26]

Les principales caractéristiques de logiciel CST Microwave Studio sont : [26]

- Une mémoire technique efficace d'intégration finie.
- La structure peut être vue soit comme un modèle 3D ou un schéma.
- Très bonne performance en raison de rapprochement frontière Perfect (PBA). Fonctionnalité pour les unités à l'aide d'une grille hexaédrique. Les solveurs transitoires et mode propre également en charge la technique Tôle mince (TST). [27]
- Caractéristique hybride à base de modélisation permet les changements structurels rapides.

- Importation d'un ensemble de données modèle humain visible ou d'autres ensembles de données.
- L'importation de modèles 2D et 3D.
- Paramétrages des fichiers de CAO importés.
- Base de données des matériaux.

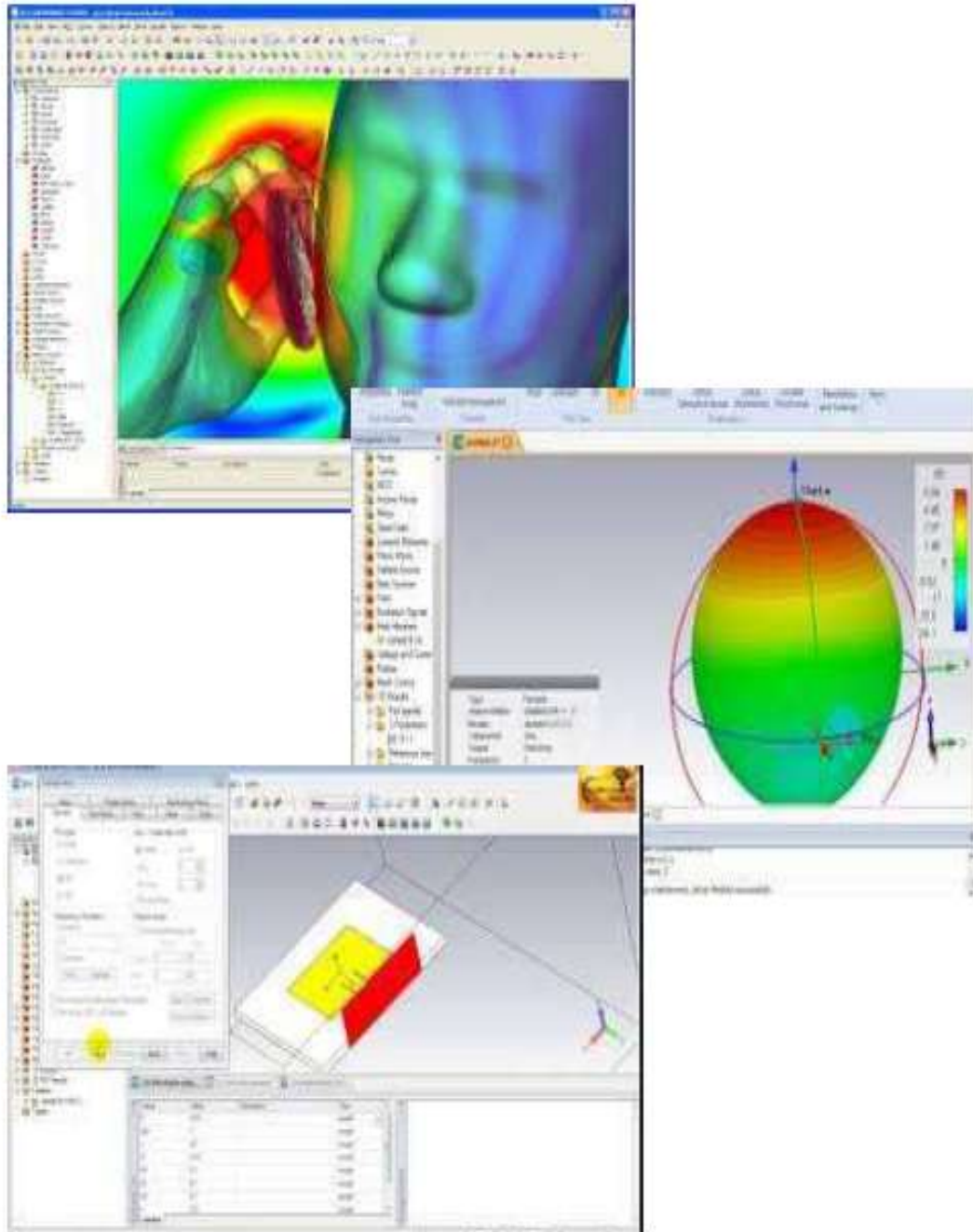


Figure 3.1: CST DESIGN STUDIO suite.

3.3 Géométrie de l'antenne élémentaire

La géométrie de l'antenne proposée est illustrée sur la figure 3.2. Elle est constituée des éléments suivants :

- L'antenne est imprimée sur un substrat Rogers RT Duroid 5880 d'épaisseur
- Le substrat possède une faible tangente de perte $\tan \delta = 0.0009$, une faible permittivité relative $\epsilon_r = 2.2$, et il a une excellente résistance chimique.
- Le patch, le plan de masse et la ligne microruban sont en cuivre, avec une hauteur $h_t = 0.035\text{mm}$.
- La technique d'alimentation utilisée est la ligne microruban qui a une impédance caractéristique $Z_c = 50\text{ ohm}$. Cette ligne est adaptée au patch par deux encoches.

