

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la  
Recherche scientifique

جامعة سعد دحلب البليدة  
Université SAAD DAHLAB de BLIDA 1

كلية التكنولوجيا  
Faculté de Technologie

قسم الإلكترونيك

Département d'Électronique



## MEMOIRE DE MASTER

Filière : Télécommunication

Spécialité : Réseaux Des Télécommunications

Présenté par :

 *OUADFEL Ilham*

 *HAFSA Sarah*

## Miniaturisation d'antennes pour les applications de communication sans fil

Proposé par :

- Mme BERKAT Zeyneb
- Mr MOSBAH Abdelkader

Année Universitaire : 2022-2023

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

## ملخص

هذا المشروع يهدف إلى إجراء رسالة ماجستير في مجال الاتصالات، حيث يركز على تصميم وبحث هوائيات الباتش المطبوعة لتطبيقات الجيل الخامس والجيل السادس. تتضمن الأعمال نهجًا مجتمعاً يجمع بين الجوانب النظرية والمنهجية والمفاهيمية لتصميم وتحسين هوائي مستطيل مطبوع صغير الحجم، يتم تغذيته بخط ميكروستريب، ويتردد ضمن نطاق ترددات الجيل الخامس (3.5-4 جيجا هرتز). يعتمد التصميم على دراسة معلمات الباتش، بهدف تحسين تكيف الهوائي. يتم تصميم الهوائيات على القاعدة FR-4 وباستخدام محاكي CST MICRO WAVE STUDIO.

**كلمات مفتاحية:** الجيل الخامس، الجيل السادس، CST

## Résumé

Ce projet de recherche vise à réaliser un mémoire de master en télécommunications en se concentrant sur la conception et la recherche d'antennes imprimées Patch pour les applications 5G et 6G. Les travaux incluent une approche combinant des aspects théoriques, méthodologiques et conceptuels afin de concevoir et d'optimiser une antenne rectangulaire imprimée de petite taille, alimentée par une ligne microstrip, qui résonne dans la bande de fréquences 5G (3.5GHz ; 4GHz). La conception repose sur une étude paramétrique du patch, visant à améliorer l'adaptation de l'antenne. Les antennes sont conçues en utilisant le simulateur CST Microwave Studio (CST) sur un substrat FR-4.

**Mots clés:** 5G, 6G, CST Microwave Studio (CST)

## Abstract

This research project aims to undertake a master's thesis in telecommunications focusing on the design and research of printed patch antennas for 5G and 6G applications. The work encompasses a combined approach of theoretical, methodological, and conceptual aspects to design and optimize a miniature rectangular printed antenna fed by a microstrip line, resonating within the 5G frequency range (3.5 GHz -4 GHz). The design is based on a parametric study of the patch, aiming to enhance antenna matching. The antennas are designed using the CST Microwave Studio (CST) simulator on an FR-4 substrate.

**Keywords:** 5G, 6G, CST Microwave Studio (CST).

## REMERCIEMENTS

Nos remerciements vont d'abord au Créateur ALLAH de l'univers pour nous avoir dotés d'intelligence et nous avoir maintenu en bonne santé.

Nous souhaitons exprimer nos remerciements les plus sincères à notre promotrice, Mme BERKAT Zeyneb. Les mérites de ce mémoire reviennent certes à l'auteur, mais également à la Directrice qui l'a supervisé. Dans notre cas, notre Directrice a été d'un soutien précieux et a fait preuve d'une attention exceptionnelle. Nous sommes reconnaissants de la confiance qu'elle nous a accordée face aux défis rencontrés et de ses efforts pour nous guider dans la recherche de solutions.

Nous tenons également à remercier M. MOSBAH Abdelkader pour la confiance qu'il a placée en nous. Nous sommes reconnaissants de son soutien dans la réalisation des expériences, des mesures effectuées et de sa sympathie à notre égard.

Nous tenons également à remercier les membres du jury d'avoir accepté d'évaluer notre travail. Leur participation est précieuse pour nous.

Nous souhaitons exprimer notre profonde gratitude au Chef de Département d'Électronique, M. Hocine AIT SAADI, ainsi qu'à l'ensemble des enseignants et du personnel de notre Département. Leur soutien et leur contribution ont été essentiels tout au long de notre parcours.

Nous ne pouvons oublier de remercier chaleureusement nos familles. Nous leur disons tout simplement MERCI. Leur présence, leur écoute, leur confiance et leur soutien constant nous ont offert des bases solides pour persévérer et nous dépasser.

Enfin, nous tenons à exprimer nos remerciements à tous ceux qui nous ont apporté leur aide, de près ou de loin, dans l'élaboration de ce travail.



## Dédicace

*Avec l'expression de ma reconnaissance, je dédie ce modeste travail à ceux qui, quels que soient les termes embrassés, je n'arriverais jamais à leur exprimer mon amour sincère.*

*A l'homme, mon précieux offre du dieu, qui doit ma vie, ma réussite et tout mon respect : mon cher père Djamel.*

*A la femme qui a souffert sans me laisser souffrir, qui n'a jamais dit non à mes exigences et qui n'a épargné aucun effort pour me rendre heureuse : mon adorable mère Djamila.*

*A mes chers sœurs et frères qui n'ont pas cessé de me conseiller, encourager et soutenir tout au long de mes études. Que Dieu les protège et leurs offre la chance et le bonheur.*

*A mes grands-mères, mes oncles et mes tantes. Que Dieu leur donne une longue et joyeuse vie.*

*A tous les cousins, les voisins et les amis que j'ai connu jusqu'à maintenant.*

*Merci pour leurs amours et leurs encouragements.*

*Sans oublier ma binôme Sarah pour son soutien moral, sa patience et sa compréhension tout au long de ce projet.*

**OUADFEL Ilham**



## **Dédicace**

*Je souhaite dédier ce travail avec une gratitude profonde et des mots sincères, accompagnés d'un amour immense.*

*À la mémoire de mon grand-père c'est vrai qu'il n'est pas avec nous pour récolter le fruit de ses sacrifices, mais il reste toujours le plus présent.*

*À mon cher père, qui m'a soutenu dès le début et en qui j'ai eu toute confiance. Tout mon amour et ma reconnaissance lui sont dédiés.*

*À ma chère mère, pour tous ses sacrifices, son amour, sa tendresse, son soutien et ses prières tout au long de nos études.*

*A ma chère grand-mère, que ce modeste travail soit l'expression des vœux qu'elle n'a cessé de formuler dans ses prières, que Dieu la préserve en bonne santé et longue vie.*

*A mon oncle Boulem, qui a été toujours là pour moi pour me soutenir et m'encourager, que dieu lui donne une longue et joyeuse vie.*

*A mon oncle Salim , qui a toujours cru en moi .*

*À mes amies, mes sœurs et mes cousines, qui ont été présentes à mes côtés.*

*Sans oublier mon binôme Ilhem pour son soutien moral, sa patience et sa compréhension tout au long de ce projet.*

**HAFSA Sarah**

## Sommaires

INTRODUCTION GENERALE .....	1
CHAPITRE I : LES AVANCEES DE LA TECHNOLOGIE 5G ET LES PERSPECTIVES DE LA TECHNOLOGIES 6G .....	3
I.Introduction : .....	4
II.Réseaux cellulaires : .....	5
<b>II.1 Evolution des standards de télécommunications cellulaires : .....</b>	<b>6</b>
III.La 5eme Génération : .....	7
<b>III .1 Nécessité de la 5G : .....</b>	<b>7</b>
<b>III.2 Domaines d'applications de la 5G : .....</b>	<b>7</b>
<b>III.3 Les Objectifs de 5G : .....</b>	<b>8</b>
<b>III.4 Architecture de la technologie 5G : .....</b>	<b>10</b>
<b>III.5 Spectre pour 5G : .....</b>	<b>14</b>
<b>III.6 Les communications à ondes millimétriques (MMW) : .....</b>	<b>16</b>
<b>III.7 Futurs systèmes de communication sans fil (5G) dans la bande Ka : ...</b>	<b>17</b>
<b>III.8 La bande SUB 6G.....</b>	<b>17</b>
IV.La Technologie 6G : .....	18
V.Conclusion : .....	19
CHAPITRE II : ANTENNES POUR NOUVELLES APPLICATIONS DE COMMUNICATION SANS FIL (5G-6G) .....	20
I.Introduction : .....	21
II.Définition d'une antenne : .....	21
III.Différents types d'antennes : .....	22
<b>III.1 Antennes filaires : .....</b>	<b>24</b>
<b>III.2 Antennes à ouverture : .....</b>	<b>24</b>
<b>III.3 Antennes micro ruban : .....</b>	<b>25</b>
<b>III.4 Antennes à réflecteur : .....</b>	<b>26</b>
<b>III.5 Antennes multi-bandes : .....</b>	<b>26</b>
IV.Principe de fonctionnement des antennes .....	27
<b>IV.1 Antenne d'émission : .....</b>	<b>27</b>
<b>IV.2 Antenne de réception : .....</b>	<b>27</b>
<b>IV.3 Réciprocité : .....</b>	<b>27</b>

V. Les antennes Patch Micro ruban :.....	28
<b>V.1 Structure d'une antenne patch :</b> .....	<b>29</b>
<b>V.2 Avantages et inconvénients de l'antenne patch :</b> .....	<b>29</b>
VI. Les paramètres et caractéristiques d'antenne :.....	30
<b>VI.1 Diagramme de rayonnement :</b> .....	<b>30</b>
<b>VI.2 Directivité :</b> .....	<b>31</b>
<b>VI.3 Gain :</b> .....	<b>31</b>
<b>VI.4 Le coefficient de réflexion <math>S_{11}</math> :</b> .....	<b>32</b>
<b>VI.5 L'impédance d'entrée :</b> .....	<b>32</b>
<b>VI.6 Rapport d'onde stationnaire (ROS) :</b> .....	<b>33</b>
<b>VI.7 Fréquence de résonance et bande passante :</b> .....	<b>34</b>
VII. Techniques d'alimentation d'une antenne micro ruban .....	34
<b>VII.1 Alimentation par ligne micro ruban :</b> .....	<b>35</b>
VII.1.1 Techniques d'adaptation de la ligne par micro ruban : .....	35
<b>VII.2 Alimentation par sonde coaxiale :</b> .....	<b>36</b>
<b>VII.3 Alimentation couplée par ouverture :</b> .....	<b>36</b>
VIII. Conclusion : .....	37
CHAPITRE III : CONCEPTION ET SIMULATION D'UN ANTENNE MINIATURISEE EN INTEGRANT LES APPROCHES DGS ET DMS.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
I. INTRODUCTION :.....	39
II. OUTIL DE SIMULATION :.....	39
<b>II.1 Conception d'une antenne rectangulaire à 3.7GHZ :</b> .....	<b>40</b>
<b>II.2 Les techniques de miniaturisations :</b> .....	<b>43</b>
II.2.1 Defected Microstrip Structures (DMS): .....	43
II.2.2 Defected ground structure (DGS): .....	43
III. Antenne patch avec DMS:.....	44
IV. Antenne patch avec DGS :.....	47
V. Combinaison de DMS et DGS pour une antenne patch:.....	50
VI. Etude paramétrique sur quelques paramètres : .....	51
<b>VI.1 La méthode DMS :</b> .....	<b>51</b>
<b>VI.2 La méthode DGS :</b> .....	<b>51</b>
VII. Comparaison entre le patch initiale et le patch finale (après miniaturisation) :.....	52

*Table des matières*

---

VIII.Conclusion : .....	53
CONCLUSION GÉNÉRALE : .....	54
LES REFERENCES:.....	55

## Liste des figures

Figure I.1 :l'évolution de la 1G à la 5G .....	4
FigureI.2 : Un réseau cellulaire de base .....	5
Figure I.3: les applications de réseaux 5G .....	8
Figure I.4: Un réseau cellulaire 5G .....	10
Figure I.5: session PDU et flux QOS : plan utilisateur (UP).....	11
Figure I.6: la séparation fonctionnelle entre NG-RAN et 5GC .....	12
Figure I.7: Architecture de NG-RAN .....	12
Figure I.8: L'architecture du système 5G, NO-Roaming .....	14
Figure I.9: Spectre 5G .....	15
FigureI.10 : Évolution du LTE en combinaison avec une nouvelle technologie d'accès radio 5G .....	16
Figure I.11 : Présentation de la 6G .....	18
Figure II.1 : Rayonnement d'une antenne .....	22
Figure II.2 : Les différents types d'antennes .....	24
Figure.II.3 : Configuration de l'antenne filaire .....	24
Figure II.4 : Configurations d'antennes à ouverture .....	25
Figure II.5 : Antennes micro ruban (patch) rectangulaires et circulaires .....	26
Figure II.6 : Configurations typiques des réflecteurs .....	26
Figure II.7 : Structure d'une antenne imprimée .....	28
Figure II.8 : structure d'une antenne patch .....	29
FigureII.9 : Exemple d'un diagramme de rayonnement en 3D,Et diagramme dans le plan YoZ (gain en dB) .....	31
Figure II.10 : Antenne en mode émetteur .....	32
Figure II.11 : Illustration de la bande passante à -10 dB d'une antenne .....	34
Figure II.12 : Alimentation par ligne micro ruban .....	35
Figure II.13 : Alimentation par sonde coaxiale .....	36
Figure II.14: Alimentation couplée par ouverture .....	36
Figure III.1 : logiciel CST studio Microwave.....	40
Figure III.2: structure d'antenne Patch adaptée .....	41
Figure III .3 : S11 du patch .....	42
Figure III.4 : S11 de 1 ère prototype.....	44
Figure III.5 : S11 de 2ème prototype.....	44
Figure III.6 : S11 de l'antenne finale.....	45
Figure III.7: Diagramme de rayonnement en 3D.....	45
Figure III.8 : le courant de surface.....	46
Figure III.9 : (a) Antenne avec modification de quatre coins et (b) S <sub>11</sub> en fonction de la fréquence .....	47
Figure III.10 : Diagramme de rayonnement en 3D de prototype 1.....	47
Figure III.11 : (a) Antenne avec modification de 14 coins et (b) S <sub>11</sub> en fonction de la fréquence. ....	48

Figure III.12 : (a) Antenne de prototype 3 et (b) S11 en fonction de la fréquence. ....	48
Figure III.13 : (a) Antenne avec plusieurs modifications et (d) S11 en fonction de la fréquence. .....	48
Figure III.14 : (a) Antenne avec les dernières modifications et (b) S11 en fonction de la fréquence. ....	49
Figure III.15: Diagramme de rayonnement d'antenne finale en DGS.....	49
Figure III.16 : (a) Antenne avec la méthode DMS et (b)Antenne avec la méthode DGS .....	50
Figure III.17: S11 en fonction de la fréquence d'antenne combinée en DGS/DMS.....	50
Figure III.18 : Diagramme de rayonnement en 3D d'antenne miniaturisée.....	50
FigureIII.19 : (a) la paramètre étudiée et (b) Paramètre S11 simulé pour les valeurs d'Y1. ...	51
FigureIII.20: (a) la paramètre étudiée et (b) Paramètre S11 simulé pour les valeurs de X1. ..	52
FigureIII.21 : comparaison en Paramètre S11 simulé dans le patch initial et finale.....	52

## **Liste des tableaux**

<b>Tableau I. 1</b> Résumé des générations de communications mobiles .....	6
<b>Tableau III.1:</b> Caractéristiques des composants d'antenne et des matériaux utilisés .....	41
<b>Tableau III.2 :</b> Formules et calculs des paramètres d'antenne .....	41
<b>Tableau III.3</b> les dimensions d'antenne de référence .....	42
<b>Tableau III.4 :</b> Comparaison entre les caractéristiques d'antenne .....	46
<b>Tableau III.5 :</b> Comparaison entre les caractéristiques d'antenne initial et final .....	53

## Liste des abréviations

<b>Abréviation</b>	<b>Signification</b>
<b>1G</b>	<b>Première génération des réseaux cellulaire.</b>
<b>2G</b>	<b>Deuxième génération des réseaux cellulaire.</b>
<b>3G</b>	<b>Troisième génération de réseaux cellulaire.</b>
<b>4G</b>	<b>Quatrième génération des réseaux cellulaire.</b>
<b>5G</b>	<b>Cinquième génération des réseaux cellulaire.</b>
<b>5GC</b>	<b>Cinquième génération Core Network.</b>
<b>5G NR</b>	<b>Cinquième génération New Radio.</b>
<b>6G</b>	<b>6eme generation.</b>
<b>AN</b>	<b>Access Network.</b>
<b>dB</b>	<b>Décibel.</b>
<b>GHz</b>	<b>Gigahertz.</b>
<b>gNB</b>	<b>gNodeB gNB-CU Next Generation NodeB-Central Unit .</b>
<b>gNB-CU-CP</b>	<b>Next Generation NodeB-Central Unit-Control Plane.</b>
<b>gNB-CU-UP</b>	<b>Next Generation NodeB-Central Unit-UserPlane .</b>
<b>gNB-DU</b>	<b>Next Generation NodeB-Distributed Unit .</b>
<b>http</b>	<b>Hyper Text Transfer Protocol.</b>
<b>LTE</b>	<b>Long Term Evolution.</b>
<b>MHz</b>	<b>Mégahertz.</b>
<b>MMW</b>	<b>Millimeter Wave</b>
<b>NGCN</b>	<b>Next Generation Core Network.</b>

<b>NG-RAN</b>	<b>Next-Generation Radio Access.</b>
<b>NR</b>	<b>New Radio.</b>
<b>PDU</b>	<b>Protocol Data Unit.</b>
<b>QOS</b>	<b>Qualité de Service.</b>
<b>ROS</b>	<b>Le rapport d'ondes stationnaires.</b>
<b>TCP</b>	<b>Transmission Control Protocol.</b>

## Liste des symboles :

$\epsilon$	Permittivité électrique
$\epsilon_0$	Permittivité électrique dans le vide
$\epsilon_r$	Permittivité relatif au milieu
$\lambda$	La longueur d'onde
$C$	La célérité de la lumière
$T$	La période
$f$	La fréquence
$f_{\min}$	La fréquence minimale
$f_{\max}$	La fréquence maximale
$f_c$	La fréquence de résonance
$P$	La densité de puissance surfacique
$P_r$	Puissance rayonnée
$D(\theta, \varphi)$	La directivité d'une antenne
$P(\theta, \varphi)$	L'intensité de rayonnement dans une direction
$P(\theta, \varphi)_{iso}$	L'intensité de puissance de source isotrope
$I$	Le courant
$V$	La tension
$Z_e$	Impédance d'entrée
$B_p$	Bande passante
$\eta$	Le rendement
$R_r$	Resistance de rayonnement
$R_p$	Resistance liées aux pertes

$S_{11}$	Coefficient de Réflexion
$Z_r$	Impédance caractéristique
$\Delta$	Dalta

## INTRODUCTION GENERALE

La technologie sans fil a révolutionné notre manière de communiquer et d'interagir avec le monde qui nous entoure. Les progrès continus dans le domaine des télécommunications ont donné lieu à des réseaux mobiles plus rapides, fiables et polyvalents tels que la 5G et la prometteuse 6G. Toutefois, pour exploiter pleinement le potentiel de ces réseaux de nouvelle génération, il est crucial de développer des antennes miniaturisées et performantes pouvant être intégrées dans des dispositifs compacts.

Le présent mémoire se concentre sur un aspect crucial de l'évolution technologique, à savoir la miniaturisation des antennes patch imprimées dans le contexte des technologies 5G et 6G. En réduisant la taille des antennes patch tout en préservant leurs performances, nous ouvrirons de nouvelles perspectives d'applications et améliorerons l'expérience des utilisateurs de dispositifs sans fil. Les antennes patch imprimées offrent de nombreux avantages, tels que leur faible coût, leur facilité de fabrication et leur compatibilité avec les circuits imprimés. Toutefois, leur taille relativement importante pose un défi pour leur intégration dans des dispositifs électroniques de plus en plus compacts et portables.

