

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
UNIVERSITE ABOU BAKR BELKAID, TLEMCEN
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE ET ELECTRONIQUE
LABORATOIRE DE TELECOMMUNICATION



MEMOIRE

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

En : Télécommunications

Spécialité : Systèmes et Télécommunications

Par : SERIR Fatima Zohra

Sujet

Conception d'antennes pour les mobiles 5G

Soutenu, le 10 /07 /2021, devant le jury composé de :

Mr. MERIAH Sidi Mohammed	PR	Univ. Tlemcen	Président
Mr. BOUSAHLA Miloud	MCB	Univ. Tlemcen	Directeur de mémoire
Mr. BOUABDALLAH Réda	MCB	Univ. Tlemcen	Examineur

ANNEE UNIVERSITAIRE : 2020-2021

Remerciements

*Nous tenons avant tout à remercier **Dieu** tout puissant de nous avoir donné la force et la volonté pour achever ce modeste travail.*

Je tiens à remercier particulièrement mes parents mes succès demeure de loin le fruit de leurs longues années de sacrifices et d'éducation.

*Mes vifs remerciement, accompagné de toute la gratitude, vont tout d'abord à mon encadreur Ms **BOUSAHLA Miloud** pour me avoir proposé ce sujet et dirigé mon travail, je le remercie aussi pour son prestigieux aide, sa disponibilité et avis éclairés.*

*Je remercie également Ms **MERIAH Sidi Mohammed** professeur à l'université de Tlemcen pour avoir accepté le présider le jury*

*J'adresse mes remerciement à Ms **BOUABDALLAH Réda** MCB à l'université de Tlemcen pour l'intérêt qu'il est bien voulu porter à ce travail en acceptant de faire partie du jury.*

Enfin je remercie toute personne ayant intervenue de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.

Dédicace

Rien n'est aussi beau à offrir que le fruit d'un labeur qu'on dédie du fond du cœur à ceux qu'on aime et qu'on remercie en exprimant la gratitude et la reconnaissance durant toute notre existence.

***Je dédie ce travail à :** A ma mère, qui m'a toujours poussé à aller de l'avant avec ses prières, A mon père qui m'a comblé de son soutien, Je ne serai jamais assez reconnaissant envers eux.*

A mes frères Ismail, Yacine, Ilyes et Ali pour leur patience, d'avoir tendu chaleureusement leurs bras et pour avoir évincé mes moments de doute. A mes belles sœurs yasmine, Khadidja et Nabahat et mes neveux qui m'ont accompagné de leur amour. A toute la promo de Télécommunication dont je fais partie. A mes professeurs tout au long du cycle de mes études qui m'ont dirigé vers la porte de réussite. A cette terre, notre chère et bien aimé ALGERIE, qui m'a vu naître (vive ma patrie).

Résumé

Le but de ce travail est l'étude, la simulation et la conception d'antennes pour les applications 5G.

L'utilisation d'un logiciel adapté pour la conception et caractérisation d'une antenne est une étape incontournable dans un souci de gain de temps et d'optimisation de la structure aux paramètres désirés.

En utilisant le logiciel CST, nous avons étudié et conçu deux antennes, de faible coût de réalisation et très facile à fabriquer, pour les applications 5G. Les résultats présentés concernent les caractéristiques les plus importantes de l'antenne, tels que le coefficient de réflexion, le diagramme de rayonnement, le gain et le rapport d'onde stationnaire (ROS) de l'antenne.

Pour chaque antenne, une étude paramétrique a été menée pour comprendre et mettre en évidence le rôle et les effets des divers paramètres afin de les d'optimiser et d'aboutir à une structure finale performante.

Mots clés : Cinquième génération (5G), Bande millimétrique, Antenne bi-bande.

Abstract

The purpose of this work is the study, simulation and design of antennas for 5G applications.

The use of software suitable for the design and characterization of an antenna is an essential step in order to save time and optimize the structure to the desired parameters.

Using the CST software, we have designed and designed two antennas, low cost of realization and very easy to manufacture, for 5G applications. The results presented concern the most important characteristics of the antenna, such as the reflection coefficient, the radiation diagram, the gain and the standing wave ratio (ROS) of the antenna.

For each antenna, a parametric study was carried out to understand and highlight the role and effects of the various parameters in order to optimize them and result in a final efficient structure.

Keywords: Fifth generation (5G), Millimetre band, Bi-band antenna.

ملخص

الغرض من هذا العمل هو دراسة ومحاكاة وتصميم هوائيات للتطبيقات 5G. ويعتبر استخدام البرمجيات المناسبة لتصميم الهوائي وتوصيفه خطوة أساسية من أجل توفير الوقت والوصول بالهيكل إلى المستوى الأمثل من البارامترات المطلوبة.

باستخدام البرنامج ، قمنا بدراسة وتصميم هوائين ، من تكلفة الإنتاج المنخفضة وسهولة التصنيع للغاية ، للتطبيقات. وتتعلق النتائج المقدمة بأهم خصائص الهوائي ، مثل معامل الانعكاس ، ونمط الإشعاع ، والمكاسب ، ونسبة الموجة الدائمة للهوائي. وبالنسبة لكل هوائي ، أجريت دراسة بارامترية لفهم وإبراز دور وآثار مختلف البارامترات من أجل الوصول بها إلى المستوى الأمثل والتوصل إلى هيكل فعال نهائي.

الكلمات الرئيسية: الجيل الخامس من فرقة ملليمتر ، هوائي من نوع بي

Table des matières

<i>Remerciements</i>	I
<i>Dédicace</i>	II
<i>Résumé</i>	III
Liste des figures	VIII
Liste des tables.....	X
Liste des abréviations.....	XI
Introduction générale	XIV
Introduction générale	1

Chapitre I :

Aspects Généraux Sur La technologie 5G

I.1 Introduction	3
I.2 Historique	3
I.3. La 5ème Génération	5
I.4. Objectifs de la 5G	5
I.5 Architecture du réseau 5G et ses services	5
I.6 Fréquences utilisées pour la 5G.....	7
I.7 Technologies utilisées pour la 5G	8
I.7.1 Beamforming (filtrage spatial)	9
I.7.2 Massive MIMO (Multiple-Input Multiple-Output).....	9
I.7.3 Full duplex:.....	10
I.7.4 Ondes millimétrique	10
I.7.5 Small cellules.....	11
I.8 Conclusion.....	12

Chapitre II :

Les Antennes Imprimées

II.1. Introduction	13
II.2 Définition d'une antenne	13
II.3 Différent types d'antennes	13
II.4 Paramètres et caractéristiques d'antenne.....	13
II.4.1 Diagramme de rayonnement	13
II.4.2 Directivité.....	14
II.4.3 Gain	14
II.4.4 Le coefficient de réflexion S₁₁	15
II.4.5 L'impédance d'entrée.....	15
II.4.6 Rapport d'onde stationnaire (ROS)	16
II.4.7 Fréquence de résonance et bande passante	17
II.5 Antenne microruban (imprimée).....	17
II.6 Avantages et inconvénients de l'antenne patch.....	18
II.7 Techniques d'alimentation	19
II.7.1 : Alimentation par ligne par microruban	19
II.7.2 Alimentation par sonde coaxiale	20
II.7.3 Alimentation couplée par ouverture	21
II.8 Techniques d'adaptation	21
II.8.1 Adaptation par ligne quart d'onde.....	21
II.8.2 Adaptation par stub	22
II.8.3 Adaptation avec encoches	22
II.9 Antennes planaires aux fréquences d'ondes mm	23
II.10 Conclusion.....	24

Chapitre III : conception et simulation d'antenne pour les applications 5G

III.1. introduction	25
III.2 Outil de simulation.....	25
III.3. Antenne triangulaire étudiée	26
III.3.1 :Etude paramétrique sur les encoches	29
III.3.2: Elargissement de la bande	30
III.4 Performance de l’antenne optimisée	31
III.4.1 Coefficient de réflexion	32
III.4.2 Rapport d’onde stationnaire (VSWR).....	33
III.4.3 Diagramme de rayonnement	33
III.4.4 Gain.....	35
III.5 Antenne trapézoïdale bi-bande proposée	35
III. 5.1 Etape de conception	37
III.5.2. Performance de l’antenne optimisée	42
III.5.3.Diagramme de rayonnement	44
III.5.4.Rapport d'onde stationnaire (ROS)	45
III.6. Conclusion	46
Conclusion générale.....	47

Liste des figures

Figure I.1: Vue schématique de l'histoire des communications cellulaires	4
Figure I. 2: l'architecture de réseau 5G.	6
Figure I. 3: l'architecture de réseau 5G.	7
Figure I. 4: Spectre des fréquences 5G [9]	8
Figure I. 5: les Technologies utilisées pour la 5G	8
Figure I. 6: MIMO Massive.....	9
Figure I. 7: Plage de fonctionnement typique des communications mobiles existantes, par rapport au spectre des ondes millimétriques	10
Figure I. 8: Petites cellules.....	12
Figure II 1: Exemple d'un diagramme de rayonnement en 3D, et diagramme dans le plan YoZ (gain en dB).....	14
Figure II 2: Antenne en mode émetteur	16
Figure II 3: Illustration de la bande passante à -10 dB d'une antenne.....	17
Figure II 4: Structure d'une antenne microruban	18
Figure II 5: Différentes formes d'une antenne patch.	18
Figure II 6: Alimentation par ligne microruban.....	20
Figure II 7: Alimentation par sonde coaxiale	20
Figure II 8: Alimentation par sonde coaxiale	21
Figure II 9 : a : Modélisation de l'antenne quart d'onde b : adaptation par ligne quart d'onde.	22
Figure II 10: a Modélisation de l'antenne à Adaptation simple stub. b : Stub en circuit ouvert	22
Figure II 11: a : L'équivalence en circuit. b : Patch adapté par encoches.	23

Figure III.1: CST Microwave Studio	26
Figure III. 2: Structure de l'antenne étudiée	27
Figure III. 3: Coefficient de réflexion de l'antenne étudiée	28
Figure III. 4: Antenne avec encoches	28
Figure III. 5: Coefficient de réflexion de l'antenne avec encoches	29
Figure III. 6: Effet de la largeur des encoches sur le coefficient de réflexion	29
Figure III. 7: Effet de la longueur des encoches sur le coefficient de réflexion	30
Figure III. 8 : Plan de masse avec fente	30
Figure III. 9: Effet de la largeur n de la fente dans le plan de masse sur le coefficient de réflexion	31
Figure III. 10: Effet de la longueur m de la fente dans le plan de masse sur le coefficient de réflexion.....	31
Figure III. 11: Coefficient de réflexion de l'antenne optimisée.....	32
Figure III. 12: Rapport d'onde stationnaire (VSWR).	33
Figure III. 13: Diagramme de rayonnement de l'antenne optimisée	34
Figure III. 14: Diagramme de rayonnement en 2D de l'antenne optimisée a) $\phi=90^\circ$, b) $\phi=0^\circ$	35
Figure III. 15 : Gain simulé de l'antenne optimisée	35
Figure III. 16 : Géométrie de l'antenne trapézoïdale proposée, a) Vu de dessus, b) Plan de masse	36
Figure III. 17: Etapes de conception de l'antenne finale proposée.....	38
Figure III. 18: Coefficient de réflexion de l'antenne initiale	39
Figure III. 19: Effet de la largeur des encoches sur le coefficient de réflexion.....	40
Figure III. 20: Effet de la longueur des encoches sur le coefficient de réflexion.....	40
Figure III. 21: Effet de la largeur de la fente	41
Figure III. 22: Effet de la longueur de la fente	41
Figure III. 23: Effet de la longueur de la fente	42

Figure III. 24: Effet de la largeur de la fente	42
Figure III. 25: Coefficient de réflexion S11 de l'antenne proposée	44
Figure III. 26: Diagramme de rayonnement de l'antenne proposée à 26 GHz (a) plan 3D (b) plan polaire ($\phi=90$).	45
Figure III. 27 :Diagramme de rayonnement de l'antenne proposée à 46.49 GHz (a) plan 3D (b) plan polaire ($\phi=90$)	45
Figure III. 28: Rapport d'onde stationnaire VSWR.....	46

Liste des tables

tableau I 1: Résumé des générations de communications mobiles [1]	4
Tableau III. 1: Paramètres géométriques de l'antenne étudiée	27
Tableau III. 2: Paramètres géométriques de l'antenne optimisée	32
Tableau III. 3: Dimension de l'antenne proposée	37
Tableau III. 4: Paramètres géométriques de l'antenne optimisée	43

Liste des abréviations

1G : première génération.

2G : deuxième génération.

3G : troisième génération.

4G : quatrième génération.

5G : cinquième génération.

Gbps : Giga bit par second.

MIMO: Multiple Input Multiple Output.

TDMA: Time Division Multiple Access.

CDMA: Code Division Multiple Access.

LTE: Long Term Evolution.

QOS : Quality Of Service.

Wi-Fi: Wireless Fidelity.

AN: Access Network (réseau d'accès).

5GC : 5G Core Network.

NG-RAN : New Generation of Radio Access Network (nouvelle génération de réseau d'accès radio).

NR : New Radio interface (nouvelle interface radio).

AN : Access Network (réseau d'accès).

3GPP: 3rd Generation Partnership Project.

TCP: Transmission Control Protocol.

IP: Internet Protocol.

UE: User Equipment.

PDU: Protocol Data Unit.

NG: New Generation.

UWB: Ultra Wide Band (Ultra Large Bande).

PIRE: Puissance Isotrope du Rayonnement Efficace.

BP: Bande Passante.

CST (MWS) : Computer Science Technology MICROWAVE STUDIO.

S11: Coefficient of reflexion.

VSWR: The Voltage Standing Wave Ratio.

Introduction générale

Introduction générale

Depuis quelques décennies, on observe un développement très rapide dans le domaine des communications sans fil. Ce développement est dû au besoin croissant de débit, le caractère mobile du terminal, l'encombrement de la ressource spectrale. Les anciens systèmes mobiles ne permettent pas de répondre d'une manière optimale à ces besoins.

La nouvelle génération de télécommunication mobile connue sous l'acronyme de cinquième génération (5G) est une technologie évolutive qui prend en charge de nouvelles fonctionnalités et répond aux besoins et aux enjeux de demain.

Notre objectif principal dans le cadre de ce mémoire est l'étude, la simulation et la conception d'antennes pour les applications 5G.

Le présent mémoire est scindé en trois principaux chapitres et une conclusion générale. Il est présenté comme suit.

Dans le premier chapitre nous présentons la technologie 5G. Nous commençons par donner un bref historique sur les générations de technologie de télécommunications, nous donnons ensuite l'objectif de la 5G, l'architecture de la 5G, les fréquences utilisées pour la 5G et à la fin les différentes technologies de la 5G.

Dans le deuxième chapitre, nous présentons des généralités sur les antennes imprimées. Dans un premier temps, on présente la définition, les caractéristiques fondamentales ainsi que les avantages et inconvénients d'une antenne imprimée. On présente dans un second temps les techniques d'alimentations les plus utilisées de ce type d'antenne. Et on termine par présenter les différentes techniques d'adaptation.

Le troisième chapitre est consacré à la conception d'antennes de faible coût de réalisation, très facile à fabriquer et répondant aux exigences de la 5G. Dans la première partie de ce chapitre, nous présentons la conception d'une antenne imprimée triangulaire permettant d'émettre ou de recevoir à la fréquence 26 GHz, en citant les différentes étapes de la conception.

Dans la deuxième partie de ce chapitre nous allons nous intéresser à la conception d'une antenne trapézoïdale bi-bande fonctionnant aux fréquences 26 et 46GHz, pour les applications 5G. Pour chaque antenne conçue, nous allons faire une étude paramétrique pour comprendre et mettre en évidence le rôle et les effets des divers paramètres afin de les d'optimiser et d'aboutir à une structure finale performante.

Enfin, on termine ce mémoire par une conclusion générale.

Chapitre I

Aspects Généraux Sur La

technologie 5G

I.1 Introduction

La 5G est le réseau mobile de la 5^{ème} génération, il s'agit une nouvelle norme mondiale sans fil, destinée à satisfaire les besoins croissant de population en offrant des débits de pointe de plusieurs Gbps, une plus grande fiabilité et disponibilité, une latence ultra faible, et une capacité des réseaux très élevés grâce aux système MIMO massive.

Ce chapitre présente un aperçu général sur l'évolution de la 5^{ème} génération. Nous allons commencer par donner un bref historique sur les générations de technologie de télécommunications, ensuite l'objectif de la 5G, l'architecture de la 5G, les fréquences utilisées pour la 5G et à la fin les différentes technologies de la 5G.

I.2 Historique

Le réseau du téléphone mobile a subi plusieurs développements dans le temps. On distingue 4 générations :

1^{ère} génération : apparaissant dans les années 1980 basée sur un système mobile de service vocal analogique.

2^{ème} génération : est le premier système mobile vocal numérique, qui a été développé en 1990 par l'accès multiple par répartition dans le temps (TDMA).

3^{ème} génération : du milieu des années 1990 au 2000, l'évolution a touché l'accès multiple par division de codage (CDMA).

4^{ème} génération : L'augmentation du taux de données est l'objectif principal de cette génération développé en 2010 fournissent des services de messagerie multimédia (MMS), diffusion vidéo numérique (DVB) et plus de clarification pour regarder la télévision à long terme.

Evolution (LTE) est le principal système 4G, il fournit des services de haute qualité (QoS), et une meilleure sécurité des données que les générations précédentes.