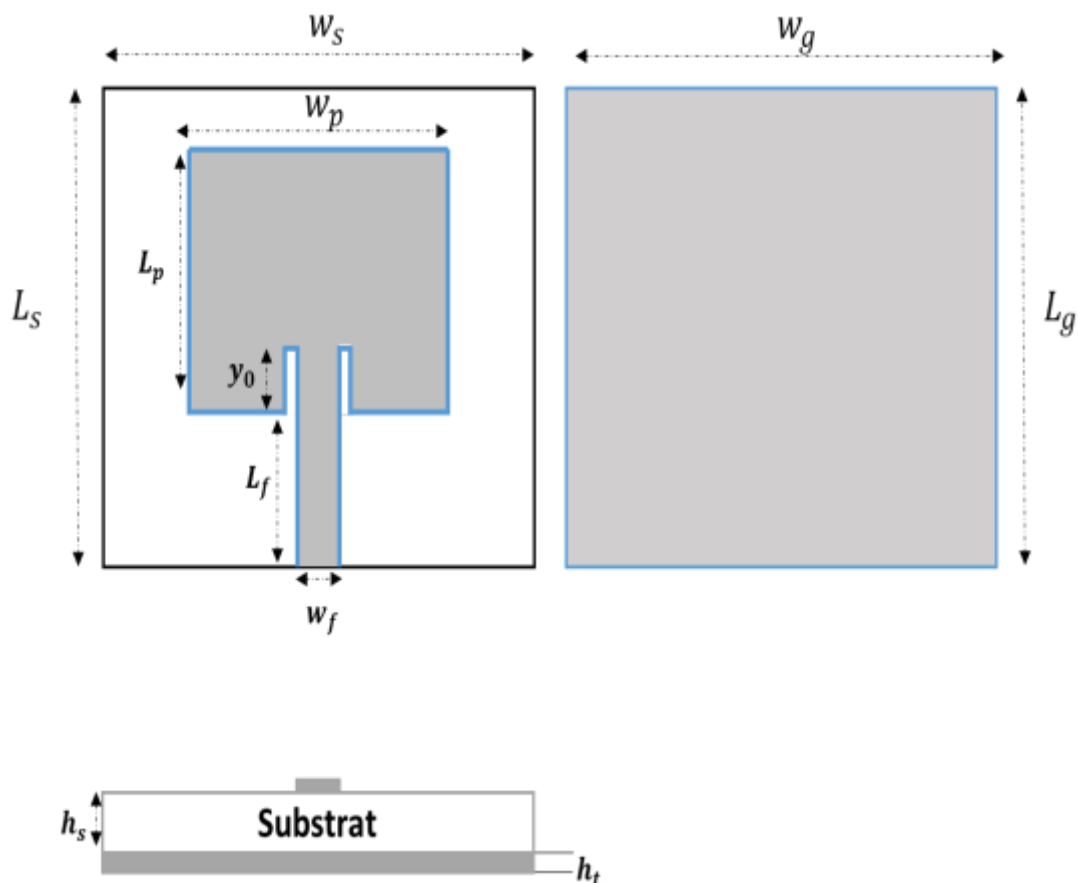


Figure 3.2: Illustration de la géométrie de l'antenne élémentaire

3.3.1 Etapes de conception de l'antenne

La Modélisation de l'antenne élémentaire sous le logiciel CST est réalisée sur plusieurs étapes :

1. La sélection de l'application dans lequel la structure sera créée.
2. Le choix du type de l'antenne, dans notre cas, on choisit les antennes planaires.
3. Fixer la plage de fréquence dans laquelle on analyse le problème.
4. L'introduction des différents paramètres de l'antenne.

