

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République algérienne démocratique et populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
جامعة بلحاج بوشعيب عين تموشنت
Université–Ain Temouchent- Belhadj Bouchaib
Faculté des Sciences et de Technologie
Département Électronique et Télécommunications



Projet de Fin d'Etudes
Pour l'obtention du diplôme de Master en : Réseaux et
Télécommunications
Domaine : Sciences et Technologie
Filière : Télécommunications
Spécialité : Réseaux et Télécommunications
Thème

Conception d'un Réseau d'Antennes Patch pour les Réseaux
Mobiles 5G Millimétrique

Présenté Par :

- 1) Mr ERROUANE Mohamed El Amine
- 2) Mr BOUDAUD Elhachemi Bouhadjar

Devant le jury composé de :

Dr BENTAIEB Samia	MCB	UAT.B.B (Ain Temouchent)	Présidente
Dr MOULESSEHOUL Wassila	MCB	UAT.B.B (Ain Temouchent)	Examinatrice
Dr FEROUANI Souheyla	MCA	UAT.B.B (Ain Temouchent)	Encadrante
Dr RABAH Mohamed Amine	MRA	CDS (Oran)	Co-Encadrant

Année Universitaire 2020/2021

Remerciement spéciale

A DJAMILA, ma défunte mère qui a éclairé avec passion mon parcours scolaire jusqu'en Terminale (3AS), je dédie ce travail de fin de cursus universitaire.

Ton fils ERROUANE Mohamed El Amine qui ne t'oubliera jamais.

Remerciement

Par la Grace de DIEU le Tout Puissant, nous nous présentons devant vous pour exposer notre travail de mémoire de fin d'études.

Nos vifs remerciements sont adressés à l'endroit de notre Encadreur Docteur FEROUANI Souheyla -Maitre de conférences classe A- pour sa patience, ses conseils, ses orientations, sa disponibilité,...

Nous tenons à remercier notre Co-encadreur de mémoire Docteur RABAH Mohamed Amine –Maitre de recherche classe A- .

Nous ne manquerons pas d'apprécier l'acceptation de siéger au sein du jury par Docteur BENTAIEB Samia Maitre conférences classe B et Docteur MOULESSEHOUL Wassila –Maitre conférences classe B à l'université de Belhadj Bouchaib d'Ain Temouchent.

Pour conclure, un témoignage de gratification à l'endroit de nos chers enseignants de l'université Belhadj Bouchaib.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail A mes chers parents pour leur soutien, leur patience, leur encouragement durant mon parcours scolaire.

Ma sœur Manel et Mon frère Abd el Ellah ainsi à toute ma famille.

Mon Cher Binôme Mohamed El Amine pour son entente et sa sympathie.

Mes Chers Amis de loin ou de près, pour leur encouragement permanent et leur soutien moral.

Ma chère amie Hadjar qui n'a jamais cessé de me soutenir

Elhachemi

Dédicace

Je dédie ce modeste travail ;

*À mon très cher père Nor-Eddine, qui m'a comblé de son soutien, tu es
pour moi un exemple de courage et de sacrifice continu ;*

À ma grand-mère Halima;

À mon très cher frère Abdelmalek ;

À mon binôme Elhachemi avec qui j'ai pu réaliser ce travail;

À toute ma grande famille;

À tous les gens qui me donnent l'envie d'aller en avant ;

*Je vous remercie tous, votre soutien et vos encouragements me donnent
la force de continuer.*

Mohamed El Amine

Dédicace spéciale

*À SIDI YAKOUB Wafaa, KHATIR BENMEHEIMDA Bouchra,
BENTOUIR Amina, FATMI Achouak.*

Mohamed El Amine et Elhachemi

Résumé

Les réseaux d'antennes ont suscité ces dernières années un très grand intérêt auprès des chercheurs dans le monde de télécommunications surtout pour les applications 5G.

Notre objectif principal consiste à concevoir et réaliser un réseau d'antennes patch dans la bande de fréquences millimétrique de 26 GHz pour les applications de cinquième génération 5G. Les résultats obtenus sont très satisfaisants en termes de S11, gain, VSWR, bande passante et diagramme de rayonnement.

Mots clés : réseaux d'antenne patch, 5G millimétrique, S11, diagramme de rayonnement.

Abstract

Recently, antenna network has shown a huge interest in the world of telecommunication, especially in the 5G applications.

Our main objective is to design and realize an array patch antenna in the millimeter frequency band of 26 GHz for fifth generation 5G applications. The results obtained are very satisfactory in terms of S11, gain, VSWR, bandwidth and radiation pattern.

Keywords: antenna network, millimeter 5G, S11, radiation pattern.

ملخص

لقد أثارَت شبكات الهوائي اهتماما كبيرا في السنوات الأخيرة بين الباحثين في عالم الاتصالات، خاصة تطبيقات 5G .

هدفنا الرئيسي يتمثل في تصميم شبكة من الهوائيات التي تعمل في نطاق التردد المليمتر 26 جيجا هرتز لتطبيقات الجيل الخامس 5G, النتائج المتحصل عليها مرضية للغاية من حيث معامل , VSWR , S11 عرض النطاق الترددي ونمط الإشعاع.

الكلمات المفتاحية: شبكة الهوائيات، CST ، 5G ، S11، نمط الإشعاع.

Tables des matières

<i>Remerciement</i>	<i>II</i>
<i>Résumé</i>	<i>V</i>
<i>Tables des matières</i>	<i>VI</i>
<i>Liste des Figures</i>	<i>X</i>
<i>Liste des Tableaux</i>	<i>XII</i>
<i>Liste des acronymes et abréviations</i>	<i>XIII</i>
<i>Introduction Générale</i>	<i>1</i>
<i>Chapitre I : Les antennes imprimées</i>	<i>4</i>
I.1 Introduction	5
I.2 Définition d'une antenne	5
I.2.1 Description des antennes imprimées.....	5
I.2.1.1 Structure d'une antenne imprimée	5
I.2.1.2 Les différentes formes du patch.....	6
I.2.2 Domaine d'application des antennes imprimées.....	6
I.2.3 Mécanisme de rayonnement d'une antenne patch	6
I.3 Caractéristiques des antennes imprimées	7
I.3.1 Coefficient de réflexion S₁₁	7
I.3.2 La Directivité	7
I.3.3 Le rendement de l'antenne.....	8
I.3.4 Le Gain.....	8
I.3.5 L'ouverture d'une Antenne.....	8
I.3.6 L'impédance d'entrée	9
I.3.7 Diagramme de rayonnement	9
I.3.8 La bande passante	10
I.3.9 Le VSWR (Voltage Standing Wave Ratio)	10

I.4	Techniques d'alimentations des antennes imprimées	11
I.4.1	Alimentation par ligne micro ruban	11
I.4.2	Alimentation par la sonde coaxiale	12
I.4.3	Alimentation par couplage de proximité.....	13
I.4.4	Alimentation couplée par fente (ouverture).....	13
I.4.5	Comparaison entre les différentes techniques d'alimentation	14
I.5	Techniques d'adaptation des antennes imprimées	15
I.5.1	Adaptation par ligne quart d'onde	15
I.5.2	Adaptation par stub	15
I.5.3	Adaptation avec encoche	16
I.6	Réseaux d'antennes	16
I.6.1	Types de réseaux d'antennes.....	16
I.6.2	Technique d'alimentation d'un réseau d'antenne patch	17
I.7	Avantages et inconvénients des antennes patches.....	18
I.8	Conclusion.....	19
Chapitre II : Généralités sur la Technologie 5G.....		20
II.1	Introduction.....	21
II.2	Historique.....	21
II.2.1	La 5ème génération.....	23
II.2.2	La Révolution Des Fréquences Millimétrique.....	24
II.2.3	La 5G millimétrique	24
II.2.4	Famille D'usage De La 5G	25
II.2.5	Les Applications de la 5G.....	26
II.3	Les technologies Émergentes Pour réseaux 5G	27
III.3.1	Les ondes millimétriques	27
III.3.2	Les micros-celles.....	28
III.3.3	Beamforming.....	28

III.3.4 Full-Duplex	28
III.3.5 Le Massive MIMO	29
II.4 Vision de 5G	30
II.5 Conclusion	31
Chapitre III : Simulations et Résultats.....	32
III.1 Introduction	33
III.2 Choix de l'outil de simulation	33
III.3 Conception de l'antenne patch rectangulaire pour la 5G millimétrique	33
III.3.1 Géométrie de base	33
III.3.2 Résultats de simulation.....	35
III.3.2.1 Paramètre de réflexion S [1,1].....	35
III.3.2.2 Adaptation de l'antenne patch par la ligne quart d'onde.....	36
III.3.2.3 Adaptation de l'antenne avec insertion des fentes et encoches sur le patch .	37
a. Coefficient de réflexion S [1,1]	38
b. Le Gain	38
c. Diagramme de rayonnement.....	39
d. Rapport d'onde stationnaire (VSWR)	39
e. La Densité du courant de l'antenne patch.....	40
III.3.2.4 Simulation du Réseau d'antennes pour la Bande des 26 GHz.....	41
a. Structure de réseau d'antenne de 8 éléments	41
b. Coefficient de réflexion S [1,1]	42
c. Diagramme de rayonnement.....	43
d. Le gain	43
e. Rapport d'onde stationnaire (VSWR)	44
f. La Densité du courant de réseaux d'antenne	44
III.4 Comparaison avec des articles de recherche	45
III.5 Prototype et mesures du réseau d'antennes patch proposé pour la 5G millimétrique.	46

III.6 Résultats de Mesure du réseau d'antenne patch pour la 5G millimétrique	47
III.6.1 Paramètre de réflexion S11	47
III.6.2 VSWR	48
III.7 Conclusion	48
Références Bibliographiques et webographie	52

Liste des Figures

Chapitre I : Les antennes imprimées.

Figure I-1: Présentation d'une antenne imprimée.....	5
Figure I-2: Différentes formes d'antennes patch	6
Figure I-3: Distribution de charge.....	7
Figure I-4 : Distribution de champ.....	7
Figure I-5 : Représentation du diagramme de rayonnement d'une antenne	9
Figure I-6 : circuit équivalent d'une antenne en émission.....	10
Figure I-7 : Alimentation par ligne micro ruban.....	11
Figure I-8 : Alimentation par ligne micro ruban, (a) Axial, (b) Décalée, (c) Axiale avec encoche.....	12
Figure I-9 : Antenne patch alimentée par câble coaxial.....	12
Figure I-10 : alimentation couplée par proximité	13
Figure I-11 : Alimentation par couplage électromagnétique à une ligne microbande à travers une fente dans le plan de masse.....	14
Figure I-12 : Adaptation par quart à adaptation quart d'onde.....	15
Figure I-13 : stub en circuit ouvert.....	15
Figure I-14: (a) Patch rectangulaire, (b): L'équivalence en circuit	16
Figure I-15 : Patch adapté par encoches de longueur	16
Figure I-16 : Différentes configurations géométriques des réseaux, linéaire (a), planaire (b) et circulaire (c)	17
Figure I-17 : Alimentation d'un réseau d'antennes patch. (a)-série (b)-parallèle.....	17

Chapitre II : Généralités sur la Technologie 5G

Figure II-1 : le spectre de fréquence en téléphonie mobile.....	25
Figure II-2 : La famille d'usage de la 5G	26
Figure II-3 : Techniques utilisées dans la technologie 5G.....	27
Figure II-4 : spectre de fréquence (ondes millimétriques).....	28
Figure II-5 : Illustration du full-duplex, comparé au FDD et TDD.....	29
Figure II-6 : Un réseau 5G MIMO Massive	29

Chapitre III : Simulations et résultats

Figure III-1 : Espace de travail CST Microwave Studio.	33
Figure III-2 : Antenne patch rectangulaire.	34
Figure III-3 : Coefficient de réflexion S11.	35
Figure III-4 : Antenne patch alimentée par une Ligne quart d'onde.....	36
Figure III-5 : Coefficient de réflexion S11 de l'antenne patch adapter par ligne quatre d'onde.	36
Figure III-6 : L'antenne patch proposée.....	37
Figure III-7 : L'antenne patch proposée 3D.	37
Figure III-8 : L'étude paramétrique des encoches et fente.....	38
Figure III-9 : Coefficient de réflexion S11 de l'antenne patch proposée.	38
Figure III-10 : Le gain.	38
Figure III-11 : Diagramme de rayonnement polaire de l'antenne à la fréquence 26 GHz.	39
Figure III-12 : Le diagramme de rayonnement en 3D.....	39
Figure III-13 : Rapport d'onde stationnaire (VSWR).	39
Figure III-14 : La densité du courant de patch.	40
Figure III-15 : Structure du réseau d'antenne de 8 éléments.....	41
Figure III-16 : Structure du réseau d'antenne de 8 éléments 3D.....	41
Figure III-17 : Le coefficient de réflexion S11 des essais.....	42
Figure III-18 : coefficient de réflexion S11 de réseau d'antenne.	42
Figure III-19 : Diagramme de rayonnement polaire de réseau d'antenne.....	43
Figure III-20 : Diagramme de rayonnement du réseau d'antenne en 3D.	43
Figure III-21 : Le gain.	43
Figure III-22 : Rapport d'onde stationnaire.....	44
Figure III-23 : La densité du courant de réseau d'antenne.	44
Figure III-24 : Prototype du réseau d'antennes patch réalisé.	47
Figure III-25 : Mesure du réseau d'Antennes patch proposé à l'aide de l'analyseur réseau... 47	47
Figure III-26 : Paramètre de réflexion S11 simulé et mesuré.	47
Figure III-27 : VSWR simulé et mesuré.....	48