Par ailleurs, cette étude se penchera sur les défis spécifiques liés à l'adaptation des antennes miniaturisées aux bandes de fréquences Sub 6GHz utilisées dans les réseaux 5G. Contrairement aux bandes millimétriques, ces fréquences ne présentent pas de problèmes majeurs de propagation et de perte de signal. Par conséquent, il est essentiel que la conception des antennes miniaturisées tienne compte de ces contraintes afin d'assurer une communication efficace et fiable.

Le premier chapitre aborde les aspects fondamentaux de la 5G, en mettant l'accent sur les objectifs, l'architecture physique et logique, ainsi que les nouveaux concepts technologiques qui en font une révolution dans le domaine des communications mobiles. Nous présentons une introduction détaillée à la 5G, couvrant les principes de base.

Le deuxième chapitre offre une vue d'ensemble des antennes, en fournissant une description de leurs différentes formes, en se concentrant sur l'antenne patch. Nous examinons leurs avantages et inconvénients, leurs caractéristiques et diverses techniques d'alimentation. Cette partie se conclut par une présentation des domaines d'application de ces antennes.

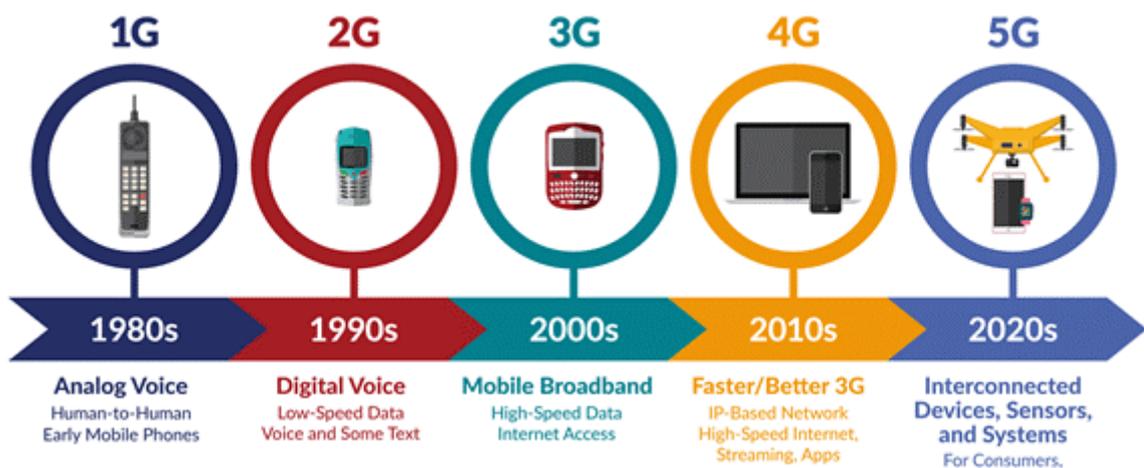
Dans le dernier chapitre, nous nous concentrons sur la conception d'antennes imprimées intégrant les techniques DGS (Defected Ground Structure) et DMS (Defected Microstrip Structure) pour la nouvelle génération de téléphonie mobile la 5G. Nous utilisons le simulateur CST Microwave Studio pour réaliser nos simulations, et nous présentons et commentons les résultats obtenus.

Enfin, ce document se clôture par une conclusion générale et une bibliographie qui répertorie les ouvrages de référence et les ressources en ligne liées à notre travail.

**CHAPITRE I : LES AVANCEES DE LA TECHNOLOGIE  
5G ET LES PERSPECTIVES DE LA TECHNOLOGIES 6G**

## I. Introduction :

Les premiers téléphones mobiles sans fil ont fait leur apparition dans les années 1980. Depuis lors, une nouvelle génération de téléphones portables est généralement introduite tous les 10 ans, selon un cycle régulier (voir Figure I.1). La dernière génération, la 5G, a été annoncée et a commencé à être commercialisée en 2020 [1].



**Figure I.1 :** l'évolution de la 1G à la 5G [1]

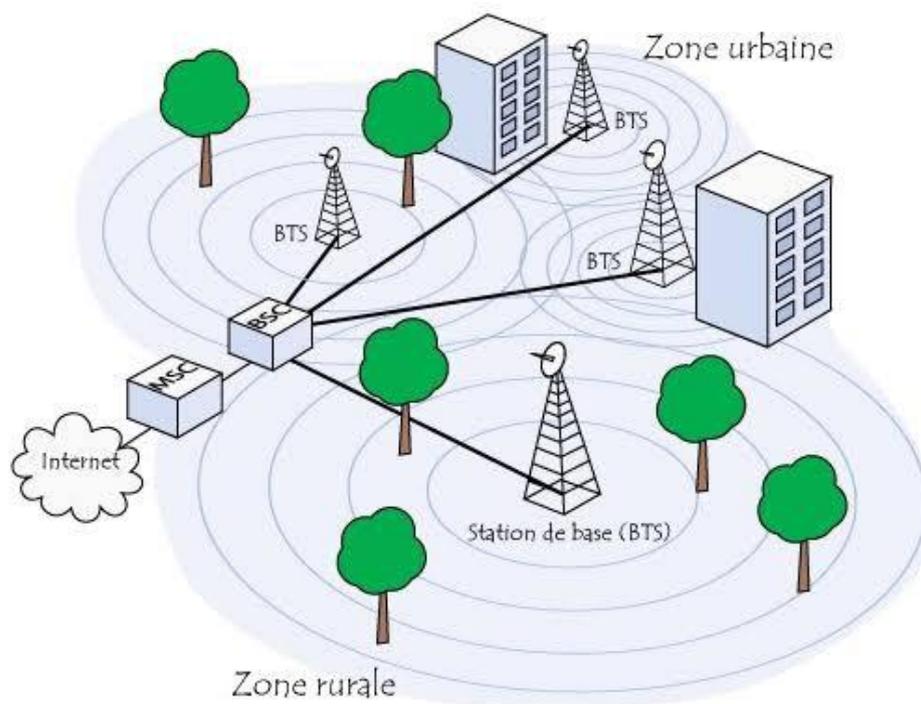
La 5G représente la cinquième génération de réseaux mobiles, offrant des vitesses de téléchargement considérablement plus rapides, une latence réduite et une connectivité plus fiable par rapport à la technologie 4G actuelle. Elle utilise des fréquences radio plus élevées que la 4G, permettant ainsi une bande passante plus large et une meilleure capacité de réseau. La 5G ouvre également la voie à une connectivité améliorée pour les appareils de l'Internet des objets (IoT), qui sont des dispositifs connectés à Internet et capables de communiquer entre eux. Cela inclut des éléments tels que les voitures autonomes, les capteurs pour les villes intelligentes et les dispositifs de santé connectés.

Cependant, la 5G nécessitera un grand nombre de nouvelles infrastructures, telles que des antennes de petite taille et des tours de transmission, ce qui peut être coûteux et prendra du temps à mettre en place. Il y a également des préoccupations en matière de sécurité et de confidentialité en ce qui concerne la 5G, car elle permettra une connectivité plus étendue de

l'IoT, ce qui pourrait potentiellement ouvrir de nouvelles vulnérabilités de sécurité.

En fin de compte, la 5G offre de grandes promesses pour l'avenir de la connectivité mobile et de l'IoT, mais nécessitera des investissements importants et des précautions en matière de sécurité pour garantir un déploiement efficace et sécurisé [2].

## II. Réseaux cellulaires :



**FigureI.2 :** Un réseau cellulaire de base [3]

Un réseau cellulaire peut être défini comme un système qui doit répondre à certaines contraintes spécifiques. La mobilité au sein d'un réseau dépend de la portée du réseau et des ondes radio qui lui sont attribuées. Les systèmes de réseaux cellulaires englobent toute l'infrastructure, en mettant l'accent sur l'équipement de communication et de routage pour les téléphones portables, ainsi que sur les ondes radio. Dans ce contexte, un réseau de liaison cellulaire est établi entre les utilisateurs finaux et les opérateurs [3].

## II.1 Evolution *des standards de télécommunications cellulaires* :

Le réseau des téléphones mobiles a connu plusieurs développements au fil du temps, se distinguant en quatre générations [4]:

**1ère génération** : Apparue dans les années 1980, cette génération était basée sur le système de service mobile analogique pour la voix.

**2ème génération** : Développée dans les années 1990, c'est le premier système vocal mobile numérique utilisant l'accès multiple par répartition dans le temps (TDMA).

**3ème génération** : Cette génération s'est déployée du milieu des années 1990 jusqu'aux années 2000 et a introduit des avancées dans l'accès multiple par division de codage (CDMA).

**4ème génération** : Avec un objectif principal d'augmenter les débits de données, cette génération, développée en 2010, a offert des services tels que les messages multimédias (MMS), la diffusion vidéo numérique (DVB), ainsi que la possibilité de regarder la télévision pendant de longues périodes.

Le LTE (Long Term Evolution) est le principal système de la 4G, offrant des services de haute qualité (QoS) et une meilleure sécurité des données par rapport aux générations précédentes.

Le tableau I.1 récapitule les caractéristiques spécifiques des différentes générations de systèmes de communication mobiles :

Génération	1G	2G	3G	4G	5G
Fréquences	900MHz	900 et 1800MHz	1900-2024MHz 2110-2200MHz	800MHz et 2600MHz	28GHZ 37GHZ 39GHZ 64-71GHZ
1ère année de déploiement	1981	1992	2001	2010	2020
Techniques d'accès	FDMA	TDMA	CDMA	OFDM	SCMA

<b>Débits réels</b>	-	9.6Kbps	384kbps HSPA 14.4Mbps HSPA+ 42Mbps	150Mbps	10Gbps
---------------------	---	---------	--	---------	--------

**Tableau I. 1** Résumé des générations de communications mobiles [4]

### **III. La 5eme Génération :**

#### **III .1 Nécessité de la 5G :**

La 5G représente l'avenir de l'Internet, en mettant l'accent sur l'Internet mobile ultra-rapide, tout en ouvrant la voie à de nouvelles technologies et services tels que l'Internet des objets, le big data et les industries du futur. Ses principaux objectifs sont les suivants [5]:

##### **1. Des forfaits data plus importants :**

- Une multiplication par 1000 de la quantité de données traitées.
- Une faible latence pour une réactivité optimale du réseau.
- Une réduction du nombre d'antennes nécessaires, avec une multiplication par 100 du nombre d'équipements terminaux pouvant être connectés à chaque antenne. Toutefois, le nombre d'antennes dépend principalement des fréquences utilisées.

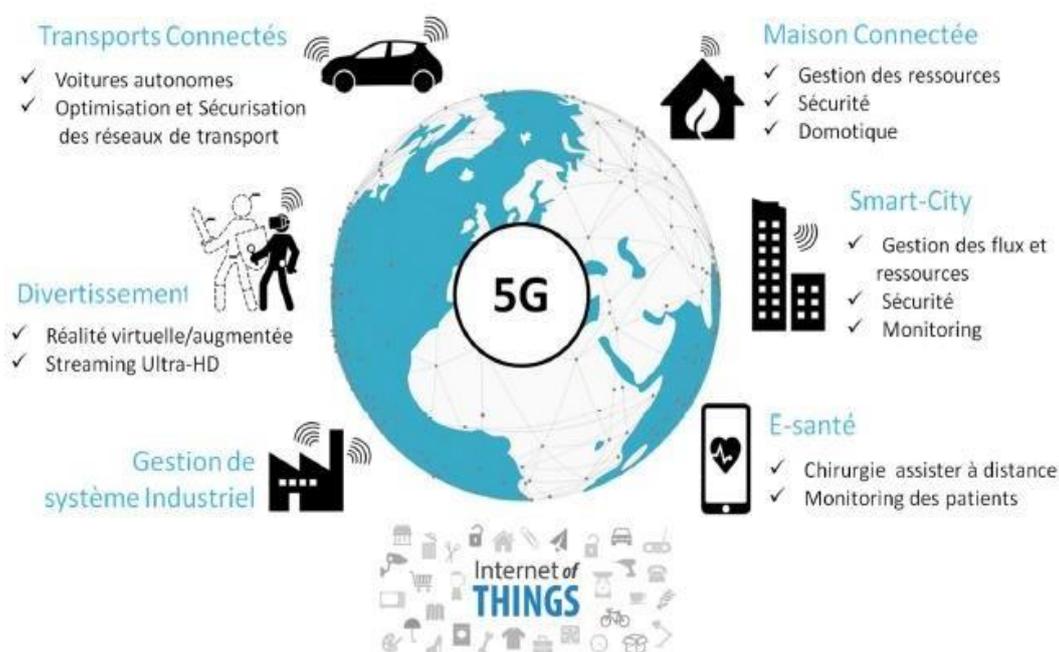
##### **2. Vitesse de pointe d'1 Go par seconde.**

##### **3. Une amélioration de l'autonomie de la batterie et une réduction de la consommation énergétique.**

En somme, la 5G vise à offrir des débits de données considérablement plus importants, une réactivité accrue, une connectivité améliorée et une consommation énergétique optimisée pour répondre aux besoins de l'Internet du futur.

#### **III.2 Domaines d'applications de la 5G :**

*“Tout et tout le monde sera connecté, partout, tout le temps”*



**Figure I.3:** les applications de réseaux 5G [6]

Les avancées de la technologie 5G ouvrent de nombreuses perspectives pour simplifier notre quotidien. En effet, les progrès réalisés dans le cadre de la 5G auront un impact significatif dans de nombreux domaines et permettront l'émergence de nouvelles applications.

Cette évolution sera particulièrement bénéfique pour les utilisateurs mobiles ayant besoin de grandes quantités de données. Elle permettra également un déploiement étendu de l'Internet des objets (IoT), offrant ainsi de nombreuses opportunités, notamment dans les domaines industriels et de la santé. Les différentes applications de la 5G sont illustrées dans la Figure I.3 [6].

### III.3 Les Objectifs de 5G :

La 5G devrait avoir un impact majeur sur la société, tant au niveau des individus que des objets connectés. La demande croissante de données et de services de meilleure qualité sur les réseaux sans fil a été l'un des principaux moteurs de l'émergence des réseaux 5G. L'un des avantages les plus importants de la 5G réside dans sa capacité à créer un réseau mondial [7].

La révolution de la 5G vise les objectifs suivants :

- Fournir un accès haut débit à Internet via des smartphones ou des tablettes.

- Atteindre des vitesses maximales allant jusqu'à 1 Go par seconde.
- Traiter des volumes de données beaucoup plus importants, avec un facteur de multiplication de 1 000.
- Améliorer la vitesse de transfert des données.
- Réduire la latence pour obtenir un réseau très réactif.
- Réduire le nombre d'antennes nécessaires, avec une multiplication par 100 du nombre d'appareils finaux pouvant être connectés à chaque antenne. Cependant, le nombre d'antennes dépendra principalement des fréquences utilisées.
- Réduire la consommation d'énergie du réseau de 90 %.
- Offrir jusqu'à 10 ans d'autonomie de batterie.
- Augmenter la bande passante par unité de surface de 1 000 fois.
- Assurer une disponibilité de 99,999 %.

Ces avancées prévues avec la 5G ouvriront de nouvelles possibilités et permettront des niveaux de connectivité et de performances sans précédent.

### III.4 Architecture de la technologie 5G :



**Figure I.4:** Un réseau cellulaire 5G [8]

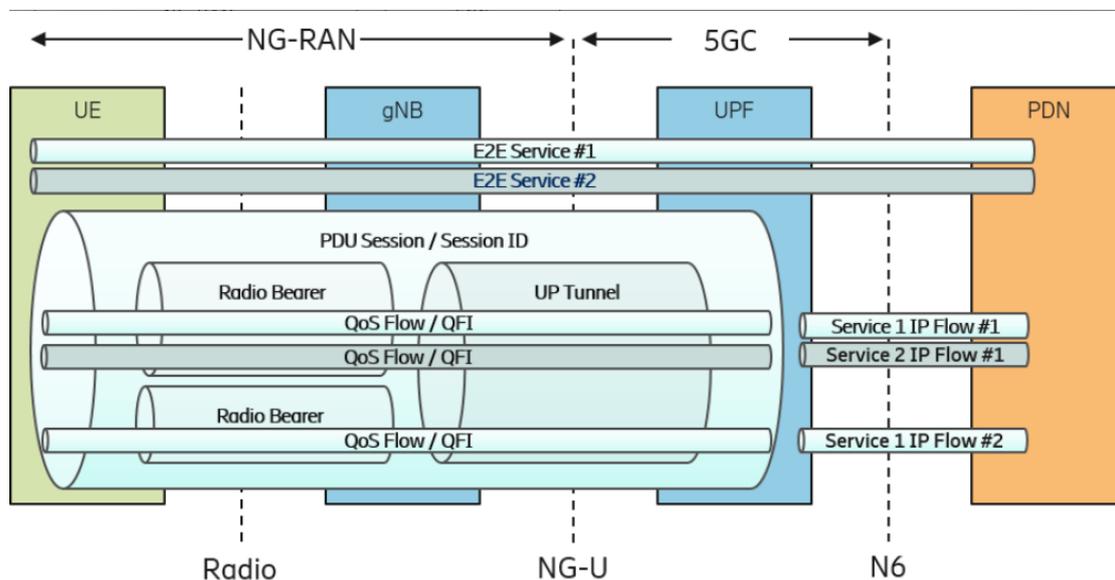
Un réseau 5G se compose d'un réseau d'accès 5G (AN) et d'un réseau cœur 5G. Le réseau d'accès est constitué de la nouvelle génération de réseau d'accès radio (NG-RAN), qui utilise la nouvelle interface radio 5G (NR), ainsi que d'un réseau d'accès non 3GPP connecté au réseau cœur 5G. Ces différentes entités de réseau sont interconnectées par un réseau de transport TCP/IP sous-jacent qui prend en charge les exigences de qualité de service (QoS).

La Figure [I.4] illustre que les réseaux 5G déploient des équipements utilisateurs (UE) connectés à un réseau de données externe. Une session PDU, qui représente une connexion 5G, est composée d'une série de tunnels 5GC NG et d'une ou plusieurs interfaces radio sans fil. Ces "tunnels" assurent la connexion entre l'UE et ses fonctions de contrôle de manière transparente. Les réseaux de données externes, permettant l'échange de trafic utilisateur, sont indiqués dans [8].

Une session PDU est un modèle de qualité de service (QoS) qui prend en charge des unités de données utilisateur. En réalité, une session PDU englobe non seulement les paquets IP utilisateur, mais également les trames Ethernet, permettant ainsi une communication de

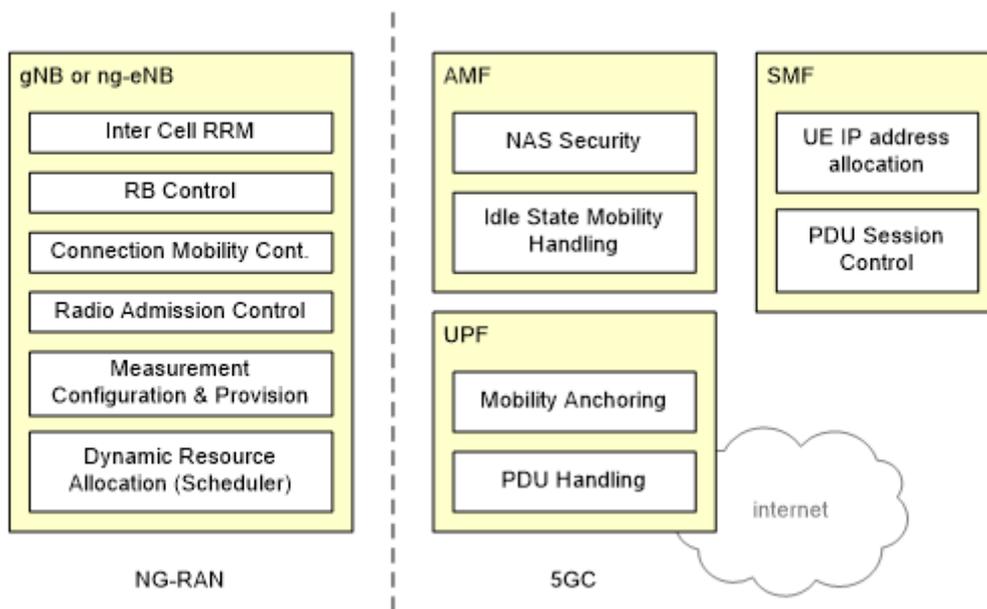
niveau 2 entre des groupes d'UE. Le modèle 5G est basé sur un nouveau concept de débit QoS, où le débit est dérivé avec une granularité maximale [9].