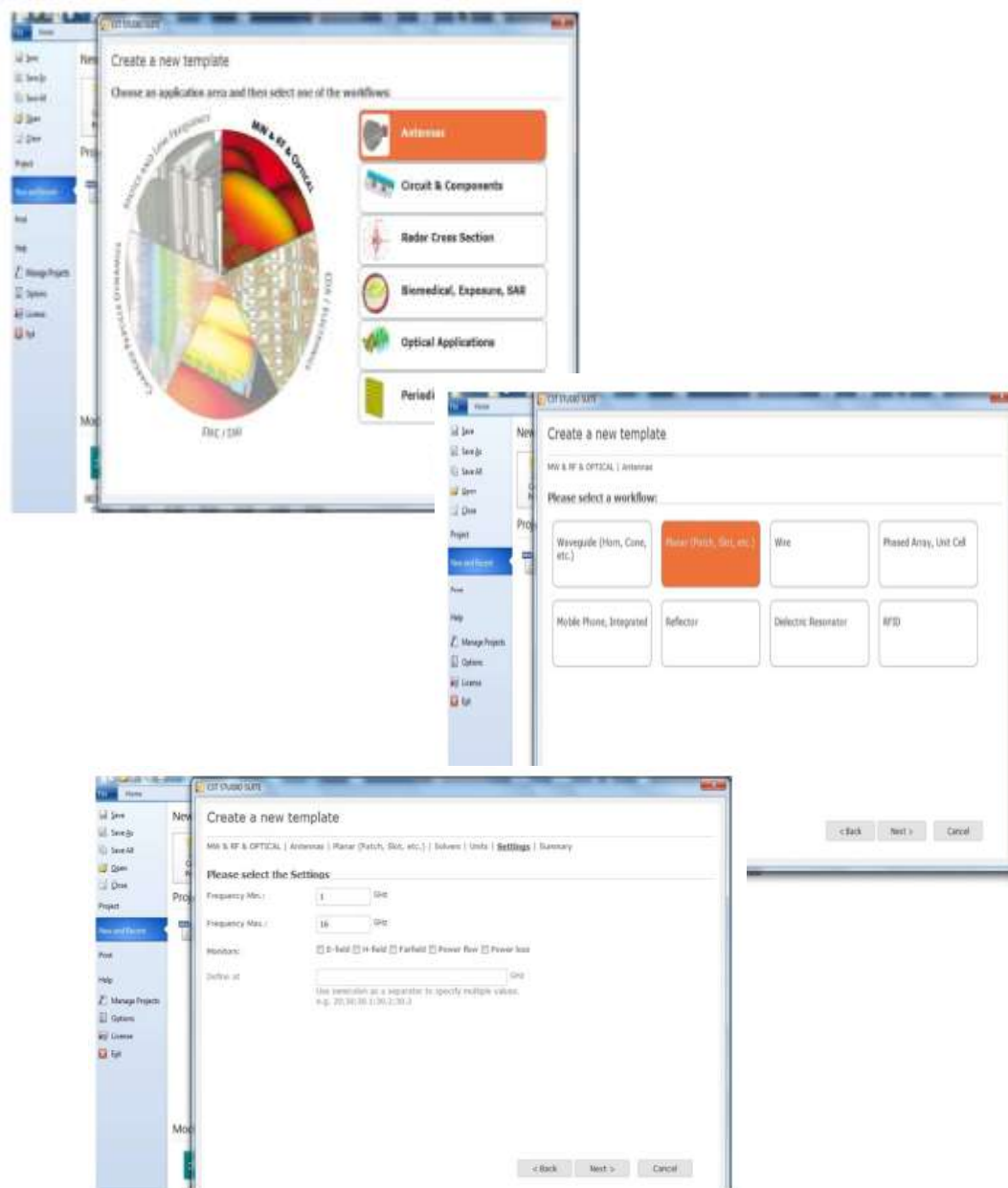


Figure 3.3: Conception d'une structure sous CST.

première fente autour de la ligne d'alimentation à l'intérieur du patch, comme il est illustré dans la **figure 3.7**.

La figure 3.8 illustre le coefficient de réflexion après l'insertion de la fente.

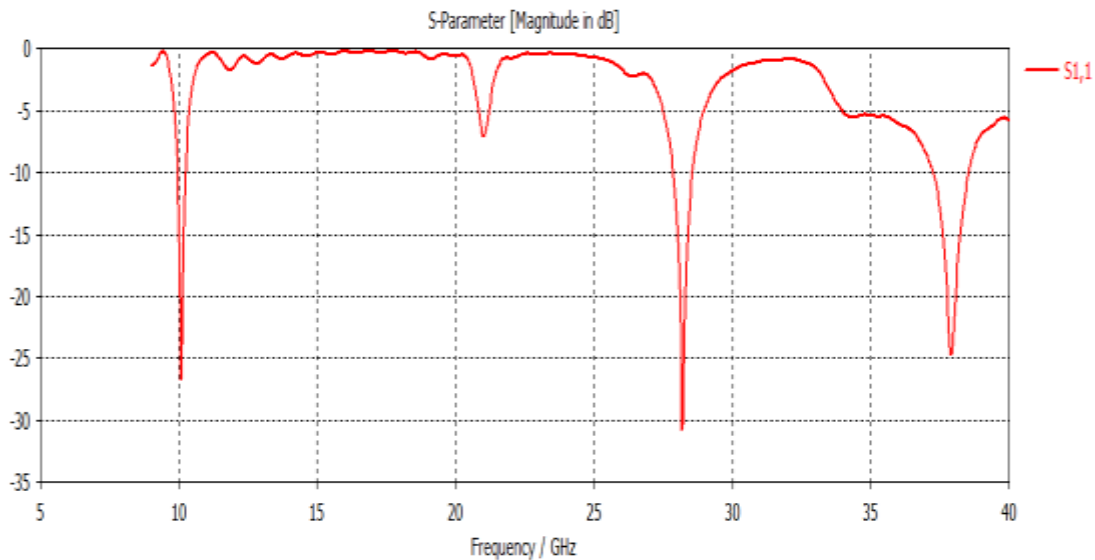


Figure 3.8: le coefficient de réflexion de l'antenne après l'ajout de la deuxième fente.

Une élimination des bandes fréquences indésirables est obtenue par suite de l'introduction de ces deux fentes accompagné d'une diminution du coefficient de réflexion à -24.7dB au niveau de la fréquence 38 GHz. Cependant une bande passante limitée est observé sur les différentes bandes.

Pour améliorer les performances de l'antenne nous allons limiter le nombre de fréquences de résonance en ajoutant une fente de largeur 0.5 mm entre les deux fentes en forme de T, pour obtenir une fonte en forme π (Figure 3.9).

Figure 3.9: l'antenne conçue avec l'introduction d'une troisième fente.

La figure 3.10 illustre les résultats de simulation pour cette dernière antenne.

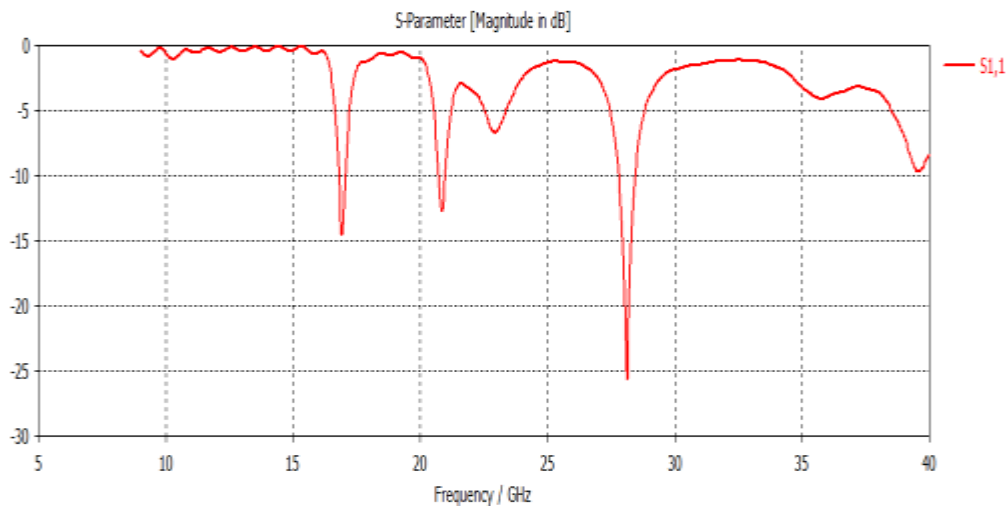


Figure 3.10: le coefficient de réflexion S11 de l'antenne après l'ajout de la troisième fente.