En observant la figure I.1, nous voyons un écart de 10 ans entre les principales générations des technologies de communication sans fil

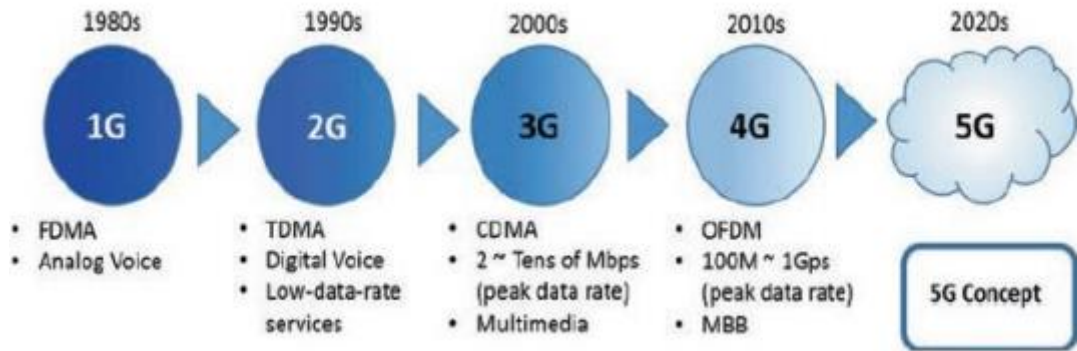


Figure I.1: Vue schématique de l'histoire des communications cellulaires

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

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

Génération	1G	2G	3G	4G	5G
1 ^{ère} année de déploiement	1981	1992	2001	2010	2020
Débit de données	2Kb/s	64Kb/s	2Mb/s	100Mb/s	10Gb/s
Fréquences	900MHz	900MHz et 1.8GHz	800/900MHz 1.7à 1.9GHz 2100MHz	800MHz 900MHz 1800MHz 2100MHz 2600MHz	28GHZ 37GHz 39GHz 64-71GHz
Description fonctionnel générale	Téléphones cellulaires analogiques	Téléphones Cellulaires Numériques (GSM/CDMA)	Première bande passante mobile utilisant des Protocoles IP (WCDMA 2000)	Le haut Débit Mobile sur un Standard Unifié (LTE)	Internet Tactile-Améliore Le réseau De communication M2M

I.3. La 5ème Génération

La définition la plus simple de la 5G c'est qu'elle est la génération d'actualité dans la technologie mobile [2]. Elle vise à être un système puissant et fiable en améliorant l'efficacité spectrale du réseau, fournir un débit de données très élevées et assurer la vitesse de l'accès rapide depuis un réseaux sans fil.

I.4. Objectifs de la 5G

La 5G devrait avoir un impact important sur la société (personnes et objets). Le besoin de plus de données sur le réseau sans fil, la demande d'un service de meilleure qualité sont parmi les facteurs qui ont conduit à l'émergence du réseau 5G. L'un des plus grands avantages de la 5G est sa capacité à créer un réseau mondial [2].

La révolution de la 5G vise comme objectif :

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

I.5 Architecture du réseau 5G et ses services

Un réseau 5G est composé d'un réseau d'accès 5G (AN) et d'un réseau central 5G (5GC) [3] (**fig.I.2**). Le réseau d'accès lui-même est constitué d'un réseau d'accès radio de nouvelle génération (NG-RAN : New Génération Radio Acces Network) [4], qui utilise la nouvelle interface radio 5G (NR) [5] et/ou un réseau AN non 3GPP (p. ex., WiFi, xDSL, etc.) connecté à un réseau de base 5G. Les différentes entités réseau sont connectées par un réseau de transport TCP/IP sous-jacent, qui prend en charge la QoSdiff-serv.

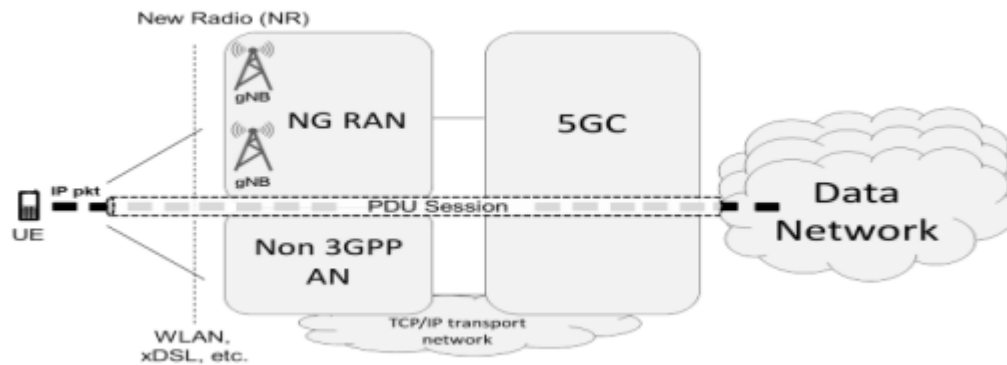


Figure I. 2: L'architecture de réseau 5G.

Comme les générations précédentes, un réseau 5G connecte l'équipement utilisateur (UE) aux réseaux de données externes. Le service de connectivité 5G s'appelle PDU Session. D'un point de vue transport, une session PDU est faite par une séquence de tunnels NG dans 5GC, et d'un ou plusieurs supports radio sur l'interface radio. Cet ensemble de "tuyaux" connecte finalement l'UE à ses fonctions de contrôle et au réseau de données externe pour l'échange de trafic utilisateur. Une tâche majeure du réseau mobile est d'établir et de libérer les tunnels et les porteurs dynamiquement, afin de suivre les mouvements et les états des utilisateurs (inactifs, connectés, etc.).

Une session PDU est très similaire à un porteur EPS dans LTE, sauf pour le modèle QoS et les unités de données utilisateur prises en charge. En effet, une session PDU peut transporter non seulement des paquets IP du plan utilisateur, mais aussi des trames Ethernet ou non structurées, permettant ainsi une communication de couche 2 entre les groupes d'UE. Le modèle QoS 5G est basé sur le nouveau concept de flux QoS [3], où un flux est la granularité la plus fine de la différenciation QoS. Différents flux QoS peuvent appartenir à une seule session PDU1.

Fig. I.3 montre les splits entre les fonctions 5G exécutées dans le NG-RAN et dans le noyau 5G. En termes généraux, le NG-RAN s'occupe d'établir, de maintenir et de diffuser les parties des sessions PDU qui traversent l'interface radio.

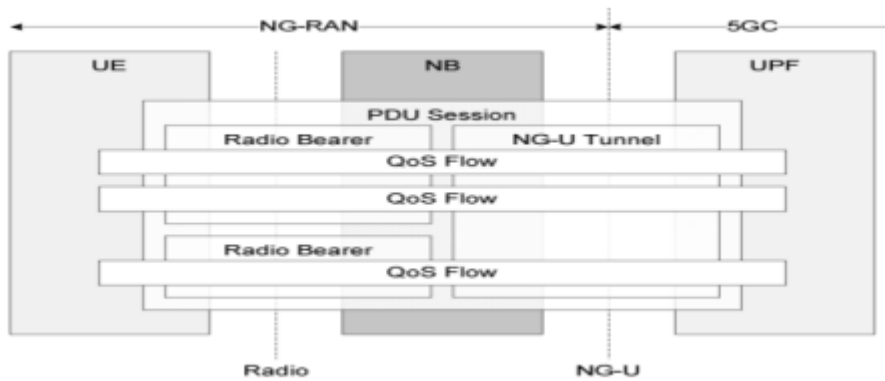


Figure I. 3: l'architecture de réseau 5G.

I.6 Fréquences utilisées pour la 5G

La 5G est la première génération à pouvoir opérer sur trois spectres radio différents : bande basse, moyenne ou haute.

- La 5G à basse bande fonctionne sur les fréquences sous 2GHz. Il s'agit des fréquences cellulaires les plus anciennes. Elle couvre une large distance, mais il n'y a pas de larges canaux disponibles et la plupart sont utilisés par la 4G. La 5G basse bande est donc relativement lente, et ressemble à la 4G. [6]
- La 5G à bande moyenne utilise les fréquences de 2 à 10GHz. Ceci couvre la plupart des fréquences WiFi et cellulaires actuelles. [6]
- La 5G à bande haute, il est possible d'utiliser jusqu'à huit canaux 100MHz. Les ondes millimétrées sont la véritable nouveauté. Il s'agit d'ondes comprises entre 20 et 100GHz. Ces ondes n'avaient presque jamais été utilisées auparavant pour des applications grand public. [6]

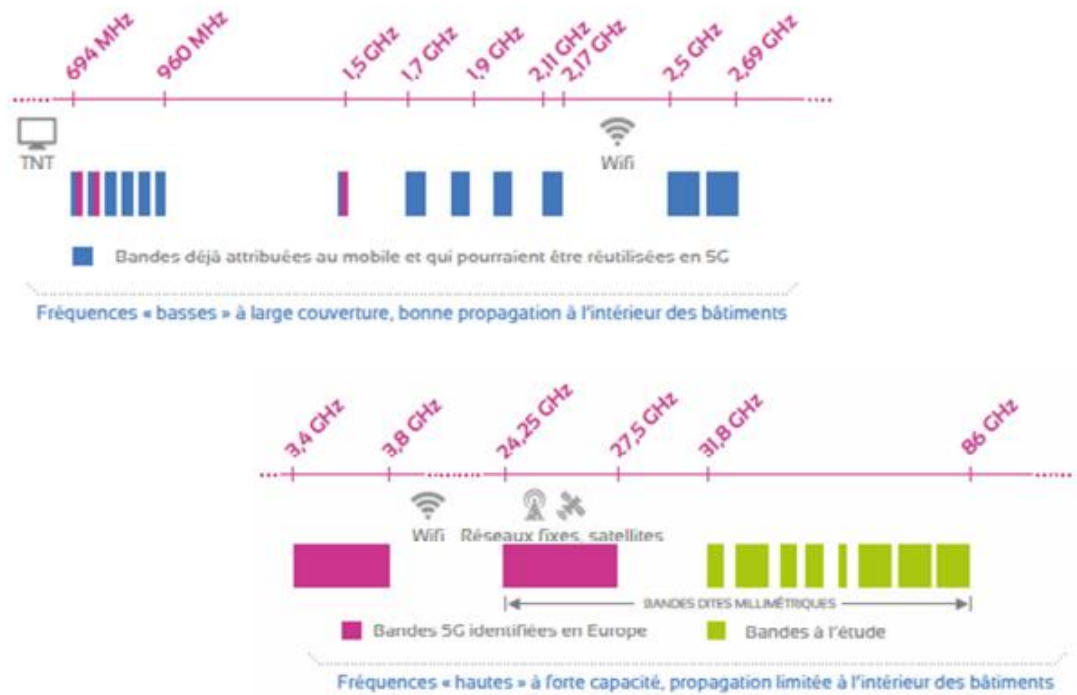


Figure I. 4: Spectre des fréquences 5G [9]

Les réseaux de téléphonie mobile recherchent donc un équilibre entre bandes basses pour bien couvrir l'ensemble des populations ; et bandes hautes pour assurer une bonne capacité dans les zones où les demandes de trafic sont les plus importantes. [7]

I.7 Technologies utilisées pour la 5G

En plus des technologies déjà utilisées dans la 4G (bandes de fréquence) de nouvelles favoris ont vu le jour tel que MIMO massive, Small cellules, duplexageect ; qu'on va décrire brièvement :



Figure I. 5: les Technologies utilisées pour la 5G

I.7.1 Beamforming (filtrage spatial)

C'est l'adaptation du diagramme de rayonnement du réseau d'antenne. Il permet de diriger le signal pour créer une connexion direct entre l'appareil et l'antenne émettrice. Donc on va obtenir un réseau plus rapide plus direct plus fiable se focalise sur un objet spécifique [8].

I.7.2 Massive MIMO (Multiple-Input Multiple-Output)

C'est l'utilisation des antennes multiples à échelle massive [9]. Cette technique consiste à augmenter la capacité du canal et à fournir des gains élevés de multiplexage et de diversité dans les directions de liaison montante et de liaison descendante. Ces performances vont dépendre du nombre d'antennes dans la station de base par rapport aux nombres d'utilisateurs.

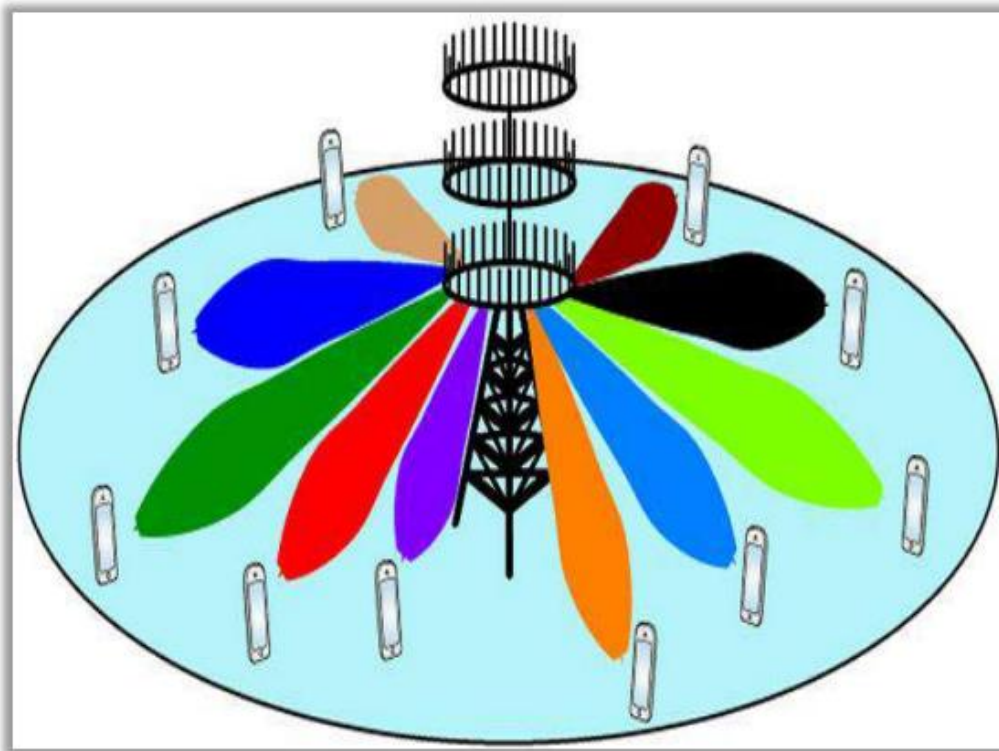


Figure I. 6: MIMO Massive

I.7.3 Full duplex:

Le Full duplex [10] permet la réception et l'émission de données simultanément. Cette technologie pourrait doubler la capacité des réseaux sans fil à leur couche physique la plus fondamentale.

I.7.4 Ondes millimétrique

Pour comprendre la signification du mot ondes millimétriques il faut revenir à la définition d'une onde électromagnétique. Si on parle souvent de la fréquence (en hertz) il ne faut pas oublier que les ondes sont avant tout définies par leur longueur qui représente la distance parcourue par l'onde pendant une période d'oscillation lorsqu'elle se propage dans un espace donné. Plus la longueur d'onde est grande, plus la fréquence est basse, donc les ondes millimétriques sont tout simplement des ondes ayant une longueur d'onde λ de l'ordre du millimètre. Elle est plus petite que les longueurs d'onde en mètres ou kilomètres utilisés pour les ondes radio.

La bande d'onde millimétrique est définie comme la partie du spectre électromagnétique s'étendant de 30 - 300 GHz avec la gamme de longueurs d'onde correspondante de 10 - 1 mm. Historiquement, les fréquences d'onde mm ont été principalement utilisées pour des applications de défense et de radioastronomie principalement en raison du coût élevé et de la disponibilité limitée des dispositifs électroniques à ces fréquences.

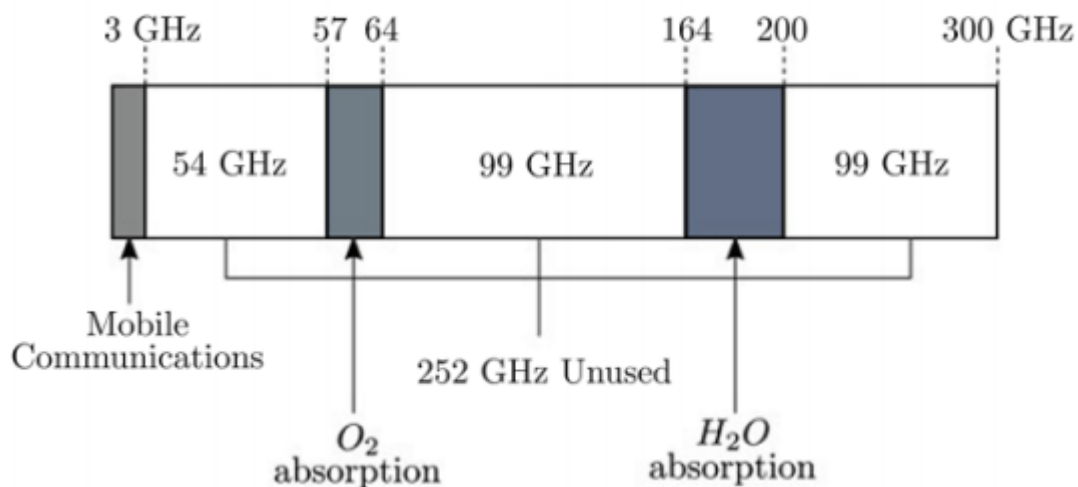


Figure I. 7: Plage de fonctionnement typique des communications mobiles existantes, par rapport au spectre des ondes millimétriques

Les ondes millimétriques [11] sont les ondes radioélectriques couvrant les fréquences de 30 à 300 GHz. Les bandes de fréquences mmWave offrent un énorme spectre qui peut répondre à l'augmentation du trafic mondial [12]. La 5G n'utilise qu'une petite partie de cette large gamme de fréquences

Le spectre des ondes millimétriques offre les avantages suivants [13] :

- ✚ Grandes assignations de fréquences. Typiquement plusieurs GHz dans beaucoup de régions du Monde.
- ✚ Plus grande puissance disponible. Contrairement aux strictes restrictions de puissance de transmission de l'UWB (Ultra Wide Band, Ultra-Large Bande), le mmWave permet une PIRE (puissance isotrope du rayonnement efficace) significative.
- ✚ Spectre propre donc très peu d'interférences.
- ✚ Les petites longueurs d'onde permettent la conception de petites antennes à gros gain, qui permettent d'obtenir des valeurs élevées de PIRE avec l'utilisation d'amplificateurs RF à faible consommation de puissance

I.7.5 Small cellules

Les Small cellules jouent un rôle central dans la 5G en tant que puissante réponse à la densification du réseau et au besoin d'augmentation massive de l'efficacité spectrale ou du débit binaire par unité de surface.