Il est possible que différents flux QoS appartiennent à une même session PDU.



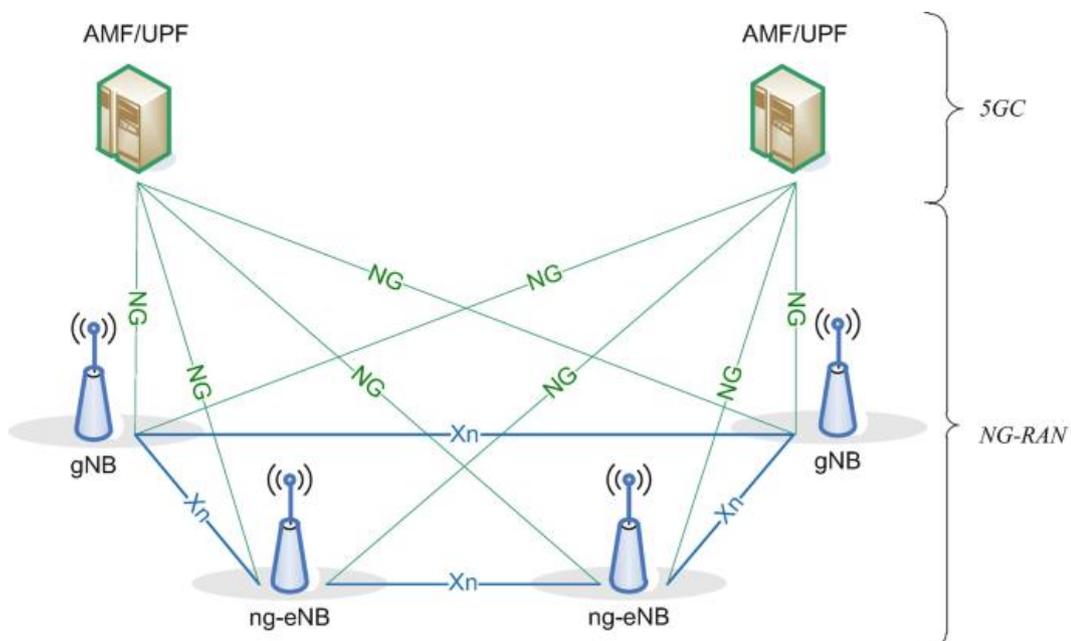
**Figure I.5:** session PDU et flux QOS : plan utilisateur (UP).[9]

La Figure [I.5] présente les fonctions 5G exécutées sur le NG-RAN (Next Generation Radio Access Network) ainsi qu'au cœur du réseau 5G. Au niveau de la périphérie, le NG-RAN est responsable de l'établissement, du maintien et de la libération de certaines sessions PDU (Protocol Data Unit) qui traversent l'interface sans fil. Il doit faire face à des contraintes physiques telles que les interférences, la réduction de puissance, etc. Les transferts entre les gNB (gNodeB) ainsi que les fonctions 5GC (5G Core Network) de multiplexage des sessions s'occupent du reste des opérations liées aux sessions PDU et à d'autres processus non liés à l'accès radio, tels que la mobilité, la sécurité des adresses IP, l'allocation, etc.



**Figure I.6:** la séparation fonctionnelle entre NG-RAN et 5GC [2].

### III.4.1 Nouvel génération réseaux d'accès (NG-RAN) :



**Figure I.7:** Architecture de NG-RAN [43]

Le NG-RAN est représenté comme un ensemble de stations dans la Figure [I.7]. La station de base 5G, appelée gNB, est connectée au réseau 5GC via une série d'interfaces logiques . Les gNB peuvent également être interconnectés les uns aux autres via l'interface Xn afin de permettre des fonctionnalités améliorées telles que la mobilité (handover) et la gestion de l'interférence entre cellules.

Les fonctions du gNB peuvent parfois être distribuées. Dans ce cas, l'architecture résultante est similaire à celle-ci : elle requiert une ou plusieurs unités distribuées (gNB-DU) qui se composent d'une unité centrale (gNB-CU) connectée à une carte radio distante (RRH). L'unité centrale est ensuite divisée en deux parties distinctes pour les fonctions de plan de contrôle (gNB-CU-CP) et les fonctions de niveau utilisateur (gNB-CU-UP).

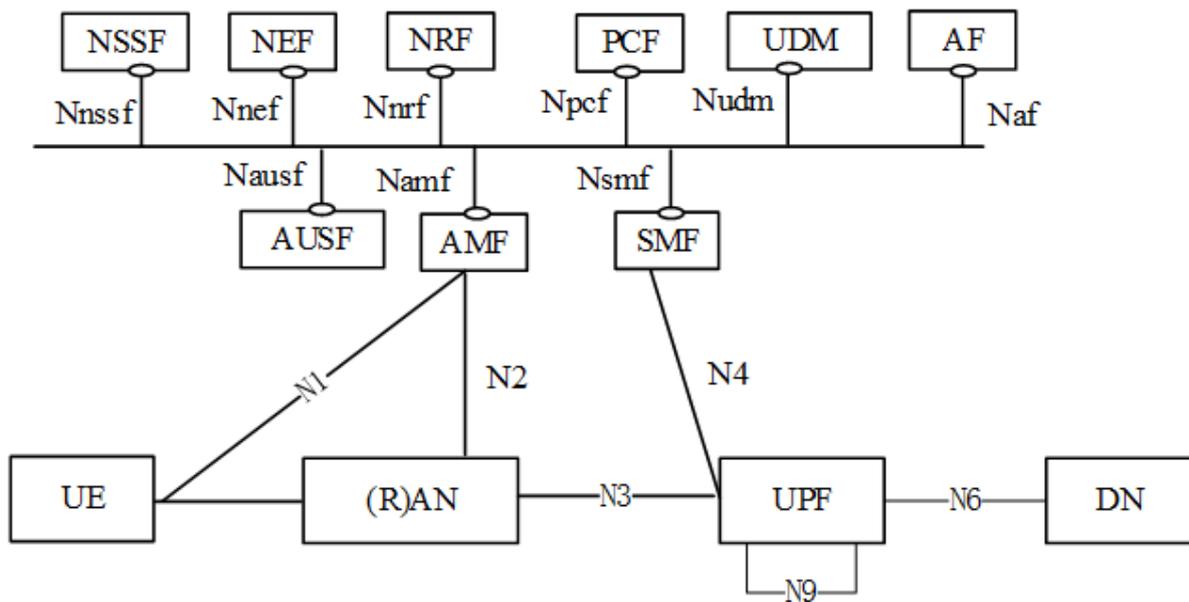
#### III.4.2 Réseau central (5GC) :

Les fonctions exécutées par les nœuds du réseau 5G sont décomposées pour permettre une architecture entièrement définie sur le plan fonctionnel et exposée en tant que service [10].

Tout comme dans le cas du NG-RAN, il existe une distinction entre le plan de contrôle et le plan utilisateur. Au niveau utilisateur, on trouve une ou plusieurs fonctionnalités UP (UPF) qui se chargent du transfert de paquets principalement entre les différents tunnels du diagramme NG-U [10] pour configurer les PDU de session. Toutes les autres fonctions du réseau relèvent du plan de contrôle.

Un autre changement fondamental par rapport aux générations précédentes est la modélisation de l'interface, qui est passée d'une approche "point à point orienté bit" à une architecture basée sur des services web. Cette architecture à base de services vise à rendre les services réutilisables. Entre chaque paire d'unités de réseau 2G, 3G et 4G qui interagissent, une interface point à point normalisée, qu'elle soit physique ou logique, est présente. Cette interface utilise un protocole spécialisé peu orienté.

Dans le cœur du réseau 5G, le plan de contrôle utilise des interfaces basées sur les services, qui sont prises en charge par des outils web tels que HTTP/2, REST et JSON pour faciliter l'interaction entre les différentes entités du plan de contrôle.



**Figure I.8:** L'architecture du système 5G, NO-Roaming [2]

### III.5 Spectre pour 5G :

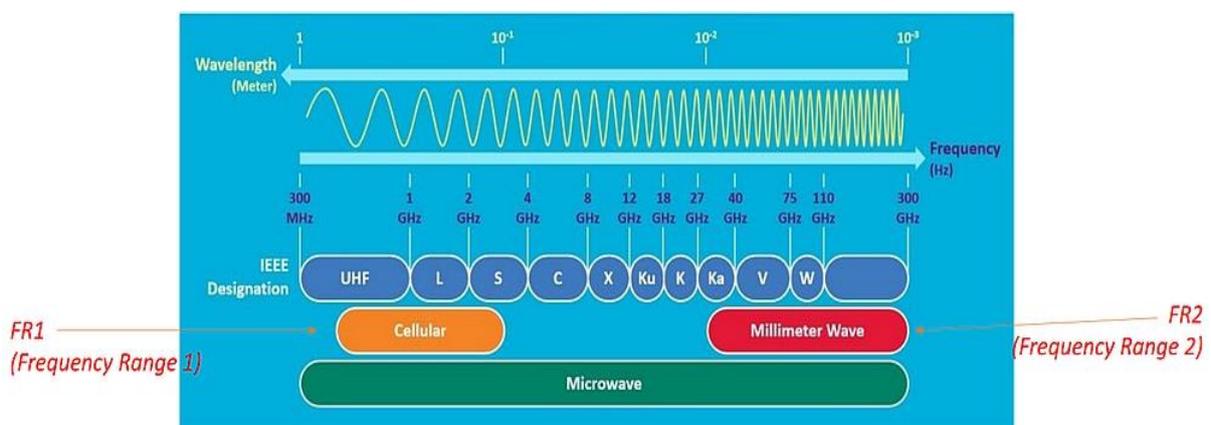
Un réseau mobile fonctionne en utilisant des fréquences et des antennes pour transmettre les données. Dans le cas de la 5G, l'utilisation des fréquences est essentielle pour son fonctionnement [9].

Les communications numériques utilisent des bandes de fréquence spécifiques pour transmettre les données, et le réseau 5G nécessite l'utilisation de plusieurs bandes de fréquences. Chaque bande de fréquences possède des caractéristiques distinctes.

Aux basses fréquences, le signal peut couvrir une distance importante, mais la vitesse de transmission est plus lente. En revanche, aux hautes fréquences, il est possible d'atteindre des débits plus élevés, mais la portée du signal est limitée.

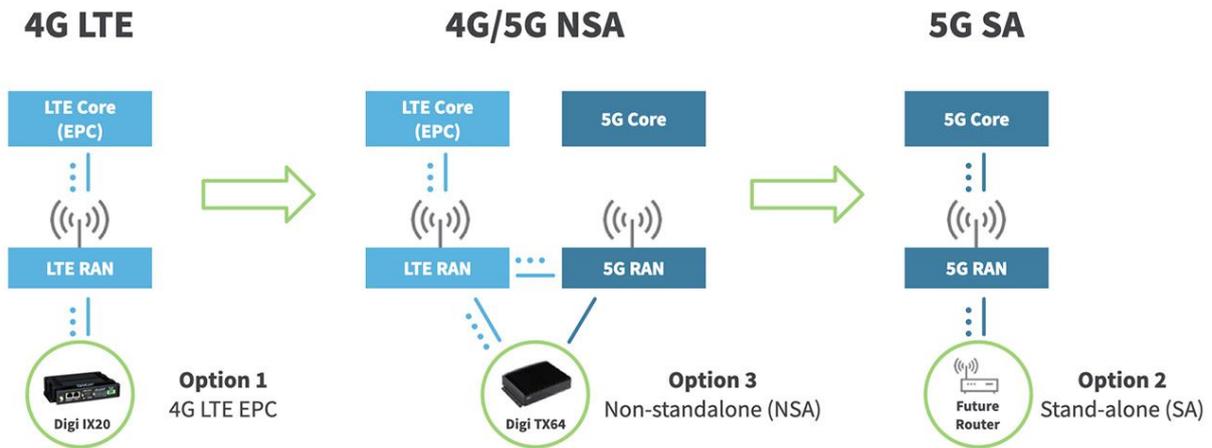
À terme, le réseau mobile utilisera trois bandes de fréquences pour la 5G, et c'est la combinaison de ces trois bandes qui offrira de nombreuses possibilités d'utilisation :

- La bande Sub 6G est spécifiquement attribuée à la 5G, suite à un processus d'attribution et d'enchères. Elle offre les débits les plus élevés.
- Les fréquences utilisées par les générations précédentes (2G, 3G, 4G) telles que 700 MHz, 800 MHz, 900 MHz, 1,8 GHz, 2,1 GHz, 2,6 GHz peuvent également être converties en 5G par les opérateurs.
- La bande des 26 GHz sera attribuée à la 5G dans les années à venir et permettra d'exploiter pleinement le potentiel de la technologie.



**Figure I.9:** Spectre 5G [9]

Diverses bandes de fréquences sont maintenant dédiées à la technologie New Radio (NR) de la 5G. Les fréquences situées entre 30 et 300 GHz sont regroupées sous le nom d'ondes millimétriques.



**Figure I.10 :** Évolution du LTE en combinaison avec une nouvelle technologie d'accès radio 5G [11]

L'utilisation de différentes fréquences peut être adaptée à des applications spécifiques, car les hautes fréquences offrent une bande passante plus élevée mais une portée plus courte.

### III.6 Les communications à ondes millimétriques (MMW) :

Il s'agit de fréquences se situant entre 30 et 300 GHz, correspondant à des longueurs d'onde de 1 mm à 10 mm. Elles sont utilisées dans les télécommunications, principalement dans la plage de 30 à 70 GHz. Les ondes millimétriques sont considérées comme une avancée révolutionnaire dans les réseaux sans fil, que ce soit dans l'industrie de la téléphonie mobile, les réseaux locaux sans fil émergents, les réseaux personnels ou les communications véhiculaires [12]. Elles offrent plusieurs avantages, tels que :

- Haut débit disponible avec de petites antennes.
- Gain et efficacité élevés, réduisant le risque d'atténuation du signal.
- Faible latence entre les appareils.
- Appareils compacts.
- Débits de données élevés.

Cependant, il y a aussi quelques inconvénients importants à prendre en compte, tels que :

- Coût élevé des équipements de micro-ondes.

- Les ondes millimétriques sont facilement absorbées par les obstacles et peuvent être rapidement atténuées.
- Portée limitée.

### **III.7 Futurs systèmes de communication sans fil (5G) dans la bande Ka :**

La bande Ka, également connue sous le nom de bande Ka-bande, est une plage spécifique de fréquences dans le spectre des ondes électromagnétiques. Elle est située dans la partie supérieure des fréquences des micro-ondes, généralement entre 26,5 et 40 GHz. La lettre "Ka" fait référence à "K-above" (en anglais), indiquant qu'elle est située au-dessus de la bande K, qui se trouve entre 18 et 27 GHz.

Une compréhension détaillée des caractéristiques de propagation du canal dans la plage de fréquences Ka (26,5 à 40 GHz) joue un rôle crucial dans le développement de la technologie de communication sans fil 5G.

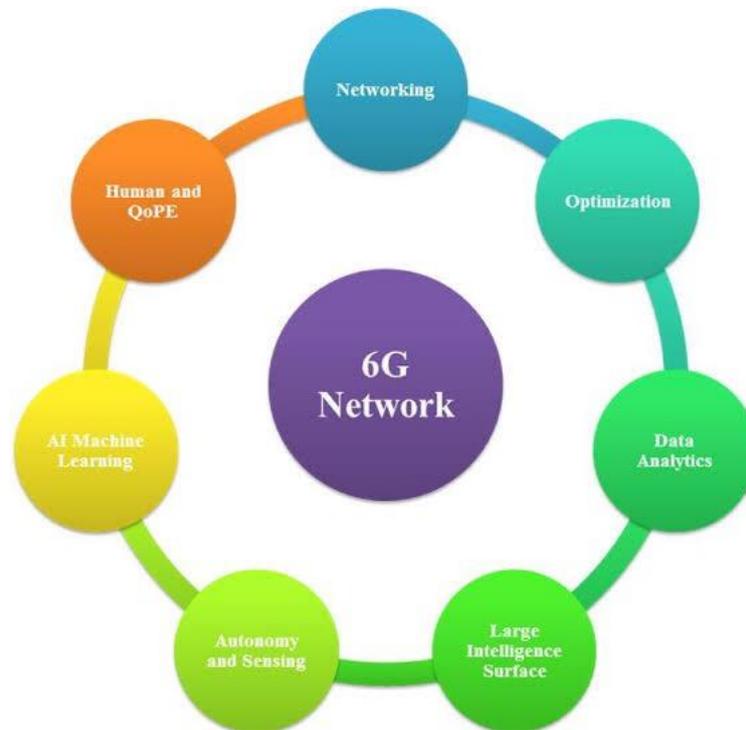
### **III.8 La bande SUB 6G**

La bande Sub-6 GHz est une partie du spectre radioélectrique utilisée dans la technologie de communication de cinquième génération (5G). Elle se réfère aux fréquences inférieures à 6 GHz qui sont utilisées pour la transmission des signaux 5G.

Cette bande de fréquences est considérée comme essentielle pour le déploiement de réseaux 5G en raison de ses caractéristiques de propagation plus favorables, notamment une portée plus étendue et une meilleure pénétration des obstacles. Elle offre également des débits de données élevés, bien que généralement inférieurs à ceux des bandes de fréquences plus élevées, telles que les ondes millimétriques.

La bande Sub-6 GHz est largement utilisée pour les déploiements 5G à grande échelle, offrant une couverture étendue et une connectivité améliorée pour les utilisateurs dans les zones urbaines et rurales.

#### IV. La Technologie 6G :



**Figure I.11** : Présentation de la 6G [44]

La 6G, dans le domaine des télécommunications, fait référence à la prochaine génération de réseaux sans fil qui succédera à la technologie cellulaire 5G. Bien qu'elle ne soit pas encore disponible sur le marché, cette nouvelle technologie sans fil promet une transmission de données encore plus rapide que son prédécesseur [13].

La prochaine génération de communications sans fil, la 6G, promet des vitesses et une efficacité encore plus rapides par rapport à la technologie actuelle, la 5G. Alors que la 5G est déjà considérée comme rapide, la 6G offre la possibilité de télécharger des films avec une résolution vidéo 8K à des vitesses jusqu'à 500 fois plus rapides que celles de la 5G. De plus, la capacité des réseaux 6G devrait être multipliée par 100 par rapport aux réseaux 5G actuels, selon les déclarations de **M. Debbah**.

**« Ce sera une connectivité massive par rapport à ce qu'elle est aujourd'hui – environ 10 millions d'objets connectés par kilomètre carré », a déclaré M. Debbah [13] .**

Avec ses innovations prévues, le marché de la 6G devrait être un moteur d'améliorations dans divers domaines tels que la localisation, l'imagerie, la détection et la perception.

Ce nouveau réseau doit fonctionner de concert avec d'autres technologies de pointe, notamment l'intelligence artificielle, pour permettre à son infrastructure de prendre des décisions critiques. Ces décisions reposent sur le traitement, le partage et le stockage des données à faible latence. Plusieurs caractéristiques sont envisagées pour les systèmes sans fil de 6e génération [14]:

- Une capacité réseau élevée
- L'accès à l'intelligence artificielle intégrée pour améliorer la sécurité des données
- Une latence très faible et une communication hautement fiable
- Une bande passante cellulaire considérablement améliorée
- Une faible congestion du réseau, etc. Ces différents éléments sont soutenus par diverses technologies visant à optimiser l'efficacité et la qualité du réseau.

## **V. Conclusion :**

Au cours de ce chapitre, nous avons examiné comment l'intégration des réseaux 5G offre de grandes promesses pour un monde plus intelligent, plus sain et plus confortable. Cela est rendu possible grâce à l'application de technologies et d'outils de pointe, ainsi qu'à des mises à jour à tous les niveaux des données.