Les résultats obtenus montrent :

- ✓ Une résonance dans la fréquence 16 GHz avec un S11= -14.5 dB et une bande passante égale à 0.25 GHz
- ✓ Une résonance dans la fréquence 21 GHz avec un S11= -12.65 dB et une bande passante égale à 0.25 GHz
- ✓ Une résonance dans la fréquence 28 GHz avec un S11= -25.62 dB et une bande passante égale à 0.64 GHz.

Ces résultats ne répondent pas nos attentes en termes de bande passante. L'une des solutions pour remédier à ce problème est d'augmenter la hauteur du substrat.

La figure 3.11 représente la bande passante et le coefficient de réflexion après l'augmentation de la valeur de la hauteur de substrat.

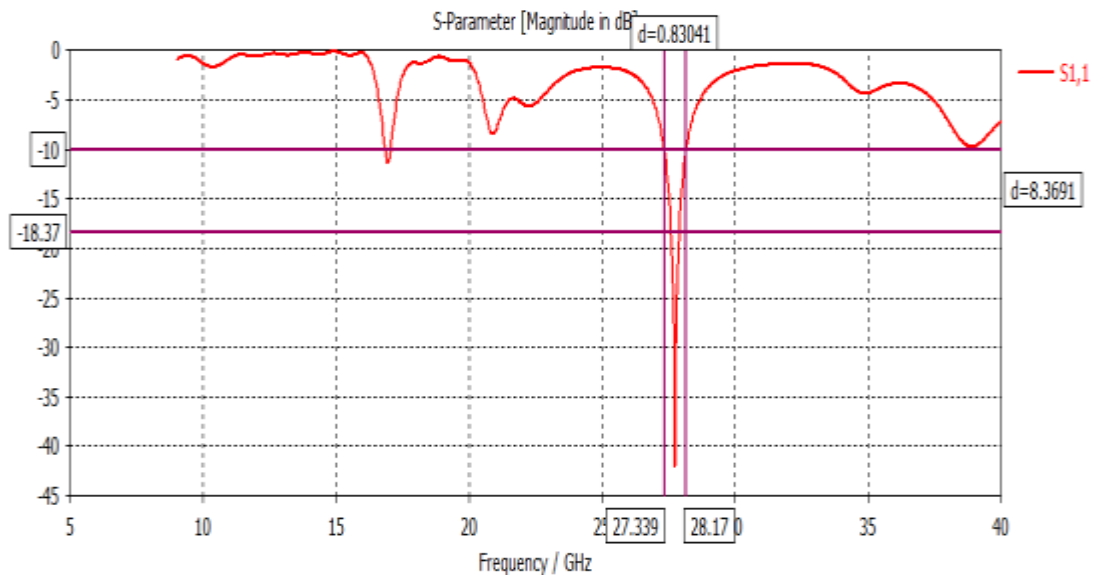


Figure 3.11: La bande passante et le coefficient de réflexion après l'augmentation de la valeur de la hauteur de substrat h_s .

Une bande passante de **0.83 GHz** et un **S11=-41.97dB** à la fréquence 27.7 GHz pour un **$h_s=$** et une atténuation des bandes de fréquences à 16.9 GHz et 21 GHz sont obtenues.

Une nouvelle optimisation est lancée sur les paramètres de l'antenne pour faire ressortir deux fréquences de résonances. Une nouvelle fente de largeur et de longueur de est aussi inséré dans le plan de masse. La figure 3.12 illustre cette antenne.

La figure 3.13 illustre le coefficient de réflexion après cette optimisation.