C'est un dispositif qui offre l'augmentation de l'efficacité spectrale de la zone d'une part et d'autre part la réduction de la taille de la cellule où le nombre réduit d'utilisateur par cellule par conséquence du rétrécissement des cellules fournit plus de spectre à chaque utilisateur. En effet, la capacité totale du réseau augmente considérablement en réduisant les cellules et en réutilisant le spectre [14].

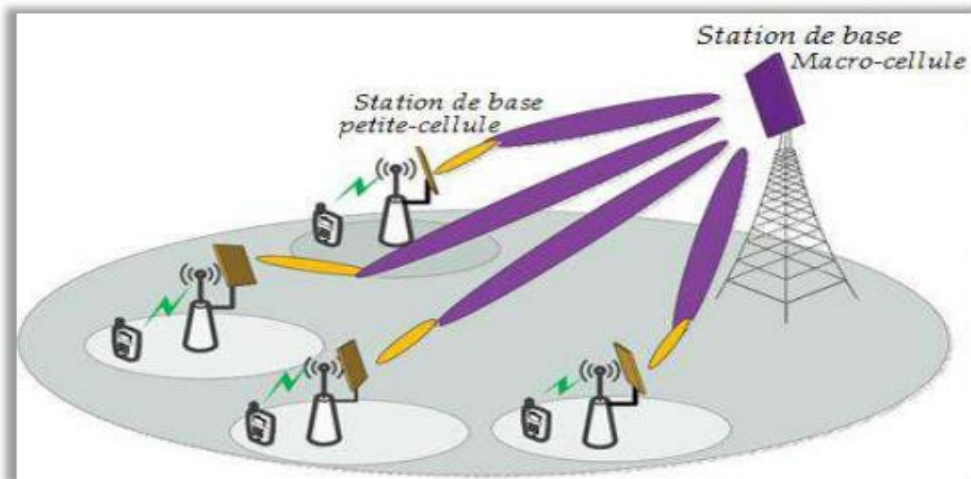


Figure I. 8: Petites cellules.

I.8 Conclusion

La technologie 5G est une révolution actuelle qui promet un développement de nouveaux services et l'amélioration de systèmes existants. Il s'agit d'un ensemble de protocoles et méthodes de transmission de l'information. Ce premier chapitre a présenté les informations les plus importantes de la technologie 5G.

Chapitre II

Les Antennes Imprimées

II.1. Introduction

Ce chapitre vise à présenter des généralités sur les antennes imprimées. Dans un premier temps, on présente la définition, les caractéristiques fondamentales ainsi que les avantages et inconvénients d'une antenne imprimée. On présente dans un second temps les techniques d'alimentations les plus utilisées de ce type d'antenne. Et on termine par présenter les différentes techniques d'adaptation.

II.2 Définition d'une antenne

Une antenne est un transducteur qui convertit l'onde radiofréquence qui propage dans l'espace libre en courant électrique et vice-versa. Une antenne de réception convertit un rayonnement électromagnétique en courant électrique. La même antenne peut servir en émission qu'en réception : réciprocité des antennes [15].

II.3 Différent types d'antennes

Généralement, il existe une grande variété de techniques pour la réalisation des antennes, chacune d'elles possède ses propres caractéristiques et sert à une application bien déterminée.

Il existe plusieurs types d'antennes selon la géométrie, le gain, la forme du faisceau et la bande passante. On peut citer quelques-unes [16]:

Antennes dipolaire, Antenne à boucle magnétique, Antenne cornet, Antenne à réflecteur parabolique, Antenne microruban (imprimée).

II.4 Paramètres et caractéristiques d'antenne

Dans les communications sans fil, chaque application met en relief certaines caractéristiques des antennes. Les paramètres d'antenne permettent de comprendre et de caractériser les performances de l'antenne lors de la conception et de la mesure d'antennes.

II.4.1 Diagramme de rayonnement

Le diagramme de rayonnement de l'antenne peut être défini comme une représentation graphique des propriétés rayonnées (puissance/champ) en fonction de l'espace angulaire [17].

Il est donné par la relation suivante :

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

Avec :

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

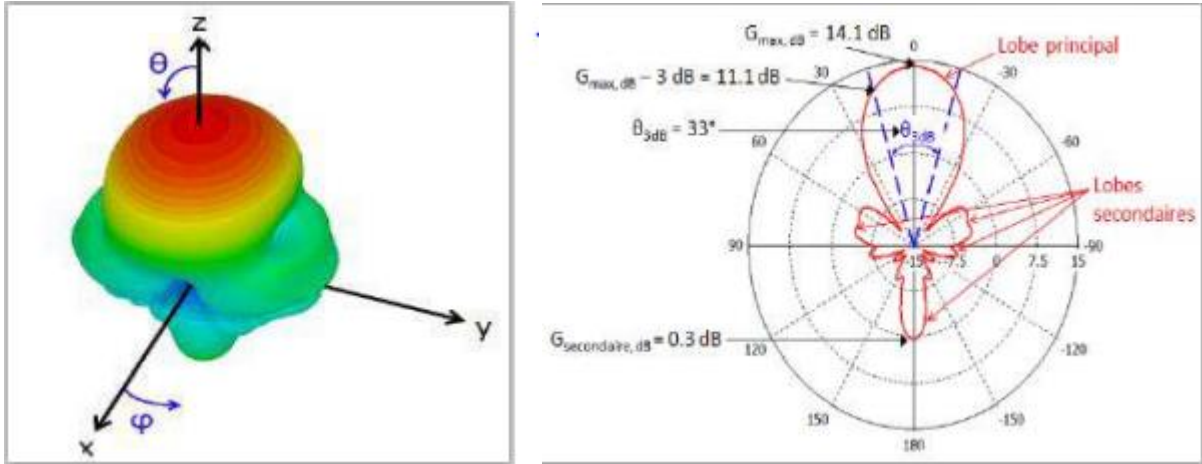


Figure II 1: Exemple d'un diagramme de rayonnement en 3D, et diagramme dans le plan YoZ (gain en dB).

II.4.2 Directivité

La directivité d'une antenne caractérise la manière dont cette antenne concentre son rayonnement dans certaines directions de l'espace. La directivité est définie comme : le rapport de l'intensité de rayonnement dans une direction de l'antenne par rapport à l'intensité de puissance que rayonnerait la source isotrope. Elle est donnée par la relation suivante [18] :

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

Avec :

- $P(\theta, \varphi)$: La Puissance rayonnée par unité d'angle solide (θ, φ) .
- Pr : est la puissance totale rayonnée.

II.4.3 Gain

Le gain est une quantité descriptive de la performance d'une antenne. Le gain d'une antenne isotrope est pris comme une référence unité (0 dB). Le gain d'une antenne dans une direction donnée est le rapport de l'intensité de rayonnement et de celle d'une antenne isotrope [19].

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

Avec :

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

II.4.4 Le coefficient de réflexion S_{11}

D'une manière générale, lorsqu'une onde incidente change de milieu de propagation ou rencontre une nouvelle interface, une partie de cette onde incidente est réfléchiée et l'autre partie est transmise dans le nouveau milieu. Le coefficient de réflexion d'une antenne se définit comme étant le rapport des amplitudes des ondes incidentes sur les ondes réfléchiées.[20]

Pour une antenne d'impédance Z , reliée à la source par une ligne d'impédance caractéristique Z_s (souvent égale à 50Ω), le coefficient de réflexion peut être défini comme suite :

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

Avec :

- Z : est l'impédance d'entrée de l'antenne.
- Z_0 : est l'impédance caractéristique (Généralement égale à 50Ω)

Le module du coefficient de réflexion est souvent exprimé en décibel (dB) et est noté $|S_{11}|$ et se définit comme suit :

$$|S_{11}|_{dB} = 20 \log |S_{11}| \quad (\text{II.5})$$

Le coefficient de réflexion permet de connaître la qualité d'adaptation d'une antenne. En effet, plus son module tend vers l'infini, plus l'antenne est adaptée. Souvent, la fréquence de résonance d'une antenne est celle où le coefficient de réflexion est minimal.

II.4.5 L'impédance d'entrée

L'impédance d'entrée est égale au rapport de la tension V_e sur le courant I_e présenté à l'entrée (figure II.2) [21] :

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

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.

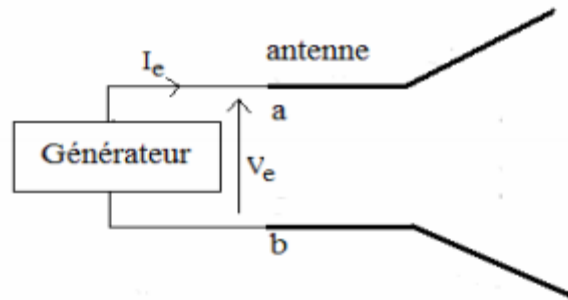


Figure II 2: Antenne en mode émetteur

II.4.6 Rapport d'onde stationnaire (ROS)

Les lignes de transmission permettent aux ondes électromagnétiques de se propager dans les deux directions. Quand la source, la ligne de transmission et la charge ont toutes la même impédance, l'onde électromagnétique se propage de la source à la charge sans aucune perte du signal. Par contre, 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 réfléchiée et lorsqu'elle atteint la charge et sera renvoyée vers la source. Dans ce cas, les ondes incidents et réfléchiées se superposent et engendrent une onde stationnaire [22].

Si on peut caractériser par (+V) l'onde propageant vers l'avant et par (-V) l'onde en retour, alors le taux ou le rapport d'onde stationnaire sera défini par :

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

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

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

II.4.7 Fréquence de résonance et bande passante

La bande passante d'une antenne peut être définie comme étant la gamme des fréquences utile, en laquelle l'antenne possède des capacités optimales pour émettre ou recevoir l'énergie électromagnétique correspondante dans l'espace environnement. La valeur des limites sur les critères de fonctionnement de l'antenne définit un domaine de fréquences situées entre une valeur minimale f_{\min} et une valeur maximale f_{\max} .

La bande passante est donnée par II.9, ainsi la bande relative peut être exprimée comme donnée par l'équation II.10 [23] :

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

$$BP(\%) = \left[\frac{f_{\max} - f_{\min}}{f_c} \right] * 100 \quad (\text{II.10})$$

Avec :

- f_c : est la fréquence centrale ou de résonance.

Une méthode pour mesurer la bande passante d'une antenne est représentée sur la Figure II.3.

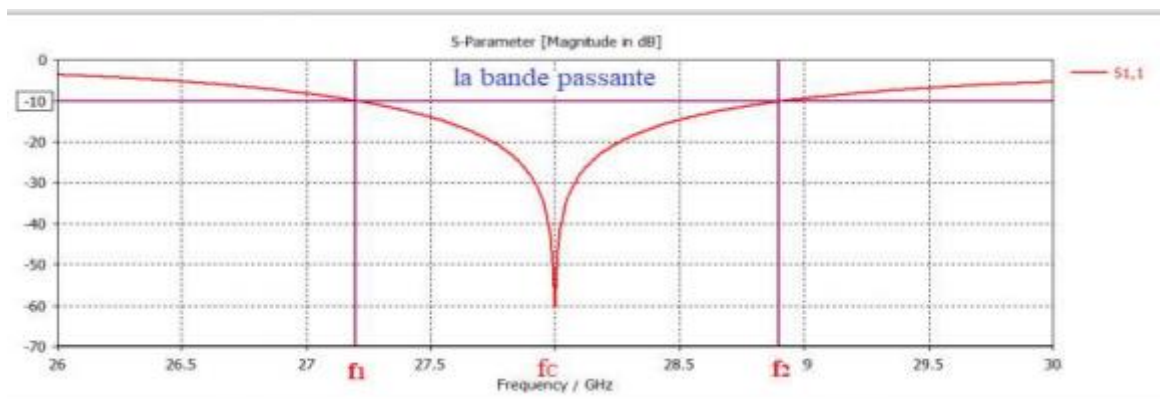


Figure II 3: Illustration de la bande passante à -10 dB d'une antenne

II.5 Antenne microruban (imprimée)

L'antenne microruban, appelée aussi antenne imprimée est constituée d'un diélectrique, possédant un plan de masse métallique sur une face. Sur l'autre face de ce diélectrique, un patch métallique permet de supporter des courants de surface qui créent le rayonnement électromagnétique (figure II.4). [24]

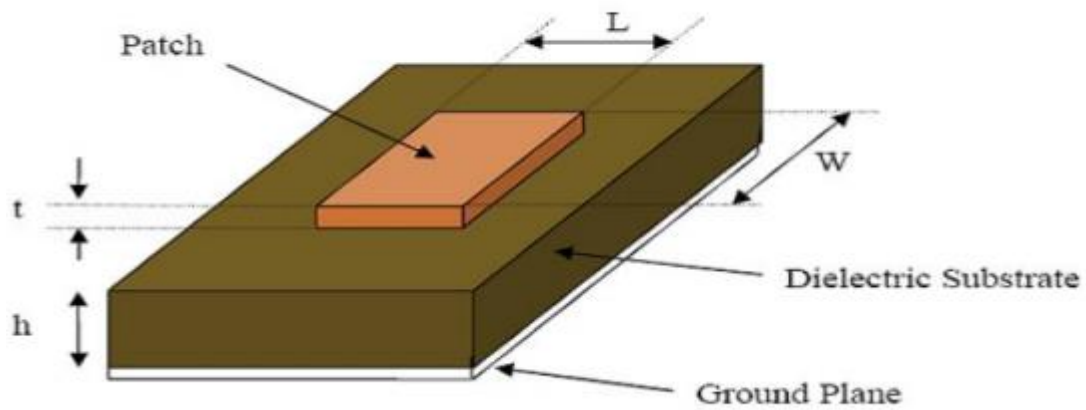


Figure II 4: Structure d'une antenne microruban

L'antenne patch prend différentes formes et s'intègre dans plusieurs applications selon sa fréquence de résonance.

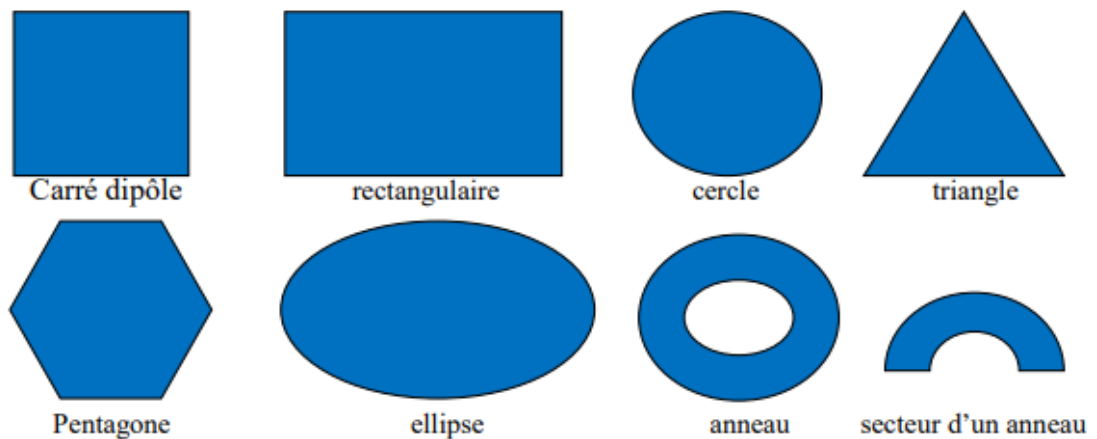


Figure II 5: Différentes formes d'une antenne patch.

II.6 Avantages et inconvénients de l'antenne patch

Il existe de nombreux avantages et limites pour les antennes imprimées lorsqu'on les compare à d'autres types d'antennes :

✚ **Avantage :**

- Poids léger, petite taille et a une forme mince.
- Facile et peu coûteux à fabriquer.
- Ses méthodes d'alimentation sont faciles.

- Il peut être utilisé en forme de réseau facilement lors de la combinaison avec le déphaseur, nous avons des antennes intelligentes.
- Il supporte la polarisation linéaire et circulaire.
- Un patch peut supporter des fréquences résonantes doubles et triples.

Inconvénients :

- Bande passante limité
- Faible efficacité et gain.
- Rayonnement étranger provenant des alimentations et des jonctions.
- Faible capacité de gestion de puissance.
- Excitation des ondes de surface.

II.7 Techniques d'alimentation

Les antennes microruban peuvent être alimentées par plusieurs méthodes. Ces méthodes peuvent être classées en deux types : contact et non contact. Dans la méthode de mise en contact, la puissance RF est envoyée directement au patch rayonnant à l'aide d'un élément de connexion tel qu'une ligne microruban. Dans le type sans contact, un couplage de champ électromagnétique est effectué pour transférer la puissance entre la ligne microruban et le patch rayonnant. Les quatre techniques d'alimentation les plus utilisées sont la ligne microruban, la sonde coaxiale (alimentation avec contact), le couplage d'ouverture et le couplage de proximité (alimentation sans contact).

II.7.1 : Alimentation par ligne par microruban

Dans ce cas, une ligne microruban est directement connectée à l'élément rayonnant comme le montre la Figure II.6, le point de jonction peut être sur l'axe de symétrie du patch ou complètement décalé pour permettre une meilleure adaptation d'impédance [25]. Ce type d'alimentation est facile à mettre en œuvre et à modéliser, mais peut engendrer un rayonnement parasite qui peut devenir considérable et une bande passante typiquement entre 2 et 5 % [25].