Liste des Tableaux

Tableau II-1 : Comparaison entre les différents générations 1G, 2G, 3G, 4G, et 5G	23
Tableau III-1 : Equations de calculs des paramètres de l'antenne patch rectangulaire [38]..	34
Tableau III-2 : Les valeurs des paramètres d'antenne initiale.	35
Tableau III-3 : Les valeurs des paramètres de la ligne quart d'onde.	36
Tableau III-4 : Les valeurs des paramètres de fente et des encoches.....	37
Tableau III-5 : Paramètres fondamentaux de l'antenne à 26GHz.	40
Tableau III-6 : paramètres du réseau d'antennes patch.....	42
Tableau III-7 : Paramètres fondamentaux de réseaux d'antennes (à 26GHz).....	45
Tableau III-8 : Paramètres de comparaison d'antenne proposée.	45
Tableau III-9 : Paramètres de comparaison de réseau d'antenne.....	46

Liste des acronymes et abréviations

GSM: Global System for Mobile Communications

GPRS: General Paquet Radio Services

IP: Internet Protocol

QoS: Quality of Service

WiMax: Worldwide Interoperability for Microwave Access

CDMA: Code division multiple Access

WCDMA: Wideband Code Division Multiple Access

M2M: Machine To Machine

ADSL: Asymmetric Digital Subscriber Line

UIT : Union internationale des télécommunications

mMTC: Massive Machine Type Communication

LPWA: Low Power Wide Area

URLLC: Ultra-Reliable Low-Latency Communication

eMBB: Enhanced Mobile Broadband

EHF: Extremely High Frequency

FDD: Frequency Division Duplexing

TDD: Time Division Duplexing

1G: First Generation

2G: Second Generation

3G: Third Generation

4G: Fourth Generation

5G: Fifth Generation

LTE: Long Term Evolution

Massive-MIMO: Massive- Multiple Input Multiple Output

VSWR: The Voltage Standing Wave Ratio

S11: Coefficient of Reflection

CST (MWS): Computer Science Technology MICROWAVE STUDIO

BP: Bandwidth

Introduction Générale

Introduction Générale

La demande croissante de services de télécommunications stimule le développement de nouvelles technologies de traitement des appels. Chaque génération de technologies mobiles a apporté avec elle une augmentation de la vitesse de transmission des données ainsi qu'une meilleure qualité de connexion et de nouvelles fonctionnalités [1]. Le réseau de cinquième génération (5G) permet un certain nombre de nouveaux services, Il sera plus avancé et interconnectera le monde entier et donnera naissance à un réseau mondial sans fil. Nous pouvons même brancher notre téléphone avec notre ordinateur portable pour l'accès Internet à large bande. La technologie 5G offrira une bande passante très élevée que les utilisateurs n'ont jamais connue auparavant [2].

Cependant, la mise à jour du réseau mondial nécessite des transformations immédiates des appareils pour être compatible avec le nouveau réseau. L'ensemble du système de communication doit être reconfiguré sinon le nouveau réseau devient redondant. Cependant, l'évolution rapide apporterait des changements dans les antennes. Ainsi, la nécessité de concevoir une antenne fonctionnant dans la gamme de communication 5G doit être appréciée. Les antennes patch sont l'une des antennes les plus recherchées pour être considérées. En raison de leur petite taille et de leur facilité de fabrication, les antennes patch sont préférées dans la plupart des industries de la communication partout où un profil bas peut être adapté [3].

Le but principal de ce mémoire est de concevoir et réaliser un réseau d'antennes fonctionnant à la bande de 26 GHz pour l'application 5G et pour ce faire on s'est basé sur la théorie des antennes imprimées afin de déterminer les paramètres géométriques de notre antenne proposée.

[Le premier chapitre présente une vue d'ensemble sur les antennes imprimées et leurs caractéristiques et décrit brièvement les principes des réseaux d'antennes.

Le deuxième chapitre, expose des généralités sur la 5G et ses technologies comme le mmWave. Ensuite nous allons décrire une présentation détaillée sur l'architecture de la 5G, et nous terminons ce chapitre par une vision du futur de la 5G.

Le dernier chapitre a pour objectif de présenter les résultats de simulation du réseau d'antenne patch pour la technologie 5G millimétrique utilisant le logiciel CST Microwave, Cette dernière doit fonctionner dans la bande [24.5-27.5] GHz.

Nous clôturons ce mémoire par une conclusion générale.

Chapitre I : Les antennes imprimées

I.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons en premier lieu la description de la structure simplifiée des antennes imprimées (antennes patch), leurs domaines d'application, leur mécanisme de fonctionnement, ensuite nous donnerons leurs caractéristiques, les différentes techniques d'alimentation, et en terminant par les réseaux d'antennes, leur type, ainsi leurs techniques d'alimentation.

I.2 Définition d'une antenne

Une antenne est un moyen de rayonnement ou de réception des ondes radio. Plus concrètement, c'est un dispositif qui reçoit des signaux d'une ligne de transmission, les convertit en ondes électromagnétiques et les diffuse dans l'espace libre lorsque l'antenne est en mode d'émission. En mode de réception, elle capte tout simplement les ondes électromagnétiques incidentes et les reconvertit en signaux [4].

I.2.1 Description des antennes imprimées

Une antenne à éléments rayonnants imprimés, communément appelée antenne patch est une ligne micro-ruban (microstrip) de forme particulière. Elle effectue ainsi deux fonctions fondamentales qui définissent le principe d'antenne de manière générale, il s'agit bien du rayonnement (émission) et de la réception d'une onde électromagnétique [5].

I.2.1.1 Structure d'une antenne imprimée

La structure de base est rappelée sur la figure I.1 :

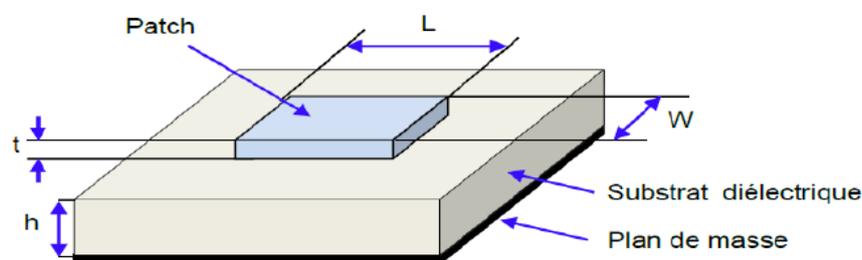


Figure I-1: Présentation d'une antenne imprimée [6].

L : Longueur du patch, t : épaisseur du patch. W : Largeur du patch, h : épaisseur du substrat.

Dans sa structure de base (figure I.1), une antenne imprimée est constituée d'un conducteur métallique, déposé sur un substrat diélectrique au-dessus d'un plan de masse. Le

patch doit être relié au reste du circuit à l'aide d'une ligne de transmission de type micro ruban. Cette ligne va également permettre d'adapter l'impédance de l'antenne au reste du circuit pour éviter un phénomène de réflexion [7].

I.2.1.2 Les différentes formes du patch

L'antenne patch peut prendre plusieurs formes (rectangle, triangle, disque, anneau, ellipse...). Ces formes sont les plus courantes car elles présentent une grande facilité d'analyse et de fabrication. La figure I.2 montre ces différentes formes.

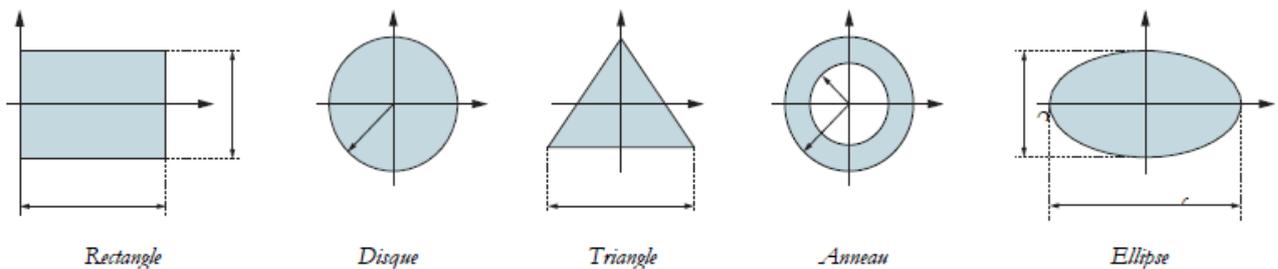


Figure I-2: Différentes formes d'antennes patch [8].

I.2.2 Domaine d'application des antennes imprimées

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

- La téléphonie mobile.
- Les radars.
- Les télécommunications spatiales.
- La télémétrie des missiles et la télésurveillance.
- Guidage des missiles et télédétection.

I.2.3 Mécanisme de rayonnement d'une antenne patch

La forme géométrique de l'antenne patch nous permet de mieux comprendre son mécanisme de rayonnement. Après l'excitation de la ligne d'alimentation, une onde électromagnétique va se propager sur cette dernière pour rencontrer l'élément rayonnant qui est généralement plus large que la ligne. Dans ce cas, on a une distribution de charge qui va s'établir sur et sous le composant rayonnant et entre le plan de masse et substrat. (Figure I.3) illustre ce phénomène. Ces distributions avec l'association des densités de courants engendrent une distribution des champs électriques représentée à la (Figure I.4). Sa répartition s'étend autour

et dans la structure dépend essentiellement : de la largeur w des circuits de métallisation, des caractéristiques du substrat : à savoir sa constante diélectrique et son épaisseur h [9].

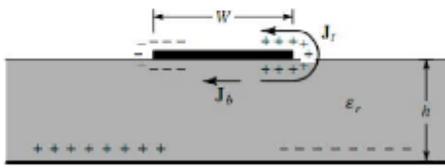


Figure I-3: Distribution de charge [9].

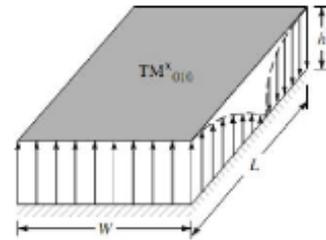


Figure I-4 : Distribution de champ [9].

I.3 Caractéristiques des antennes imprimées

I.3.1 Coefficient de réflexion S11

Le coefficient de réflexion d'une antenne se définit comme étant le rapport des amplitudes des ondes incidentes sur les ondes réfléchies [2]. Pour une antenne d'impédance Z_e , reliée à la source par une ligne d'impédance caractéristique Z_0 (souvent égale à 50Ω), le coefficient de réflexion peut être défini comme suite :

$$\mathbf{S11} = \frac{(Z_e - Z_0)}{(Z_e + Z_0)} ; \quad (\text{I.1})$$

Avec :

Z_e : 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 $|\mathbf{S11}|$ et se définit comme suit :

$$|\mathbf{S11}|_{\text{dB}} = 20 \log |\mathbf{S11}| \quad (\text{I.2})$$

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.

I.3.2 La Directivité

La directivité d'une antenne est le rapport de la puissance rayonnée par unité d'angle solide dans la direction (θ, φ) à la puissance que rayonnerait la source isotrope de référence par unité d'angle solide pour une même puissance totale rayonnée [10].

$$D(\theta, \varphi) = 4\pi \frac{P(\theta, \varphi)}{\eta P_a}; \quad (\text{I.3})$$

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

I.3.3 Le rendement de l'antenne

Le rendement est le rapport entre l'énergie rayonnée par une antenne et celle que lui fournit l'alimentation [11]. Elle est exprimée par:

$$\eta = \frac{R_r}{R_r + R_p}; \quad (\text{I.4})$$

R_r : Résistance liée à son rayonnement.

R_p : Résistance liée aux pertes de l'antenne.

Il est aussi exprimé par :

$$\eta = \frac{P_r}{P_a}; \quad (\text{I.5})$$

Avec :

P_r : Puissance totale rayonné.

P_a : Puissance d'alimentation de l'antenne.