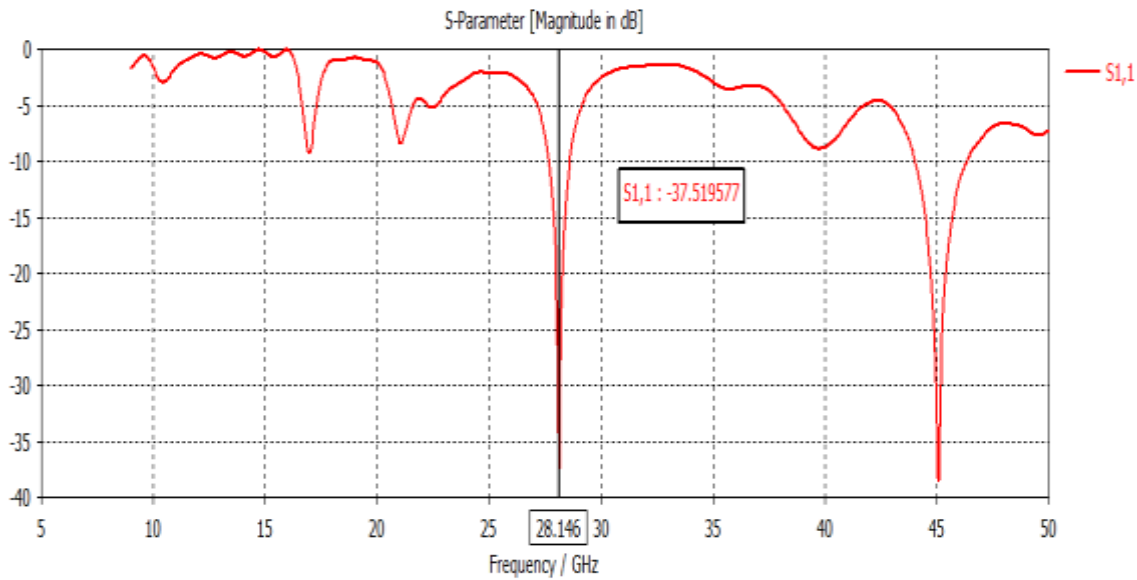


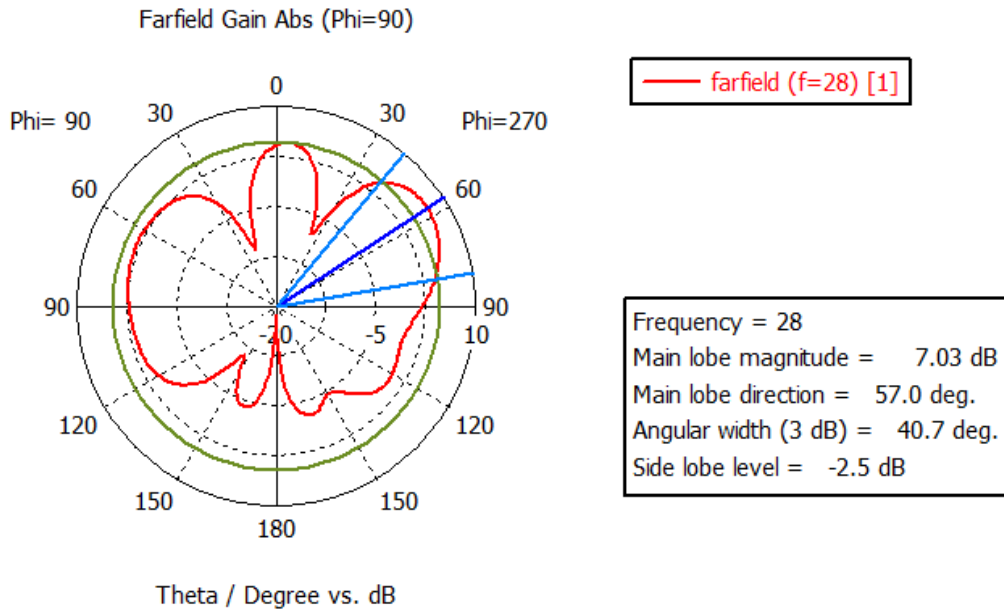
Figure 3.13: le coefficient de réflexion S11 de l'antenne conçue après l'ajout de la fente dans le plan de masse.

Les résultats obtenus montrent :

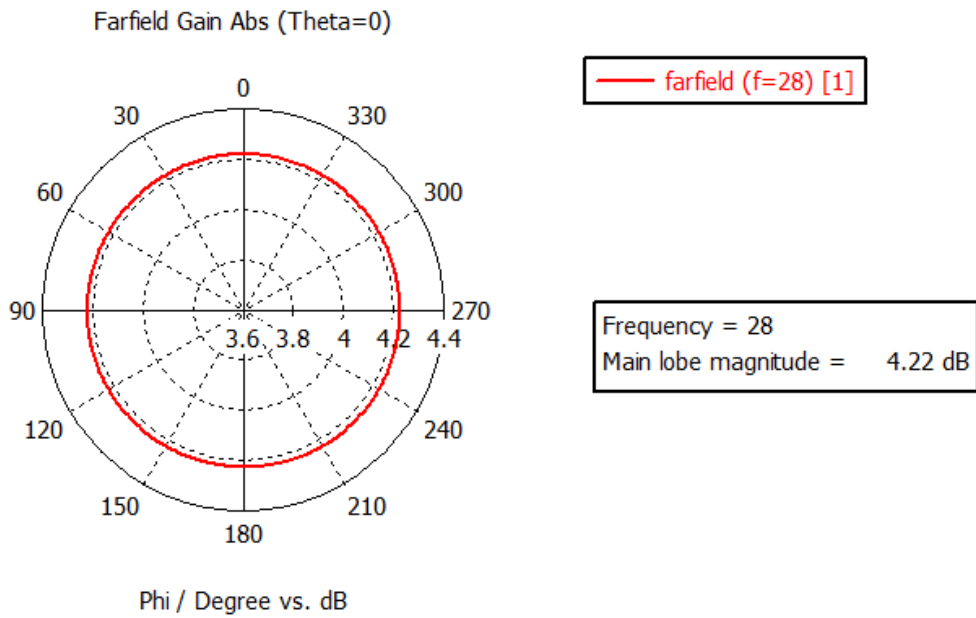
- Une bande de fréquence à 45 GHz avec un $S_{11} = -38.37\text{dB}$ et une bande passante égale à 2.28 GHz.
- Une bande de fréquence à 28 GHz avec un $S_{11} = -37.51\text{dB}$ et une bande passante égale à 0.93 GHz.

Ces résultats répondent parfaitement à l'exigence du cahier de charge de la 5G qui limite la bande passante à 0.8 GHz, avec des fréquences de résonance dans la bande millimétrique.

Les diagrammes de rayonnement à 28GHz et 45 GHz sont donnés sur les figures 3.14 et 3.15.

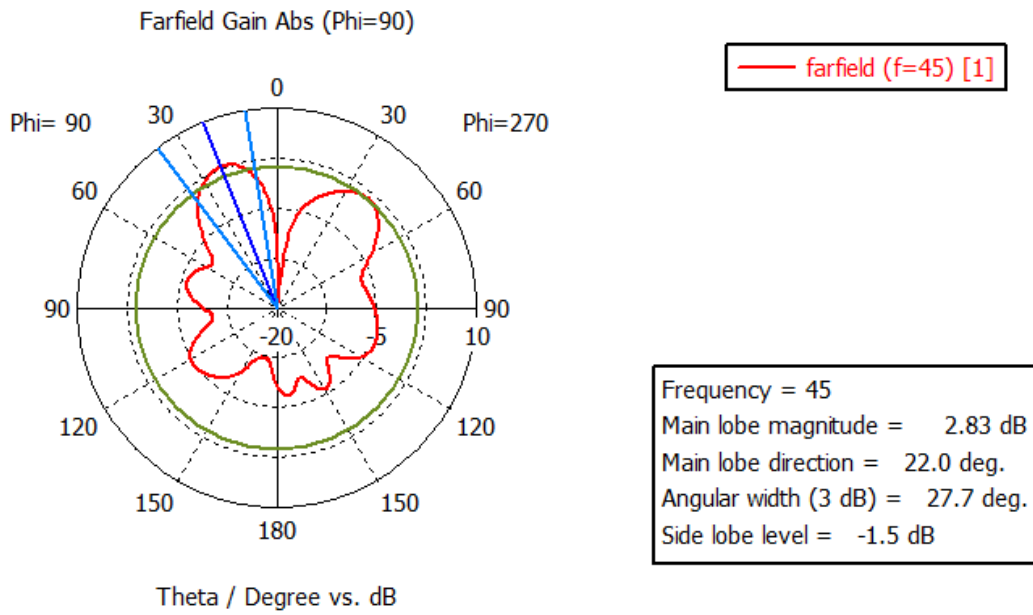


(a)