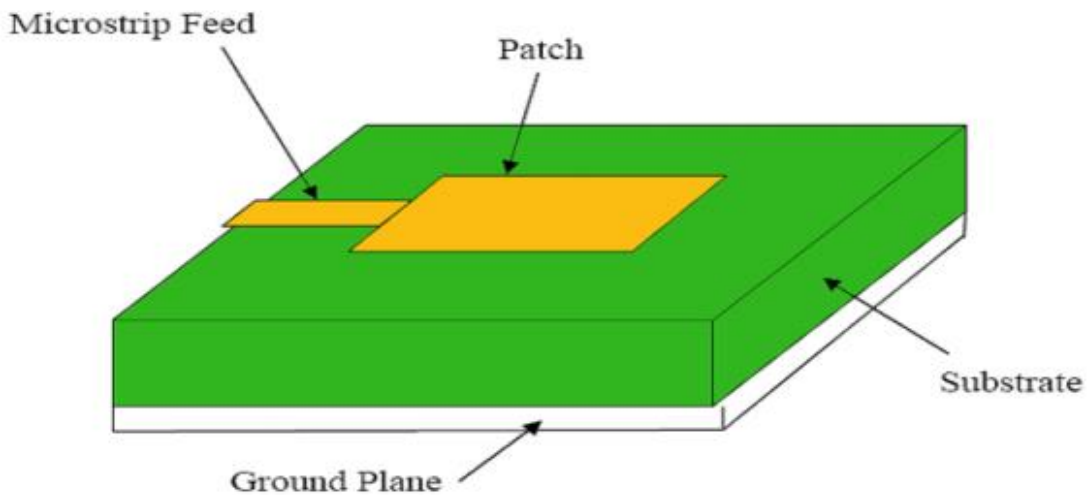


Figure II 6:Alimentation par ligne microruban

II.7.2 Alimentation par sonde coaxiale

L'alimentation par sonde coaxiale est montrée sur la (Figure II.7), dans ce cas, le conducteur central (intérieur) est soudé directement à l'élément rayonnant (patch) après avoir traversé le diélectrique et le plan de masse, le conducteur extérieur est relié directement à ce dernier. L'avantage de cette méthode est qu'elle peut appliquer à n'importe quel endroit du patch avec une facilité de fabrication et moins de rayonnement parasite. [26]

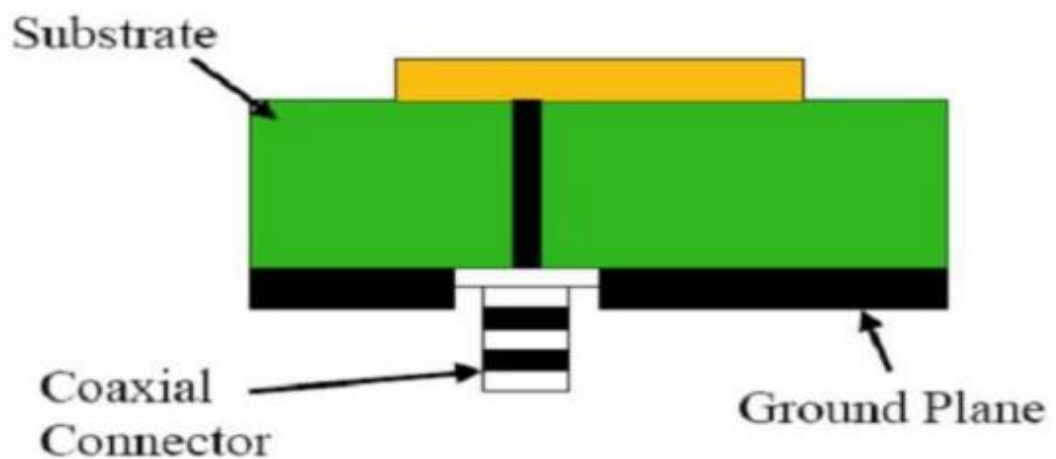


Figure II 7:Alimentation par sonde coaxiale

II.7.3 Alimentation couplée par ouverture

Dans cette technique d'alimentation, le patch de rayonnement et la ligne d'alimentation sont séparés par le plan de masse comme indique sur la Figure (Figure II.8). La jonction entre le patch et la ligne d'alimentation est faite par une ouverture ou une fente dans le plan de masse [27].

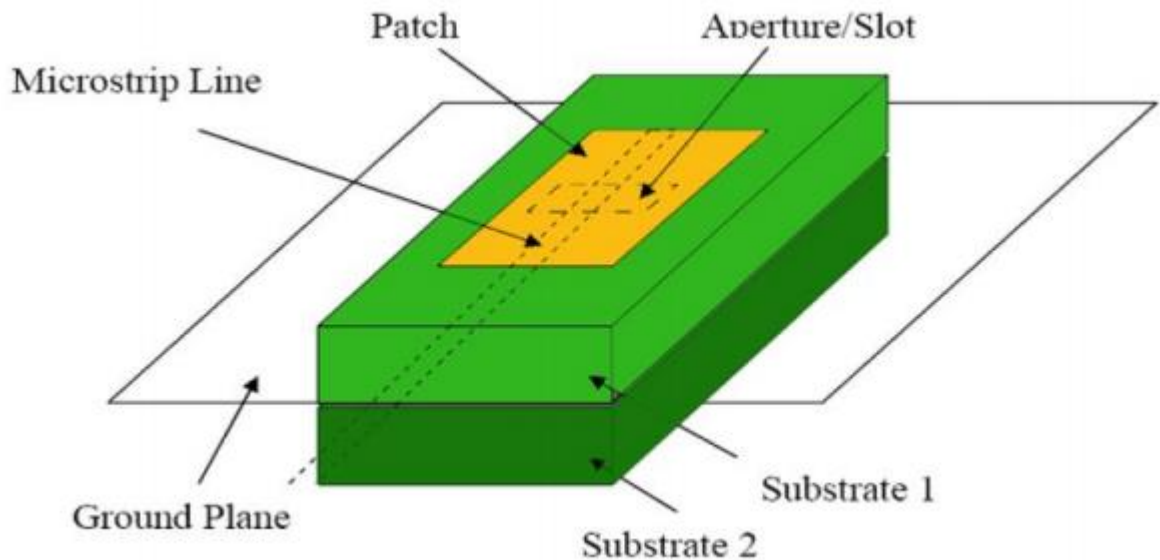


Figure II 8:Alimentation par sonde coaxiale

II.8 Techniques d'adaptation

Dans la construction de circuits hyperfréquences, on recherche souvent l'adaptation, c'est à dire à se ramener à une impédance différente (qui est souvent l'impédance caractéristique) de celle obtenue en fin de circuit [28]. Plusieurs techniques d'adaptation existent, les plus utilisées sont :

II.8.1 Adaptation par ligne quart d'onde

Pour améliorer l'adaptation de l'antenne on utilise un transformateur quart d'onde, il suffit que le transformateur soit placé entre la ligne microruban et l'extrémité du patch comme le montre la Figure III.9.

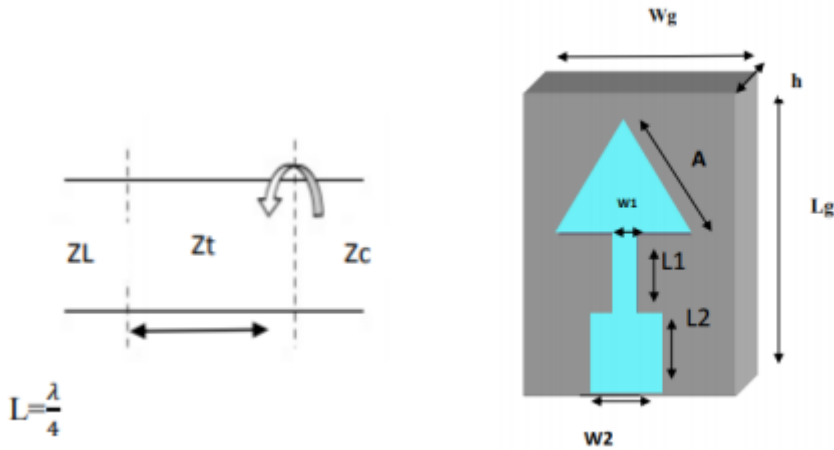


Figure II 9 : a : Modélisation de l'antenne quart d'onde b : adaptation par ligne quart d'onde.

II.8.2 Adaptation par stub

Pour réaliser l'adaptation d'une charge quelconque, on utilise un stub en circuit ouvert (open stub) ou en court-circuit (short stub). Un stub est un tronçon de ligne de longueur L_s que l'on branche en dérivation sur la ligne principale à une distance d de la charge [28].

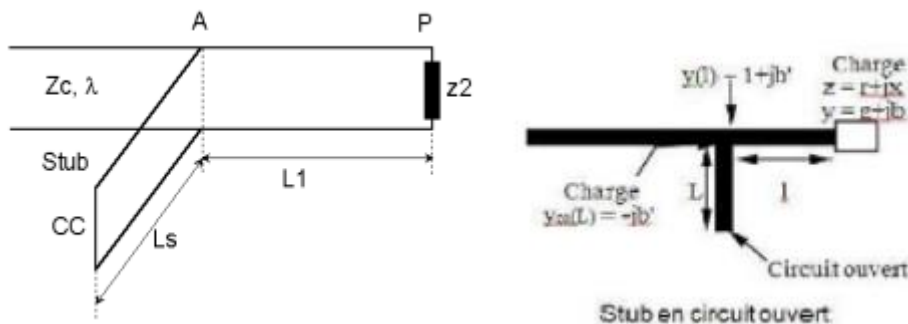


Figure II 10: a) Modélisation de l'antenne à Adaptation simple stub. b) Stub en circuit ouvert

II.8.3 Adaptation avec encoches

Pour améliorer l'adaptation de l'antenne on utilise des encoches dans la géométrie du patch [28].

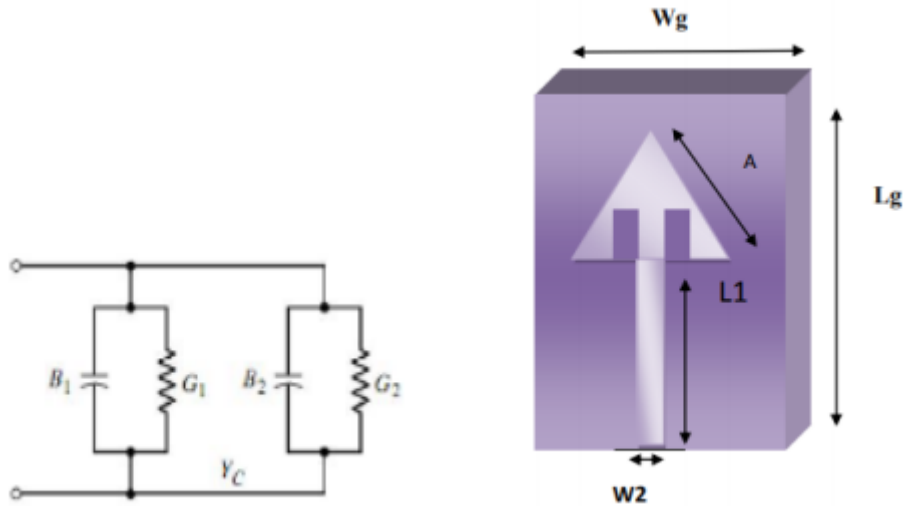


Figure II 11: a : L'équivalence en circuit.

b : Patch adapté par encoches.

II.9 Antennes planaires aux fréquences d'ondes mm

Au cours des dernières années, la demande de données cellulaires à grande vitesse et le besoin de plus de spectre ont motivé l'utilisation de fréquences porteuses d'ondes millimétriques (mm-wave) pour les futurs réseaux cellulaires, où les antennes adaptatives à gain élevé. La bande mm-Wave attire beaucoup l'attention, car une énorme quantité de bande passante est disponible.

Les antennes planaires intégrées ont suscité beaucoup d'intérêt ces dernières années pour les applications à ondes millimétriques en raison de leur faible coût, de leur facilité de fabrication et de leur potentiel d'efficacité élevée. La petite longueur d'onde aux fréquences d'ondes mm est un avantage pour la conception de petites antennes efficaces. La taille de l'antenne est déterminée par les lois de la physique ; et pour un rayonnement efficace, la taille de l'antenne doit être de l'ordre de la moitié de longueur d'onde ou plus. Par conséquent, pour $f = 30 - 300$ GHz ($\lambda = 10 - 1$ mm), il est possible de construire des antennes physiquement petites et en même temps électriquement assez grandes pour émettre efficacement. Cependant, à des fréquences d'onde mm, les pertes sont généralement plus élevées qu'à des fréquences inférieures; et le concepteur de l'antenne doit soigneusement concevoir l'antenne et choisir le substrat approprié pour minimiser les pertes et atteindre une haute efficacité de rayonnement.

En raison de sa petite longueur d'onde, la taille de l'antenne d'onde mm peut être plus petite que l'onde de fréquence cellulaire conventionnelle. La petite taille d'antenne permet la formation de faisceaux pointus ou la technologie MIMO massive.[29] [30] .

II.10 Conclusion

Ce chapitre a présenté des généralités sur les antennes : définition, les différents types d'antennes, la structure générale d'une antenne microruban, les principaux avantages et inconvénients ainsi que les techniques d'alimentation les plus utilisées dans ce type d'antenne.

Chapitre III

Conception et Simulation
d'antennes pour les
applications 5G

III.1. introduction

Depuis plusieurs années, les domaines de télécommunications et de nouvelles technologies connaissent un véritable essor. La technologie 5G exige des antennes avec des nouvelles fonctionnalités [31]. L'utilisation de la bande millimétrique dans la 5G est une solution appropriée pour répondre aux exigences de cette technologie. Les futures générations d'équipements vont faire appel à des antennes de plus en plus performantes et fonctionnant dans la bande 5G.

Ce chapitre sera consacré à l'étude et à la conception d'antennes fonctionnant dans la bande 5G à l'aide du logiciel CST microwave studio. Nous étudions l'influence de quelques paramètres importants qui affectent les performances d'une antenne afin d'avoir une bonne conception de l'antenne.

III.2 Outil de simulation

Plusieurs techniques existent pour concevoir les antennes. La technique des intégrales finis (FIT) utilisée par le logiciel CST Microwave Studio et la méthode des éléments finis (FEM) utilisée par le logiciel HFSS (High Frequency Structure Simulator) d'ANSOFT sont les méthodes les plus utilisées pour résoudre les équations de Maxwell. Ces deux logiciels sont des simulateurs versatiles, solides et applicables à une grande variété de structures. Malheureusement, ceci souvent nécessite un temps de calcul long et une grande capacité de mémoire.

Dans le simulateur électromagnétique CST, l'utilisateur commence par dessiner la structure de l'antenne, indiquer les caractéristiques des matériaux, exciter la structure avec un port guide d'onde ou avec un port discret et en fin simuler le modèle. Le CST se trouve plus approprié pour simuler sur des gammes de fréquence élevées.

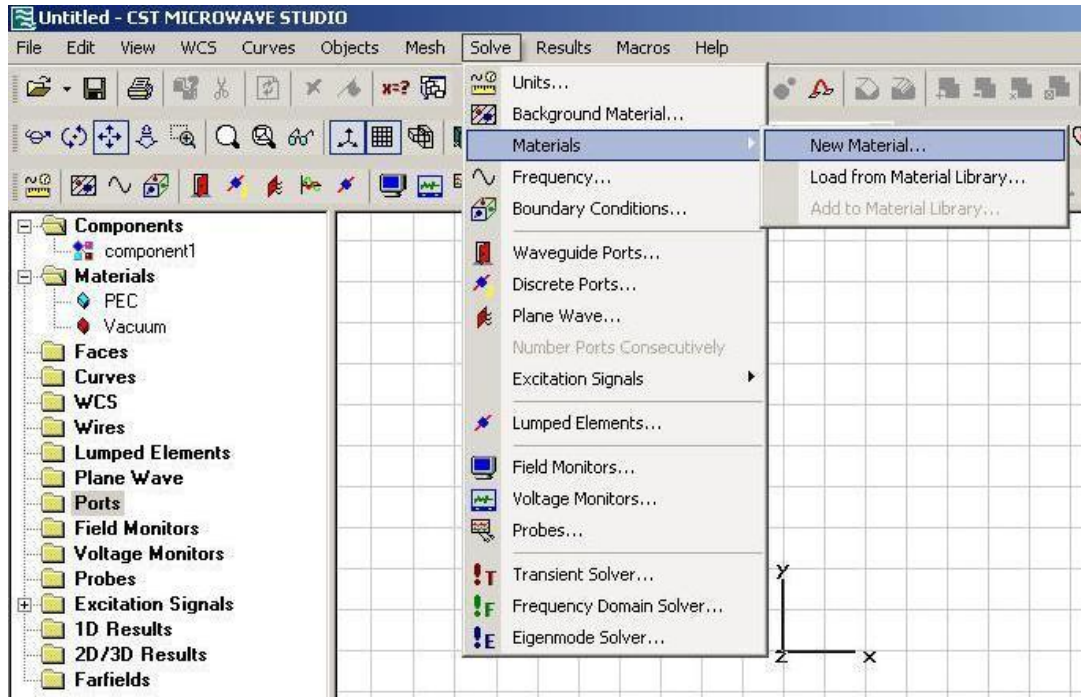


Figure III.1: CST Microwave Studio

III.3. Antenne triangulaire étudiée

En raison de leurs propriétés géométriques et électromagnétiques intéressantes, les antennes imprimées sont utilisées dans plusieurs domaines. Parmi les formes d'antennes imprimées actuellement étudiées pour les applications 5G, on retrouve l'antenne patch triangulaire.