I.3.4 Le Gain

Le gain d'une antenne dans une direction (θ, φ) est le rapport de la puissance rayonnée dans cette direction $P(\theta, \varphi)$ à la puissance que rayonnerait la source isotrope de référence par unité d'angle solide avec la même puissance d'alimentation et il est exprimé par [11] :

$$G(\theta, \varphi) = \frac{P(\theta, \varphi)}{P_0(\theta, \varphi)} = 4\pi \frac{P(\theta, \varphi)}{P_a}; \quad (\text{I.6})$$

La relation entre le gain et la directivité d'une antenne est donnée par l'équation suivante.

$$G(\theta, \varphi) = \eta D(\theta, \varphi); \quad (\text{I.7})$$

I.3.5 L'ouverture d'une Antenne

Le gain maximal d'une antenne donnée dans un plan bien déterminé, alors son ouverture dans ce plan est l'angle qui se trouve entre deux directions de ce plan ayant la moitié du gain maximal (gain a -3 dB) [6].

I.3.6 L'impédance d'entrée

Considérons une antenne dont on peut définir les deux bornes d'entrée A et B. Soient V_e la tension entre les bornes A et B et I_e le courant d'alimentation de l'antenne [11]. L'impédance d'entrée de l'antenne est donnée par :

$$Z_e = \frac{V_e}{I_e} = R + j X ; \tag{I.8}$$

Z_e = 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.

I.3.7 Diagramme de rayonnement

Le diagramme de rayonnement représente les variations de la puissance rayonnée par l'antenne dans les différentes directions de l'espace. Il indique les directions de l'espace (θ_0, φ_0) dans lesquelles la puissance rayonnée est maximale.

On trace dans le diagramme de rayonnement la fonction caractéristique de rayonnement $r(\theta, \varphi)$, qui varie entre 0 et 1 selon la direction. Celui-ci peut se représenter sous différentes formes (Figure I-5).

$$r(\theta, \varphi) = \frac{P(\theta, \varphi)}{P(\theta_0, \varphi_0)} ; \tag{I.9}$$

$P(\theta, \varphi)$: Puissance rayonnée dans une direction quelconque

$P(\theta_0, \varphi_0)$: Puissance rayonnée max

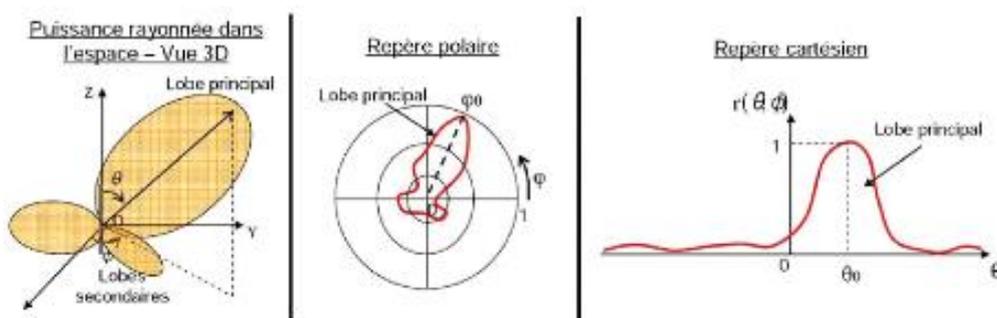


Figure I-5 : Représentation du diagramme de rayonnement d'une antenne [12].

En général, la puissance est concentrée dans un ou plusieurs « lobes ». Le lobe principal correspond à la direction privilégiée de rayonnement. Les lobes secondaires sont généralement

des lobes parasites. Dans ces directions, l'énergie rayonnée est perdue donc on cherche à les atténuer [12].

I.3.8 La 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 [13] :

$$BP (\%) = \left[\frac{f_{max} - f_{min}}{f_c} \right] \times 100 ; \tag{I.10}$$

Avec f_c est la fréquence centrale ou de résonance.

I.3.9 Le VSWR (Voltage Standing Wave Ratio)

Pour qu'une antenne fonctionne efficacement, le transfert maximum de puissance doit être entre l'émetteur et l'antenne. Ce transfert ne s'effectue pas s'il n'y a pas adaptation entre l'entrée de l'antenne et l'émetteur (Figure I-6). La puissance peut être transférée si l'impédance de l'émetteur est le complexe conjugué de l'impédance de l'antenne :

$$Z_{in} = Z_s \tag{I.11}$$

Avec l'impédance de sortie de l'émetteur:

$$Z_s = R_s + jX_s \tag{I.12}$$

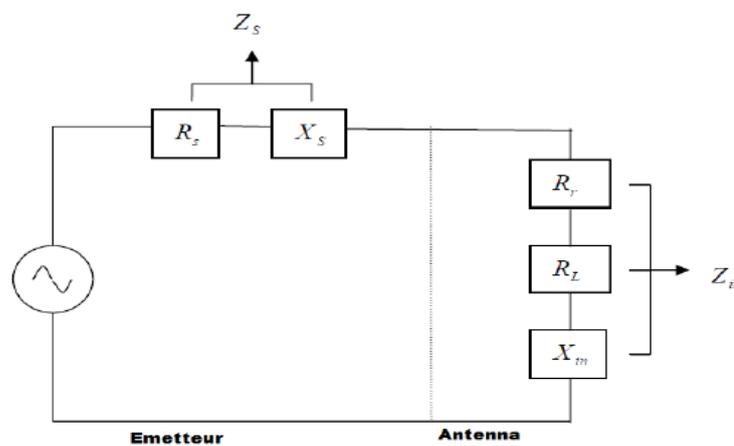


Figure I-6 : circuit équivalent d'une antenne en émission [5].

Si cette condition n'est pas satisfaite, et une partie de la puissance est réfléchi, cela conduit à la création d'ondes stationnaires, qui peut être caractérisé par un paramètre appelé le rapport d'ondes stationnaires (ROS) ou bien VSWR.

Le VSWR est donné par Markov par [5] :

$$VSWR = \frac{1+|S_{11}|}{1-|S_{11}|} \quad (1.13)$$

Le VSWR minimal correspondant à une bonne adaptation. Une bonne conception d'antenne doit avoir une impédance de 50 Ω à 75 Ω [5].

I.4 Techniques d'alimentations des antennes imprimées

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

Les techniques les plus utilisées dans la bande millimétrique sont la ligne micro ruban ou le couplage par ouverture (fente) dans le plan de masse [10].

I.4.1 Alimentation par ligne micro ruban

L'alimentation par ligne micro ruban est facilement réalisable, telle que l'on imprime sur la même face du substrat, l'élément rayonnant et sa ligne d'alimentation (figure I-7).

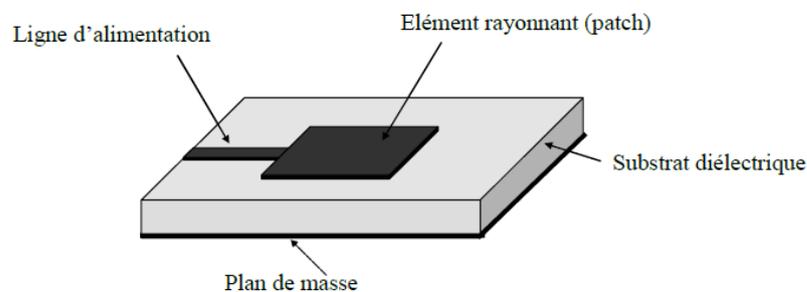


Figure I-7 : Alimentation par ligne micro ruban [15].

Cette technique d'alimentation peut se faire soit par connexion directe dont le point de jonction est sur l'axe de symétrie de l'élément rayonnant (figure I-8. a) ou décalé par rapport à

cette axe (Figure I-8. b), soit en créant une encoche au niveau du point d'alimentation (figure I-8. c) [16].

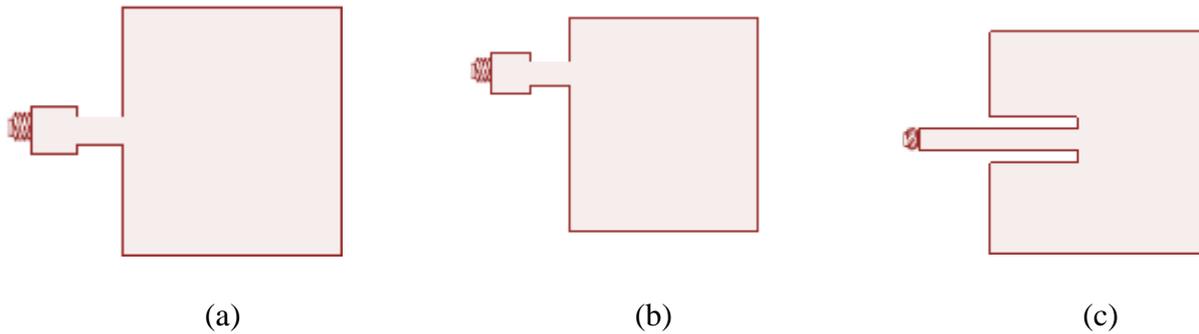


Figure I-8 : Alimentation par ligne micro ruban, (a) Axial, (b) Décalée, (c) Axiale avec encoche [16].

Il s'agit donc d'une technique d'alimentation relativement simple car elle offre une facilité de fabrication, une simplicité de modélisation et une bonne adaptation d'impédance [16].

I.4.2 Alimentation par la sonde coaxiale

Un autre moyen pour alimenter le patch consiste à placer une ligne coaxiale perpendiculairement au plan de masse comme le montre la Figure (I-9). Le conducteur central est soudé au plan métallique rayonnant (patch), alors que le conducteur extérieur est relié au plan de masse [15]. L'inconvénient de ce type d'alimentation réside dans la bande passante étroite et la difficulté de modélisation surtout pour des substrats électriquement épais [17].

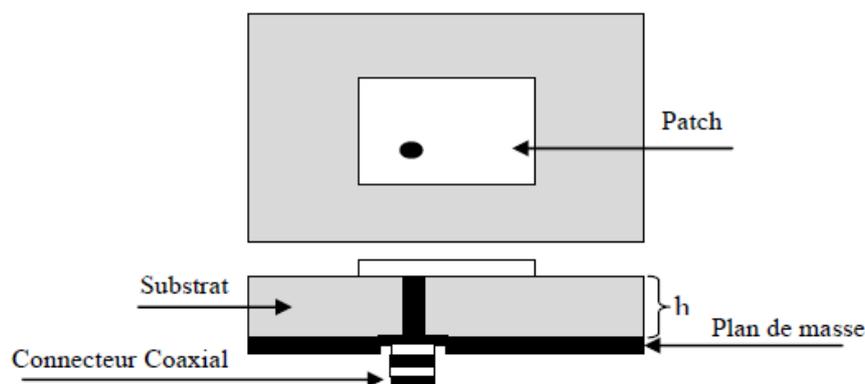


Figure I-9 : Antenne patch alimentée par câble coaxial [15]

I.4.3 Alimentation par couplage de proximité

Ce type d'alimentation est représenté sur la (figure I-10), deux substrats diélectriques sont employés tels que la ligne d'alimentation est entre les deux substrats et le patch de rayonnement est sur le substrat supérieur [5].

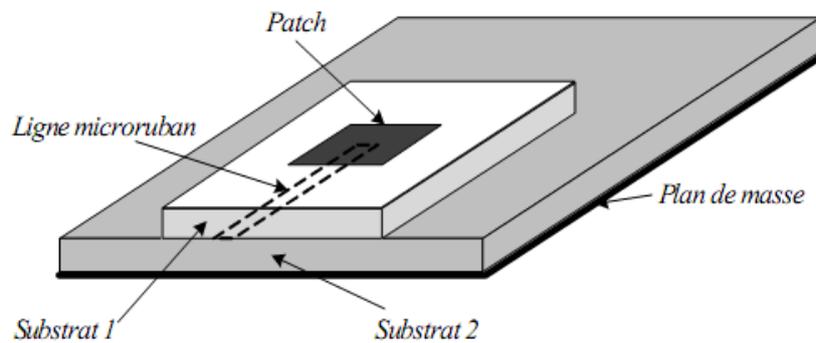


Figure I-10 : alimentation couplée par proximité [5].

L'adaptation peut être réalisée en contrôlant la longueur de la ligne d'alimentation. L'inconvénient principal de cette technique d'alimentation est qu'elle est difficile à fabriquer en raison des deux couches diélectriques qui nécessitent un alignement approprié. En outre, il y a une augmentation de l'épaisseur globale de l'antenne [18].

I.4.4 Alimentation couplée par fente (ouverture)

Dans la structure représentée à la Figure I-11, un plan de masse commun sépare la ligne micro bande d'alimentation, située en dessous, de l'antenne et l'élément imprimé, situé au-dessus. L'ouverture de couplage est habituellement centrée sous le patch. La quantité de couplage à partir de la ligne d'alimentation au patch est déterminée par la forme, la taille et l'emplacement de l'ouverture. Puisque le plan de masse sépare le patch et la ligne d'alimentation, le rayonnement parasite est minimisé [14].

L'inconvénient d'une telle technique est sa complexité de fabrication qui réside dans l'ouverture creusée dans le plan de masse et la réalisation de deux couches diélectriques.