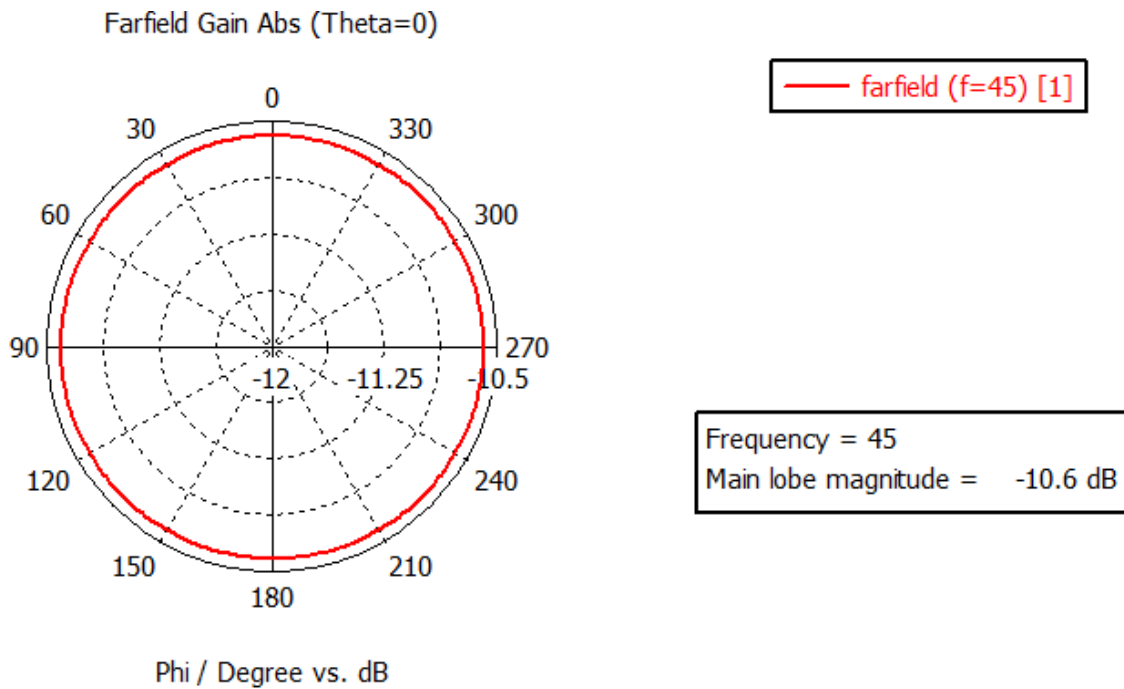


(b)

Figure 3.14: Diagramme de rayonnement polaire de l'antenne à 28 GHz pour (a) le plan E (b) le plan H.



(a)



(b)

Figure 3.15: Diagramme de rayonnement polaire de l'antenne à 45 GHz pour (a) le plan E et (b) le plan H.

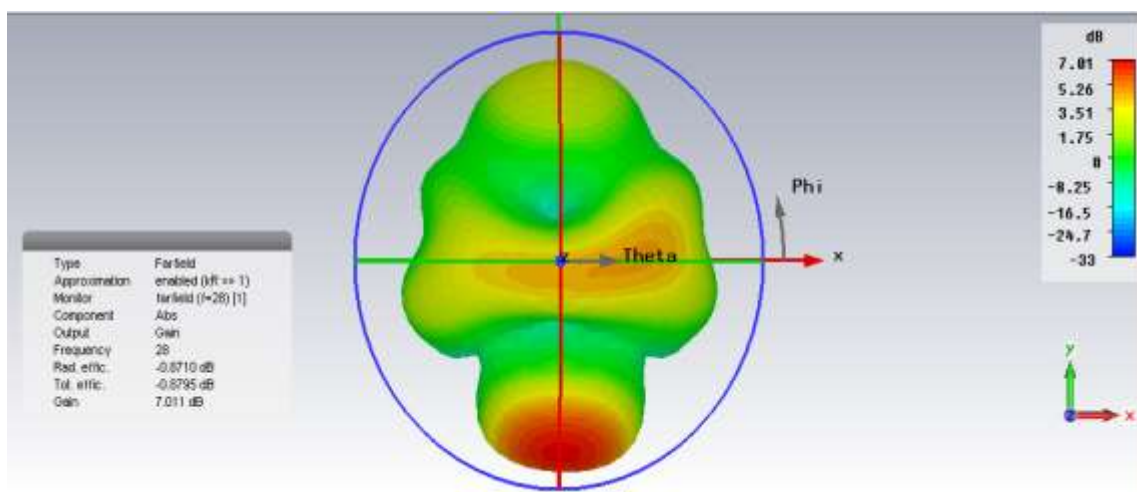


Figure 3.16: le diagramme de rayonnement de l'antenne à 28 GHz en 3D.