Dans un premier temps, nous avons choisi une antenne patch de forme triangulaire alimentée par ligne microruban. La structure de cette antenne est représentée sur la figure III.2 (a) et (b). L'antenne est constituée d'un patch triangulaire, gravé sur la face supérieure d'un substrat diélectrique de type Rogers RT5880 (Lossy) de permittivité relative 2.2, et d'épaisseur 0.508. Sur la surface inférieure du substrat est imprimé le plan de masse. Le plan de masse et le patch sont conçus avec du cuivre d'épaisseur 0.035. Tous les paramètres géométriques de l'antenne sont donnés dans le tableau III.1.

Tous d'abord à l'aide du logiciel CST, on simule cette antenne conventionnelle, dont la fréquence de résonance est différente de la fréquence désirée de 26 GHz.

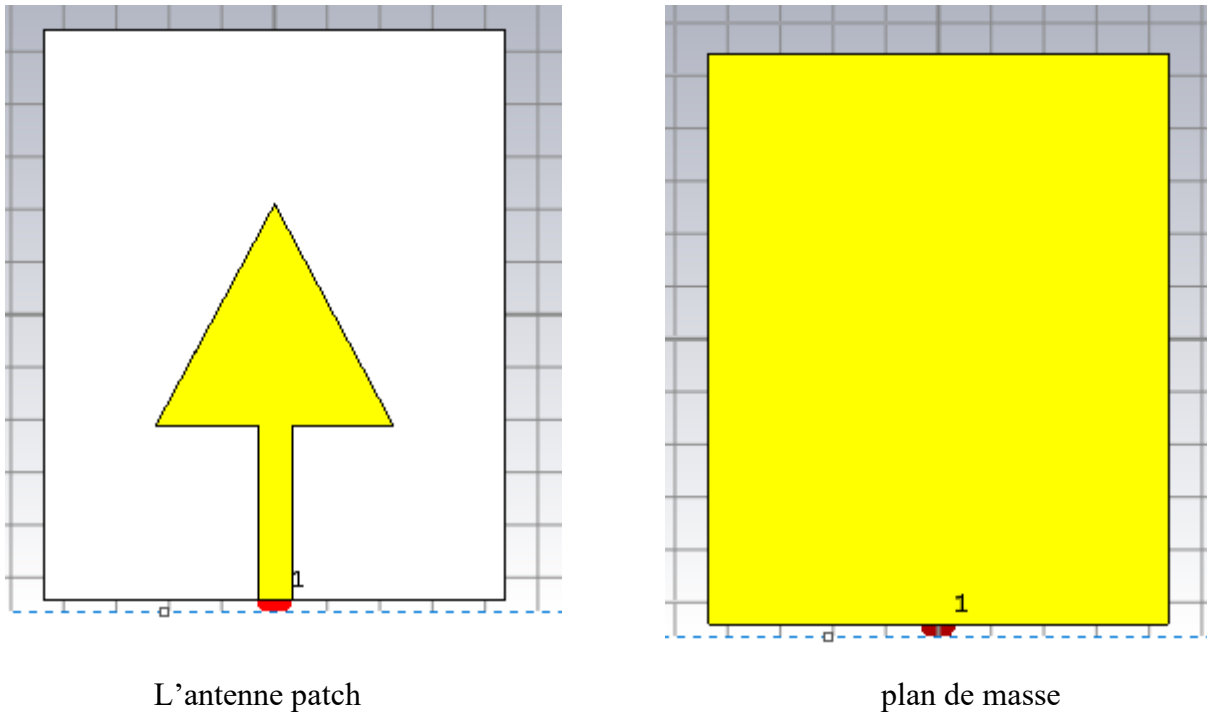


Figure III. 2: Structure de l'antenne étudiée

Paramètres	Variables	Valeurs (mm)
Largeur du substrat	W_s	8.649
Longueur du substrat	L_s	10.877
Epaisseur du substrat	h	0.508
Epaisseur du ground et patch	t	0.035
Longueur du patch	L_p	4.17
Largeur du patch	W_p	4.815
Largeur de la ligne de transmission	W_f	0.6132

Tableau III. 1: Paramètres géométriques de l'antenne étudiée

Le coefficient de réflexion de l'antenne triangulaire étudiée est représenté dans la figure III.3. On constate que le module du coefficient de réflexion de cette antenne est supérieur à -10 dB dans la bande de fréquence étudiée, donc l'antenne présente une mauvaise adaptation à la fréquence de résonance de 26 GHz désirée.

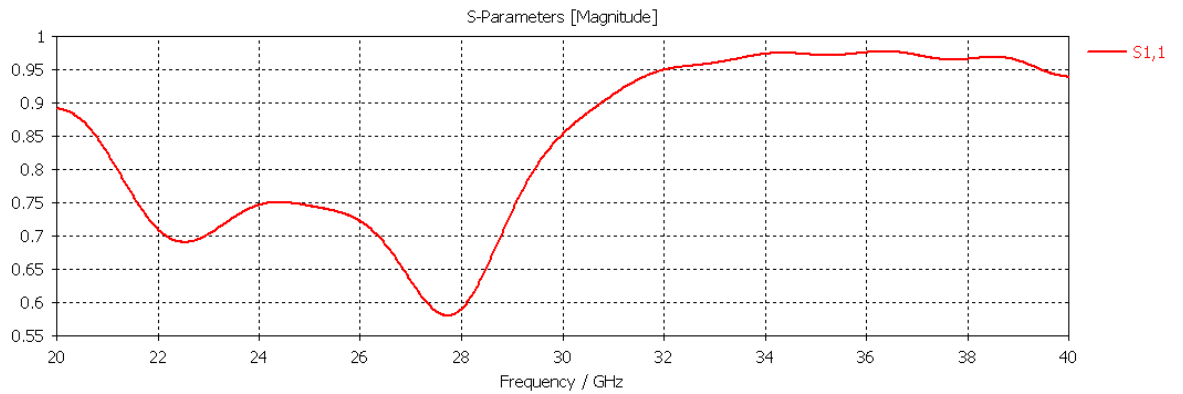


Figure III. 3: Coefficient de réflexion de l'antenne étudiée

Nous introduisons maintenant des encoches dans le patch pour obtenir l'adaptation de l'antenne à la fréquence désirée de 26 GHz.

La **figure III.4** montre la structure de l'antenne après introduction des encoches.

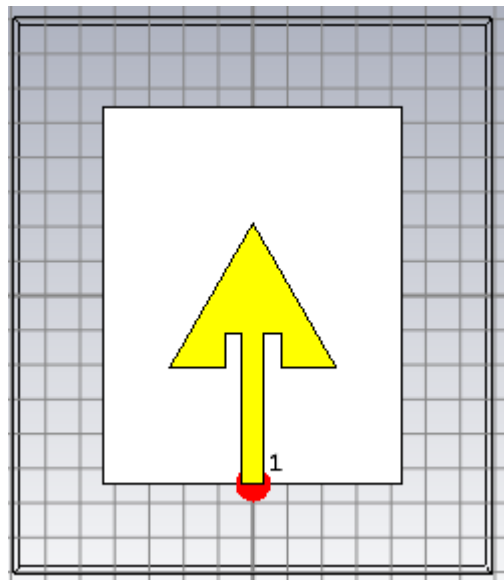


Figure III. 4: Antenne avec encoches

La **figure III.5** représente le coefficient de réflexion de l'antenne triangulaire étudiée après introduction des encoches. Nous remarquons que l'antenne présente toujours une mauvaise adaptation à fréquence de résonances désirée de 26 GHz.

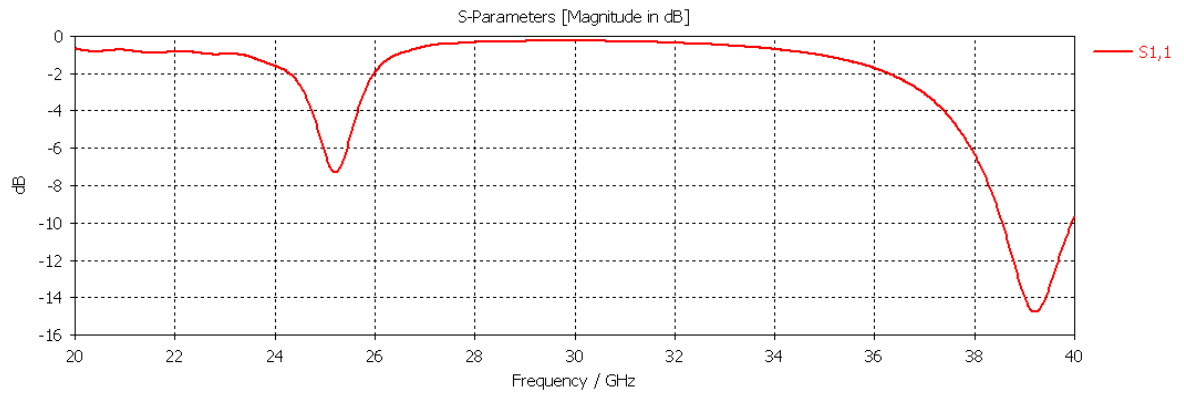


Figure III. 5: Coefficient de réflexion de l'antenne avec encoches

Nous passons maintenant à la conception de notre antenne, en se basant sur l'étude paramétrique sur la longueur et la largeur des encoches, pour obtenir l'adaptation à la fréquence souhaitée de 26 GHz.

III.3.1 :Etude paramétrique sur les encoches

On présente d'abord les résultats de simulation de l'effet de la largeur des encoches. La Figure III.6 montre les résultats de la simulation du coefficient de réflexion de l'antenne en fonction de la fréquence pour différentes valeurs de la largeur des encoches.

On peut constater que les courbes du coefficient de réflexion sont de forme similaire pour ces valeurs de la largeur des encoches, mais l'adaptation de l'antenne varie d'une façon significative avec le changement de la largeur.

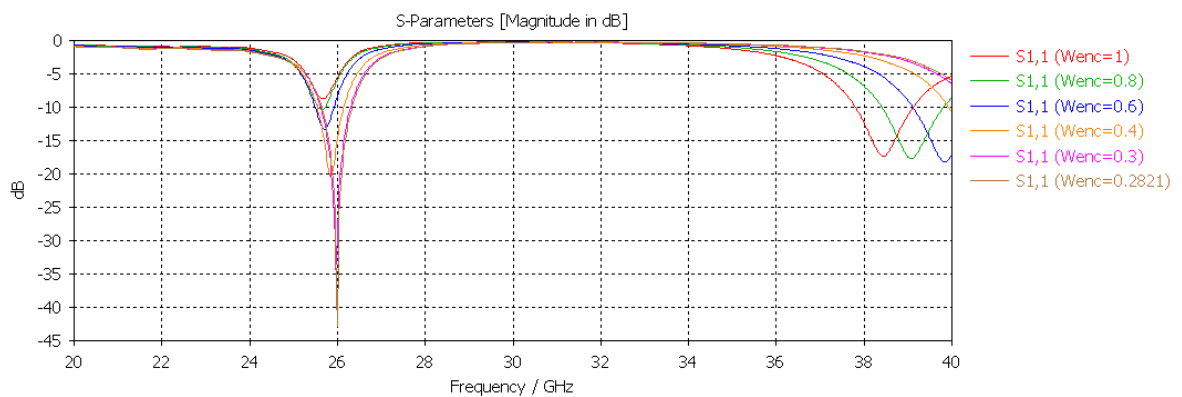


Figure III. 6: Effet de la largeur des encoches sur le coefficient de réflexion

La représentation du coefficient de réflexion en fonction de la fréquence pour les différentes valeurs de la longueur des encoches est présentée dans la **Figure III.7**.

Nous constatons que la longueur des encoches a un grand effet sur l'adaptation de l'impédance de l'antenne. On obtient la meilleure adaptation pour une valeur de la longueur de 0.9 mm.

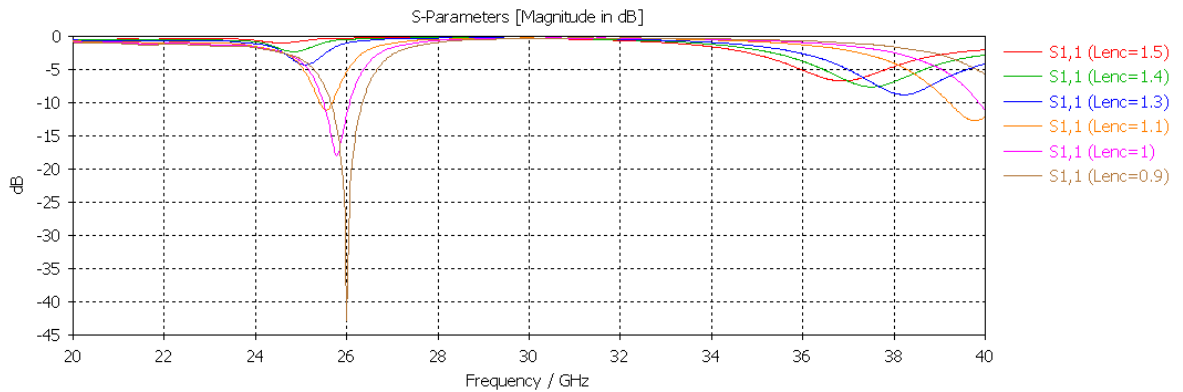


Figure III. 7: Effet de la longueur des encoches sur le coefficient de réflexion

III.3.2: Elargissement de la bande

Pour répondre aux exigences de la technologie 5G en terme de bande passante nous devons apporter des améliorations sur l'adaptation de l'antenne et plus précisément sur sa bande passante. Pour cela nous avons introduit une fente dans le plan de masse (figure III.8).

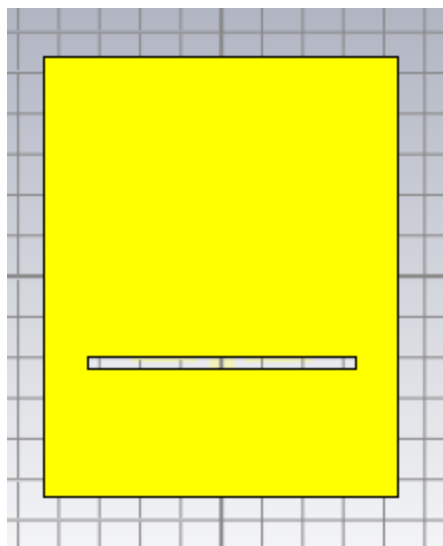


Figure III. 8 : Plan de masse avec fente

Une étude paramétrique a été faite pour voir les effets de la longueur et de la largeur de la fente sur la largeur de la bande passante (**figure III.9** et **III.10**).

Les Figures III.9 et III.10 montrent les résultats de la simulation du coefficient de réflexion de l'antenne en fonction de la fréquence pour différentes valeurs de la largeur n et pour différentes valeurs de la longueur m des encoches respectivement.

On peut constater que la bande passante de l'antenne à -10dB varie d'une façon significative avec le changement de la largeur n et de la longueur m de la fente.

Les valeurs optimales de la largeur et de longueur de la fente sont : $n=0.3$ et $m=6.6$.

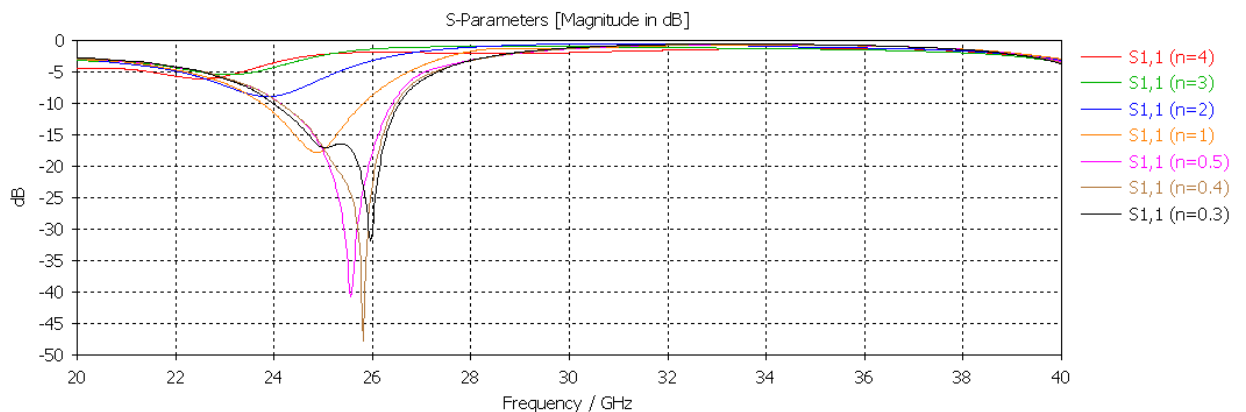


Figure III. 9: Effet de la largeur n de la fente dans le plan de masse sur le coefficient de réflexion

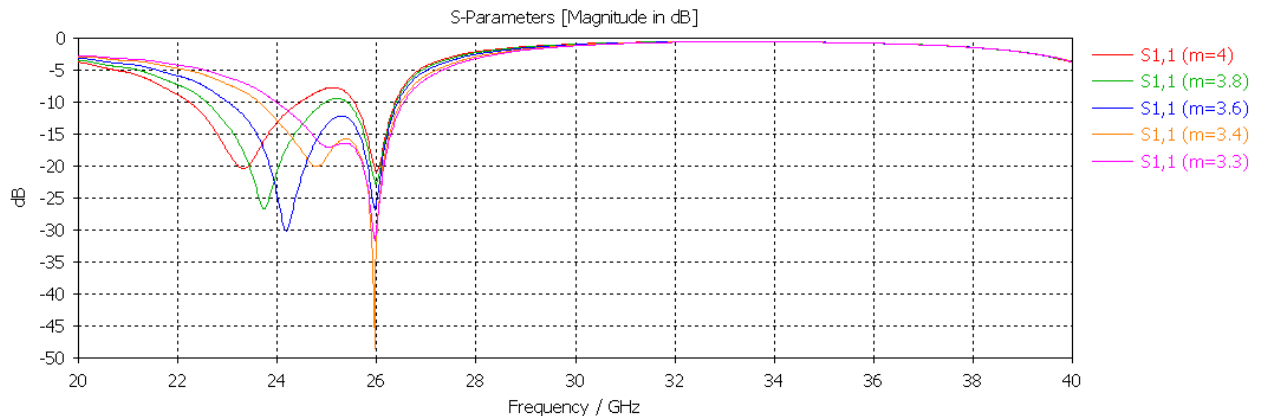


Figure III. 10: Effet de la longueur m de la fente dans le plan de masse sur le coefficient de réflexion

III.4 Performance de l'antenne optimisée

Dans cette partie, nous présentons les résultats de la simulation de l'antenne optimisée pour un fonctionnement dans la bande 5G autour de la fréquence 26 GHz. Les dimensions optimales relatives à l'antenne étudiée sont quant à elles détaillées dans le **tableau III.2**.