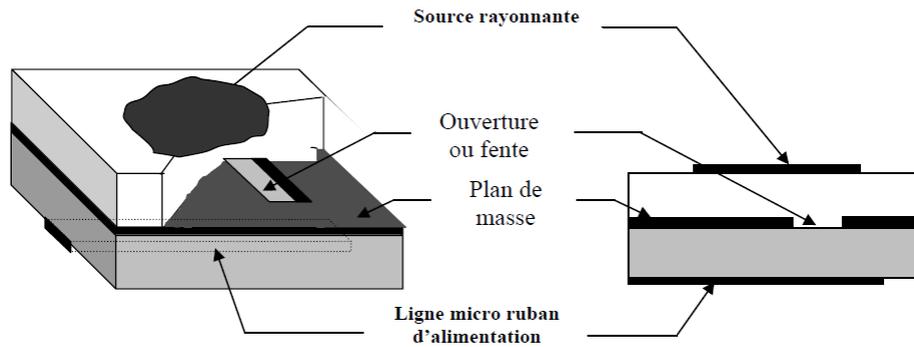


Figure I-11 : Alimentation par couplage électromagnétique à une ligne microbande à travers une fente dans le plan de masse [14].

I.4.5 Comparaison entre les différentes techniques d'alimentation

Caractéristiques	Alimentation par Ligne micro ruban	Alimentation coaxiale	Alimentation couplée par proximité	Alimentation couplée par ouverture
Rayonnement parasite de l'alimentation	Plus	Plus	Minimum	Moins
Fiabilité	Meilleur	Pauvres A Cause De Soudure	Bon	Bon
Facilité de fabrication	Facile	Soudure et forage requis	Alignement requis	Alignement requis
Adaptation d'Impédance	Facile	Facile	Facile	Facile
Bande passante (réalisé avec adaptation d'impédance)	2-5%	2-5%	13%	2-5%

Tableau I-1 : Comparaison entre les différentes techniques d'alimentation [6].

I.5 Techniques d'adaptation des antennes imprimées

Chaque système qui transforme l'énergie sur une ligne de transmission a besoin d'adaptation ; la ligne transforme l'impédance de charge en une autre valeur d'impédance au droit de la source. Ce que voit la source dépend donc de l'impédance de charge, de la longueur électrique de la ligne et de son impédance caractéristique [19].

I.5.1 Adaptation par ligne quart d'onde

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 [19].

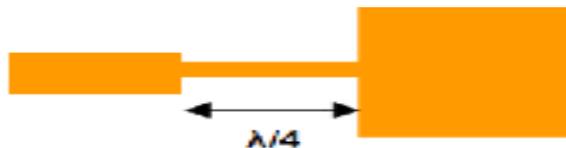


Figure I-12 : Adaptation par quart à adaptation quart d'onde [19]

I.5.2 Adaptation par stub

Une autre façon de procéder pour arriver à l'adaptation d'une charge quelconque consiste à utiliser un stub. Grâce à un stub en un circuit ouvert (open stub) ou en court-circuit (short stub). La solution retenue est généralement celle présentant le plus faible encombrement. Le raisonnement peut se faire en impédance mais il est plus facile de travailler dès le départ en admittance pour faire la somme des impédances parallèles ramenées [19].

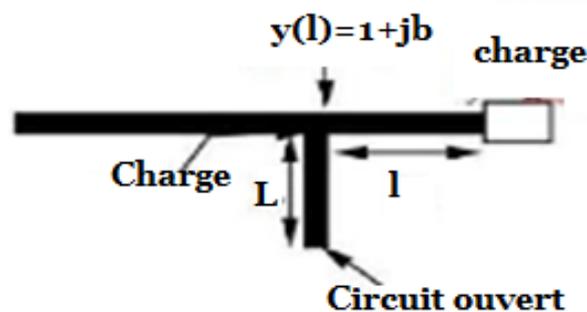


Figure I-13 : stub en circuit ouvert [19].

I.5.3 Adaptation avec encoche

Pour adapter l'antenne, on utilise des encoches, il suffit de modifier la géométrie du patch (Les dimensions des encoches) [19].

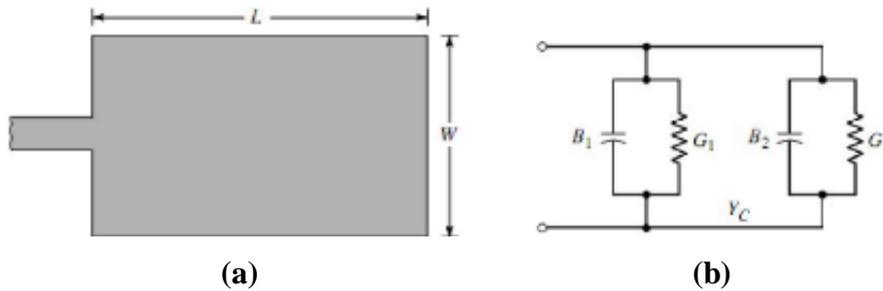


Figure I-14: (a) Patch rectangulaire [19], (b): L'équivalence en circuit [19].

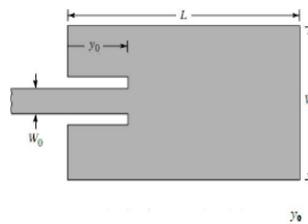


Figure I-15 : Patch adapté par encoches de longueur [19].

I.6 Réseaux d'antennes

Un réseau d'antennes est une association des différents éléments rayonnants. Le but du réseau d'antennes est d'atteindre des caractéristiques spécifiques, un gain élevé et/ou un lobe principal conformé [9].

I.6.1 Types de réseaux d'antennes

La Figure I-12 (a, b, c) montre trois types de réseaux d'antennes: réseaux linéaires, réseaux planaires et réseaux circulaires.

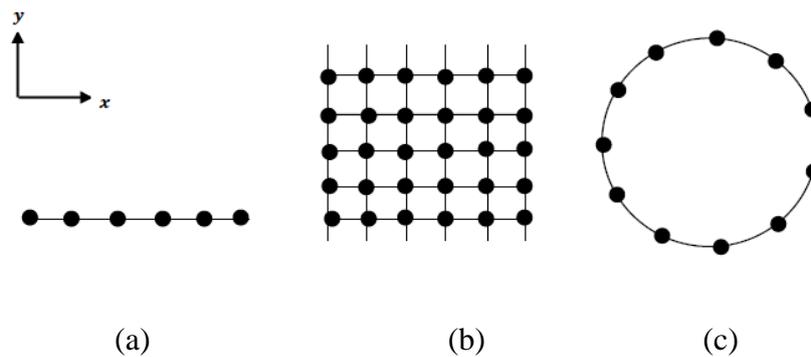


Figure I-16 : Différentes configurations géométriques des réseaux, linéaire (a), planaire (b) et circulaire (c) [20].

Antenne en réseau linéaire : Pour un réseau linéaire, les éléments rayonnants sont placés l'un après de l'autre par des déplacements parallèles sur une même droite comme montré dans la figure I-12.a.

Antenne en réseau plan : Pour un réseau plan, les éléments rayonnants se déduisent l'un de l'autre par des translations parallèles sur le même plan Figure I-12.b.

Antenne en réseau circulaire : Antenne constituée d'un groupement d'éléments rayonnants identiques dans lesquels chaque ensemble de points est placé sur un cercle Figure I-12.c [20].

I.6.2 Technique d'alimentation d'un réseau d'antenne patch

Dans le cas d'un réseau d'antennes patch, le principe de la répartition d'énergie se fait par des lignes micro rubans, où les déphaseurs, les diviseurs et les combineurs de puissance sont réalisés par des lignes micro ruban. Nous montrons sur la figure II-13, deux types d'alimentations d'un réseau d'antennes [21].

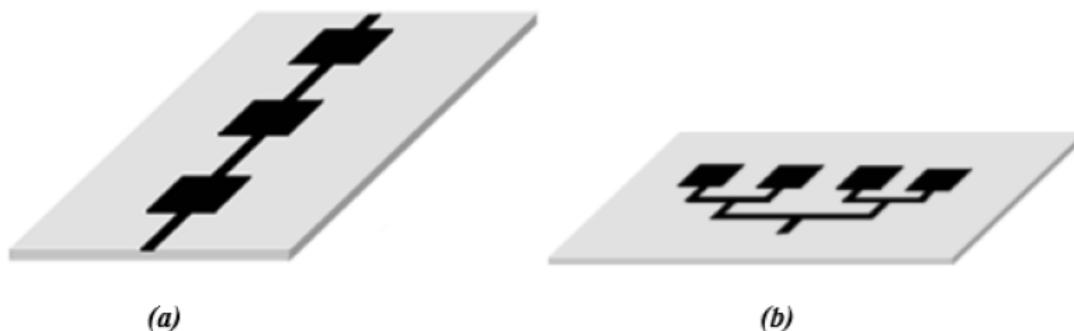


Figure I-17 : Alimentation d'un réseau d'antennes patch. (a)-série (b)-parallèle [21].

Alimentation série : les éléments rayonnants sont excités en série à travers une ligne de transmission. Entre deux éléments rayonnants consécutifs il y a un déphaseur qui permet d'imposer la loi de phase appropriée (Figure I-17.a).

Alimentation parallèle : le circuit d'alimentation possède une entrée et plusieurs sorties égales aux nombres des éléments rayonnants. La synthèse du réseau permet de déterminer les coefficients de pondération et les déphasages des signaux à affecter à chaque élément (Figure I-17.b) [21].

I.7 Avantages et inconvénients des antennes patches

Compte tenu de la structure plane des antennes imprimées, nous bénéficions donc de tous les avantages de la technologie des circuits imprimés. Comparées aux antennes conventionnelles, les avantages qu'on peut leur attribuer sont nombreux. Néanmoins, on se contentera de citer les plus attirants d'entre eux [18] :

- Faible poids.
- Faible encombrement.
- Faible épaisseur.
- Simplicité de réalisation et reproduction.
- Fort rendement d'ouverture.
- Polarisation variable simplement avec la position d'alimentation.
- Possibilité d'association à des éléments actifs ou passifs tels que : applicateurs,
- Modulateurs, déphaseurs, etc. . . .
- Possibilité de les conformer sur des surfaces non planes.

Comme les antennes microbandes ont des avantages; elles ont aussi quelques inconvénients comparées aux antennes micro-ondes classiques tels que [18,20] :

- Bandes passante très étroite.
- Gain faible dû aux pertes.
- Rendement faible (concentration des champs sur les parois métalliques).
- Effet de couplage parasite entre les éléments.
- Pureté de polarisation difficile à obtenir.
- Puissance supportée limitée.
- Rayonnement parasite de l'alimentation.

I.8 Conclusion

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

Dans notre travail, le choix s'est porté sur la technologie des antennes imprimées. Nous avons essayé à travers ce chapitre de présenter de façon concise, l'essentiel de la théorie des antennes patch. Tout d'abord, nous avons commencé par donner une description de ces antennes et leur principe de fonctionnement, nous avons cité quelques-unes de leurs applications et on s'est intéressé par la suite aux plus importantes techniques utilisées pour leur alimentation, à la fin nous avons parlé sur les réseaux d'antennes, leur type et les avantages et inconvénient des antennes patch.

Chapitre II : Généralités sur la Technologie 5G

II.1 Introduction

Les technologies radio ont commencé leur première étape pour connecter le monde entier en introduisant les systèmes cellulaires analogiques dans les années 1980. Par la suite, les technologies radio ont connu une évolution rapide avec le lancement des systèmes de communication sans fil numériques à différentes étapes, du système mondial de communications mobiles (GSM) à la technologie mobile de cinquième génération 5G [22].

La technologie 5G promet de faire évoluer le système de communication mobile avec ses caractéristiques, en particulier dans la bande passante très élevée. Il est prévu, les utilisateurs font l'expérience d'une énorme différence entre la technologie 5G et les générations mobiles précédentes, ce qui rend la technologie 5G plus puissante dans un avenir proche.

5G promet à ses utilisateurs de profiter à grande vitesse jusqu'à 1tera bps de taux de liaison sans fil, un plus large éventail d'applications, la connectivité partout, regarder des vidéos de haute qualité sur leurs téléphones portables, une consommation de batterie plus faible et beaucoup plus autour de l'année 2020.

II.2 Historique

Dans les années 1980, les réseaux mobiles de première génération (1G) ont été introduits. Les systèmes de signalisation 1G ont été conçus sur la base de transmissions analogiques.

Au début des années 1990, les réseaux mobiles de deuxième génération (2G) basés sur le système mondial de communications mobiles (GSM) ont été lancés. 2G est le point de départ de la communication numérique sans fil. La principale préoccupation du nouveau système concernait les problèmes de sécurité des systèmes de communication analogiques. Une autre nouveauté dans la conception du GSM a été l'utilisation de la modulation numérique pour améliorer la qualité de la voix, mais le réseau offre un service de données limité [22].