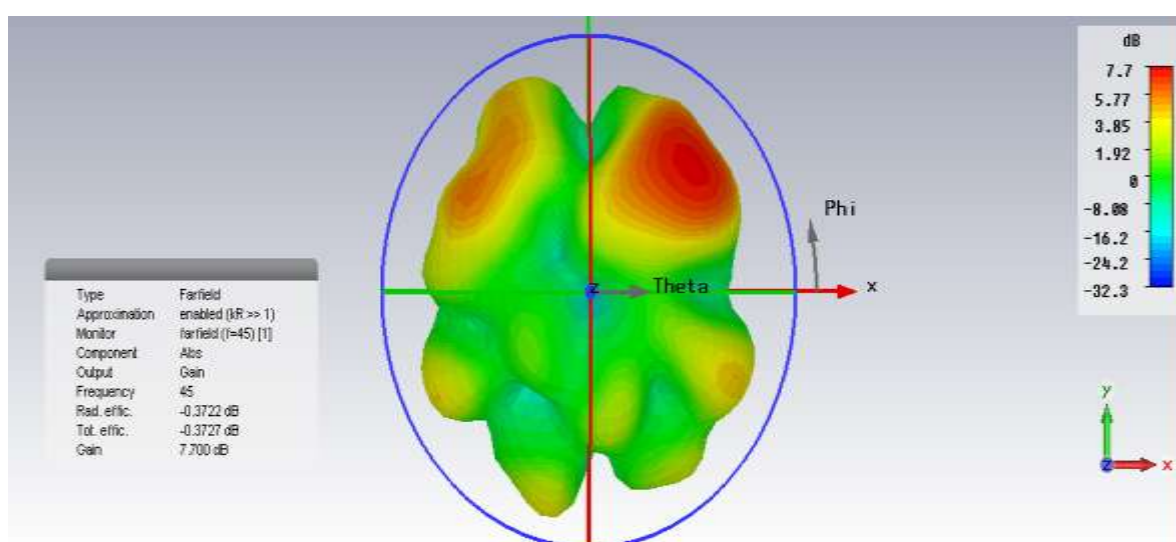


Figure 3.17: le diagramme de rayonnement de l'antenne à 45 GHz en 3D.

3.6 Conclusion

Ce chapitre avait comme objectif la conception d'une antenne qui répond au cahier de charge de la 5G pour des fréquences dans la bande millimétrique.

Pour atteindre cet objectif nous avons commencé par la conception d'une antenne simple avec des performances limitées. Par la suite nous avons apporté plusieurs modifications à cette antenne pour, enfin, obtenir les performances souhaitées.

Enfin, l'étude comparative avec des travaux de recherche récents qui utilisent les mêmes paramètres de fréquence et de bande passante, confirme que notre conception est acceptable pour des applications 5G.

Conclusion générale

Porté par un intérêt accru envers la cinquième génération (5G) en tant que technologie prometteuse pour les télécommunications mobile, la communauté scientifique cherche toujours à atteindre des meilleures performances. Cependant, garantir une bonne qualité tout en alliant les limitations de complexité, temps de latence, coût, gain etc., reste un défi qui occupe les chercheurs. Dans le premier chapitre de ce mémoire, les généralités sur la 5G avec ses technologies clés ont été présentées d'une manière générale afin de se familiariser avec le concept de base de ces notions. Nous avons ensuite présenté les antennes imprimées et les réseaux d'antennes étant donné qu'ils constituent une bonne solution qui a pu améliorer les performances du système.

L'objectif de ce travail était la conception d'une antenne patch pour des applications 5G dans la bande des ondes millimétriques. Nous avons dans un premier temps mis l'accent sur la conception de l'antenne élémentaire. Évidemment, l'antenne doit assurer de meilleures performances dans la bande désirée. Notre choix s'est penché vers une antenne imprimée grâce à ses nombreux avantages en particulier ses faibles dimensions qui permettent son intégration aisée dans un réseau. Notre conception a commencé par une antenne rectangulaire de base et afin d'améliorer sa bande passante étroite à l'origine, nous avons mené des études paramétriques et certaines modifications aboutissant à une antenne bi-bande qui résonne aux fréquences 28 GHz et 45 GHz avec des bande passantes qui dépasse de loin les 800 MHz exigé par le cahier de charge de la 5G.

Une comparaison avec des articles de la littérature à montrer que notre antenne présente des performances très acceptable et peut-être appliquée dans des systèmes 5G.

Bibliographie

- [1] *Réseau 5G:déploiement, fonctionnement, usages et smartphones compatibles en France*, frandroid.com.
- [2] B. O. G. e. Z. F. D. Stéphane, *Evolution technologique de la 3G et 3G+*, Université de Picardie Jules Verne - Master 2 Systèmes d'information et Informatique Nomade (SIIN), 2009.
- [3] «Evaluation de L'exposition du public aux ondes électromagnétiques 5G,» Agence National Des Fréquences, 2019.
- [4] autorité de régulation des communications électroniques et des postes , *Les Enjeux De La 5G*, 2017.
- [5] J. G. A. a. R. M. A. Ghosh J. Zhang, *Fundamentals of LTE*, Upper Saddle River , NJ: Pearson Education, 2010.
- [6] S. B. G. C. A. M. F. R. a. A. U. Paolo Banelli, «"Modulation Formats and Waveforms for 5G Networks: Who Will Be the heir of OFDM",» *IEEE SIGNAL PROCESSING MAGAZINE*, NOVEMBRE 2014.
- [7] H. O. a. H. Imai, "On the distribution of the peak-to-average power ratio in OFDM signals", vol. 49, *IEEE Trans. Commun*, 2001, pp. 282-289.
- [8] S. Haykin, "Cognitive radio: Brain-empowered wireless communication", vol. 23, *IEEE J. Select. Areas Commun*, 2005, pp. 201-220.
- [9] L. Chouitti, *contribution a l'étude d'antenne imprimées rectangulaires doubles-bandes et multi-bandes tenant compte de l'effet de couplage*, Institut d'électronique, Université de Constantine, 2009.
- [10] Balanis.A, *Antenna theory analysis and design*, 2005.
- [11] D.Aissaoui, *Analyse A L'Aide De Modèles Equivalents D'antennes Imprimées Alimentées Par Lignes Adaptées*, Université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen : Mémoire de Magister, 2007.
- [12] D. Ameziane, *Etude et optimisation d'antennes fractales plaquées*, Université abou bakr Belkaid de Tlemcen: Memoire de magiset , 2008.
- [13] M. S. F. A. Belainine, *Etude de la miniaturisation des antennes par repliement application pour la conception d'une antenneghz*, Alger, 2013.
- [14] B. S. MEDDOUR Meriem, *Etude et simulation d'une antenne microruban dans la bande WIFI 5Ghz*, Ourgladépartement d'Electronique et Des Télécommunications, 2017.
- [15] D. Emùanuel, *Conception, optimisation et intégration RF d'un système d'antennes miniatures multi capteur utilisant la diversité en vue d'augmenter les performances radio d'un terminal mobile 4G*, L'Institut polytechnique de Grenoble: Docteur de l'Université de Grenoble délivré par L'Institut polytechnique de Grenoble, 2010.
- [16] S. Vergerio, *Recherche des caractéristiques optimales d'antennes multi-capteurs pour les systèmes MIMO*, Docteur de l'université de Province, 2007.
- [17] G. Mohamed, *Conception d'une antenne "PIFA" multibandes pour applications sans fil*, Université sidi Mohammed Ben Abdellah, Faculté des sciences et techniques Fés, Département Génie électrique, 2016.
- [18] *Les antennes : théorie, conception et applications*, paris: Dunod, 2009.