Largeur du substrat	W_s	8.649 mm
Longueur du substrat	L_s	10.877 mm
Epaisseur du substrat	h	0.508 mm
Epaisseur de métallisation	t	0.035 mm
Longueur du patch	L_p	4.17 mm
Largeur du patch	W_p	4.815 mm
Largeur de la ligne d'alimentation	W_f	0.6132 mm
Largeur de l'encoche	W_{enc}	0.28 mm
Longueur de l'encoche	L_{enc}	0.89 mm
Largeur de la fente	m	6.6 mm
Longueur de la fente	n	0.3 mm

Tableau III. 2: Paramètres géométriques de l'antenne optimisée

III.4.1 Coefficient de réflexion

La figure III.11 représente le coefficient de réflexion de l'antenne optimisée. La bande passante à -10 dB est de 2.4371 GHz. Cette bande s'étend de 24.213 à 26.65 GHz, et peut répondre à l'exigence des applications 5G.

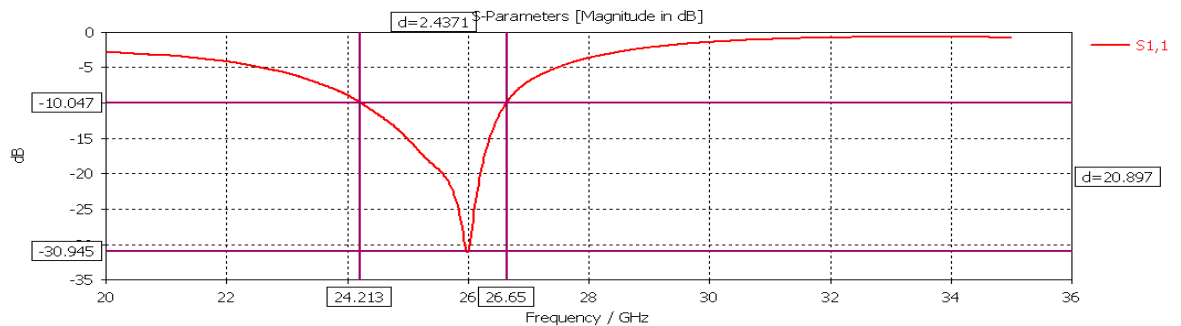


Figure III. 11: Coefficient de réflexion de l'antenne optimisée

III.4.2 Rapport d'onde stationnaire (VSWR)

Le résultat de simulations du taux d'onde stationnaire simulé de l'antenne optimisée, est présenté dans la **figure III.12**. Ce résultat montre que l'antenne optimisée couvre une large bande passante autour de 26 GHz (TOS < 2).

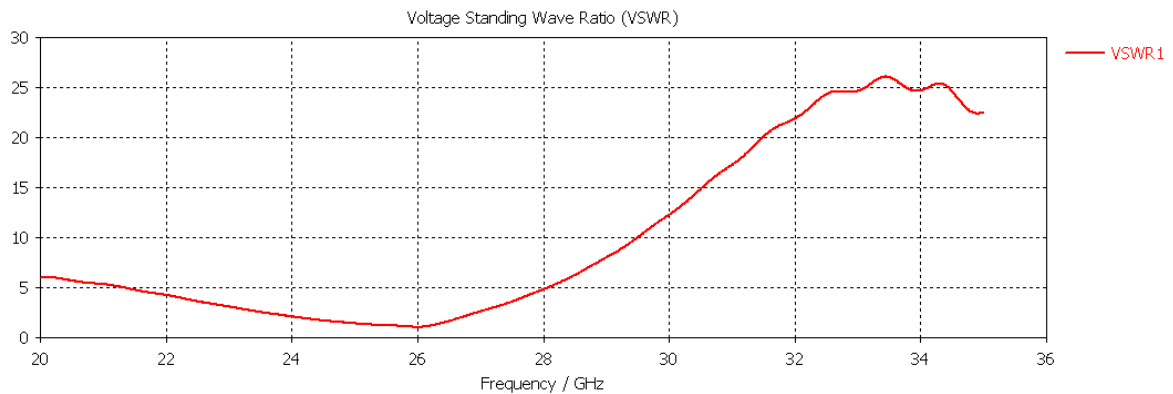
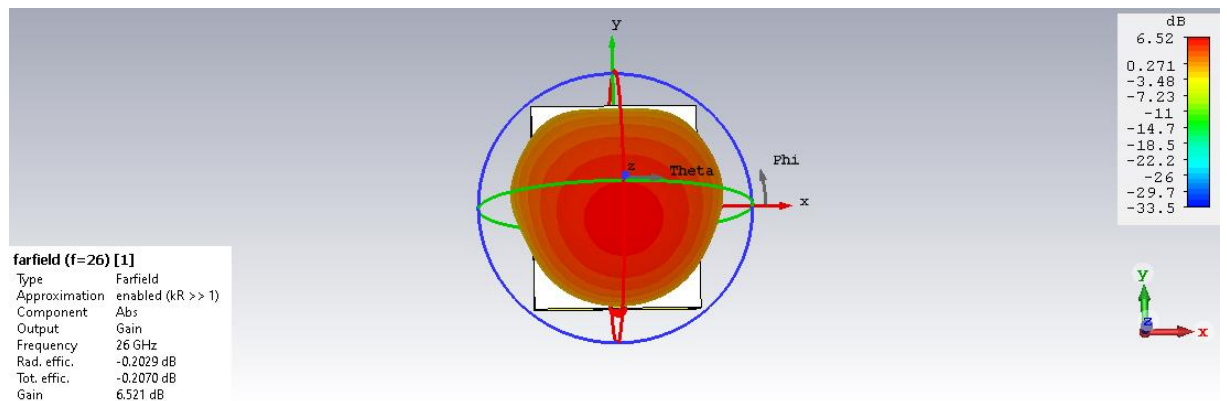


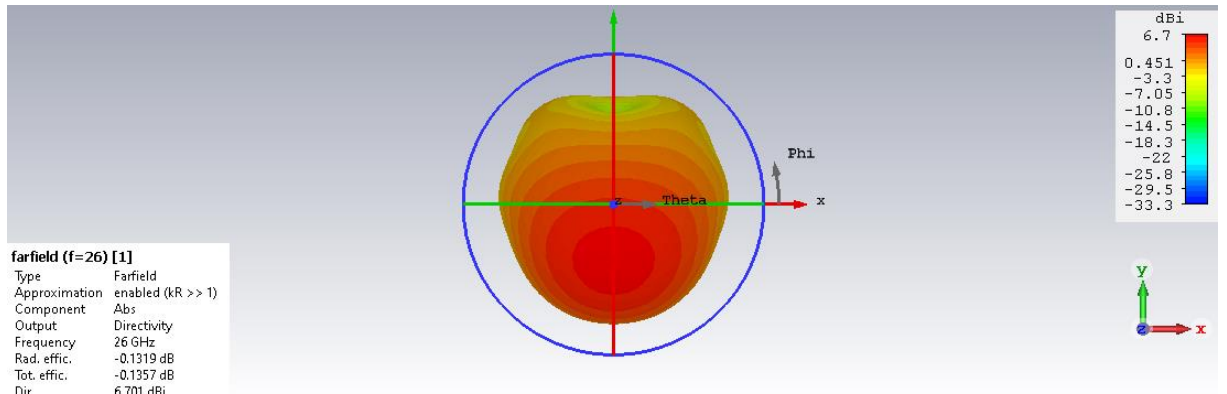
Figure III. 12: Rapport d'onde stationnaire (VSWR).

III.4.3 Diagramme de rayonnement

La **figure (III.13)** montre le diagramme de rayonnement 3D simulé du gain et de la directivité de l'antenne optimisée, à la fréquence de résonance 26 GHz.



a)



b)

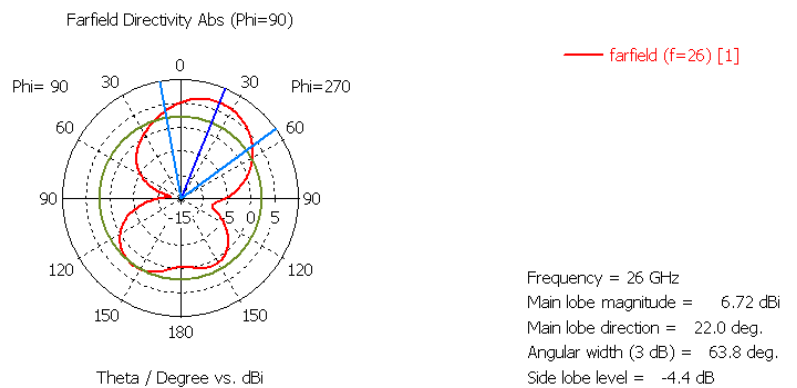
Figure III. 13: Diagramme de rayonnement de l'antenne optimisée

a) Diagramme de rayonnement du gain

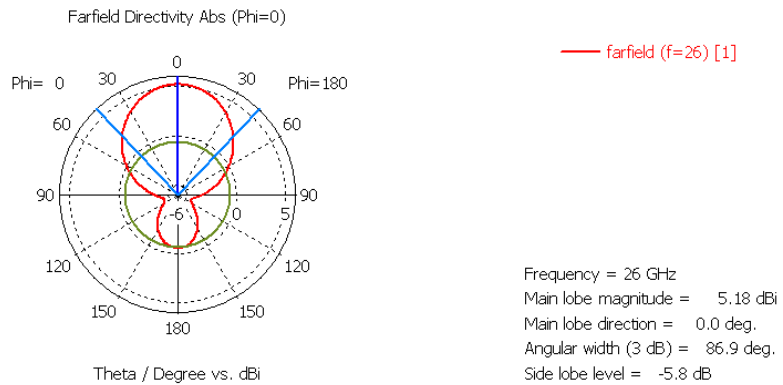
b) Diagramme de rayonnement de la directivité

Le diagramme de rayonnement 2D simulé du gain et de la directivité, à la fréquence de résonance 26 GHz est présenté dans la figure III.14.

La représentation en 2D du diagramme de rayonnement de l'antenne permet de visualiser ses lobes dans les deux plans vertical et horizontal.



a)



b)

Figure III. 14: Diagramme de rayonnement en 2D de l'antenne optimisée a) $\phi=90^\circ$, b) $\phi=0^\circ$

III.4.4 Gain

La figure (III.15) montre le gain obtenu avec l'antenne optimisée. Cette antenne a un gain positif croissant sur toute la bande de fonctionnement de 20 à 26 GHz. Le gain est égal à 6.51 dB pour une fréquence de 26 GHz.

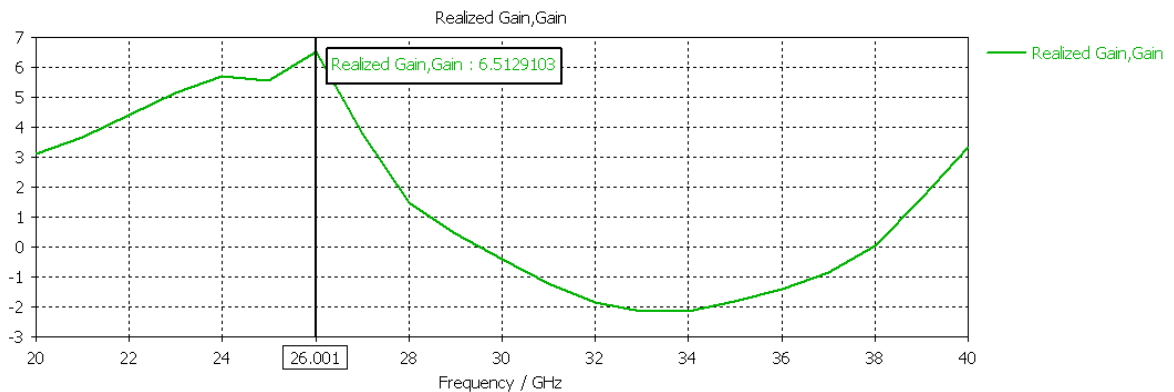


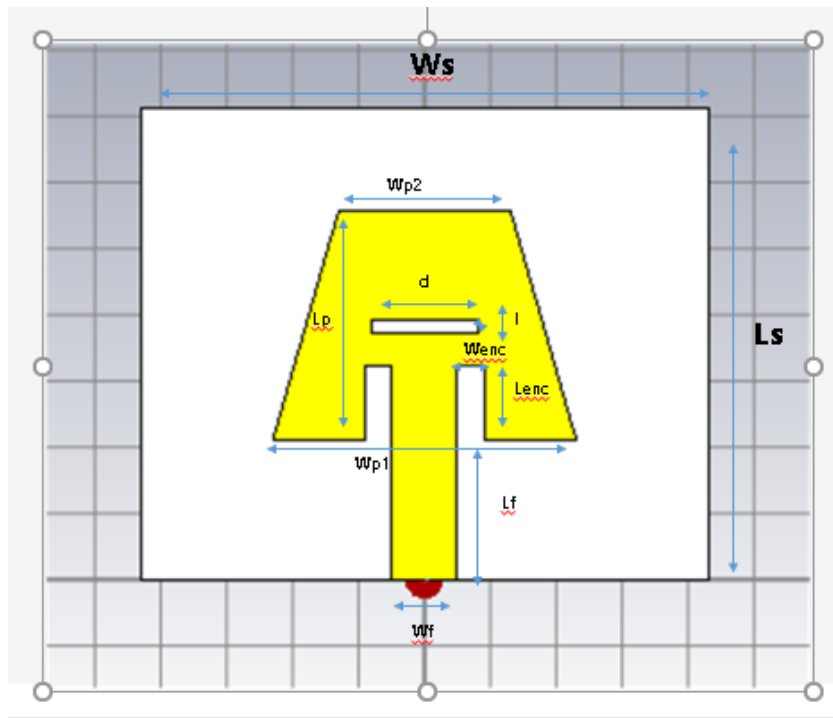
Figure III. 15 : Gain simulé de l'antenne optimisée

III.5 Antenne trapézoïdale bi-bande proposée

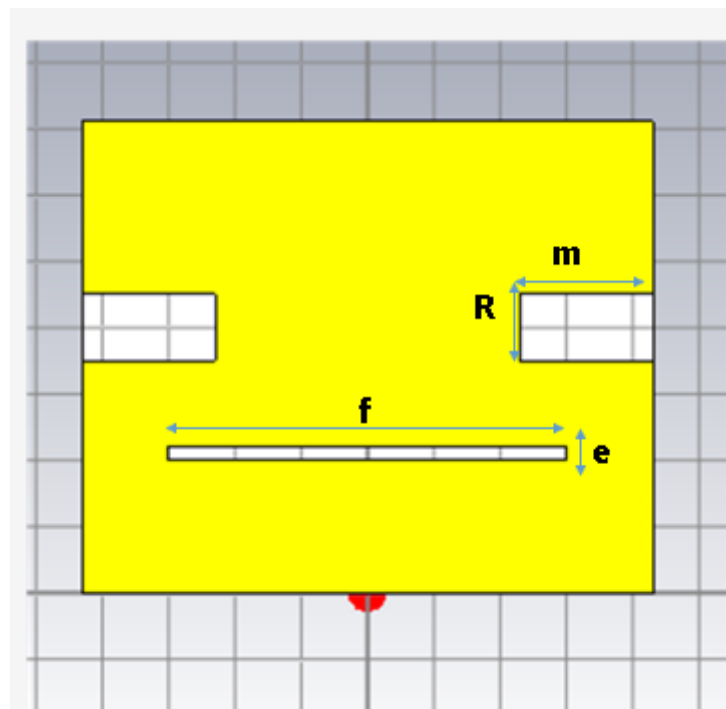
Le but de ce travail est de concevoir une antenne pour les applications 5G, de faible coût de réalisation et très facile à fabriquer.

Suite à l'étude de l'antenne précédente, nous proposons une antenne bi-bande fonctionnant aux fréquences 26 et 46 GHz. La géométrie de cette antenne proposée est présentée dans la figure III.16 et sa conception est inspirée de l'antenne triangulaire étudiée précédemment.

Les dimensions de l'antenne proposée sont données dans le **tableau III.3**.



a)



b)

Figure III. 16 : Géométrie de l'antenne trapézoïdale proposée, a) Vu de dessus, b) Plan de masse

Paramètres	Variables	Valeurs (mm)
Largueur du substrat et plan de masse	Ws	8.61
Longueur du substrat et plan de masse	Ls	7.11
Largueur du patch 1	Wp1	4.6
Largueur du patch 2	Wp2	2.6
Longueur du patch	Lp	3.57
Largueur de la ligne d'alimentation	Wf	1
longueur de la ligne d'alimentation	Lf	2.1
Longueur de l'encoche	Lenc	1.22
Largeur de l'encoche	Wenc	0.4
Longueur de la fente	d	1.6
Largeur de la fente	l	0.2
Epaisseur du substrat	h	0.508
Epaisseur du patch et du plan de masse	t	0.035

.Tableau III. 3: Dimension de l'antenne proposée

III. 5.1 Etape de conception

Pour concevoir une antenne fonctionnant aux deux fréquences différentes, à savoir 26 GHz et 46 GHz, nous avons changé le patch triangulaire par un patch trapézoïdal en gardant le même type de substrat.