Une phase intermédiaire, le 2.5G, a été introduite à la fin des années 1990. Il utilise la norme General Packet Radio Services (GPRS), qui fournit des capacités de données commutées par paquets aux réseaux GSM existants. L'importance de la commutation par paquets a augmenté avec l'essor d'Internet et du protocole Internet (IP).

La troisième génération de systèmes mobiles (3G) est proposée dans les années 2000 pour fournir un accès Internet haute vitesse pour permettre aux clients de téléphonie mobile utilisant des applications vidéo et audio. L'un des principaux objectifs de la conception du système 3G

était de normaliser un protocole de réseau mondial unique au lieu des différentes normes adoptées précédemment en Europe, aux États-Unis et dans d'autres régions

Le système mobile de quatrième génération (4G) offert en 2010 promettait d'offrir un taux de transmission pouvant atteindre 20 Mbps. Le concept de qualité de service (QoS) a reçu plus d'attention dans le système 4G. QoS permettra aux entreprises de téléphone de prioriser le trafic en fonction du type d'application utilisant la bande passante et de régler les différents besoins téléphoniques à tout moment. Haute qualité vidéo et audio streaming sur le protocole Internet de bout en bout est la plus attraction de la 4G. Il existe deux normes importantes dans les technologies 4G : Interopérabilité mondiale pour l'accès aux micro-ondes (WiMax) et Long Terme Evolution (LTE) [22].

Le système mobile de cinquième génération (5G) réaliser les énormes promesses faites par la 5G en termes de débit de données élevé, faible latence, faible consommation d'énergie et bien plus encore.

C'est un grand pas en avant sur cette route et personne ne sait si cette étape permet à l'humain d'atteindre le sommet des communications sans fil ou s'il y a encore un long chemin à parcourir.

Le secteur des télécommunications connaît une nouvelle génération de réseaux mobiles presque tous les 10 ans depuis l'avènement de l'1G. L'introduction de toute nouvelle génération mobile se fait en assignant de nouvelles bandes de fréquences et une large bande passante spectrale par canal de fréquences. Le tableau (II-1) montre l'évolution des différents systèmes de télécommunications et de leur bande passante spectrale correspondante [22].

Génération	1G	2G	3G	4G	5G
1 ère année de déploiement	1981	1992	2001	2010	2020
Débit de données	2 Kb/s	64 Kb/s	2 Mb/s	100 Mb/s	10 Gb/s
Fréquences	900 MHz	900 MHz et 1,8 GHz	800/900MHz 1,7 à 1,9GHz 2100 MHz	800MHz 900MHz 1800MHz 2100MHz 2600MHz	28GHz 37 GHz 39 GHz 64 – 71 GHz
Description fonctionnelle 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 - Améliorer le réseau de communication M2M

Tableau II-1 : Comparaison entre les différents générations 1G, 2G, 3G, 4G, et 5G [23].

II.2.1 La 5ème génération

La 5G, (réseau mobile de cinquième génération) appelée aussi systèmes sans fil de cinquième génération, applique la prochaine génération de normes de télécommunication mobile. Voici quelques-unes des principales attentes du réseau 5G pour améliorer le réseau de télécommunications. Tout d’abord, le réseau 5G vise à fournir un taux de données très élevé pour un grand nombre d’utilisateurs. Deuxièmement, il vise également à prendre en charge plusieurs connexions simultanées pour déployer un nombre massif de capteurs. Par rapport à la 4G, ils devraient être une amélioration notable de l’efficacité spectrale du réseau 5G [24].

D'autres paramètres qui devraient être améliorés dans la 5G comprennent un débit binaire de pointe plus élevé, la manipulation d'un plus grand nombre d'appareils connectés simultanément, une efficacité spectrale plus élevée, une consommation de batterie plus faible, une panne plus faible probablement (meilleure couverture), un débit binaire élevé dans de plus grandes parties des données de couverture, des latences plus faibles, un nombre plus élevé d'appareils pris en charge, Réduction des coûts de déploiement des infrastructures et amélioration de la fiabilité de la communication.

II.2.2 La Révolution Des Fréquences Millimétrique

Les fréquences prévues pour la 5G peuvent être divisées en trois grandes catégories : les fréquences basses (<1 GHz), les fréquences moyennes (entre 1 et 6 GHz) et les plus hautes (au-dessus de 20 GHz).

Les deux premières bandes de fréquence sont déjà partiellement exploitées par les précédentes générations (2G/3G/4G) mais aussi par le WiFi et d'autres technologies.

Elles représentent un bon compromis entre débit et capacité de couverture. Ces fréquences portent le qualificatif « millimétriques », en rapport à leur longueur d'onde de l'ordre du millimètre. L'exploitation de ces hautes fréquences permet d'obtenir de très hauts débits, mais les faibles longueurs d'onde sont plus sensibles aux perturbations et pénètrent difficilement les bâtiments.

Elles seront donc utilisées pour couvrir des zones de faible superficie mais nécessitant des débits très élevés ou rassemblant de nombreux utilisateurs. On parle de « small cells » [25].

II.2.3 La 5G millimétrique

La 5G millimétrique déployé sur la bande fréquence 24 à 30GHz (26 GHz en France), cette technologie offre un débit beaucoup plus important à cause de leur très haut fréquence, cette dernière peut aller jusqu'à 10 Gbit/s soit 500 fois une connexion ADSL [26].

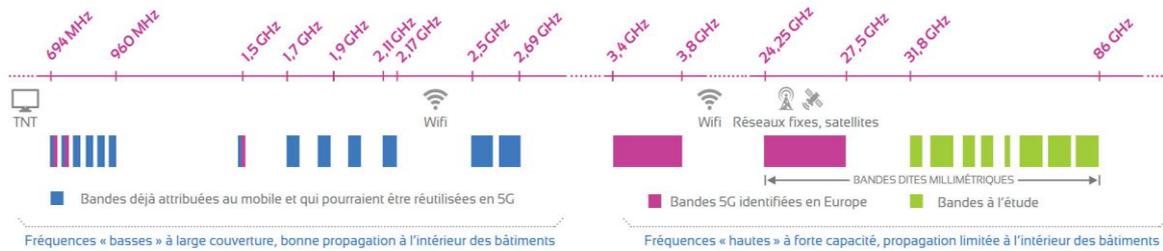


Figure II-1 : le spectre de fréquence en téléphonie mobile [26].

II.2.4 Famille D’usage De La 5G

Les spécifications de la 5G selon l'Union internationale des télécommunications (UIT) ont identifié trois grandes catégories d’usages, avec leurs exigences respectives et potentiellement incompatibles entre elles :

Communications de type machine massive (mMTC) : Le mode mMTC (mMTC massive Machine Type Communication) conjugue une couverture étendue et une pénétration profonde à l’intérieur des bâtiments pour un très grand nombre d’appareils connectés (jusqu’à 1 million par kilomètre carré). Ce cas d’utilisation répond aux exigences d’un Internet des objets mobile en pleine croissance avec des technologies LPWA (Low Power Wide Area) qui conjuguent une consommation d’énergie peu élevée, une couverture améliorée et des transmissions optimisées pour des blocs de données compacts et intermittents [25].

Communications ultra-fiables et à faible latence (URLLC) : La technologie URLLC (Ultra-Reliable Low-Latency Communication) convient aux applications hautement critiques qui exigent des temps de latence de bout en bout extrêmement faibles (1 ms, voire moins), ainsi qu’un haut niveau de fiabilité et de disponibilité [25].

Le haut débit mobile amélioré (eMBB) : Le mode eMBB (enhanced Mobile Broadband) il sert d'améliore l’accès à Internet sans fil et soutient les tendances de consommation de streaming et de contenu vidéo à grande échelle. Les consommateurs vont bénéficier directement de l’eMBB, mais les nouveaux cas d’utilisation de la 5G dépassent le domaine de la consommation et vont façonner l’avenir d’industries complètes [27].

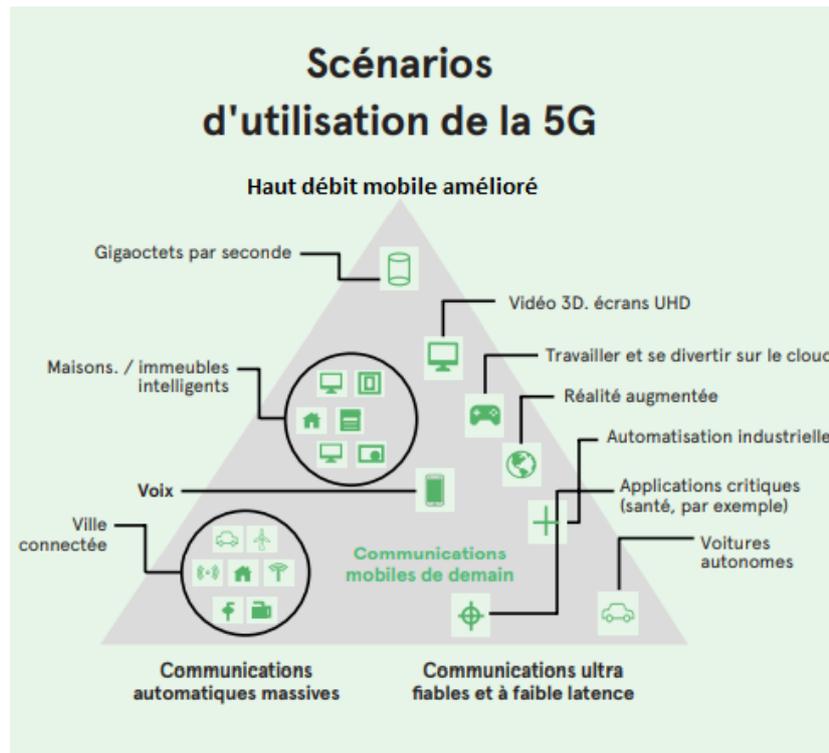


Figure II-2 : La famille d'usage de la 5G [28].

II.2.5 Les Applications de la 5G

Avec l'avènement de la 5G, chaque type de communication sera grandement affecté. Regardons les motivations pour chercher le nouveau réseau appelé 5G. Il est clair que l'augmentation de la demande pour des connexions à haut débit, la nécessité d'augmenter le volume de données sur les réseaux sans fil, la demande pour un service de meilleure qualité et un prix plus bas sont parmi les facteurs qui ont conduit au réseau 5G [24].

Les réseaux mobiles, les soins de santé, la vidéo et l'audio sur Internet, les jeux, la surveillance de la sécurité et divers aspects de notre vie profiteront du réseau 5G. Il jouera également un rôle important dans les affaires, l'industrie, les écoles et les collèges, dans la vie des médecins, des pilotes et de la police, dans les véhicules et dans de nombreux autres domaines de notre vie [24]. L'un des plus grands avantages de la 5G est sa capacité à établir un réseau mondial. Ce réseau mondial est basé sur l'utilisation de toutes les communications disponibles. Pensez à la disponibilité de dispositifs portables dotés de capacités d'intelligence artificielle, qui peuvent nous aider à surveiller les activités de notre corps, comme la variabilité de la fréquence cardiaque, la pression artérielle et les activités du cerveau, et à établir une communication en ligne avec un centre de santé... centre de soins. La 5G vise à apporter une telle contribution au monde [24].

II.3 Les technologies Émergentes Pour réseaux 5G

Dans les réseaux 5G, il est préférable de fournir un débit de données basé sur plusieurs gigabits par seconde pour la communication, en utilisant des nouvelles technologies comme : MIMO massive et les ondes millimétrique. Dans ce qui suit nous décrivons brièvement les principes de chaque une de ces nouvelles technologies [29].



Figure II-3 : Techniques utilisées dans la technologie 5G [29].

III.3.1 Les ondes millimétriques

Les ondes millimétriques sont des ondes radioélectriques qu'ont une longueur d'onde resserrée, allant de 1 à 10 mm. En principe, leur fréquence va de 30 à 300 GHz mais l'Arcep explique que l'on peut parler de bandes millimétriques lorsqu'elles sont supérieures à 24 GHz. Cette tranche est nommée EHF (extrêmement haute fréquence) [30].

L'utilisation de bandes millimétriques constitue l'une des technologies de rupture de la 5G. Cette appellation correspond aux fréquences supérieures à 6 GHz qui n'ont encore jamais été prises en compte pour le déploiement des réseaux mobiles pour des raisons de maturité technologique et de qualité de propagation. Pour répondre à l'incessante augmentation des débits et des volumes de données échangés, il est nécessaire d'utiliser de nouvelles bandes disposant de très larges canalisations (plus de 100 MHz par utilisateur) : les bandes millimétriques pourraient offrir de telles réserves de spectre et leur utilisation permettrait d'atteindre dans certains cas [30].

En particulier, à cause de la faible qualité de propagation des ondes millimétriques, chaque cellule aura une couverture réduite, ce qui nécessitera la mise en place de techniques de beamforming, décrites ci-dessous, pour mieux focaliser l'énergie transmise par les antennes [30].