- [19] https://www.ece.mcmaster.ca/faculty/nikolova/antenna_dload/current_lectures/L21_Mstrip2.pdf, 2014, 2014, Nikolova.
- [20] C. Fung, *Basic antenna theory and application*, Worcester Polytechnic Institute, 2011.
- [21] V. L. Subrahmanya, *Pattern Analysis of the rectangular microstrip patch antenna*, University Colledge of Boras, 2009.
- [22] C. Leila, *contribution a l'étude d'antennes imprimées rectangulaires double bande et multi bande tenant compte l'effet de couplage*, Université Mentouri-Constantine, Algérie, 2009.
- [23] B. Somia, *Contribution a l'etude et a la modelisation des antennes imprimées rectangulaires: Application aux communication*, Université 8 Mai 1945.
- [24] B. Amel, *contribution a l'etude des antennes a patch résistif parfaitement conducteur tenant compte d'une source d'excitation et des nouvelles formes asymptotique de courant*, constantine, université mentouri de constantine, 2006.
- [25] R. Alhalabi, *High efficiency planar and RFIC -based antennas for millimeter-wave communication systems*, université de california-san diego: Thèse Doctorat, 2010.
- [26] B. Nassima, *CONCEPTION DES ANTENNES PIFA MONO-BANDE ET MULTI-BANDES GSM, DCS, PCS, UMTS ET WIFI*, Tlemcen, GÉNIE ÉLECTRIQUE ET D'ELECTRONIQUE, 2013.
- [27] O. M. A. e. K. Yassine, *Étude et simulation d'antennes imprimées à commande de phase*, Ain-Temouchent, 2019.
- [28] A. A. a. E. K. I. Hamad, *Design of a Compact High Gain Microstrip Patch Antenna for Tri-Band 5G Wireless Communication*, 2019.
- [29] L. Chouitti, *contribution à l'étude d'antenne imprimées rectangulaires doubles-bandes et multi-bandes tenant compte de l'effet de couplage*, Institu d'électronique, Université de Constantine, 2009.
- [30] Balanis.A, *Antenna theory analysis and design*, 2005.
- [31] M. S. F.A. Belainine, *Etude De La Miniaturisation Des Antennes Par Repliection Application Pour La Conception D'une Antenne 2.4ghz*, Alger, Université Houari Boumediene d'Alger, 2013.
- [32] D. Ameziane, *Etude Et Optimisation D'antennes Fractales Plaquées*, Université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen: Mémoire de Magister, 2008.
- [33] B. S. MEDDOUR Meriem, *Etude et simulation d'une antenne microbande dans la bande WiFi 5 GHz*, Ouargla, Département d'Electronique et Des Télécommunications, 2017.
- [34] D. Emmanuel, *Conception, optimisation et intégration RF d'un système d'antennes miniatures multi capteurs utilisant la diversité en vue d'augmenter les performances radio d'un terminal mobile 4G*, l'Institut polytechnique de Grenoble: Docteur de l'Université de Grenoble délivré par l'Institut polytechnique de Grenoble, 2010.
- [35] S. Vergerio, *Recherche des caractéristiques optimales d'antennes multi-capteurs pour les systèmes MIMO*, Docteur de l'Universite de Provence, 2007.
- [36] G. Mohamed, *Conception d'une antenne "PIFA" multibandes pour applications sans fil*, Université Sidi Mohamed Ben Abdellah, Faculté des Sciences et Techniques Fès, Département Génie Electrique, 2016.
- [37] O. P. e. coll, *Les antennes : théorie, conception et applications*, Paris: Dunod, 2009.
- [38] http://www.ece.mcmaster.ca/faculty/nikolova/antenna_dload/current_lectures/L21_Mstrip2.pdf, Nikolova, 2014.

- [39] V. L. Subrahmanya, *Pattern Analysis of the rectangular microstrip patch antenna*, University College of Boras, 2009.
- [40] C. Fung, *Basic antenna theory and application*, Worcester Polytechnic Institute, 2011.
- [41] C. A. Balanis, *Antenna theory : Analysis and Design*, third edition, 2005.
- [42] C. Leila, *Contribution à l'étude d'antennes imprimées rectangulaires double bande et multi bandes tenant compte de l'effet de couplage*, Université Mentouri-Constantine, Algérie, 2009.
- [43] B. Somia, *Contribution à l'étude et à la modélisation des antennes imprimées rectangulaires : Application aux systèmes de communication*, Université 8Mai 1945, 2012.
- [44] B. Amel, *Contribution à l'étude des antennes à patch résistif et parfaitement conducteur tenant compte d'une source d'excitation et des nouvelles formes asymptotique de courant*, Constantine, Université Mentouri de Constantine, 2006.
- [45] D. Aissaoui, *Analyse A L 'Aide De Modèles Equivalents D'antennes Imprimées Alimentées Par Lignes Adaptées*, Université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen: Mémoire de Magister, 2007.
- [46] R. Alhalabi, *High efficiency planar and RFIC-based antennas for millimeter-wave communication systems*, Université de California-San Diego : Thèse Doctorat, 2010.