D'abord une étude paramétrique a été menée sur les dimensions du patch et du substrat pour adapter l'antenne aux fréquences désirées **figure III. 17(a)**. Cette étude permet de

prévoir les modifications à apporter pour adapter la structure selon les besoins. Pour mieux adapter l'antenne, des encoches sont créées dans l'élément rayonnant, **figure III.17(b)**. Une fente horizontale est ensuite ajoutée dans l'élément rayonnant, **Figure III.17(c)**, enfin, des fentes sont insérés dans plan de masse comme le montre la **figure III. 17(d)** pour améliorer encore la bande passante à chaque résonance et pour augmenter encore le coefficient de réflexion pour une meilleure adaptation d'impédance.

La **figure III.17** montre les étapes de conception de l'antenne finale proposée.

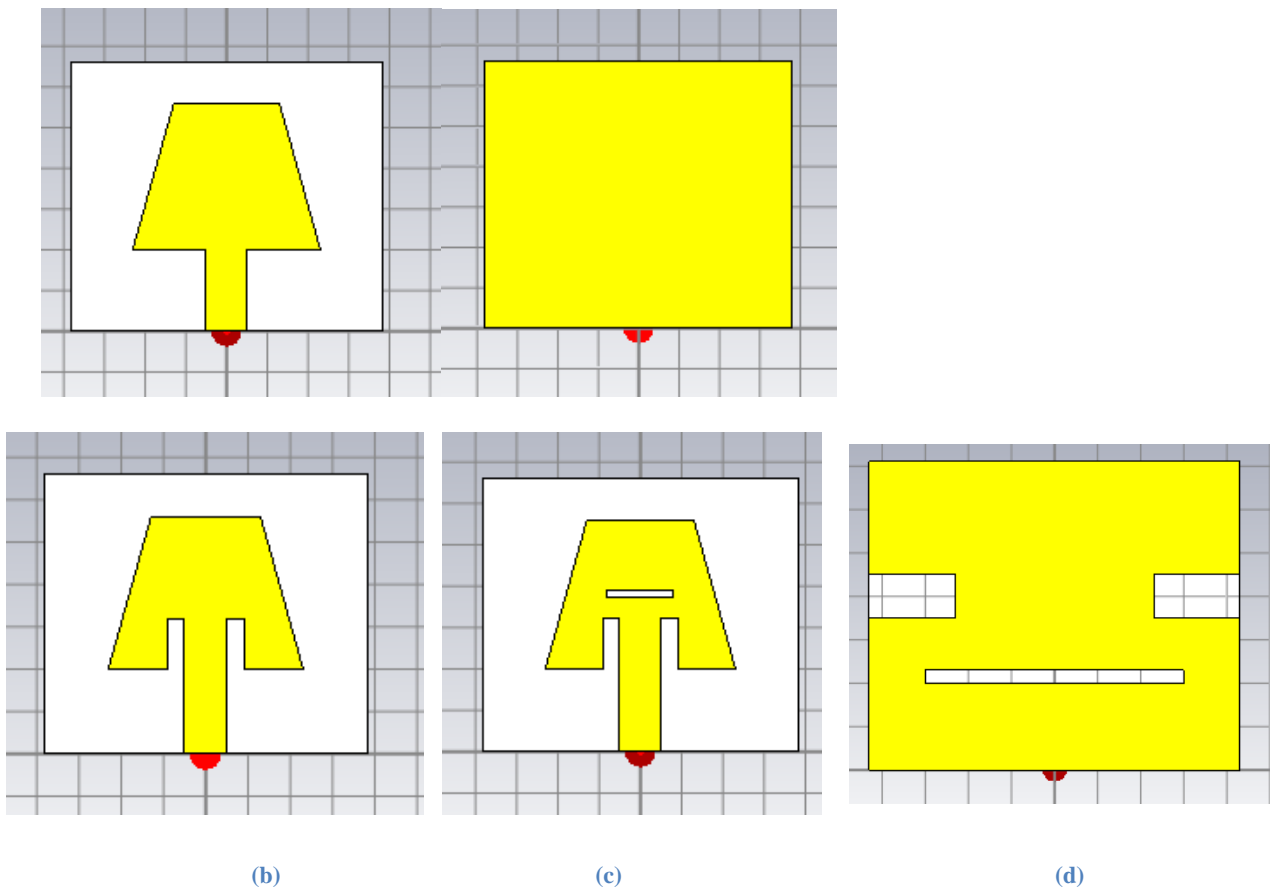


Figure III. 17: Étapes de conception de l'antenne finale proposée.

La première simulation nous a donné le coefficient de réflexion montré dans **la figure (III.18)**

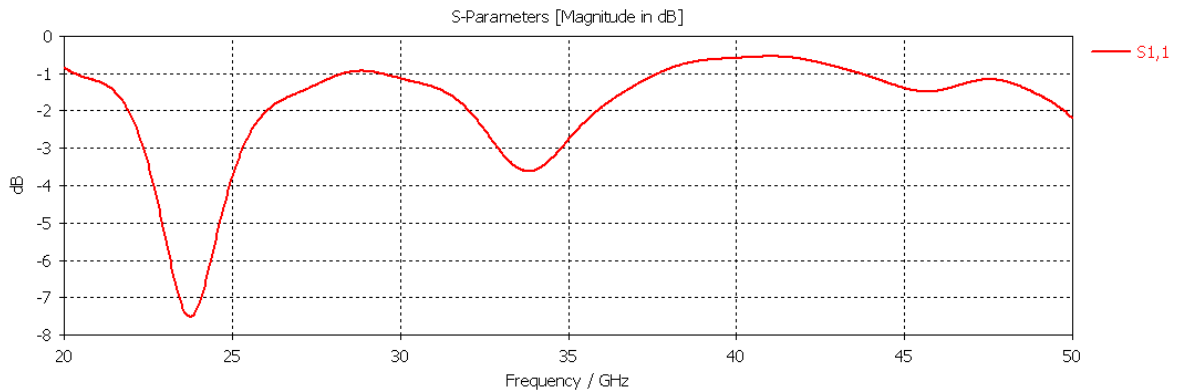


Figure III.18: Coefficient de réflexion de l'antenne initiale

Nous remarquons que le coefficient de réflexion S_{11} de cette antenne est supérieur à -10dB sur toute la plage de fréquence donc l'antenne présente une mauvaise adaptation.

Nous introduisons maintenant des encoches dans le patch (**figure III.17**) pour obtenir l'adaptation de l'antenne aux fréquences désirées de 26 et 46 GHz.

➤ Etude paramétrique sur les encoches

On présente d'abord les résultats de simulation de l'effet de la largeur des encoches. **La Figure III.19** montre les résultats de la simulation du coefficient de réflexion de l'antenne en fonction de la fréquence pour différentes valeurs de la largeur des encoches.

La figure III.20 montre l'impact de la longueur des encoches sur la variation du coefficient de réflexion en fonction de la fréquence.

On peut constater que les courbes du coefficient de réflexion sont de forme similaire lorsqu'on varie la largeur ou la longueur des encoches, mais l'adaptation de l'antenne varie avec ce changement.

Pour une largeur des encoches égales à 0.4 mm, nous observons une bonne adaptation mais à une seule fréquence seulement.

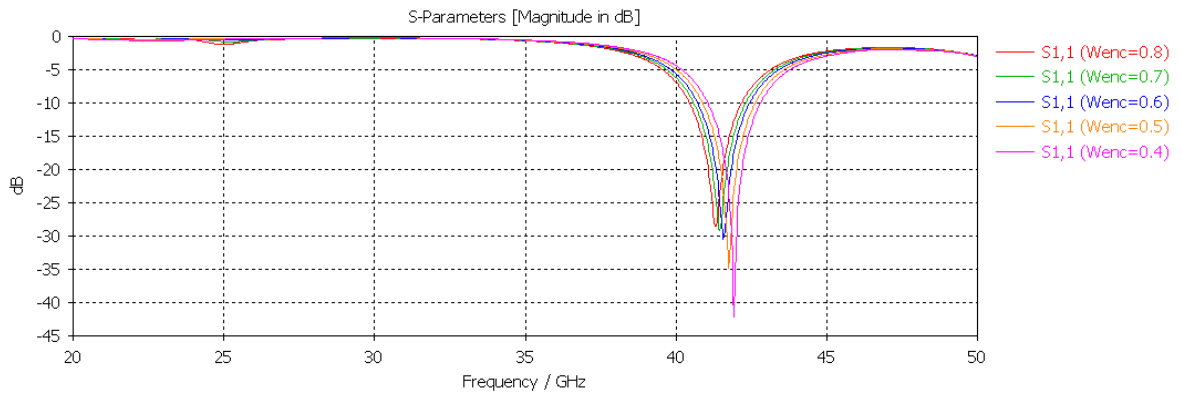


Figure III. 19: Effet de la largeur des encoches sur le coefficient de réflexion

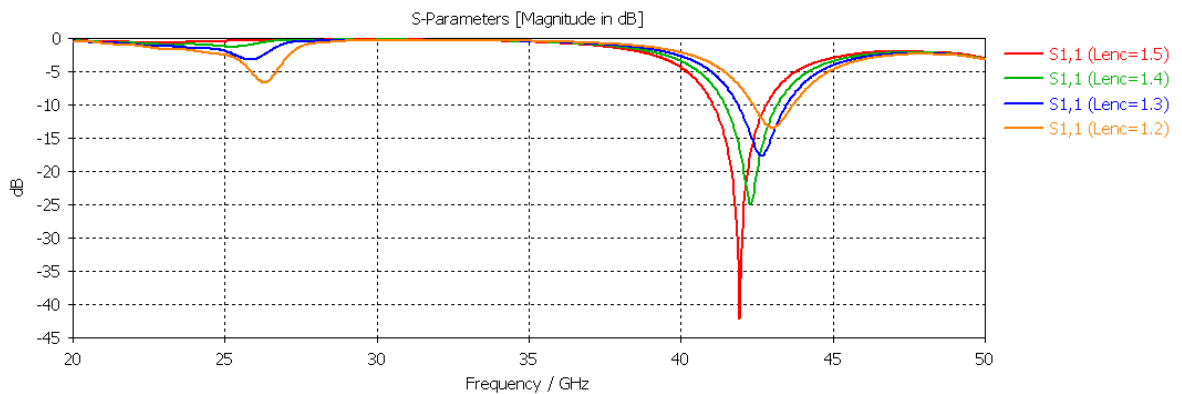


Figure III. 20: Effet de la longueur des encoches sur le coefficient de réflexion

Pour arriver à un fonctionnement de l'antenne en bi-bande, nous introduisons une fente dans le patch.

➤ Etude paramétrique sur la fente dans le patch

Les Figures III.21 et III.22 montrent l'impact de la largeur et de longueur de la fente sur la variation du coefficient de réflexion en fonction de la fréquence.

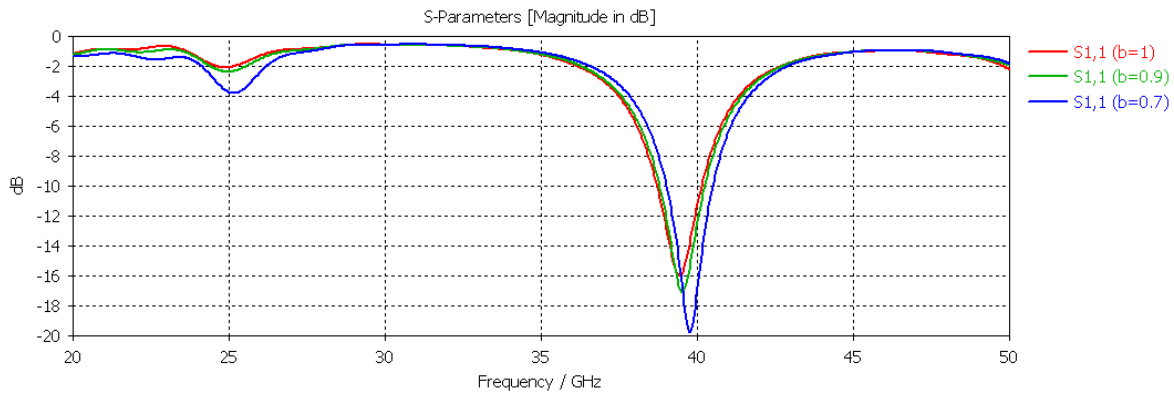


Figure III. 21: Effet de la largeur de la fente

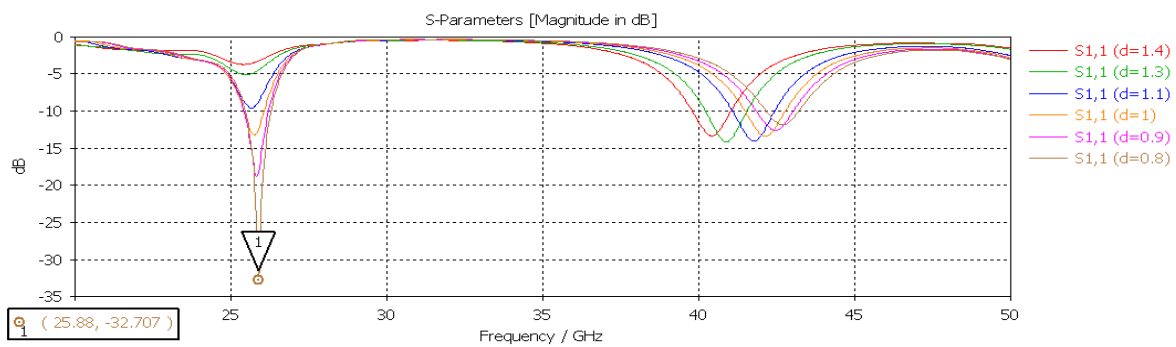


Figure III. 22: Effet de la longueur de la fente

Nous observons une bonne adaptation à la fréquence de 26GHz mais l'antenne n'est pas adaptée à la fréquence de 46GHz. Nous introduisons maintenant une autre fente mais cette fois-ci dans le plan de masse, pour obtenir cette deuxième fréquence de résonance.

➤ Etude paramétrique sur la fente dans le plan de masse

L'impact de la largeur et de longueur de la fente pratiquée dans le plan de masse, sur la variation du coefficient de réflexion, est illustré dans les **Figures III.23** et **III.24**

Comme le montre **la Figure III.23**, nous remarquons que les performances de l'antenne sont presque indépendantes de la longueur de la fente pratiquée dans le plan de masse.

Pour une largeur de la fente de $e = 0.2$ nous obtenons une antenne bi-bande adaptées aux fréquences 26 GHz et 46 GHz avec un coefficient de réflexion respectivement de -29.355dB et -14.661 dB.

La largeur de bande simulée de l'antenne est de 1.8559GHz autour de la fréquence de résonance 26GHz.

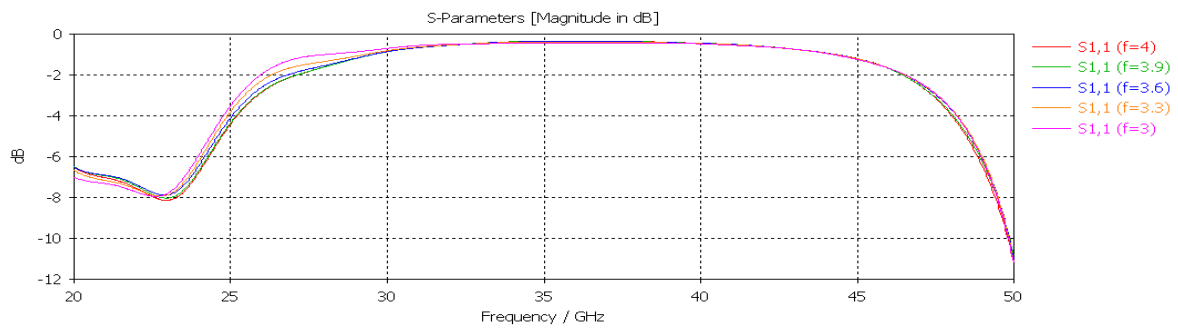


Figure III. 23: Effet de la longueur de la fente

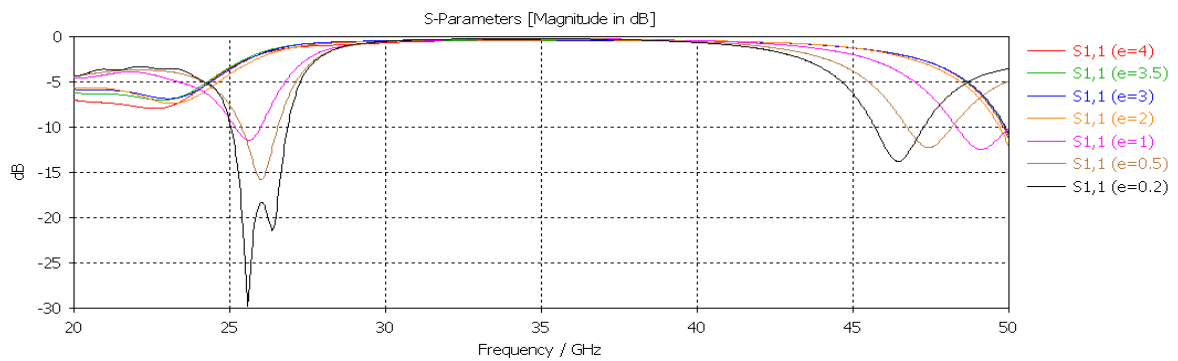


Figure III. 24: Effet de la largeur de la fente

III.5.2. Performance de l'antenne optimisée

Les dimensions optimales relatives à l'antenne proposée sont résumées dans le **tableau**

III.4.