La transition de la 5G à la 6G représentera une nouvelle étape dans le développement des communications sans fil, ouvrant la voie à des avancées encore plus impressionnantes dans divers domaines tels que la localisation, l'imagerie, la détection et la perception.

En conclusion, tant la 5G que la 6G apportent des améliorations significatives dans les communications sans fil. Alors que la 5G répond aux besoins actuels en matière de vitesse et de transfert de données, la 6G prépare le terrain pour des avancées encore plus rapides et efficaces, en intégrant des fonctionnalités avancées et en exploitant le potentiel de l'IA. L'évolution des réseaux sans fil vers la 6G promet de transformer notre manière de communiquer, d'interagir et de vivre dans un monde de plus en plus connecté.

**CHAPITRE II : ANTENNES POUR NOUVELLES  
APPLICATIONS DE COMMUNICATION SANS FIL (5G-6G)**

## **I. Introduction :**

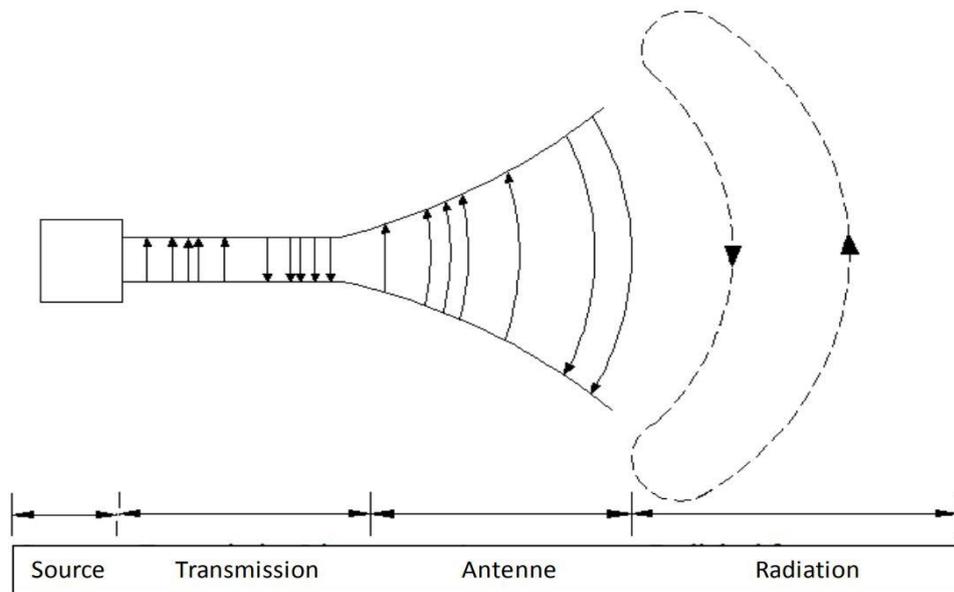
Les antennes sont des dispositifs électromagnétiques qui permettent de transmettre ou de recevoir des signaux sans fil, tels que des ondes radio, des signaux Wi-Fi, des signaux de télévision, etc. Elles jouent un rôle crucial dans la communication sans fil en permettant une transmission efficace et fiable des signaux.

Dans le contexte de la 5G, les antennes sont utilisées pour exploiter les bandes de fréquences plus élevées allant des ondes millimétriques (mmWave) jusqu'aux fréquences sub-6 GHz. Les antennes mmWave sont particulièrement importantes car elles offrent des débits de données extrêmement élevés, mais leur portée est limitée. En revanche, Les antennes sub-6 GHz sont utilisées pour fournir une couverture plus étendue et une meilleure pénétration des signaux à travers les obstacles.

Quant à la 6G, il est encore trop tôt pour décrire en détail l'utilisation spécifique des antennes. Cependant, il est prévu que les antennes jouent un rôle encore plus crucial pour prendre en charge des fonctionnalités avancées telles que des vitesses de transmission encore plus rapides, une latence ultra-faible et une capacité réseau accrue. Les antennes de la 6G seront conçues pour permettre des communications intelligentes et fiables, ainsi que pour répondre aux besoins croissants en termes de capacité de données et de performances globales du réseau.

## **II. Définition d'une antenne :**

La norme IEEE "Définitions des termes d'antenne" fournit une définition précise de ce qu'est une antenne. Selon cette norme, une antenne est un dispositif utilisé pour émettre ou recevoir des ondes radio [15]. Plus spécifiquement, il s'agit d'un appareil qui prend un signal provenant d'une ligne de transmission et le convertit en ondes électromagnétiques, les diffusant dans l'espace libre lorsqu'il est en mode émission. En mode réception, l'antenne capte les ondes électromagnétiques entrantes et les reconvertit en signaux utilisables. Ce fonctionnement peut être représenté de manière simple par une illustration (Figure II.1) pour mieux comprendre le concept.



**Figure II.1 :** Rayonnement d'une antenne [16]

Dans les systèmes de communication, les antennes ont la capacité d'orienter l'énergie rayonnée dans une direction spécifique et de réduire ou d'éliminer cette énergie dans d'autres directions, en fonction de la fréquence utilisée. Cela signifie que les antennes ne sont plus simplement des dispositifs de transmission, mais plutôt des dispositifs transitoires. Par conséquent, la forme des antennes est adaptée en fonction des besoins spécifiques. Ainsi, on peut trouver des antennes sous la forme d'ouvertures, de patches, de réflecteurs, de lentilles, de groupes d'éléments, et bien d'autres encore. Une conception d'antenne bien réalisée peut permettre de répondre aux exigences du système de manière plus souple et améliorer les performances globales du système [16].

### III. Différents types d'antennes :

Les antennes peuvent être regroupées en différentes catégories en fonction de leur géométrie, de leur gain, de la forme du faisceau qu'elles produisent et de leur bande passante. Voici une classification des antennes selon ces critères :

➤ **Forme géométrique :**

- Antennes filaires : dipôle, boucle, spirale.
- Antennes à ouvertures : cornet, fente.

- Antennes imprimées : patch, dipôle imprimé, spirale.

➤ **Gain :**

- Gain élevé : antennes planaires.
- Gain moyen : cornet.
- Gain bas : dipôle, fente, patch.

➤ **Forme du faisceau :**

- Omnidirectionnel: dipole.
- Faisceau étroit : antennes planaires.
- Faisceau large : antenne réseau.

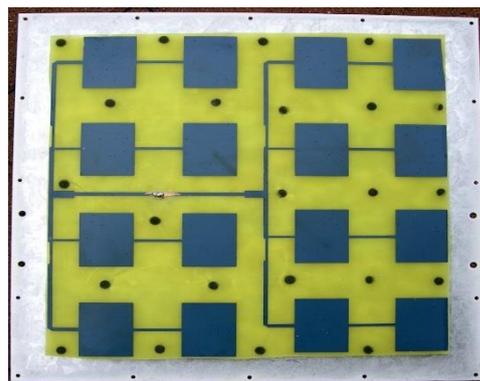
➤ **Largeur de bande :**

- Bande large : spirale.
- Bande étroite : patch, fente.

En classant les antennes de cette manière, il est possible de mieux comprendre et choisir l'antenne la mieux adaptée en fonction des besoins spécifiques en termes de géométrie, de gain, de forme du faisceau et de bande passante.



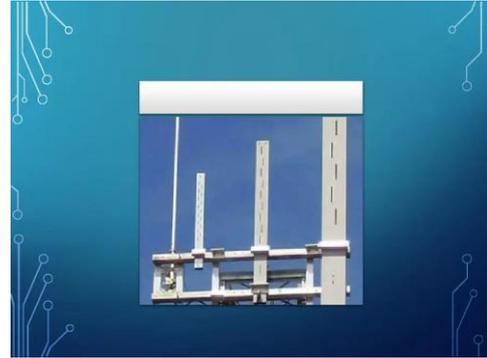
(a) Antenne filaire



(b) Réseau d'antennes imprimées



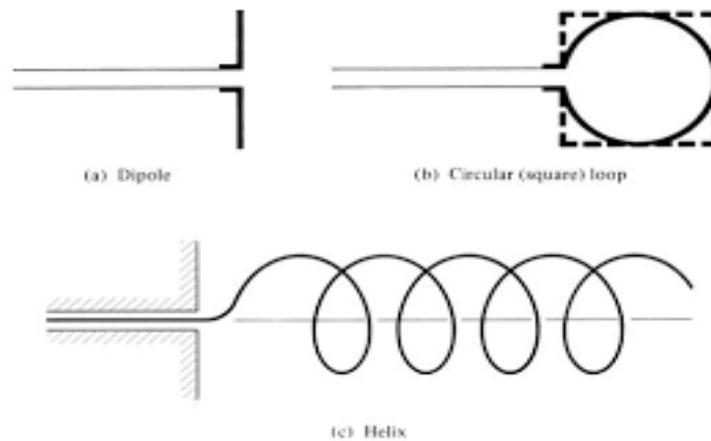
(c) Antenne cornet



(d) Antenne à fente

**Figure II.2 :** Les différents types d'antennes [18]

### III.1 Antennes filaires :



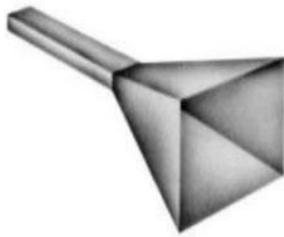
**Figure.II.3 :** Configuration de l'antenne filaire [15]

Les antennes filaires sont couramment utilisées dans diverses applications, telles que les voitures, les vaisseaux spatiaux, et sont donc familières à la plupart des gens. Il existe différentes formes d'antennes filaires, telles que les antennes droites (dipôles), en boucle et en hélice, comme illustré dans la Figure (II.4). Les antennes en boucle ne sont pas limitées à une forme simplement circulaire, elles peuvent également prendre la forme de rectangles, de carrés, d'ovales ou de toute autre forme.

### III.2 Antennes à ouverture :

Avec la demande croissante de formes et d'utilisations d'antennes plus avancées, les antennes à ouverture sont aujourd'hui plus courantes et familières qu'auparavant, surtout pour les fréquences plus élevées. La Figure (II.5) présente certaines formes d'antennes à ouverture

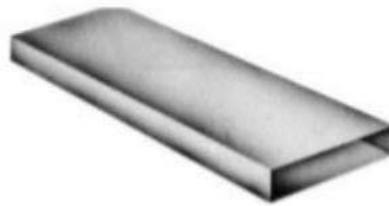
[20].



(a) *Cornet pyramidal*



(b) *Cornet conique*



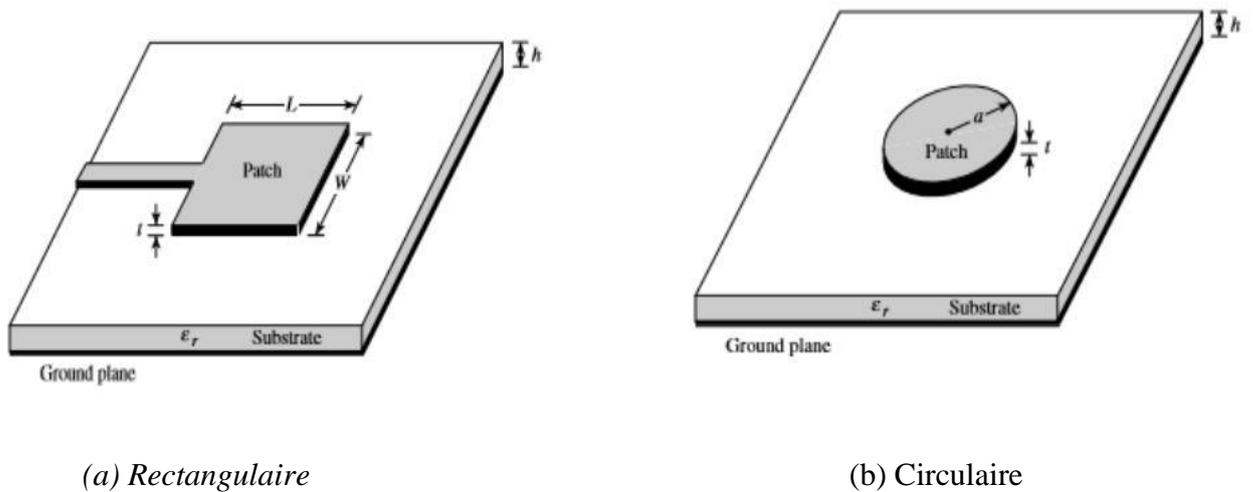
(c) *Guide d'ondes rectangulaire*

**Figure II.4 :** Configurations d'antennes à ouverture [21]

Ce type d'antenne est particulièrement utile dans les applications aéronautiques et spatiales, où elles sont fixées à la coque d'un avion ou d'un vaisseau spatial. Elles peuvent être revêtues d'un matériau isolant pour les protéger des conditions environnementales souvent difficiles [20].

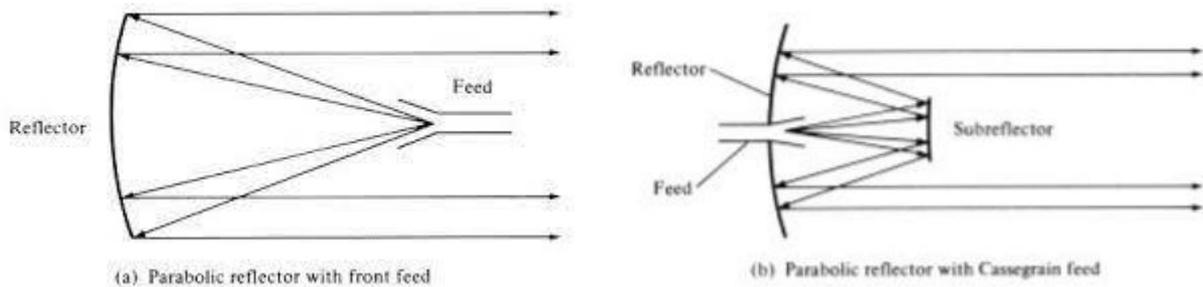
### III.3 Antennes micro ruban :

Les antennes micro ruban sont devenues très populaires dans les années 1970, principalement pour les applications spatiales. Aujourd'hui, ils sont utilisés dans des applications commerciales. Ces antennes sont constituées de patchs métalliques sur un substrat mis à la terre. Les patchs métalliques peuvent se présenter sous de nombreuses configurations différentes, comme indiqué ci-dessous. Cependant, comme le montre la (Figure II.6), les patchs rectangulaires et circulaires sont les plus populaires en raison de leur facilité d'analyse et de fabrication. [22]



**Figure II.5 :** Antennes micro ruban (patch) rectangulaires et circulaires [22]

### III.4 Antennes à réflecteur :



**Figure II.6 :** Configurations typiques des réflecteurs [21]

Le progrès de l'exploration spatiale a joué un rôle essentiel dans l'avancement de la théorie des antennes. La communication sur de longues distances a exigé l'utilisation d'antennes sophistiquées pour transmettre et recevoir des signaux parcourant des millions de kilomètres. Une forme d'antenne très répandue dans de telles applications est la parabole, comme représentée dans la Figure (II.7) [23].

### III.5 Antennes multi-bandes :

Une antenne multi bande est définie comme une antenne qui fonctionne dans deux ou plusieurs bandes de fréquences et présente des performances similaires dans chacune de ces

bandes. Lorsque l'antenne opère dans une bande de fréquences, elle est généralement réglée de manière "raisonnable" pour toutes les fréquences de cette bande. Ce réglage "raisonnable" est défini par un coefficient de réflexion ou un rapport d'onde stationnaire (ROS) à l'entrée de l'antenne, qui est inférieur à une valeur fixe.

L'avantage des antennes multibandes réside dans le fait que des éléments rayonnants indépendants peuvent être utilisés pour chaque bande de fréquences. Ainsi, il est possible de modifier la couverture d'une bande de fréquences spécifique sans affecter la couverture des autres bandes de fréquences de l'antenne. Cette modification de la couverture de la bande de fréquences est obtenue en changeant l'élément rayonnant responsable de cette bande spécifique [24].

## **IV. Principe de fonctionnement des antennes**

### **IV.1 Antenne d'émission :**

Une antenne d'émission est un dispositif essentiel pour assurer la propagation d'ondes dans l'air. Son rôle consiste à convertir la puissance électromagnétique guidée provenant d'un générateur en une puissance rayonnée. En d'autres termes, elle agit comme un transducteur [27].

### **IV.2 Antenne de réception :**

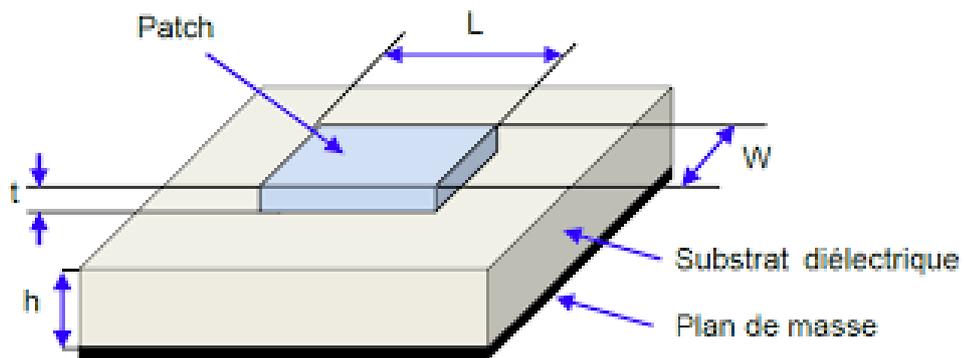
À l'inverse, une antenne de réception peut capter la puissance rayonnée. Elle agit ainsi comme un capteur et un convertisseur de puissance rayonnée en puissance électromagnétique guidée. Son rôle est similaire à celui d'un télescope qui recueille la lumière émise par les étoiles et la transforme [26].

### **IV.3 Réciprocité :**

Dans la plupart des cas, une antenne peut être utilisée à la fois en réception et en émission, avec des propriétés rayonnantes similaires. On dit alors que son fonctionnement est réciproque. Cela découle du théorème de réciprocité, qui sera expliqué plus en détail ultérieurement. Dans certains cas exceptionnels, lorsque les antennes sont composées de matériaux non linéaires ou anisotropes, elles ne sont pas réciproques. En raison de la

réciprocité des antennes, il est rarement nécessaire de faire une distinction entre le rayonnement en émission et en réception. Les caractéristiques annoncées pour une antenne s'appliquent généralement dans les deux modes de fonctionnement, sans qu'il soit nécessaire de le préciser dans la plupart des cas [27].

## V. Les antennes Patch Micro ruban :

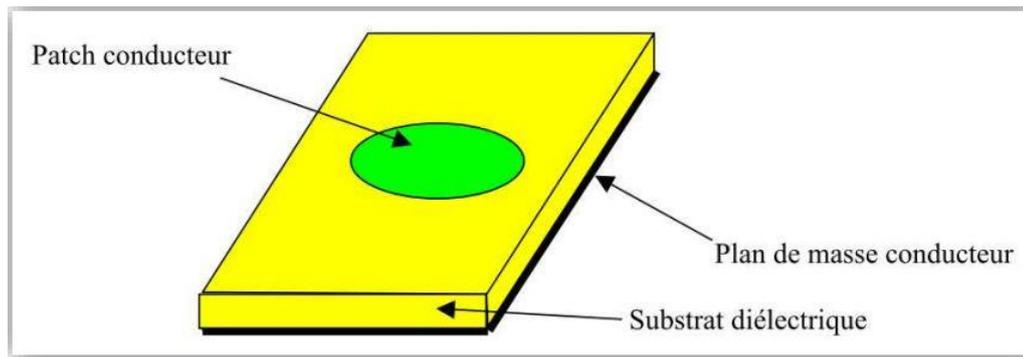


**Figure II.7 :** Structure d'une antenne imprimée [25].

Les antennes patch, également appelées antennes planaires, sont un nouveau type d'antenne. Son développement et son utilisation sont de plus en plus courants. Il se compose d'un substrat diélectrique avec un plan de masse métallique sur un côté. Sur l'autre côté, les métaux peuvent résister aux courants de surface qui génèrent des radiations électromagnétiques (Fig. II.8). Le courant est transporté du générateur à l'antenne.