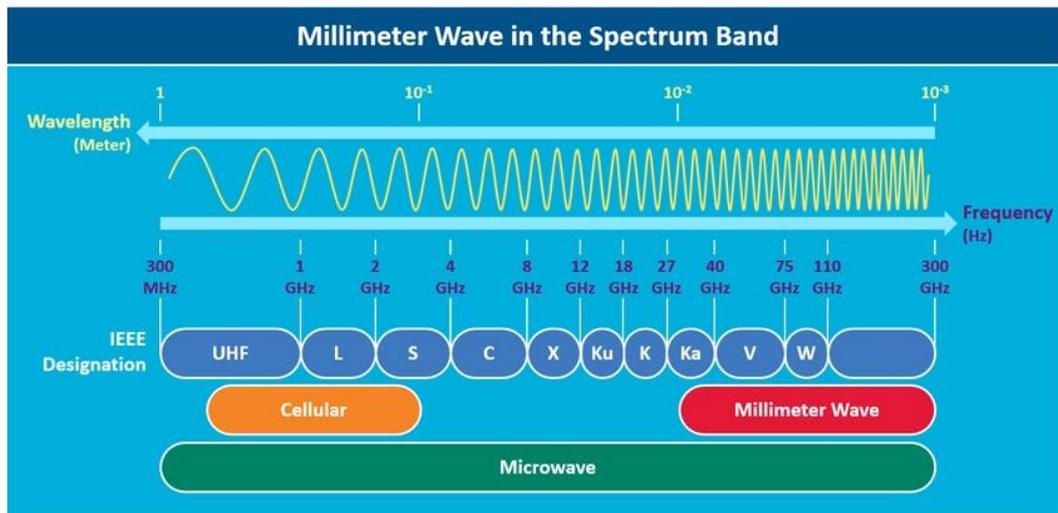


Figure II-4 : spectre de fréquence (ondes millimétriques) [22].

III.3.2 Les micros-celles

Un dispositif qui offre l'augmentation de l'efficacité spectrale de la zone d'un 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 [18].

III.3.3 Beamforming

La technique du beamforming (filtrage spatiale) consiste à focaliser un signal sans fil vers un dispositif de réception spécifique, au lieu de le diffuser dans toutes les directions à partir d'une antenne radio, comme c'est habituellement le cas. La connexion, plus directe, est plus rapide et plus fiable qu'elle ne le serait sans formation de faisceau [31].

III.3.4 Full-Duplex

Dans les systèmes classiques, l'émission et la réception se font soit sur des bandes de fréquences différentes (duplexage en fréquences dit FDD, « fréquence division duplexing » utilisé sur toutes les bandes des réseaux mobiles français) soit à des instants différents (duplexage temporel dit TDD, time division duplexing, pressenti pour les réseaux de boucle locale radio LTE en France). Le full duplex ambitionne de permettre l'émission et la réception simultanée d'information, sur les mêmes fréquences, au même moment et au même endroit.

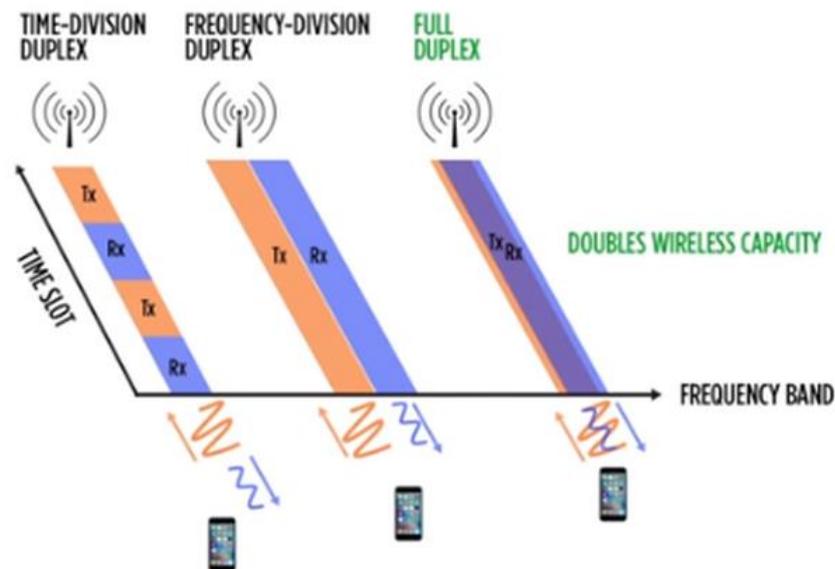


Figure II-5 : Illustration du full-duplex, comparé au FDD et TDD [32].

III.3.5 Le Massive MIMO

Multiple Inputs - Multiple Outputs : cette technologie se caractérise par l'utilisation d'un nombre élevé de micro antennes « intelligentes », situées sur le même panneau (de 8 à 128 actuellement, mais le nombre augmentera avec l'utilisation de fréquences supérieures à 6 GHz). L'attrait de l'utilisation du massive MIMO est double :

D'une part, cette technologie permet d'augmenter les débits, grâce au multiplexage spatiotemporel ; d'autre part, elle permet de focaliser l'énergie sur un terminal, pour améliorer son bilan de liaison, grâce à la formation de faisceau, ou beamforming [34].

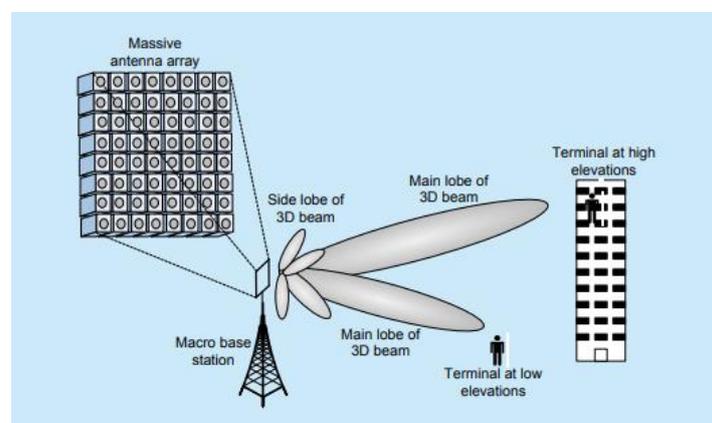


Figure II-6 : Un réseau 5G MIMO Massive [35].

II.4 Vision de 5G

Les générations précédentes de systèmes mobiles n'avaient pas de vision en tant que telle. Ils visaient à résoudre les problèmes avec la génération précédente et à fournir une connectivité plus rapide. La discussion dans la partie précédente a porté sur les questions de fournir des solutions plus rapides et de plus grande capacité, en supposant que celles-ci seront au cœur de la 5G. Toutefois, contrairement aux générations précédentes, les promoteurs de la 5G ont présenté une vision des nouveaux services, dont certains portent sur la vitesse et la capacité et d'autres sur des capacités particulières. Pour ce faire, il a été suggéré que la 5G devrait répondre à un ou plusieurs des critères suivants :

- Connectivité pour plusieurs appareils et services avec une couverture géographique de 100 %.
- La capacité de combiner les signaux provenant de multiples bandes de fréquences (UHF ultrahaute fréquence jusqu'à des bandes d'ondes millimétriques) de façon plus souple en fonction de l'emplacement, du temps et de l'application pour permettre une connectivité plus stable. Faible latence pour prendre en charge les services ou applications dont les besoins ne peuvent être satisfaits à l'aide des technologies existantes.
- Le regroupement de multiples plateformes de prestation sous un seul « parapluie ».
- Capacité à soutenir la fourniture de services à très haut débit.
- La technologie pour soutenir un large éventail de services différents qui nécessitent des solutions différentes.

II.5 Conclusion

La 5G avec les fonctionnalités susmentionnées va révolutionner le marché d'un système sans fil. Le concept de super-noyau sera renforcé par la 5G dans laquelle tous les opérateurs de réseau seront connectés via un seul et même noyau et disposeront d'une seule infrastructure quelles que soient leurs technologies d'accès. Le réseau 5G sera une combinaison de plusieurs technologies améliorées pour répondre aux exigences de l'établissement d'un réseau plus efficace avec une plus grande capacité et une meilleure qualité de service.

Et pour concevoir un réseau avec une telle qualité et une telle capacité, un réseau qui est intensive avec de petites cellules est la clé.

Chapitre III : Simulations et Résultats

III.1 Introduction

Le but de ce chapitre est de concevoir et simuler un réseau d'antenne patch pour la technologie 5 G millimétrique utilisant le logiciel CST Microwave. Cette dernière doit travailler dans la bande [24.5-27.5] GHz. Nous présentons les résultats des simulations réalisés de notre antenne proposée en termes de coefficient de réflexion, le taux des ondes stationnaires (VSWR), le gain, le diagramme de rayonnement, et la densité de courant. Et nous terminons ce chapitre par une conclusion.

III.2 Choix de l'outil de simulation

CST MICROWAVE STUDIO est un outil spécialisé pour la simulation et la conception électromagnétique trois dimensions (3D) des composantes hautes fréquences. Il simplifie le processus de saisie de la structure et la définition des équipements en fournissant une interface graphique de modélisation puissante et solide. Après la modélisation du composant, une procédure de maillage automatique peut être appliquée avant que le moteur de simulation ne soit lancé [36].

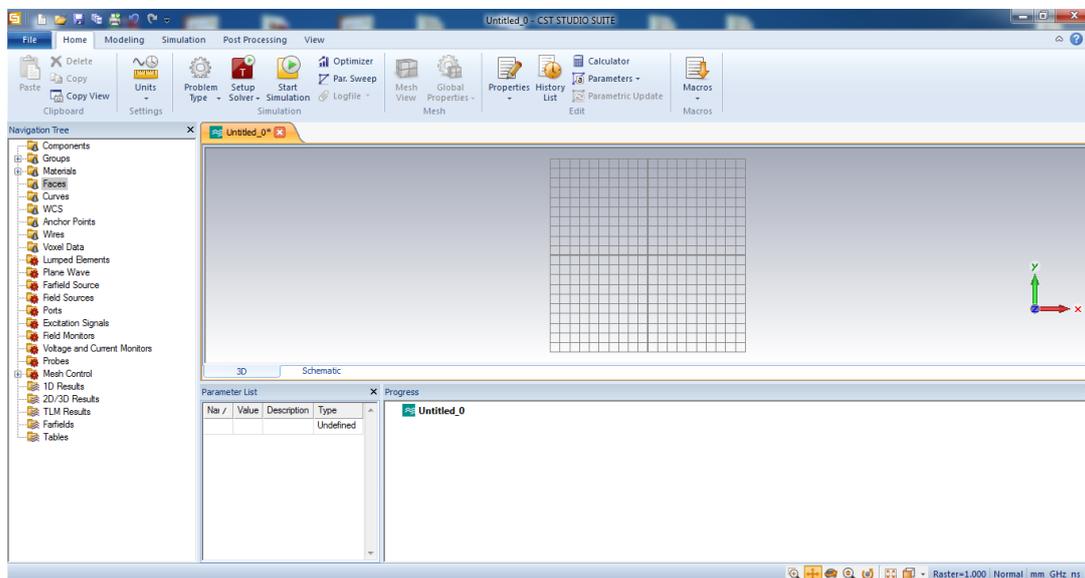


Figure III-1 : Espace de travail CST Microwave Studio.

III.3 Conception de l'antenne patch rectangulaire pour la 5G millimétrique

III.3.1 Géométrie de base

Dans ce travail, nous avons choisi une antenne patch rectangulaire tel que le montre la Figure III.2. Elle est alimentée par une la ligne microruban (50Ω). Le substrat utilisé est de type FR04, de permittivité $\epsilon_r = 4.3$ et d'une épaisseur $h=1.5\text{mm}$, Le plan de masse et le patch de type matériaux Copper (annealed). La Figure (III-2) nous présente la structure d'une antenne patch rectangulaire simple.

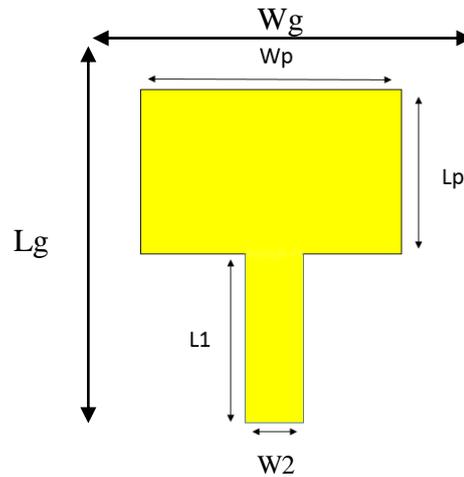


Figure III-2 : Antenne patch rectangulaire.