Largueur du substrat et plan de masse	W_s	8.61
Longueur du substrat et plan de masse	L_s	7.11
Largueur du patch 1	W_{p1}	4.6
Largueur du patch 2	W_{p2}	2.6
Longueur du patch	L_p	3.57
Largueur de la ligne d'alimentation	W_f	1

longueur de la ligne d'alimentation	Lf	2.1
Longueur du l'encoche	Lenc	1.22
Largeur du l'encoche	Wenc	0.4
Largeur de la fente	l	0.2
Longueur de la fente	d	1.6
Epaisseur du substrat	h	0.508
Epaisseur du patch et plan de masse	t	0.035
Longueur de fente 1 sur plant de masse	f	6
Largeur de fente 1 sur plan de masse	e	0.2
Longueur de fente 2 sur plant de masse	m	2
Largeur de fente2 sur plan de masse	r	1

Tableau III. 4: Paramètres géométriques de l'antenne optimisée

La **figure III.25** montre la variation du coefficient de réflexion en fonction de la fréquence de l'antenne proposée. Ce résultat montre que l'antenne fonctionne en bi-bande, on observe que le coefficient de réflexion S11 est de -22.736 dB à la fréquence 26.26 GHz et de -14.66 à la fréquence 46.49 GHz.

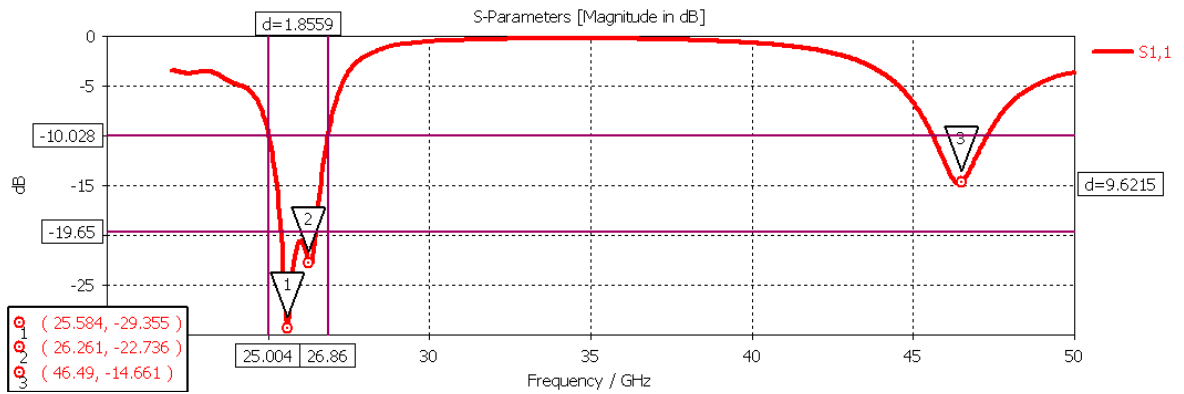
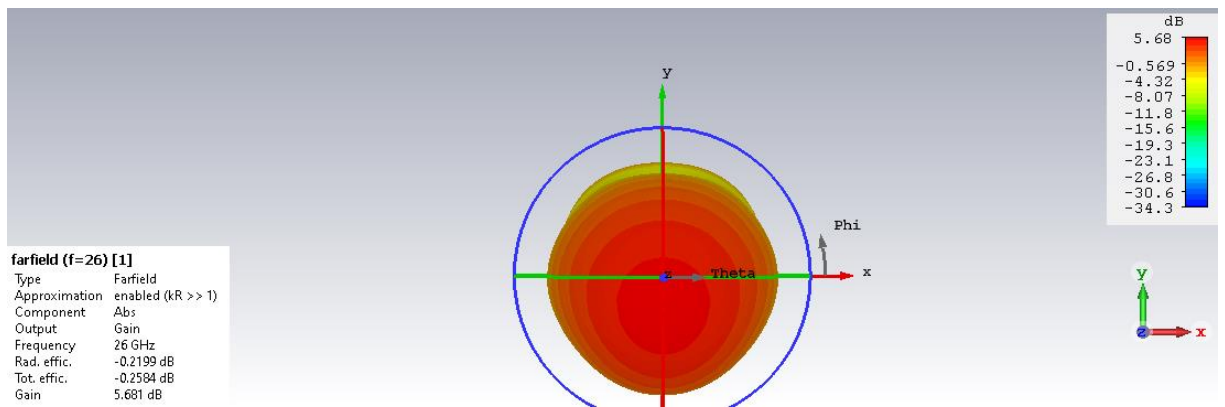


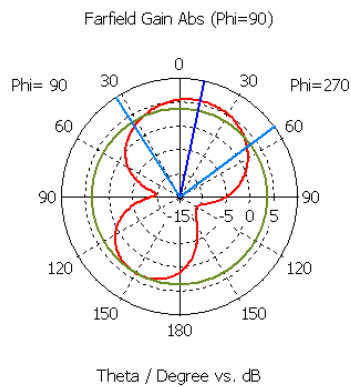
Figure III. 25: Coefficient de réflexion S11 de l'antenne proposée

III.5.3. Diagramme de rayonnement

Les diagrammes de rayonnement 3D et 2D, simulés aux fréquences de 26 et 46 GHz, de l'antenne proposée sont illustrés dans les Figures III.26 et III.27.



(a)

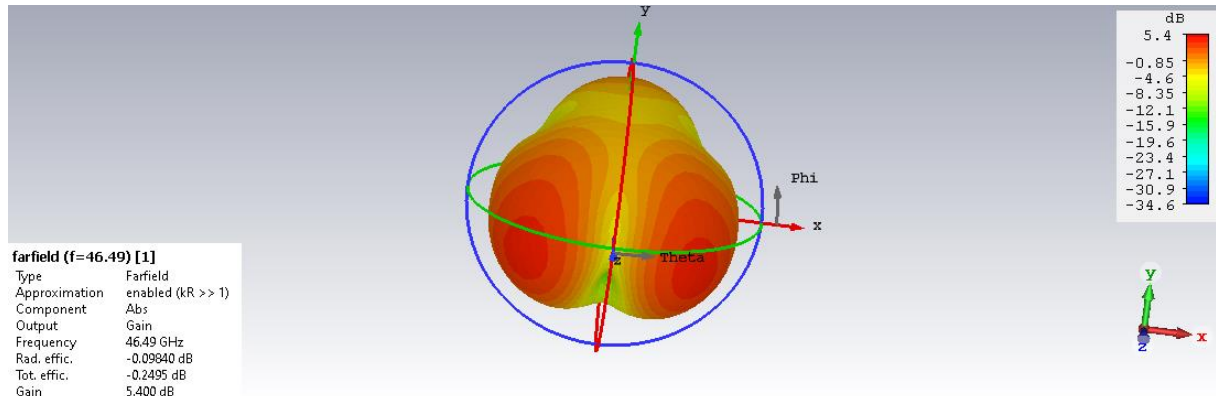


farfield (f=26) [1]

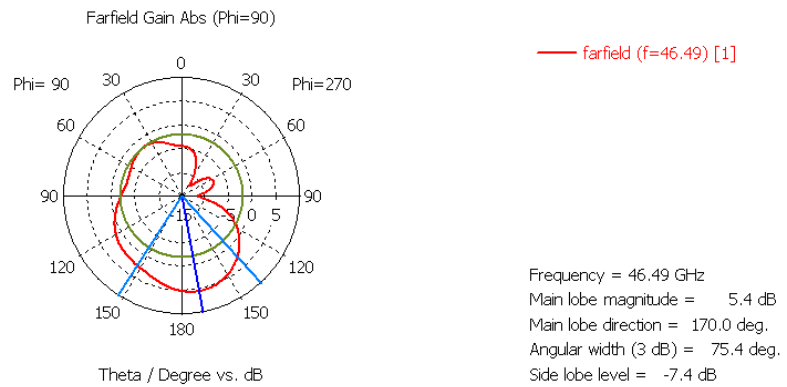
Frequency = 26 GHz
 Main lobe magnitude = 5.69 dB
 Main lobe direction = 12.0 deg.
 Angular width (3 dB) = 86.4 deg.
 Side lobe level = -2.1 dB

(b)

Figure III. 26: Diagramme de rayonnement de l'antenne proposée à 26 GHz (a) plan 3D (b) plan polaire (phi=90).



(a)



(b)

Figure III. 27 :Diagramme de rayonnement de l'antenne proposée à 46.49 GHz (a) plan 3D (b) plan polaire (phi=90) .

III.5.4.Rapport d'onde stationnaire (ROS)

Le rapport d'onde stationnaire (ROS) en fonction de la fréquence est représenté dans la **figure III.28**. Le VSWR est égal à 1.22 à la fréquence 26 GHz et 1.2059 à la fréquence 46 GHz. Nous remarquons que le VSWR est inférieur à 2 pour les deux fréquences de résonance, donc l'antenne est bien adaptée à ces fréquences.

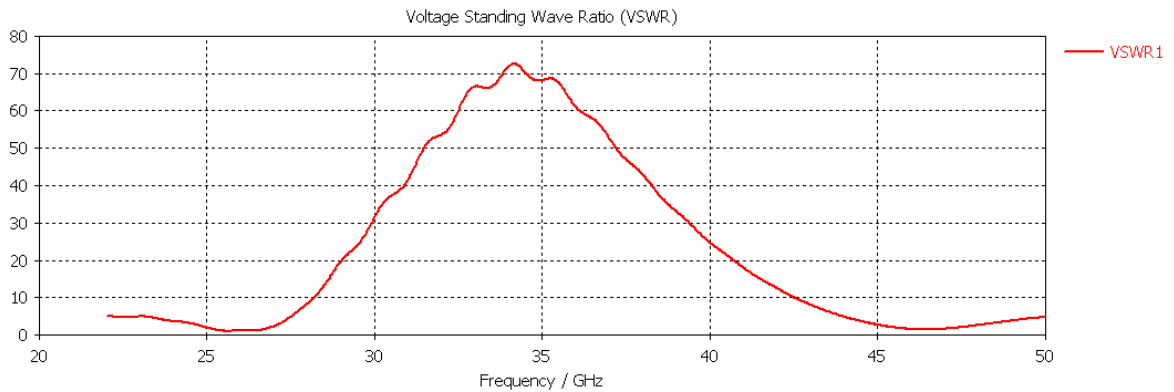


Figure III. 28: Rapport d'onde stationnaire VSWR

III.6. Conclusion

Les antennes imprimées, bien qu'elles présentent des géométries simples, exigent des études approfondies théoriques et numériques dans leur conception.

L'utilisation d'un logiciel adapté pour la conception et caractérisation d'une antenne est une étape incontournable dans un souci de gain de temps et d'optimisation de la structure aux paramètres désirés.

Dans ce chapitre, nous avons présenté deux antennes pour les applications 5G, de faible coût de réalisation et très facile à fabriquer. La conception de ces deux antennes a été faite en utilisant le logiciel CST studio. Les résultats présentés concernent les caractéristiques les plus importantes de l'antenne, tels que le coefficient de réflexion, le diagramme de rayonnement, le gain et le rapport d'onde stationnaire (ROS) de l'antenne.

Pour chaque antenne, une étude paramétrique a été menée pour comprendre et mettre en évidence le rôle et les effets des divers paramètres afin de les d'optimiser et d'aboutir à une structure finale efficace.

Conclusion générale

Conclusion générale

Notre objectif principal dans le cadre de ce mémoire est l'étude, la simulation et la conception d'antenne pour les applications 5G.

Nous avons présenté dans le premier chapitre la technologie 5G. Après avoir rappelé les objectifs du standard 5G, nous avons présenté ses technologies clés et son architecture.

Ensuite dans le deuxième chapitre, nous avons présenté des généralités sur les antennes imprimées, leurs caractéristiques et leurs techniques d'alimentations les plus utilisées.

La conception d'antennes de faible coût de réalisation, très facile à fabriquer et répondant aux exigences de la 5G a été l'objet du troisième chapitre. Dans la première partie de ce chapitre, nous avons présenté la conception d'une antenne imprimée triangulaire permettant d'émettre ou de recevoir à la fréquence 26 GHz, en citant les différentes étapes de la conception.

Dans la deuxième partie de ce chapitre nous nous sommes intéressés à la conception d'une antenne bi-bande fonctionnant aux fréquences 26 et 46GHz, pour les applications 5G. Nous avons présenté les résultats de simulations obtenus par l'application des fentes qui permettent d'améliorer les performances de l'antenne.

Pour chaque antenne conçue, une étude paramétrique a été menée pour comprendre et mettre en évidence le rôle et les effets des divers paramètres afin de les d'optimiser et d'aboutir à une structure finale performante.

Les résultats obtenus en simulation par CST ont montré que les caractéristiques des antennes conçues (bande passante, gain, diagramme de rayonnement) répondent aux exigences de la 5G.

Les résultats obtenus montrent aussi que l'utilisation d'un logiciel adapté pour la conception et caractérisation d'une antenne est une étape incontournable dans un souci de gain de temps et d'optimisation de la structure aux paramètres désirés.

Références Bibliographiques

- [1] M. H. Abu Saada « Design Of Efficient Millimeter Wave Planar Antennas For 5g Communication Systems » Mémoire de Master, Université Islamique de Gaza 2017.
- [2] FEI Hu « Opportunities in 5g Networks a Research and development Perspective » Livre, 5 avril 2016.
- [3]<https://www.5gitaly.eu/2018/wp-content/uploads/2019/01/5G-Italy-White-eBook-Functional-architecture.pdf>
- [4]<https://www.5gitaly.eu/2018/wp-content/uploads/2019/01/5G-Italy-White-eBook-Functional-architecture.pdf>
- [5] : Detti, Andrea. "Functional architecture." CNIT - Electronic Eng. Dept., Université de Rome Tor Vergata.
- [6] www.lebigdata.fr/5g-tout-savoir.
- [7] (<https://www.anfr.fr/petites-antennes>). ANFR: l'agence national des fréquences.
- [8] Shahram Shahbaz Panahi, Yindi Jing, in Academic Press Library in Signal Processing, Volume 7, 2018
- [9] E. G. Larsson, "Massive MIMO for Next Generation Wireless Systems," IEEE Commun. Mag., vol. 52, no. 2, pp. 186–195, 2014.
- [10] Mahmood, Nurul Huda; Gatnau, Marta; Berardinelli, Gilberto. Mogensen, Preben Elgaard. « Full Duplex Communications in 5G Small Cells». International Wireless Communications and Mobile Computing Conference. pp. 1665-1670.2017.
- [11] François MAGNE. «Télécommunications haut débit en ondes millimétriques»,10 mai 1998.
- [12] Jaco du Preez et Saurabh Sinha : Introduction to the world of millimeter-wave systems. In Millimeter-Wave Antennas: Configurations and Applications, pages 1– 18. Springer, 2016
- [13] J. Qiao, «Enabling Millimeter Wave Communication for 5G Cellular Networks: MAClayer Perspective», University of Waterloo, 2015.
- [14] T. Nakamura, S. Nagata, A. Benjebbour, Y. Kishiyama, T. Hai, S. Xiaodong, Y. Ning et L. Nan, «Trends in small cell enhancements in LTE advanced», IEEE Communications Magazine, vol. 51, no. 2, pp. 98-105, 2013.

- [15] H. Chorfi « Conception D'un Nouveau Système D'antenne Réseau Conforme En Onde Millimétrique » Mémoire de Master, Université Québec Abitibi-Témiscamingue 2012.
- [16] les antenne , théorie , conception et applications. Maurice BELLANGER Professeur au CNAM.Paris, le 26 juin 2009
- [17] H. Chorfi « Conception D'un Nouveau Système D'antenne Réseau Conforme En Onde Millimétrique » Mémoire de Master, Université Québec Abitibi-Témiscamingue 2012.
- [18] Keit.R.Caver and James.W.Mink , «Microstrip antenna Technology», IEEE.1981.
- [19] 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.
- [20] S. Tebache .« Méthode De Caractérisation Hyperfréquence Des Antennes Imprimées » Magister, Faculté des Sciences Et De La Technologie, Université Mohamed Khider, Biskra 2013.
- [21] D. Ameziane « Etude Et Optimisation D'antennes Fractales Plaquées » Mémoire de Magister, Université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen 2008.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] CHORFI Hamid « Conception d'un nouveau système d'antenne réseau conforme aux ondes millimétrique »mémoire pour l'obtention Université de Quebec ,Mai 2012.
- [25] J. Dauvignac, N. fortino, S. Tourette, G. Kassivas, P. Ciais. « Miniaturisation Des Antennes UWB Planaires » Université De Nice-Sophia Antipolis. 25 OCT 2006.
- [26] C. A. Balanis, "Antenna theory analysis and design," 2 edition John Wiley and Sons, 1997.
- [27] Choutti Leila ‘’ Contribution à l'étude d'antennes imprimées rectangulaires double bande et multi bandes tenant compte de l'effet de couplage ‘’mémoire pour l'obtention de grade Magister, université de Constantine, 2009

- [28] Par foued benamrane. « Conception d'une antenne patch microstrip ».mémoire online, une versité sidi Mohamed ben abedellah (Fès) maroc.2011.
- [29] A. El Zooghby, «Smart antenna engineering», Training, vol. 2012, pp. 07–09, 2005.
- [30] A. M. Elmurtada, Y. N. Awad, y M. G. Elnourani, «Adaptive smart antennas in 3G networks and beyond», 2012, pp. 148–153.
- [31] W. Roh et al., “Millimeter-Wave Beamforming as an enabling technology for 5G cellular communications: theoretical feasibility and prototype results”, IEEE Comm. Magazine, pp. 106-113, Feb. 2014.