Par ligne de transmission ou sonde coaxiale [24]. Remplit deux fonctions c'est aussi la base pour définir les principes généraux des antennes Rayonnement (rayonnement) et réception des ondes électromagnétiques [26].

## V.1 Structure d'une antenne patch :



**Figure II.8 :** structure d'une antenne patch [28]

Les antennes micro-ruban fabriquées à l'aide de la technologie de carte de circuit imprimé ont généralement une bande de fréquence étroite dans leur conception de base. Elles se composent d'un conducteur métallique mince (généralement d'une épaisseur de 17,5 à 35  $\mu\text{m}$  pour les micro-ondes et de 9  $\mu\text{m}$  pour les millimètres), connu sous le nom d'élément rayonnant, qui est déposé sur un substrat épais.

Cet élément rayonnant permet d'augmenter la puissance rayonnée par l'antenne en convertissant l'énergie électrique en énergie électromagnétique. Il est utilisé pour réduire les pertes et améliorer l'efficacité et la bande passante de l'antenne.

Le substrat est généralement entièrement métallisé pour fournir un plan de masse [26].

## V.2 Avantages et inconvénients de l'antenne patch :

Les antennes imprimées présentent de nombreux avantages et limites par rapport à d'autres types d'antennes.

### Voici une liste des avantages :

- Faible poids et encombrement, ce qui permet de les placer près des systèmes.
- Structure plane qui peut être façonnée selon les besoins.
- Coût réduit et facilité de fabrication, adapté à la production en série.
- Possibilité d'être utilisées pour des applications multi-bandes et multi-polarisations (linéaire et circulaire).
- Possibilité de former des réseaux d'antennes pour améliorer les caractéristiques globales de rayonnement en utilisant plusieurs dizaines ou centaines d'éléments.

**Cependant, les antennes imprimées présentent également certaines limitations, notamment :**

- Bande passante étroite (1 à 5%).
- Gain moyen.
- Puissance limitée (quelques dizaines de watts).
- Sensibilité aux dispersions technologiques.

**Parmi les inconvénients des antennes imprimées, on peut citer :**

- Bande passante limitée.
- Efficacité et gain réduits.
- Rayonnement indésirable provenant des alimentations et des jonctions.
- Capacité de gestion de puissance limitée.
- Excitation des ondes de surface.

## **VI. Les paramètres et caractéristiques d'antenne :**

### **VI.1 Diagramme de rayonnement :**

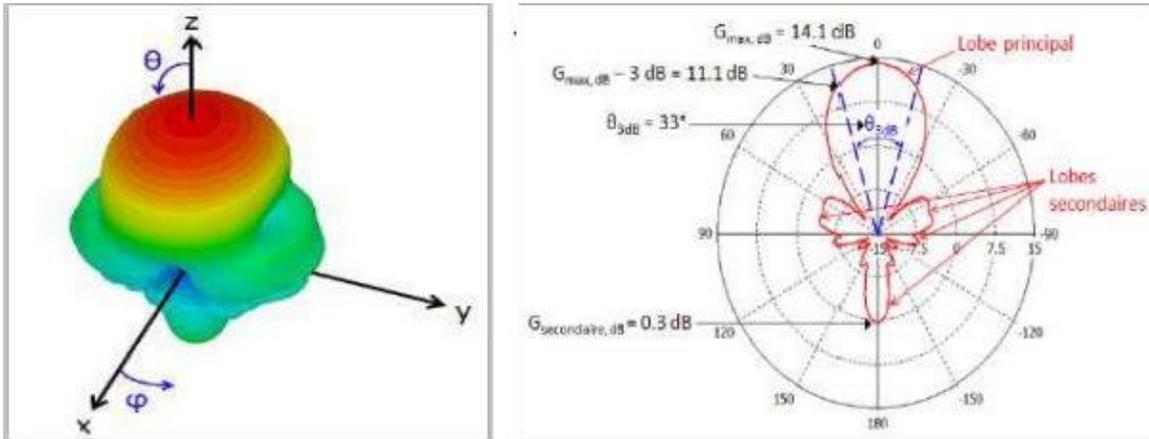
Le diagramme de rayonnement d'une antenne peut être défini comme la représentation graphique des caractéristiques de rayonnement (puissance/champ) en fonction de l'espace angulaire.

Il peut être exprimé par la relation suivante [31]:

$$r(\theta, \varphi) = \frac{P(\theta, \varphi)}{P_0(\theta_0, \varphi_0)} \quad (1)$$

Avec :

- $P(\theta, \varphi)$  : Puissance rayonnée dans une direction quelconque.
- $P_0(\theta_0, \varphi_0)$  : Puissance rayonnée max.



**Figure II.9 :** Exemple d'un diagramme de rayonnement en 3D, Et diagramme dans le plan YoZ (gain en dB) [30]

Cette relation permet de quantifier le rayonnement d'une antenne dans différentes directions en comparaison avec sa puissance rayonnée maximale.

## VI.2 Directivité :

La directivité d'une antenne représente sa capacité à concentrer son rayonnement dans une direction spécifique de l'espace. Elle est définie comme le rapport entre l'intensité de rayonnement d'une antenne dans une direction donnée et l'intensité de puissance rayonnée par une source isotrope. Cette relation est exprimée par [32]:

$$D(\theta, \varphi) = \frac{P(\theta, \varphi)}{P(\theta, \varphi)_{iso}} = \frac{P(\theta, \varphi)}{\left(\frac{P_r}{4\pi}\right)} \quad (2)$$

Avec:

- $P(\theta, \varphi)$  : La Puissance rayonnée par unité d'angle solide  $(\theta, \varphi)$  .
- $P_r$  est la puissance totale rayonnée.
- $P(\theta, \varphi)_{iso}$  : l'intensité de puissance de source isotrope .

## VI.3 Gain :

Le gain est une mesure qui décrit les performances d'une antenne. Le gain d'une antenne isotrope est considéré comme une référence unitaire (0 dB). Le gain d'une antenne dans une direction spécifique est le rapport entre l'intensité de rayonnement dans cette direction et

l'intensité de rayonnement d'une antenne isotrope. Cette relation est donnée par [33]:

$$G(\theta, \varphi) = \frac{P(\theta, \varphi)}{(P_a/4\pi)} \quad (3)$$

Avec:

- $P(\theta, \varphi)$  : Puissance rayonnée dans une direction.
- $P_a$ : Puissance rayonnée par l'antenne.

#### VI.4 Le coefficient de réflexion $S_{11}$ :

Généralement, lorsqu' une onde incidente traverse une interface ou change de milieu de propagation, une partie de l'onde est réfléchié tandis qu'une autre partie se propage à travers le nouveau milieu. Le coefficient de réflexion d'une antenne est défini comme le rapport entre l'amplitude de l'onde incidente et l'amplitude de l'onde réfléchié. Pour une antenne d'impédance  $Z$ , connectée à une source via une ligne d'impédance caractéristique  $Z_s$  ( égale à  $50\Omega$ ), le coefficient de réflexion peut être défini de la manière suivante [34]:

$$S_{11} = \frac{(Z_e(f)-Z_0)}{(Z_e(f)+Z_0)} \quad (4)$$

Avec:

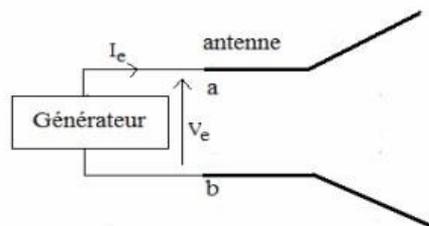
- $Z_e$ : est l'impédance d'entrée de l'antenne.
- $Z_0$ : est l'impédance caractéristique(Généralement égale à  $50\Omega$ )

Le module du coefficient de réflexion est souvent exprimé en décibels (dB) et est noté  $|S_{11}|$ . Il est défini de la manière suivante [34]:

$$|S_{11}|_{db} = 20 \log |S_{11}| \quad (5)$$

La fréquence de résonance de l'antenne est généralement la fréquence à laquelle le coefficient de réflexion atteint sa valeur minimale.

#### VI.5 L'impédance d'entrée :



**Figure II.10** : Antenne en mode émetteur [29]

L'impédance d'entrée est définie comme le rapport de la tension d'entrée  $V_e$  au courant d'entrée  $I_e$ , comme exprimé par la relation [35] :

$$Z = \frac{V_e}{I_e} = R + jX \quad (6)$$

Avec :

- $Z$  = impédance d'entrée aux bornes a et b.
- $R$  = résistance de l'antenne aux bornes a et b.
- $X$  = réactance de l'antenne aux bornes a et b.

### VI.6 Rapport d'onde stationnaire (ROS) :

Les lignes de transmission permettent aux ondes électromagnétiques de se propager dans les deux sens. Lorsque la source, la ligne de transmission et la charge ont toutes la même impédance, les ondes électromagnétiques se propagent de la source à la charge sans aucune perte de signal. En revanche, si la source n'a pas la même impédance par rapport aux autres éléments de la chaîne de transmission, une partie de l'onde sera réfléchi et reviendra vers la source lorsqu'elle atteindra la charge. Dans ce cas, les ondes incidentes et réfléchies se superposent et génèrent des ondes stationnaires.

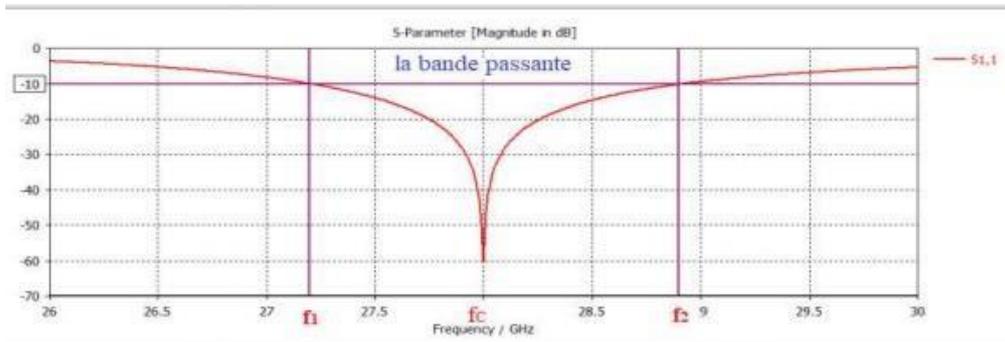
Si nous le caractérisons en termes d'ondes de propagation vers l'avant (+V) et d'ondes de retour (-V), le rapport ou rapport d'ondes stationnaires est défini comme suit [36] :

$$ROS = \frac{(+V)+(-V)}{(+V)-(-V)} \quad (7)$$

Il est lié au coefficient de réflexion  $\Gamma$  par la relation [36] :

$$ROS = \frac{1+|\Gamma|}{1-|\Gamma|} \quad (8)$$

## VI.7 Fréquence de résonance et bande passante :



**Figure II.11** : Illustration de la bande passante à -10 dB d'une antenne [19]

La bande passante d'une antenne peut être définie comme la plage de fréquences dans laquelle l'antenne présente les meilleures performances pour la transmission ou la réception de l'énergie électromagnétique dans l'environnement. Les limites de fonctionnement de l'antenne déterminent la plage de fréquences entre la valeur minimale  $f_{min}$  et la valeur maximale  $f_{max}$ . La largeur de bande est calculée à l'aide de l'équation suivante [37]:

$$BP = f_{max} - f_{min} \quad (9)$$

La largeur de bande relative peut être exprimée par l'équation suivante [37] :

$$BP(\%) = \left[ \frac{f_{min} - f_{max}}{f_c} \right] \quad (10)$$

Où  $f_c$  représente la fréquence centrale ou de résonance.

## VII. Techniques d'alimentation d'une antenne micro ruban

Les antennes micro ruban peuvent être alimentées de différentes manières, qui peuvent être classées en deux types : alimentation par contact et alimentation sans contact. Dans la méthode d'alimentation par contact, la puissance RF est directement appliquée au patch rayonnant à l'aide de connecteurs tels que des lignes micro ruban.

Dans l'alimentation sans contact, le couplage électromagnétique est utilisé pour transférer la puissance entre la ligne micro ruban et le patch rayonnant. Les quatre techniques d'alimentation les plus couramment utilisées sont la ligne micro ruban, la sonde coaxiale

(alimentation par contact), le couplage d'ouverture et le couplage de proximité (alimentation sans contact) [20].

### VII.1 Alimentation par ligne micro ruban :

Dans cette configuration, la ligne micro ruban est directement connectée à l'élément rayonnant de l'antenne. Le point de connexion peut être situé sur l'axe de symétrie du patch ou déplacé pour améliorer l'adaptation d'impédance. Cette méthode d'alimentation est facile à mettre en œuvre et à modéliser, mais elle peut entraîner une importante émission de parasites, généralement entre 2% et 5% de la bande passante [42].

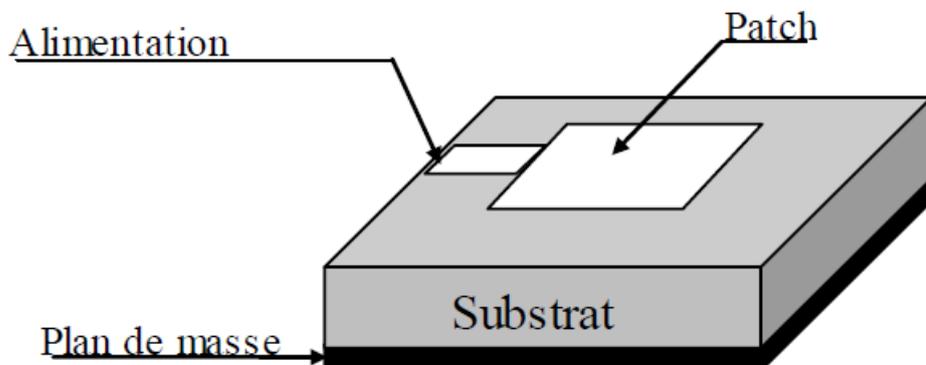


Figure II.12 : Alimentation par ligne micro ruban [42]

#### VII.1.1 Techniques d'adaptation de la ligne par micro ruban :

Lors de la conception de circuits micro-ondes, l'objectif est souvent d'atteindre une adaptation d'impédance. Cela signifie ajuster l'impédance à une valeur différente de l'impédance caractéristique de la ligne. Il existe plusieurs techniques couramment utilisées pour réaliser cette adaptation [15].

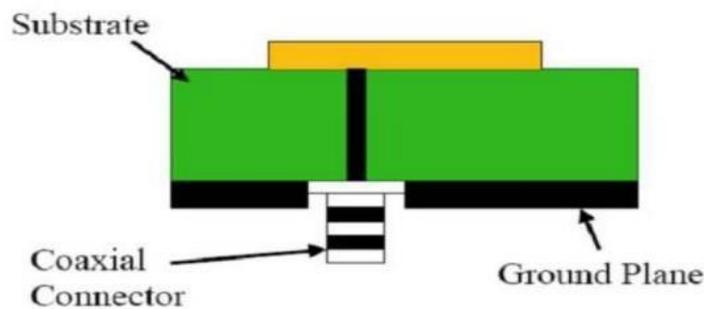
*a) Adaptation par ligne quart d'onde :* Dans cette technique, un transformateur quart d'onde est utilisé pour améliorer l'adaptation de l'antenne. Il suffit de placer le transformateur entre la ligne microruban et le bord du patch pour atteindre une meilleure adaptation d'impédance.

*b) Adaptation par stub :* Dans cette méthode, des talons ouverts ou des talons courts sont utilisés pour s'adapter à n'importe quelle charge. Un tronçon de ligne, appelé stub, est ajouté

à la ligne principale à une distance  $d$  de la charge pour ajuster l'impédance et améliorer l'adaptation.

*c) Adaptation avec encoches :* Dans cette approche, une encoche est introduite dans la forme du patch pour améliorer l'adaptation de l'antenne. Cette encoche permet d'ajuster l'impédance et d'obtenir une meilleure adaptation avec la charge.

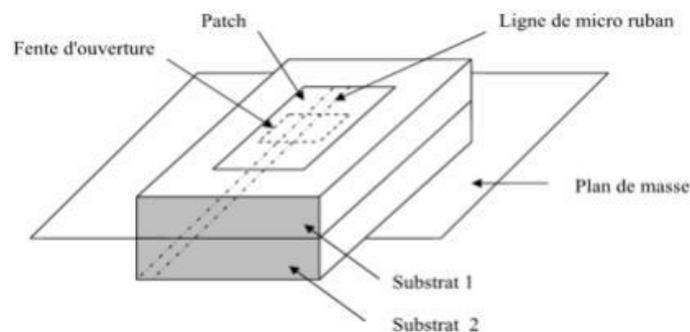
## VII.2 Alimentation par sonde coaxiale :



**Figure II.13 :** Alimentation par sonde coaxiale [30]

L'alimentation par sonde coaxiale est représentée dans l'image, dans cette configuration, le conducteur central (intérieur) est directement soudé à l'élément rayonnant (patch) après avoir traversé le diélectrique et le plan de masse, tandis que le conducteur extérieur est connecté directement à ce dernier. Cette méthode présente l'avantage de pouvoir être appliquée à n'importe quel emplacement sur le patch et elle est facile à fabriquer tout en réduisant les émissions parasites [30].

## VII .3 Alimentation couplée par ouverture :



**Figure II.14:** Alimentation couplée par ouverture [26]

Dans cette méthode d'alimentation, une plaque de base sépare le champ rayonné et la ligne d'alimentation. Les connexions entre les patchs et les lignes d'alimentation sont établies à travers des ouvertures ou des fentes pratiquées dans le plan de masse [26].

### **VIII. Conclusion :**

Ce chapitre vise à fournir des informations générales sur les antennes, en couvrant plusieurs aspects importants. Il commence par présenter des définitions essentielles et une vue d'ensemble des différents types d'antennes existants. Ensuite, il se concentre sur les antennes Patch, en expliquant leur construction courante et en mettant en évidence leurs avantages et inconvénients principaux.

Nous avons abordé également les techniques d'alimentation les plus couramment utilisées pour les antennes Patch, en soulignant leurs particularités et leurs applications. Ces informations sont cruciales pour comprendre les bases de la conception, de l'utilisation et de l'optimisation des antennes.

En fournissant ces connaissances générales, le chapitre vise à offrir une compréhension solide des antennes, de leurs caractéristiques et des options d'alimentation disponibles. Cela leur permettra d'aborder plus efficacement des sujets plus avancés dans le domaine des antennes et d'appliquer ces connaissances dans des contextes pratiques.

**CHAPITRE III : CONCEPTION ET SIMULATION D'UN  
ANTENNE MINIATURISEE EN INTEGRANT LES APPROCHES  
DGS ET DMS**

## **I. INTRODUCTION :**

Dans le cadre de notre projet de fin de cycle, nous prévoyons de simuler une antenne patch rectangulaire destinée aux applications 5G sub-6GHz. Ce chapitre vise à appliquer les notions abordées dans les deux chapitres précédents pour concevoir une antenne imprimée dans la bande de fréquences [3,5-4] GHz, en utilisant le logiciel de simulation CST Microwave Studio.

Le travail sera divisé en quatre parties distinctes. La première partie se concentrera sur la conception d'une antenne patch rectangulaire. Nous calculerons les dimensions de cette antenne, la simulerons et l'adapterons à la fréquence de 3,7 GHz. Ensuite, nous présenterons les résultats finaux de l'antenne, notamment en termes de coefficient de réflexion, de bande passante et de diagramme de rayonnement en gain.

La deuxième partie de ce chapitre portera sur l'application d'une méthode de miniaturisation appelée DMS. Nous utiliserons des encoches pour visualiser le courant de surface et examinerons les résultats en termes d'agilité fréquentielle. L'objectif sera de parvenir à une antenne patch qui reste dans la bande de fréquences ciblée.

La troisième partie sera consacrée à l'application d'une autre méthode de miniaturisation appelée DGS. Nous procéderons à une augmentation du gain de l'antenne.