Les paramètres de l'antenne patch rectangulaire sont donnés sur le **tableau III-1**

Paramètre de l'antenne patch rectangulaire		Equations
Patch	La largeur	$W_p = \frac{c}{2fr} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}}$
	Constant diélectrique (ϵ_{eff})	$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[1 + 12 \frac{h}{w} \right]^{-\frac{1}{2}}$
	La longueur	$L_p = \frac{c}{2fr\sqrt{\epsilon_{eff}}} - 2\Delta L$
	L'extension de la longueur (ΔL)	$\frac{\Delta L}{h} = 0.412 \frac{(\epsilon_{eff} + 0.3) \left(\frac{w}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon_{eff} - 0.258) \left(\frac{w}{h} + 0.8 \right)}$
Substrat et plan de masse	La longueur	$L_g = L_p + L + (6 \times h)$
	La largeur	$W_g = W_p + (6 \times h)$
La longueur de la ligne	Simple	$L = \frac{\lambda}{2} = \frac{c}{2fr\sqrt{\epsilon_{eff}}}$
	Quart d'onde	$L = \frac{\lambda}{4} = \frac{c}{4fr\sqrt{\epsilon_{eff}}}$
La largeur de la ligne	Simple	$W = \frac{8 e^A}{e^{2A} - 2} \times h$, avec $A = \frac{Z_c \sqrt{2(\epsilon_r + 1)}}{120} + \frac{1}{2} \left(\frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1} \right)$

Tableau III-1 : Equations de calculs des paramètres de l'antenne patch rectangulaire [37].

Tel que :

ϵ_{eff} : Permittivité effective du substrat

h : l'épaisseur du substrat

fr: Fréquence de résonance.

Les valeurs des paramètres de l'antenne patch initiale sont mentionnées dans le **tableau III-2** qui est calculées à partir des équations du **tableau III-1**

Paramètres	Dimensions (mm)
Wp	3.54
Lp	1.95
Wg	10
Lg	6

Tableau III-2 : Les valeurs des paramètres d'antenne initiale.

III.3.2 Résultats de simulation

III.3.2.1 Paramètre de réflexion S [1,1]

Nous allons représenter le coefficient de réflexion S11, qui va nous permettre de visualiser le niveau d'adaptation et la bande passante à la fréquence de résonance entre [24.5-27.5] GHz pour cette antenne patch rectangulaire.

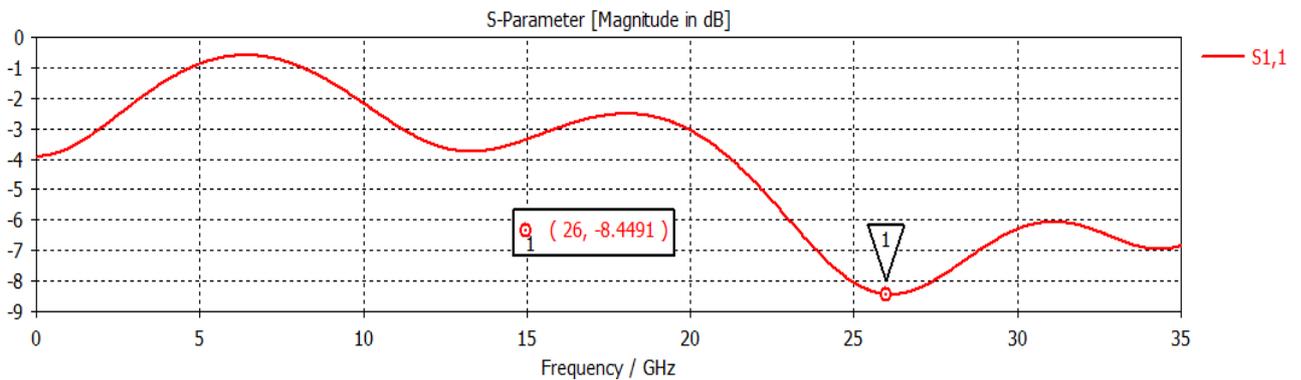


Figure III-3 : Coefficient de réflexion S11.

Nous remarquons bien d'après la Figure III-3 que l'antenne n'est pas adaptée à la fréquence 26GHz, le S11 est de -8.4491dB.

III.3.2.2 Adaptation de l'antenne patch par la 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 micro-ruban et l'extrémité du patch comme le montre la Figure III-4.

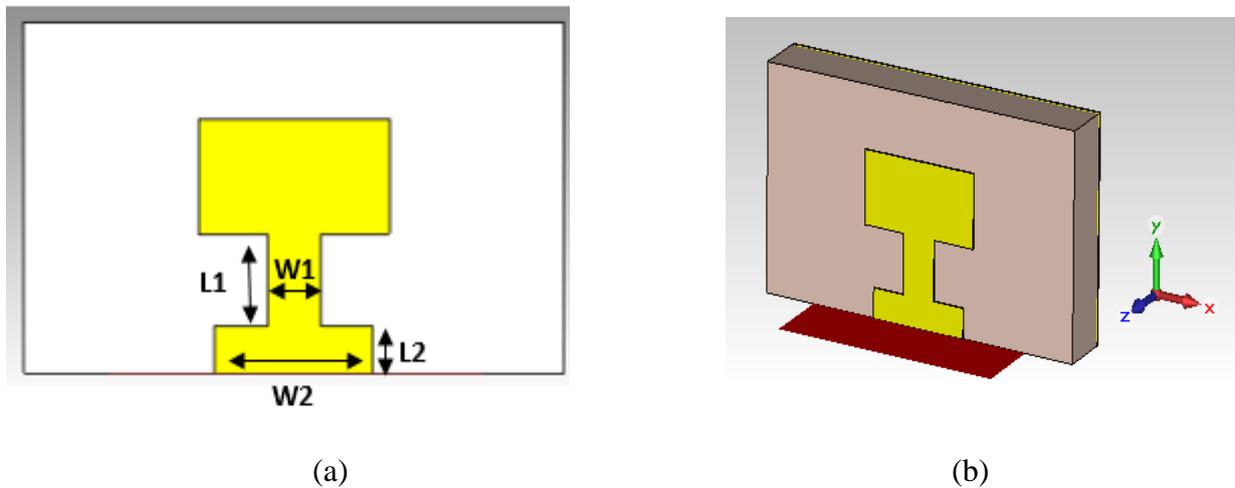


Figure III-4 : Antenne patch alimentée par une Ligne quart d'onde.

Tableau III-3 montre les dimensions de paramètre ligne quart d'onde.

Tableau III-3 : Les valeurs des paramètres de la ligne quart d'onde.

Paramètre	Dimensions (mm)
L1	0.8
L2	1.58
W1	1
W2	2.92

La Figure III-5 montre le paramètre S11 de notre antenne patch :

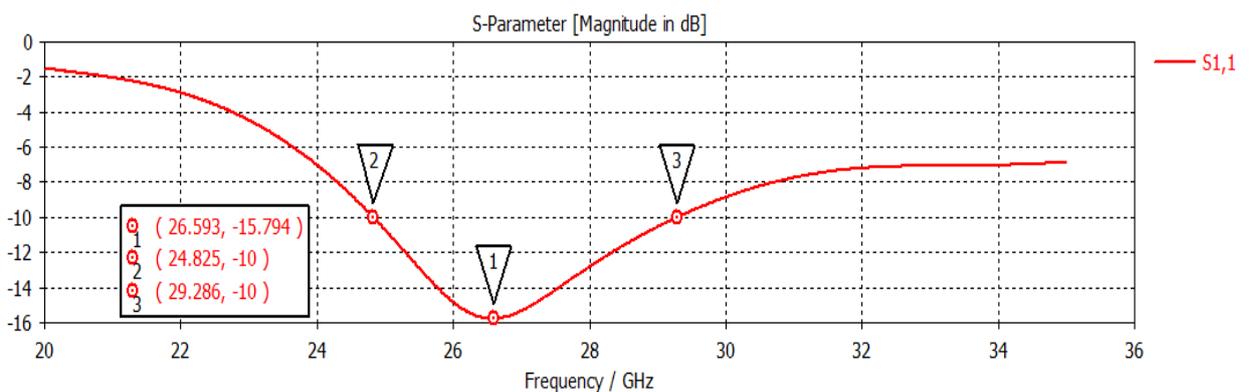
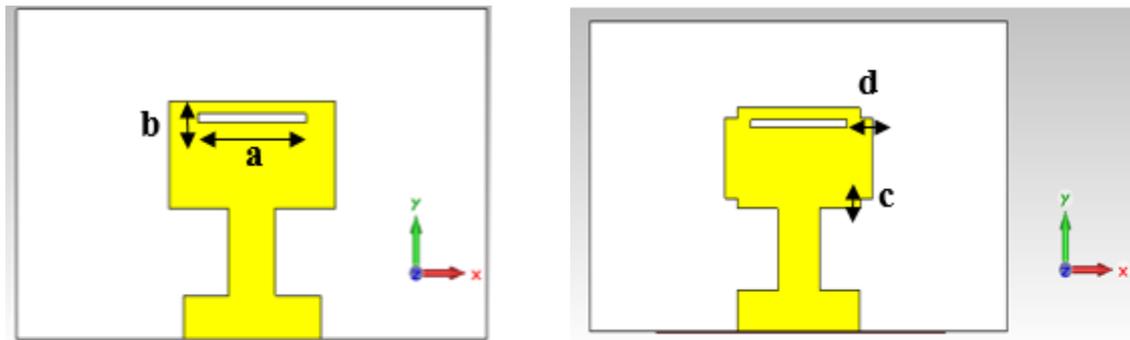


Figure III-5 : Coefficient de réflexion S11 de l'antenne patch adapter par ligne quatre d'onde.

La Figure III-5 donne un coefficient de réflexion S11 de -15.7 dB à la fréquence 26.59 GHz. Nous allons essayer dans ce qui suis d'adapter encore plus la résonnance de l'antenne patch à la fréquence 26GHz avec l'usage des fentes et des encoches sur le patch.

III.3.2.3 Adaptation de l'antenne avec insertion des fentes et encoches sur le patch

Pour améliorer l'adaptation de notre antenne nous allons insérer une fente au milieu et des encoches au niveau du patch de l'antenne proposée comme le montre la Figure III-6.



(a) antenne patch avec fente dans le milieu (b) antenne patch avec des encoches

Figure III-6 : L'antenne patch proposée

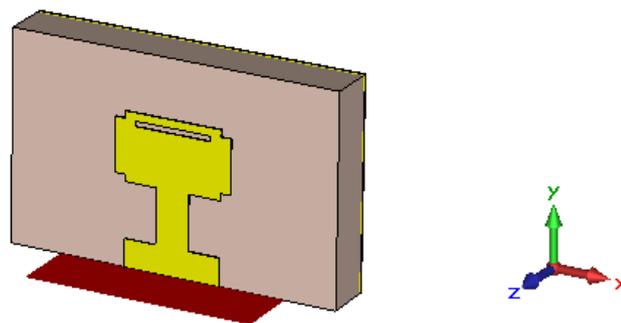


Figure III-7 : L'antenne patch proposée 3D.

<i>Paramètre</i>	<i>Dimensions (mm)</i>
a	2.3
b	0.15
c	0.2
d	0.3

Tableau III-4 : Les valeurs des paramètres de fente et des encoches.

a. Coefficient de réflexion S [1,1]

Les Figures III-8 et III-9 montre Le coefficient de réflexion obtenu avec le logiciel CST.

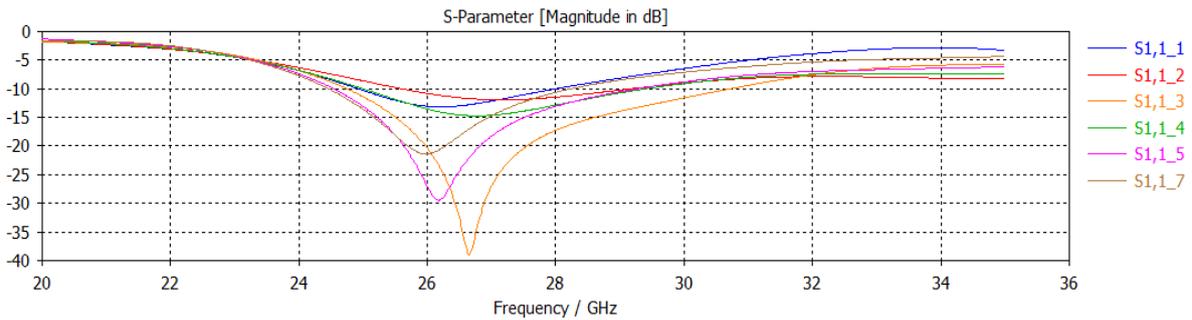


Figure III-8 : L'étude paramétrique des encoches et fente.