Enfin, dans la quatrième partie, nous combinerons les deux méthodes, DGS et DMS, tout en maintenant la fréquence de résonance de l'antenne.

## **II. OUTIL DE SIMULATION :**

Pour la conception des composants micro-ondes (les antennes imprimées, les filtres HF...), il existe plusieurs simulateurs électromagnétiques destinés par exemples le HFSS, ADS Momentum, IE3D, FEKO et CST MICROWAVESTUDIO.

Nous avons utilisé dans notre étude le CST MICROWAVESTUDIO, qui est un outil spécialisé pour la simulation en 3D des composants à haute fréquence basé sur la résolution des équations de MAXWELL suivant la technique des intégrales finies (FIT, Finit Intégration Technique).

L'avantage de cet outil est la possibilité de traiter toutes sortes de structures homogènes quelle que soit la technologie utilisée [38].

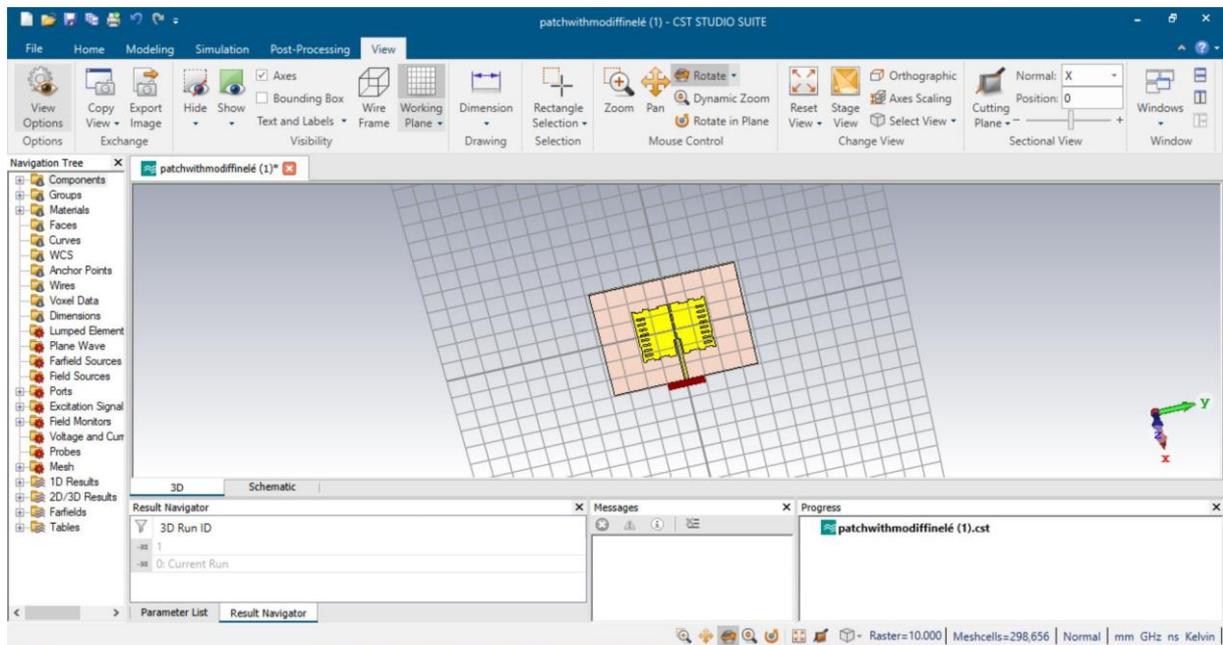


Figure III.1 : logiciel CST studio Microwave

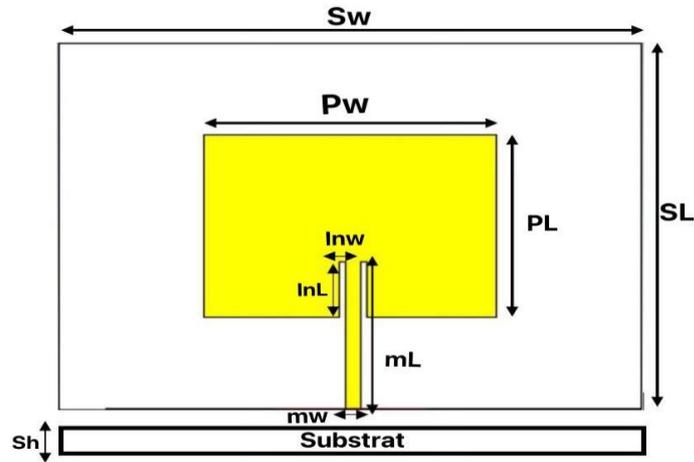
## II.1 Conception d'une antenne rectangulaire à 3.7GHZ :

L'antenne que nous avons proposée est une configuration de type patch rectangulaire, spécifiquement conçue pour répondre aux besoins d'adaptation d'impédance à une valeur de  $50\Omega$ . Le patch rectangulaire, d'une dimension  $S_w * S_L$ , est soigneusement ajusté pour assurer une correspondance appropriée avec l'impédance d'entrée requise [39].

Pour ce qui est du substrat, nous avons choisi d'utiliser un matériau FR-4 (LOSSY) avec une permittivité relative de  $\epsilon_r=4.3$  et une épaisseur de  $h=1.6\text{mm}$ . Ce choix est basé sur les propriétés électriques et mécaniques de ce matériau, qui conviennent bien à notre application.

Le plan de masse, d'une dimension  $G_w \times G_L$ , est fabriqué en cuivre avec une épaisseur de  $t=0.035\text{mm}$ . Cette configuration assure une bonne conductivité et permet une distribution efficace du courant sur la surface du plan de masse.

De plus, nous avons inclus des encoches dans notre conception pour faciliter l'adaptation des dimensions  $inw \cdot inL$ , ce qui contribue à améliorer les performances de l'antenne en termes d'impédance et de rayonnement.



**Figure III.2:** structure d'antenne Patch adaptée

Le tableau III.1 présente les caractéristiques d'antenne Patch simulée :

Les composants d'antenne	Le type de matériaux	Hauteur (mm)	Permittivité diélectrique
Plans de masse	Copper (annealed)	0.035	---
Le patch	Copper (annealed)	0.035	---
Substrat	FR-4(Lossy)	1.6	4.3
Ligne d'alimentation	Copper (annealed)	0.035	---

**Tableau III.1:** Caractéristiques des composants d'antenne et des matériaux utilisés

Paramètre d'antenne	Equations
Longueur réelle du patch (Pw)	$Pw = Leff - 2\Delta L$
Longueur effective (Leff)	$Leff = \frac{c}{2f\sqrt{\epsilon_{eff}}}$
L'extension de la longueur ( $\Delta L$ )	$\Delta L = 0.412sh \left( \frac{(\epsilon_{eff} + 0.3) \left( \frac{PL}{sh} + 0.264 \right)}{(\epsilon_{eff} - 258) \left( \frac{PL}{sh} - 0.8 \right)} \right)$

Constante diélectrique ( $\epsilon_{eff}$ )	$\epsilon_{reff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} - \sqrt{(1 + 12 \frac{sh}{PL})}$
Largeur du patch (PL)	$PL = \frac{c}{2f\sqrt{(\frac{\epsilon_r + 1}{2})}}$
Longueur du substrat (Sw)	$SW = Pw * 2$
Largeur du substrat (SL)	$SL = PL * 2$
L'impédance caractéristique de la ligne microruban	$ZC = \frac{119.9}{\sqrt{2(\epsilon_r + 1)}} \left[ \ln(4 \frac{sh}{wf}) + \sqrt{16((\frac{sh}{wf})^2 + 2) - \frac{1}{2} (\frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1}) (\ln \frac{\pi}{2} + \frac{1}{\epsilon_r} \ln \frac{4}{sh})} \right]$

**Tableau III.2 :** Formules et calculs des paramètres d'antenne [40]

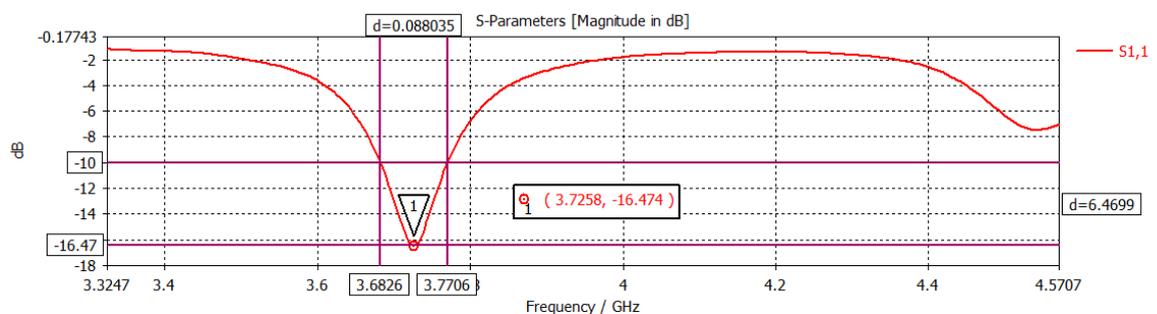
Le tableau III.2 présente les formules et calculs des paramètres d'antenne avec :

- C : la vitesse de la lumière  $c = 3 * 10^8$  m/s
- Fr : fréquence de résonance
- $\epsilon_r$  : permittivité du substrat
- h : l'épaisseur du substrat

Paramètres	sl	sw	sh	mt	pl	pw	ml	mw	inl	inw	k
(mm)	59	76	1.5	0.035	29.5	38	14.75	2.86	9	0.74	5.62

**Tableau III.3** les dimensions d'antenne de référence

### ➤ Le coefficient de réflexion



**Figure III .3 :** S11 du patch

Nous avons bien une adaptation à la fréquence de 3.73 GHz avec un coefficient de réflexion  $S_{11}$  égale à **-16.47 dB**, et une bande passante **BP= 0.9 %**.

## **II.2 Les techniques de miniaturisations :**

Lorsque nous cherchons à réduire la taille d'une antenne, nous sommes toujours confrontés à des contraintes physiques qui doivent être respectées afin de préserver ses performances. Voici quelques techniques disponibles pour relever ce défi de miniaturisation tout en maintenant les performances de l'antenne :

### **II.2.1 Defected Microstrip Structures (DMS):**

Les microstructures défectueuses (DMS) sont des altérations délibérées de la géométrie ou de la composition d'une antenne ou d'une ligne de transmission dans des zones spécifiques. Elles sont utilisées dans le but de réduire la taille de l'antenne tout en maintenant ses performances électromagnétiques. Les DMS peuvent également provoquer une plus grande incidence d'un effet de vague lente, ce qui présente des avantages pour les performances de l'antenne. Par ailleurs, l'utilisation de jauges de déformation peut contribuer à augmenter le facteur d'onde lente (SWF) de la ligne de transmission en mesurant les contraintes mécaniques exercées sur la structure [45]

### **II.2.2 Defected ground structure (DGS):**

La structure de terre défectueuse (DGS), également connue sous le nom de "defected ground structure" en anglais, fait référence à un motif ou à une configuration spécifique gravée ou insérée dans le plan de masse d'un circuit micro-ondes ou d'une antenne. Cette structure est conçue de manière intentionnelle pour modifier les propriétés électromagnétiques du plan de masse et des ondes qui s'y propagent, En modifiant la forme, la taille et la disposition des défauts présents dans la structure de terre, il est possible d'ajuster et de contrôler les performances électromagnétiques du circuit ou de l'antenne dans la bande de fréquence souhaitée [41].

### III. Antenne patch avec DMS:

Les structures DMS sont généralement des motifs découpés, des fentes ou des perturbations introduites dans la ligne de transmission microstrip. Ces structures sont conçues pour perturber les propriétés électromagnétiques du tracé du microstrip, ce qui permet d'obtenir des avantages tels qu'une meilleure isolation, une réduction des pertes, une réjection des interférences et une amélioration du facteur de qualité.

- **Prototype1 :**

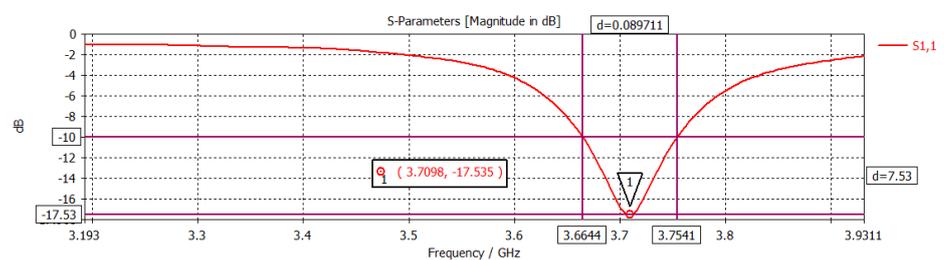
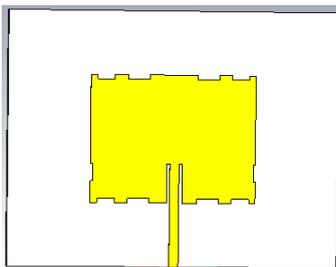


Figure III.4 : S11 de 1 ère prototype

- **Prototype2:**

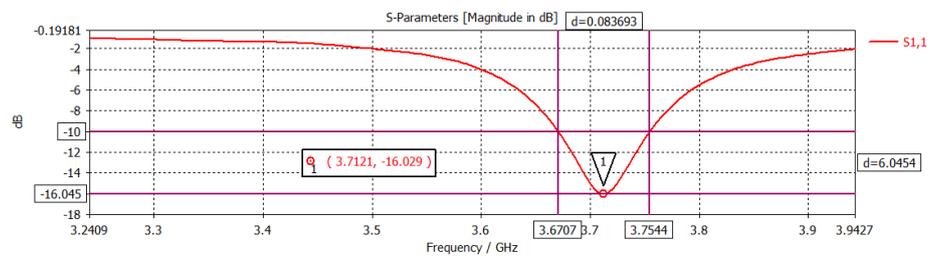
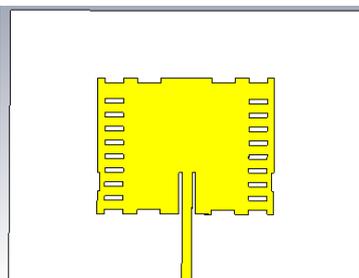
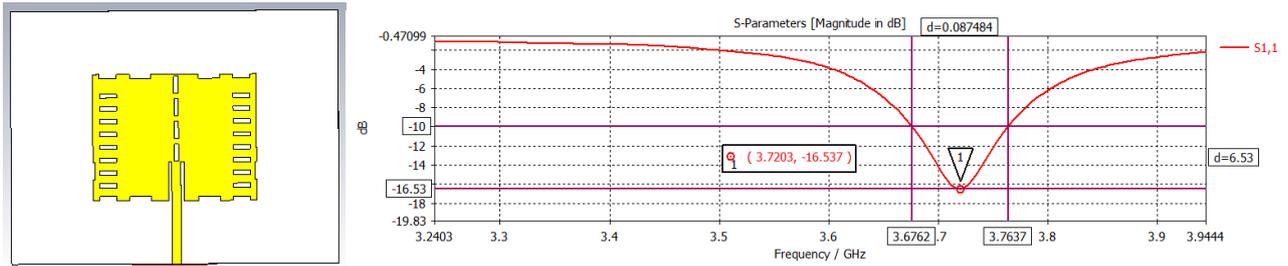


Figure III.5 : S11 de 2ème prototype

Les résultats illustrés dans les deux figures (Figure III.4 et Figure III.5) mettent en évidence une variation notable, avec un coefficient de réflexion S11 de -16 dB à travers la plage de fréquences [3,67 GHz - 3,75 GHz]. De plus, nous avons réussi à maintenir la même largeur de bande, conformément à nos objectifs préétablis.

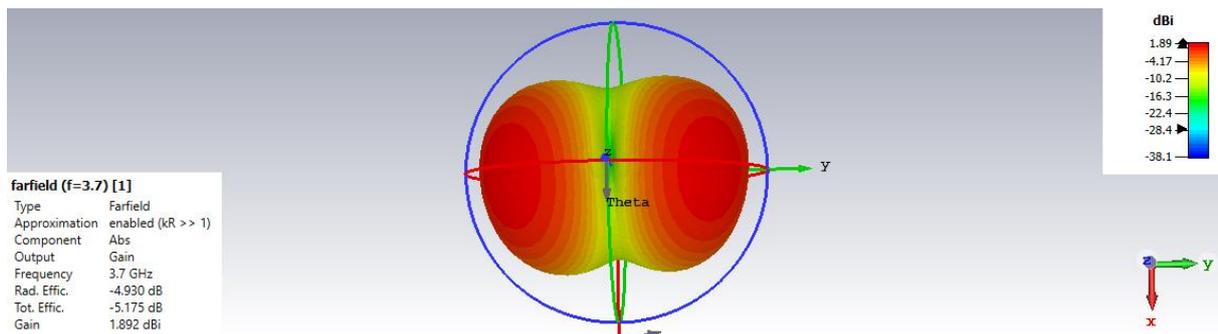
### Prototype 3:



**Figure III.6 :** S11 de l'antenne finale

Nous avons réalisé une amélioration significative de l'adaptation de l'antenne à la fréquence de 3,72 GHz, comme le montre clairement la Figure III.6. Le coefficient de réflexion présente un pic d'environ -16.53 dB.

#### ➤ Diagramme de rayonnement d'antenne finale

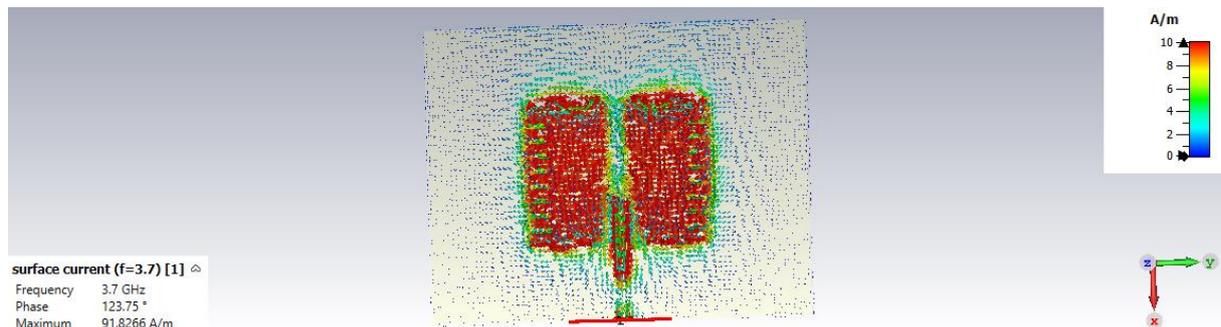


**Figure III.7:** Diagramme de rayonnement en 3D

Le diagramme de rayonnement bidirectionnel indique que l'antenne est capable d'émettre et de recevoir des signaux efficacement dans plusieurs directions, offrant une connectivité optimale dans le plan E. Le gain positif égal à 1.89 dBi indique également que l'antenne est capable d'amplifier le signal dans sa direction principale, améliorant ainsi la portée et la qualité de la transmission dans cette direction.

➤ **Courant de surface**

À une fréquence de 3,7 GHz, la répartition du courant dans la configuration illustrée dans la Figure III.8 montre une légère dispersion autour de l'encoche et au-dessus de l'élément patch, avec une concentration principale au centre de ce dernier. De plus, une observation révèle qu'une légère densité de courant se situe entre le bord de la fente et le bord de l'élément rayonnant dans la moitié de la ligne d'alimentation.



**Figure III.8** : le courant de surface

➤ **Tableau de comparaison :**

Voici un tableau comparatif des résultats par la technique DMS , nous avons comparé les résultats de trois cas différents (prototype 1,2,3 ) en utilisant les métriques (fréquence, Directivité, Gain ) obtenues grâce au simulateur CST .

<b>Patch avec DGS</b>	<b>Frequency (GHz)</b>	<b>S11 (dB)</b>	<b>Directivité</b>	<b>Gain (dBi)</b>
<b>Prototype 1</b>	<b>3.70</b>	<b>-17.53</b>	<b>6.86</b>	<b>1.85</b>
<b>Prototype 2</b>	<b>3.71</b>	<b>-16.02</b>	<b>6.82</b>	<b>1.85</b>
<b>Prototype 3</b>	<b>3.72</b>	<b>-16.53</b>	<b>6.82</b>	<b>1.89</b>

**TABLEAU III.4** : Comparaison entre les différentes simulations de la méthode DMS.

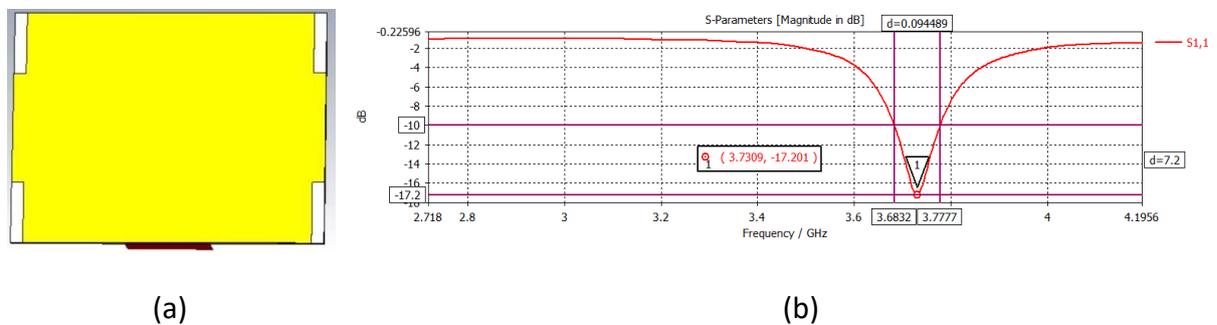
Après avoir miniaturisé l'antenne et retiré certaines encoches, nous constatons une dégradation des performances électromagnétiques, notamment en termes de directivité et S11. Toutefois, il est important de noter que malgré cette dégradation, la miniaturisation conduit à une augmentation du gain. Par conséquent, bien que les performances

électromagnétiques se détériorent, l'antenne continue de fonctionner de manière satisfaisante en raison de la présence d'un gain positif.

#### IV. Antenne patch avec DGS :

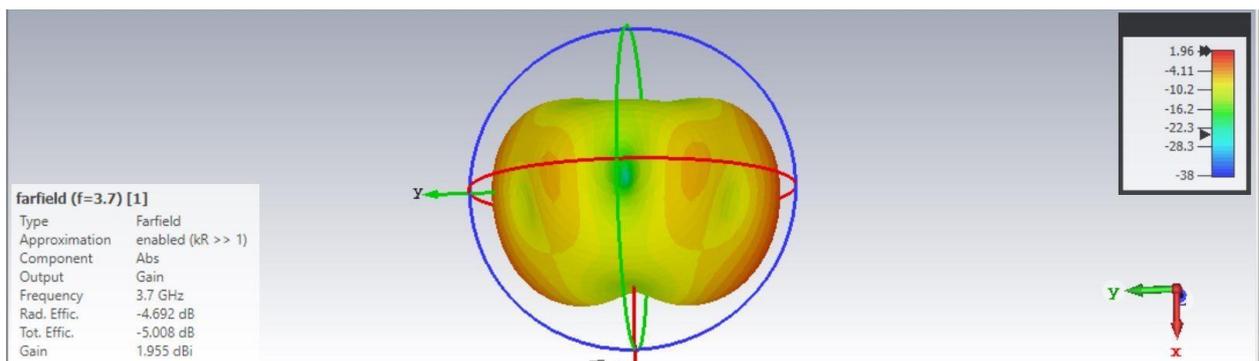
Après nos recherches dans la littérature, il a été constaté aussi que la technique connue sous le nom de DGS (Defected Ground Structure) est utilisée afin d'améliorer les performances et les propriétés électromagnétiques des circuits micro-ondes. Cette technique consiste à introduire intentionnellement des motifs particuliers dans le plan de masse.

##### • Prototype 1 :



**Figure III.9 :** (a) Antenne avec modification de quatre coins et (b)  $S_{11}$  en fonction de la fréquence

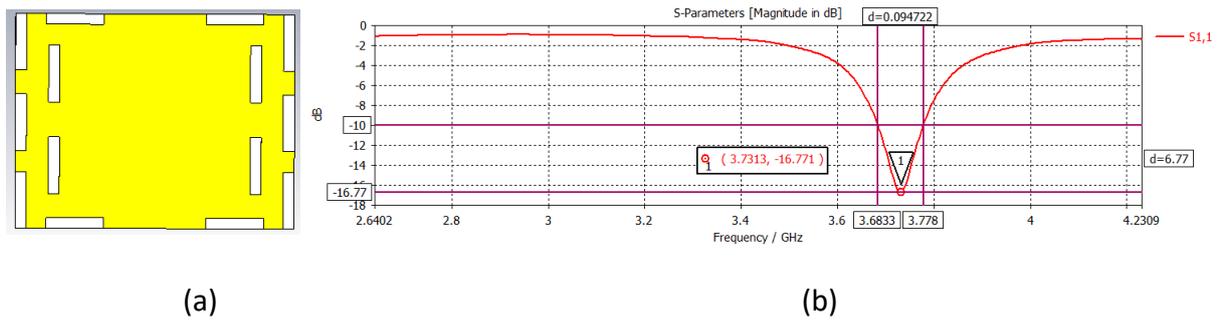
D'après la Figure III.9 (b), on peut observer que l'antenne présente coefficient de réflexion  $S_{11}$  de -17 dB à une fréquence de 3,73 GHz.



**Figure III.10 :** Diagramme de rayonnement en 3D de prototype 1

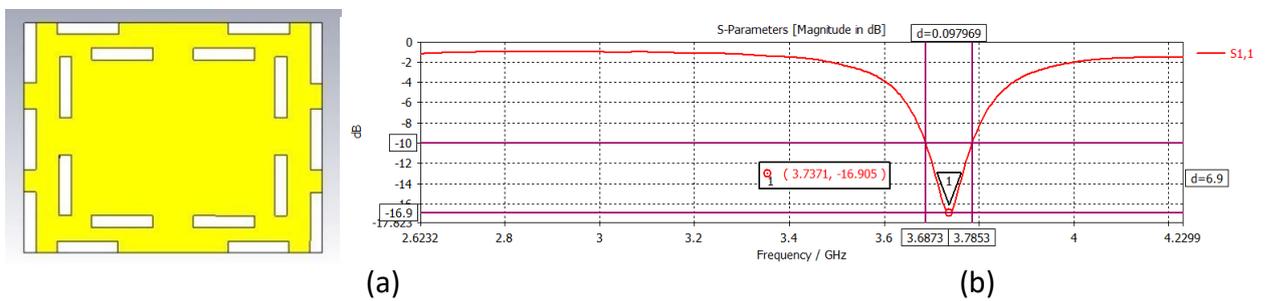
Dans la figure III.10, il est notable que le gain a augmenté par rapport au gain initial.

##### • Prototype2 :



**Figure III.11 :** (a) Antenne avec modification de 14 coins et (b) S11 en fonction de la fréquence.

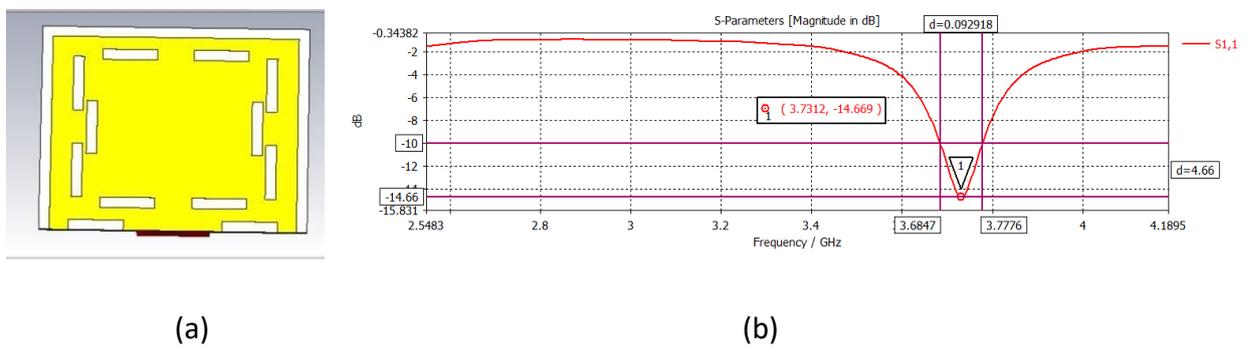
• **Prototype 3 :**



**Figure III.12 :** (a) Antenne de prototype 3 et (b) S11 en fonction de la fréquence.

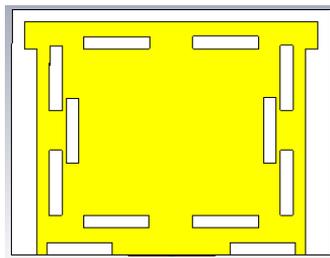
Les résultats présentés dans les deux figures (Figure III.11 et Figure III.12) indiquent que le coefficient de réflexion S11 augmente à -16,9 dB sur la plage de fréquences [3,68 GHz - 3,78 GHz].

• **Prototype4 :**

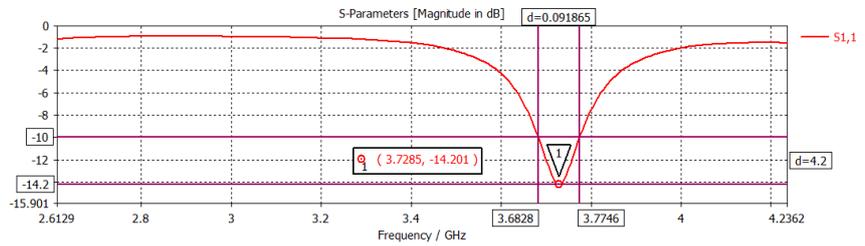


**Figure III.13 :** (a) Antenne avec plusieurs modifications et (d) S11 en fonction de la fréquence.

- **Prototype5 :**



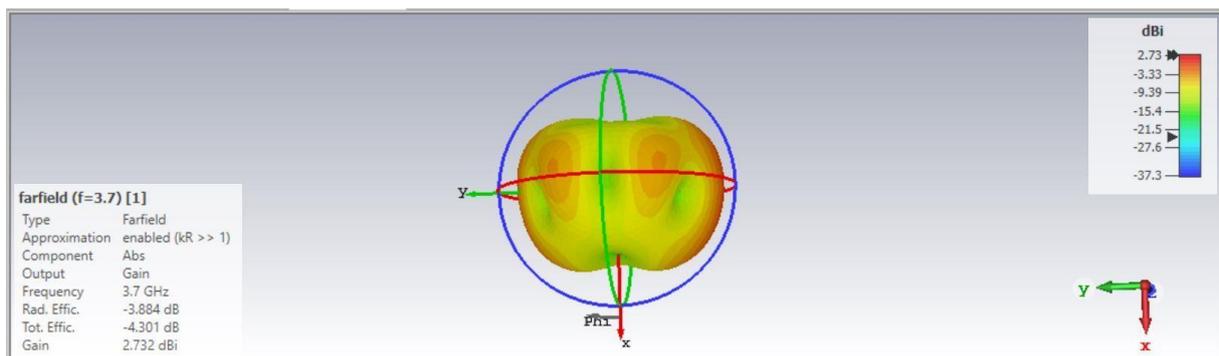
(a)



(b)

**Figure III.14 :** (a) Antenne avec les dernières modifications et (b) S<sub>11</sub> en fonction de la fréquence.

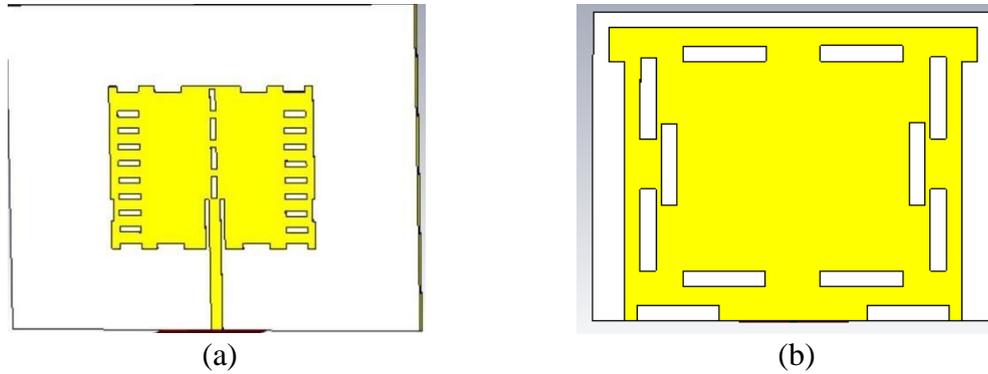
Les figures III.13 et III.14 illustrent l'antenne dans sa version finale miniaturisée en utilisant la technique DGS. Cela est dû au fait que si l'on supprime davantage d'encoches, le gain diminuera à 0,567 ou bien nous risquons de perdre la fréquence souhaitée.



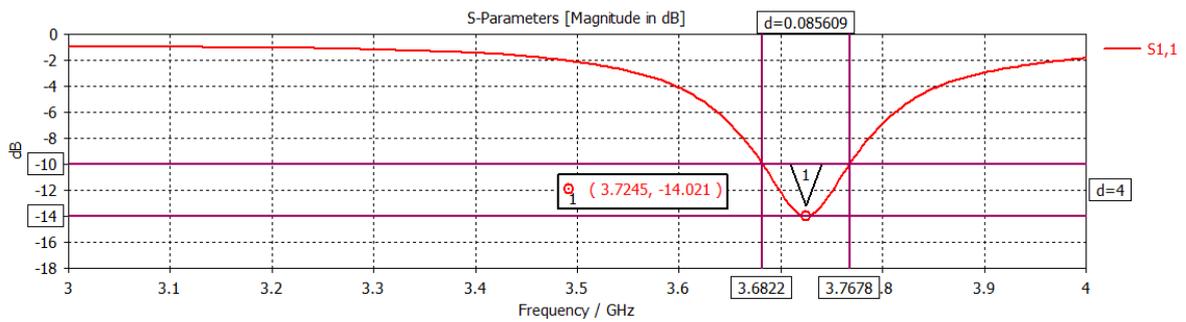
**Figure III.15:** Diagramme de rayonnement d'antenne finale en DGS.

Dans la figure III.15, on peut observer une amélioration significative du gain à 2,73 dBi.

## V. Combinaison de DMS et DGS pour une antenne patch:

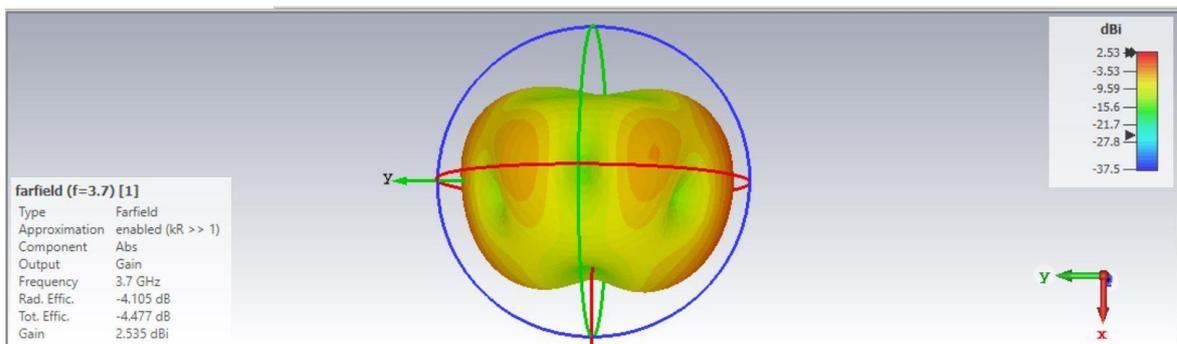


**Figure III.16 :** (a) Antenne avec la méthode DMS et (b) Antenne avec la méthode DGS



**Figure III.17:** S11 en fonction de la fréquence d'antenne combinée en DGS/DMS.

Il est possible d'observer que la fréquence finale de cette antenne est de 3,72 GHz, ce qui se situe dans la plage de fréquences [3,6 GHz - 3,8 GHz], ce qui est considéré comme acceptable.

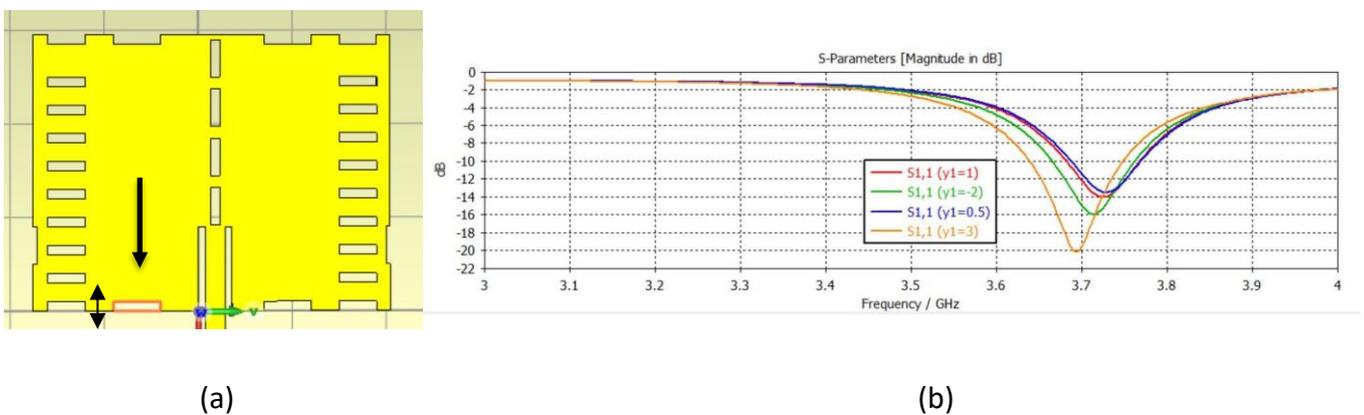


**Figure III.18 :** Diagramme de rayonnement en 3D d'antenne miniaturisée.

Le gain final de notre antenne s'élève à 2,535 dB, et il n'est pas possible de le surpasser en raison de notre utilisation préalable de la méthode DMS pour miniaturiser le patch. Lorsque nous avons introduit des encoches sur le plan de masse, nous avons rencontré des difficultés, et une miniaturisation supplémentaire aurait entraîné une diminution du gain. Par conséquent, nous sommes contraints de nous limiter à cette valeur de gain.

## VI. Etude paramétrique sur quelques paramètres :

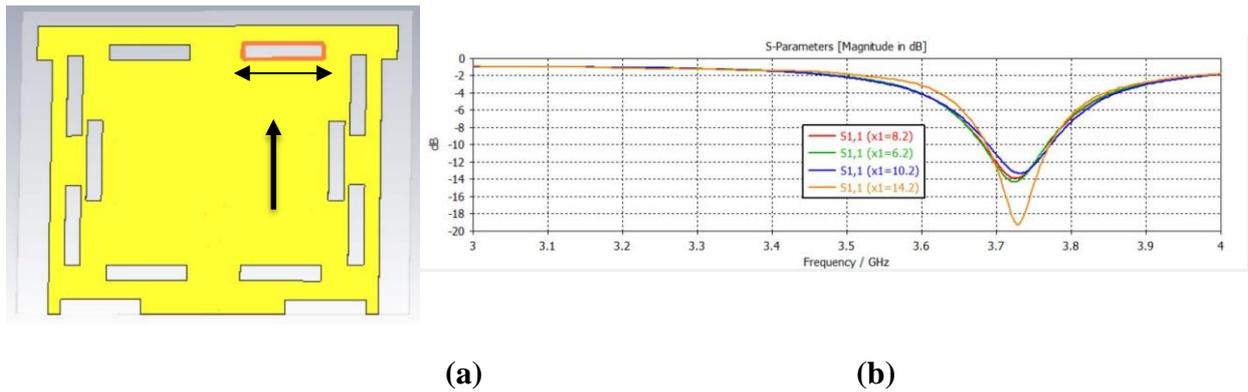
### VI.1 La méthode DMS :



**Figure III.19 :** (a) la paramètre étudiée et (b) Paramètre S11 simulé pour les valeurs d' $Y_1$ .

Le résultat illustré dans la Figure III.20 est particulièrement intéressant, car il met en évidence l'effet significatif de la longueur d' $y_1$  sur la fréquence de résonance et la bande passante. Nous remarquons qu'avec une valeur d' $y_1$  égale à 3 mm, une amélioration notable de S11 de -20 dB à 3,7 GHz est observée.

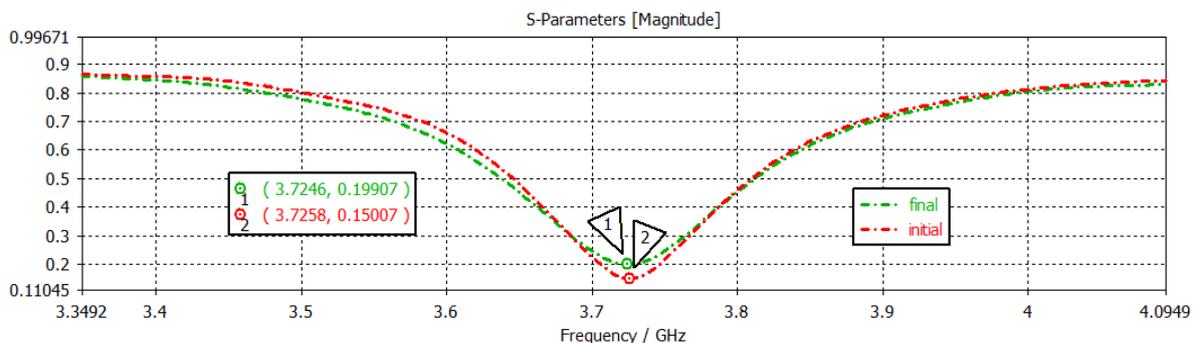
### VI.2 La méthode DGS :



**Figure III.20:** (a) la paramètre étudiée et (b) Paramètre S11 simulé pour les valeurs de  $X1$ .

À partir de la Figure III.20, il est clair que le paramètre  $X1$  exerce une influence significative sur l'adaptation d'impédance de l'antenne. Les meilleures valeurs pour obtenir une bonne adaptation sur l'ensemble de la bande désirée se situent entre 8,2 mm et 14,2 mm. De plus, nous remarquons qu'à mesure que la valeur de  $X1$  augmente, nous obtenons une meilleure adaptation avec S11 atteignant -19 dB.

## VII. Comparaison entre le patch initial et le patch finale (après miniaturisation) :



**Figure III.21 :** comparaison en Paramètre S11 simulé dans le patch initial et finale

La Figure III.21 présente une comparaison entre les résultats de simulation de S11 de l'antenne initiale et celle de l'antenne finale après sa miniaturisation à l'aide des méthodes DGS et DMS. On observe qu'à la fréquence de 3,73 GHz, le S11 est égal a -14 dB, ce qui représente une légère diminution par rapport à la valeur initiale.

### ➤ **Tableau de comparaison :**

Le tableau suivant résume les valeurs du gain, Directivité et la fréquence de résonance d'antenne patch initial et final :

<b>Antenne</b>	<b>frequence (GHz)</b>	<b>S11(dB)</b>	<b>Directivité</b>	<b>Gain (dB)</b>
<b>Antenne de référence</b>	<b>3.725</b>	<b>-16.47</b>	<b>6.81</b>	<b>1.947</b>
<b>Antenne miniaturisée</b>	<b>3.724</b>	<b>-14.02</b>	<b>6.64</b>	<b>2.535</b>

**TABLEAU III.5 :** Comparaison entre les caractéristiques d'antenne initial et final.

La comparaison des résultats démontre que nous avons réussi à maintenir la fréquence souhaitée à 3,7 GHz, avec une bonne adaptation du paramètre S11 et une augmentation notable du gain jusqu'à 2,53 dBi.

### **VIII. Conclusion :**

Ce chapitre nous a permis d'obtenir une vue d'ensemble sur la miniaturisation. Nous avons débuté en concevant une antenne patch rectangulaire simple et performante, accordée à la fréquence 5G (3,7 GHz).

L'utilisation des outils CST Microwave Studio nous a permis d'étudier et de simuler l'antenne. Nous avons trouvé un équilibre entre les dimensions de l'antenne et ses performances, afin d'obtenir les meilleurs résultats en termes de coefficient de réflexion, de diagramme de rayonnement et de gain.

Nous avons ensuite exploré deux techniques miniaturisations, à savoir la (DGS) et la (DMS). Pour chacune de ces techniques, nous avons étudié plusieurs prototypes (entre trois et cinq).

Finalement, nous avons combiné les résultats obtenus par les techniques DGS et DMS pour créer l'antenne finale. Cette dernière présentait de bonnes performances en termes de coefficient de réflexion, ainsi qu'une augmentation significative du gain.

## **CONCLUSION GÉNÉRALE :**

Notre objectif principal dans ce mémoire est d'étudier, simuler et concevoir des antennes pour les applications 5G. Les antennes patch fonctionnant à une fréquence de 3,7 GHz offrent des performances exceptionnelles en termes de directivité et de gain. Leur conception polyvalente et leur efficacité en font un choix privilégié pour de nombreuses applications. Cependant, des efforts continus sont nécessaires pour optimiser leur conception et surmonter les défis associés à leur utilisation dans des environnements réels.

Dans le premier chapitre, nous avons introduit la technologie 6G. Après avoir rappelé les objectifs de la norme 5G, ses technologies clés et son architecture, nous avons abordé les antennes en général, avec une attention particulière portée aux antennes imprimées. Les principaux avantages de la technologie des antennes microruban résident dans sa simplicité de mise en œuvre et son faible coût de fabrication.

Dans le troisième chapitre, nous avons présenté les techniques de miniaturisation DGS et DMS, qui ont considérablement amélioré les performances, la compacité et la flexibilité des antennes imprimées. Ces techniques ont ouvert de nouvelles possibilités dans le domaine des communications sans fil en permettant une intégration transparente des antennes dans diverses applications. Cependant, des recherches supplémentaires sont nécessaires pour relever les défis liés à l'efficacité et à la bande passante des antennes miniaturisées, afin de garantir une connectivité fiable et performante dans les futurs systèmes de communication.

En conclusion, notre travail met en évidence les avantages de la technologie 5G et des techniques de miniaturisation DGS et DMS pour les antennes imprimées. Ces avancées offrent de nouvelles perspectives dans le domaine des communications sans fil, en permettant des antennes plus compactes et performantes. Cependant, des études supplémentaires sont nécessaires pour améliorer l'efficacité et la bande passante de ces antennes miniaturisées, afin de répondre aux exigences croissantes des systèmes de communication modernes.

## LES REFERENCES:

- [1] RAPPAPORT, THEODORE S., MACCARTNEY, GEORGE R., SAMIMI, MATHEW K., ET AL. WIDEBAND MILLIMETER-WAVE PROPAGATION MEASUREMENTS AND CHANNEL MODELS FOR FUTURE WIRELESS COMMUNICATION SYSTEM DESIGN. IEEE TRANSACTIONS ON COMMUNICATIONS, 2015, VOL. 63, NO 9, P. 3029- 3056.
- [2] DETTI, ANDREA. "FUNCTIONAL ARCHITECTURE." CNIT - ELECTRONIC ENG. DEPT., UNIVERSITE DE ROME TOR VERGATA , 2019 .
- [3] DENBY, BRUCE. GEOLOCALISATION IN CELLULER TELEPHONE NETWORKS. PARIS VI: UNIVERSITE PIERRE ET MARIE CURIE , S.D.
- [4] S.SEBASTIEN, "LES ENJEUX DE LA 5G, " ARCEP, 2017.
- [5] FATIMAH, AI-OGAILI, ET M.SHUBAIR RAED. MILIMETRE-WAVE MOBILE COMMUNICATION FOR 5G:CHALLENGES AND OPPORTONITTIES. UAE: KHALIFA UNIVERSITY, S.D.
- [6] FEHIZORONIAINA , RATSIMBAZAFY ORIMBATO. «ETUDE DES FORMES D’ONDES UTILISEES EN 5G NR.» MEMOIRE MASTER , ECOLE SUPERIEUR POLYTECHNIQUE, 2017-2018
- [7] DAOUD, KHADIDJA . "SIMULATION COMPARATIVE DES TECHNIQUES FBMC ET OFDM POUR LES RESEAUX 5G". L’UNIVERSITE DE TLEMCEN, FACULTE DE TECHNOLOGY, DEPARTEMENT DE TELECOMMUNICATIONS .2016.
- [8] ROD, JONATHAN , ED. "FUNDAMENTALS OF 5G MOBILE NETWORKS ". JOHN WILEY & SONS, 2015.
- [9] ANDRIAMANALINA AN. RANDRIAMITANTSOA AA. RAKOTONDRAINA TE. "CAPACITE D’UN SYSTEME MIMO VIA UN CANAL A EVANOUISSEMENT."2013.
- [10] M. N. E. TEMMAR, A. HOCINI, D. KHEDROUCHE, AND M. ZAMANI , “ANALYSIS AND DESIGN OF A TERAHERTZ MICROSTRIP ANTENNA BASED ON A SYNTHESIZED PHOTONIC BANDGAP SUBSTRAT USING BPSO,”J COMPUT ELECTRON, VOL . 18, NO. 1, PP. 231–240, MAR. 2019.
- [11] GEOVANY MAURICIO ITTURALDE RUIZ, “PERFORMANCE DES RESEAUX LTE“,THESE, INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE TOULOUSE (INP TOULOUSE),2012

- [12] KHOULOUDD ISSIALI, "STUDY OF SMART ANTENNAS AND MU-MIMO TECHNIQUES FOR INDOOR RADIO ENGINEERING AND PLANNING TOOLS," ELECTRONICS. INSA DE RENNES, FRANCE, 2015.
- [13] LAURENTI, NICOLA. «POSITIONING IN 5G CELLULAR NETWORKS .» JULY 27, 2018, LICENSED UNDER THE CREATIVE COMMONS ATTRIBUTION-SHAREALIKE 4.0 INTERNATIONEL LICENSE .
- [14] AI, QINGHUA, ALMPANIS, GEORGIOS, FUMEAUX, CHRISTOPHE, ET AL. COMPARISON OF THE RADIATION EFFICIENCY FOR THE DIELECTRIC RESONATOR ANTENNA AND THE MICROSTRIP ANTENNA AT KA BAND. IEEE TRANSACTIONS ON ANTENNAS AND PROPAGATION, 2008, VOL. 56, NO 11, P. 3589-3592.
- [15] CONSTANTINE A. BALANIS, "ANTENNA THEORY ANALYSIS AND DESIGN", 2005,JOHN WILEY & SONS, INC.
- [16] UNIVERSITÉ DU QUÉBEC , MÉMOIRE CONCEPTION D'UNE ANTENNE PATCH ULTRA-LARGE BANDE (3.1 GHZ-10.6 GHZ) PAR ADIL KAMIL.
- [17] SHOGAIFER, ALIREZA. EVALUATION AND IMPROVEMENT OF THE RSSI BASED LOCALIZATION ALGORITHM KARLSKRONA SWEDEN : FACULTY OF COMPUTING, 2015.
- [18] SAIDI, MOHAMED, ET NIHEL BEKHCHI. DEVELOPPEMENT D'UNE APPLICATION ANDROID POUR LA GEOLOCALISATION EN EXPLOITANT LES DONNEES DU RESEAU GSM. MEMOIRE MASTER, TLEMCEN: UNIVERSITE ABOUBAKR BELKAID, 26/09/2017
- [19] UNIVERSITÉ PARIS-SUD, ORSAY , ELECTROMAGNÉTISME – DEUXIÈME SEMESTRE , LIVRET DE TP .
- [20] ANTENNE A FENTE , RÉALISÉ PAR: AGHZIF KHADIJA HAMROUDEN HAMZA IDLIL MAROUA SALEM MOHAMMEDTAHA , UNIVERSITÉ MOHAMED V
- [21] NAFATI A. ABOSEWAL, CONSTANTINE A. BALANIS AND CRAIG R. BIRTCHÉ "CONICAL HORN: GAIN AND AMPLITUD PATTERNS",IEEE TRANSACTIONS ON ANTENNAS AND PROPAGATION, VOL. 61, N°. 7, JULY 2013.
- [22] Y. T LO, S. W. LEE, "TYPES AND DESIGN METHODS" ANTENNA ENGINEERING HANDBOOK, MC GRAW-HILL, 2007, USA.
- [23] NICOLAS FORTINO « CONCEPTION ET CARACTÉRISATION D'ANTENNES IMPRIMÉES POUR SYSTÈMES ULTRA LARGE BANDE IMPULSIONNELS » THÈSE DIRIGÉE

PAR : GEORGES KOSSIAVAS (DIRECTEUR DE THÈSE) ,JEAN-YVES DAUVIGNAC ,  
L'UNIVERSITE DE NICE-SOPHIA ANTIPOLIS,16 FÉVRIER 2006.

[24] HEBIB. S " : NOUVELLE TOPOLOGIE D'ANTENNES MULTI-BANDES POUR  
APPLICATIONS SPATIALES ", THÈSE DE DOCTORAT, UNIVERSITÉ DE TOULOUSE III -  
PAUL SABATIER, 2008.

[25] REJANE, DALCE. « METHODES DE LOCALISATION PAR LE SIGNAL DE  
COMMUNICATION DANS LES RESEAUX DE CAPTEURS SANS FIL EN INTERIEUR.» THESE  
DE DOCTORAT, TOULOUSE , 26 JUIN 2013

[26] UNIVERSITE ABOU BEKR BELKAID-TLEMCEN , MEMOIR PAR : DOULAT  
ABDELKADER , SUJET CONCEPTION DES ANTENNES MINIATURES A BASE DE  
METAMATERIAUX POUR LES APPLICATIONS DE LA CINQUIEME GENERATION .

[27] LIVRE DE ODILE PICON ET COLL : « LES ANTENNES : THEORIE , CONCEPTION , ET  
APPLICATIONS « , PREFACE DE MAURICE BELLANGER. PARUTION : SEPTEMBRE 2009.

[28] COULON, MARTIAL . «CANAL DE PROPAGATION.» 2007-2008.

[29] CHEHRI, HAMOU. ÉTUDE ET CARACTÉRISATION D'UN CANAL DE PROPAGATION  
POUR LES RÉSEAUX V ANET. COMME EXIGENCE PARTIELLE DE LAMAÎRISE EN  
INGÉNIERIE, UNIVERSITÉ DU QUÉBEC EN ABITIBITÉMISCAMINGUE, JUIN, 2014.

[30] SHU, SUN, S. RAPPAPORT THEODORE, RANGER SUNDEEP, A. THOMAS TIMOTHY,  
ET GHOSH AMITAVA . PROPAGATION PATCH LOSS MODELS FOR 5G URBAN MICRO  
AND MACRO-CELLULAR SCENARIOS. IEEE, MAY 2016.

[31] H. CHORFI « CONCEPTION D'UN NOUVEAU SYSTÈME D'ANTENNE RÉSEAU  
CONFORME EN ONDE MILLIMÉTRIQUE » MÉMOIRE DE MASTER, UNIVERSITÉ QUÉBEC  
ABITIBI-TÉMISCAMINGUE 2012.

[32] KEIT.R.CAVER AND JAMES.W.MINK , «MICROSTRIP ANTENNA TECHNOLOGY»,15  
IEEE.1981.

[33] F.A. BELAININE, M.A. SALMI « ETUDE DE LA MINIATURISATION DES ANTENNES  
PAR REPLIEMENT APPLICATION POUR LA CONCEPTION D'UNE ANTENNE 2.4GHZ »  
MÉMOIRE DEMASTER, UNIVERSITÉ HOUARI BOUMEDIENE D'ALGER 2013.

[34] S. TEBACHE .« MÉTHODE DE CARACTÉRISATION HYPERFRÉQUENCE DES  
ANTENNES IMPRIMÉES » MAGISTER, FACULTÉ DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE,  
UNIVERSITÉ MOHAMED KHIDER, BISKRA 2013.

- [35] D. AMEZIANE « ETUDE ET OPTIMISATION D'ANTENNES FRACTALES PLAQUÉES » MÉMOIRE DE MAGISTER, UNIVERSITÉ ABOU BEKR BELKAID DE TLEMCCEN 2008.
- [36] F.A. BELAININE, M.A. SALMI « ETUDE DE LA MINIATURISATION DES ANTENNES PAR REPLIEMENT APPLICATION POUR LA CONCEPTION D'UNE ANTENNE 2.4GHZ » MÉMOIRE DE MASTER, UNIVERSITÉ HOUARI BOUMEDIENE D'ALGER 2013.
- [37] M, GUJRAL, J.L.W, LI,T, YUAN, AND CW.QIU, « BANDWIDTH IMPROVEMENT OF MICROSTRIP ANTENNA ARRAY USING DUMMY EBG PATTERN ON FEED LINE» NATIONAL UNIVERSITY OGSINGAPOOR, PROGRESS IN ELECTROMAGNETIC RESEARCH, VOL.127, PP.79-92, 2012.
- [38] HIRTENFELDER, "EFFECTIVE ANTENNA SIMULATION USING CST MICROWAVE STUDIO®," 2007 2ND INTERNATIONAL ITG CONFERENCE ON ANTENNAS , 2007, PP. 239-239, DOI : 10.1109/INICA.2007.4353972
- [39] P. IKONEN, S. MASLOVSKI, S.TRETYAKOV, "ON ARTIFICIAL MAGNETO-DIELECTRIQUE SUBSTRATES WITH MICROSTRIP ANTENNAS : THE ROLE OF FREQUANCY DISPERSION," IEEE ANTENNAS AND PROPAGATION SOCIETY INTERNATIONAL SYMPOSIUM, PP. 390 – 393, 2006.
- [40] : ADIL KAMIL « CONCEPTION D'UNE ANTENNE PATCH ULTRA-LARGE BANDE (3.1 GHz-10.6 GHz) », THESE DE POUR L'OBTENTION DU GRADE DU MAITRES SCIENCES UNIVERSITE DU QUEBEC, 2011.
- [41] : DOCTORAT DE L'UNIVERSITE DE RENNES 1 MENTION : ELECTRONIQUE ECOLE DOCTORALE MATISSE PRESENTEE PAR SABRE DAKHLI PREPARE A L'UNITE DE RECHERCHE UMR CNRS 6164 INSTITUT D'ELECTRONIQUE ET DE TELECOMMUNICATION DE RENNES GROUPE ANTENNES ET HYPERFREQUANCE UFR STRUCTURES ET PROPRIETES DE LA MATIERE ET AU LABORATOIRES INNOV.COM, SUP.COM.
- [42] : UNIVERSITE DE BATNA -2- THESE DE DOCTORAT PAR : NAZIH HAMDIKEN , THEME « APPLICATION DE NOUVELLES METHODES DE MODELISATION ET D'OPTIMISATION DANS L'ETUDE DES ANTENNES MICROBANDES ET DES SYSTEMES MULTI-ANTENNAIRES POUR TECHNIQUES DE DIVERSITE ET MIMO ».
- [43] : 3GPP TS 38.305: NG RADIO ACCESS NETWORK (NG-RAN); STAGE 2 FUNCTIONEL SPECIFICATION OF USER EQUIPEMENT (UE) POSITIONING IN NG-RAN, V.15.4.0

[44] : PRAMANIK, PIJUSH KANTI DUTTA, ET AL. "ADVANCING MODERN HEALTHCARE WITH NANOTECHNOLOGY , NANOBIOSENSORS, AND INTERNET OF NANO THINGS : TAXONOMIES, APPLICATIONS , ARCHITECTURES , AND CHALLENGES ." IEEE ACCESS 8 (2020): 65230-65266.