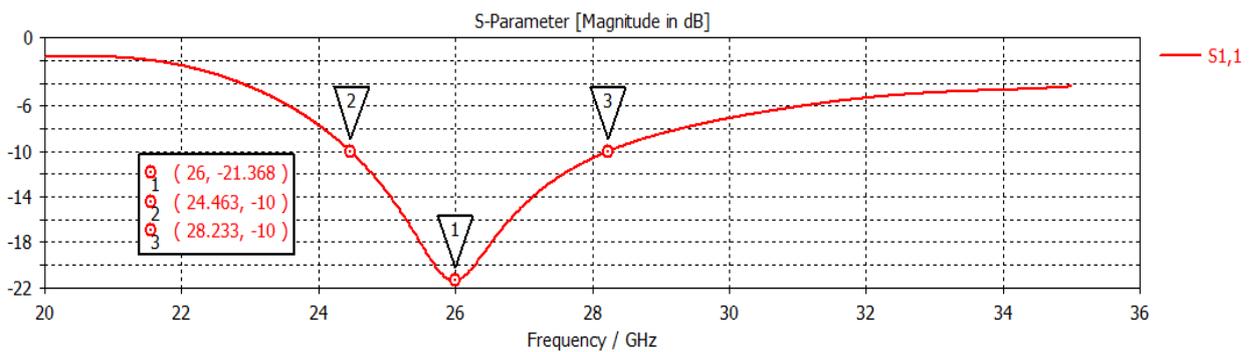


Figure III-9 : Coefficient de réflexion S11 de l'antenne patch proposée.

La Figure III-9 montre que l'antenne patch proposée résonne à la fréquence 26GHz avec un S11 de -21.368 dB. Une large bande est de 3.77 GHz autour de la fréquence de résonance (26 GHz) dans l'intervalle (24.463 - 28.233) GHz. L'antenne patch proposée est adaptée à la norme 5G millimétrique.

b. Le Gain

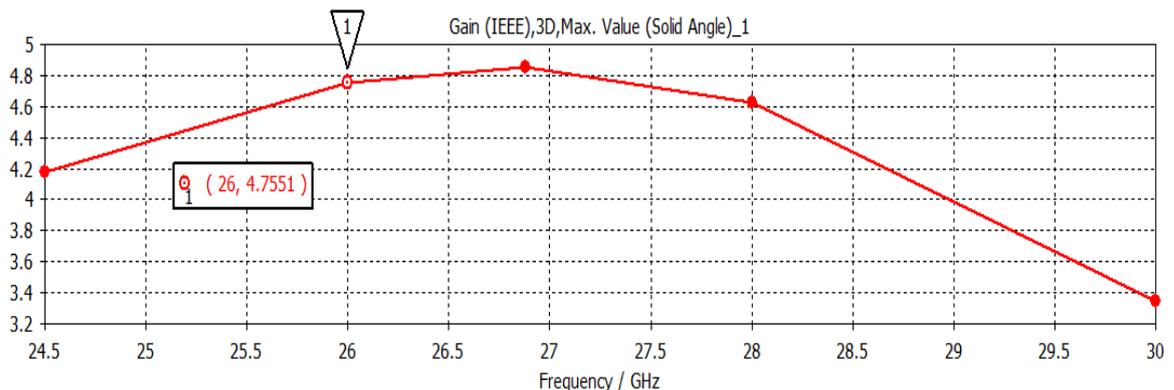


Figure III-10 : Le gain.

La Figure III-10 donne un gain de 4.7551 dBi à la fréquence de résonance 26GHz.

c. Diagramme de rayonnement

Dans la Figure III-11, on trace le diagramme de rayonnement du gain en coordonnées polaires à la fréquence 26 GHz.

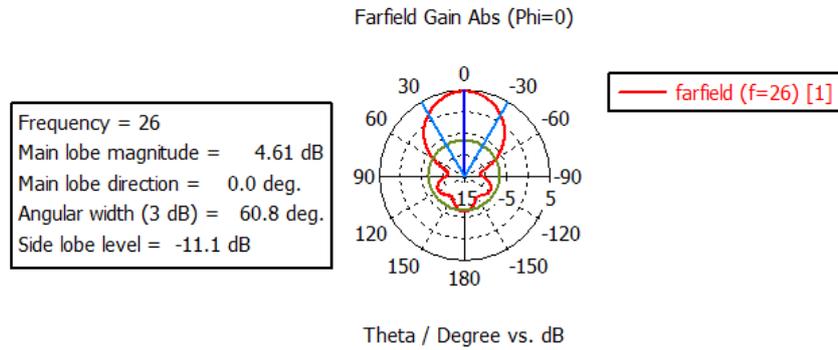


Figure III-11 : Diagramme de rayonnement polaire de l’antenne à la fréquence 26 GHz.

La Figure III-12 illustre le diagramme de rayonnement en 3D à la fréquence 26 GHz.

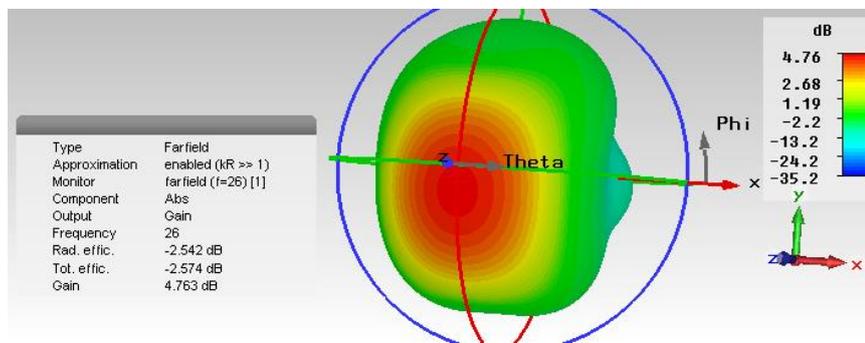


Figure III-12 : Le diagramme de rayonnement en 3D.

d. Rapport d’onde stationnaire (VSWR)

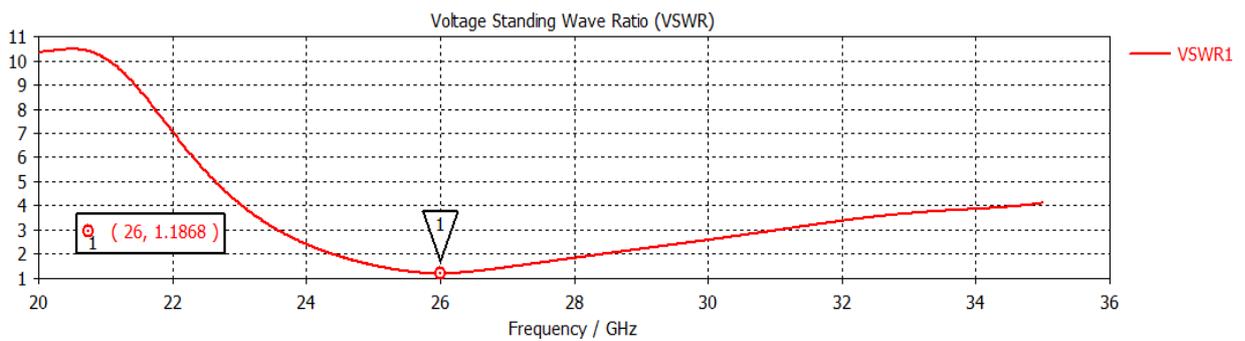


Figure III-13 : Rapport d’onde stationnaire (VSWR).

Le VSWR de la Figure III-13 à la fréquence 26GHz est de 1.1868, ce qui montre une bonne adaptation d'impédance entre l'antenne et la ligne de transmission.

e. La Densité du courant de l'antenne patch

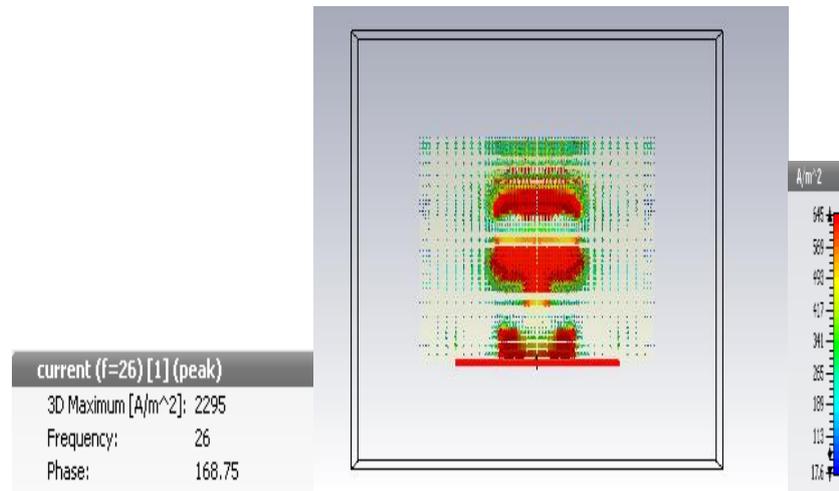


Figure III-14 : La densité du courant de patch.

Nous avons remarqué que le courant est concentré sur le patch à côté des encoches et sur la fente au milieu de patch, cela indique que cette antenne envoie un rayonnement d'une manière acceptable.

La Figure III-14 montre bien la distribution de courant sur toute l'interface de l'antenne patch rectangulaire proposée.

- Les paramètres précédemment analysés de l'antenne patch proposée pour la bande des 26 GHz sont résumés dans le tableau III-5.

Paramètres	Valeur
Paramètre de réflexion S11	S11 = -21.368 dB
Gain	G = 4.755 dBi
VSWR	1.186
Bande passante (BW)	BW= 3.77GHz à S11 = -10 dB

Tableau III-5 : Paramètres fondamentaux de l'antenne à 26GHz.

III.3.2.4 Simulation du Réseau d'antennes pour la Bande des 26 GHz

Nous avons mis l'accent sur la conception d'une antenne imprimée à patch unique qui résonne à la fréquence des 26 GHz pour une application de la cinquième génération. Les attentes de la 5G nécessitent beaucoup plus de gain. Pour répondre à ceci, nous devons augmenter le gain total de l'antenne. Pour se faire nous passons la mise en réseau de huit antennes, en utilisant l'antenne proposé.

a. Structure de réseau d'antenne de 8 éléments

Dans le cadre de ce travail, un réseau d'antenne patch rectangulaire de 8 éléments avec substrat FR04 a été conçu et simulée à une bande de fréquence de [24.5-27.5] GHz sous le CST Microwave studio. Le FR04 utilisé pour concevoir le réseau d'antennes ayant une constante de diélectrique (ϵ_r) égale à 4,3 et d'une épaisseur $h = 1.5$ mm, comme montré dans la Figure III-15, Les éléments de patch micro ruban sont disposés avec un espacement entre 0.4λ à 0.9λ pour concevoir un réseau d'antennes de 8 éléments.

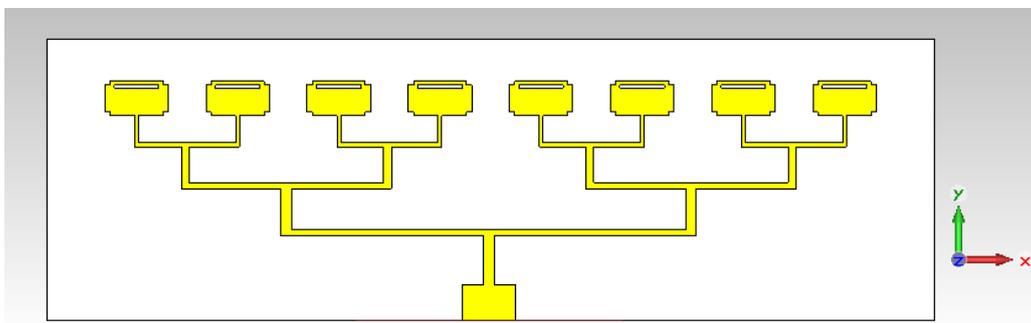


Figure III-15 : Structure du réseau d'antenne de 8 éléments.

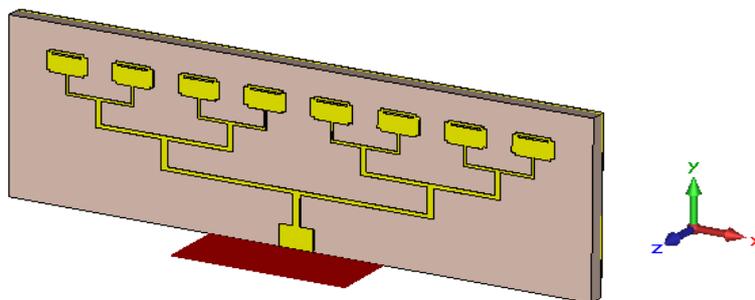


Figure III-16 : Structure du réseau d'antenne de 8 éléments 3D.

Le tableau III-6 montre les valeurs des principaux paramètres suivis dans la conception de notre réseau antennaire proposé.

Paramètres	Ls (Longueur du substrat et du plan de masse)	Ws (Largeur du substrat et du plan de masse)	h (Epaisseur de substrat)	0.4λ a 0.9λ (l'espace entre les 2 éléments (2 patch))
Valeur (mm)	15.8 mm	49.55mm	1.5 mm	$0.49 \lambda = 5.65\text{mm}$

Tableau III-6 : paramètres du réseau d'antennes patch.

b. Coefficient de réflexion S [1,1]

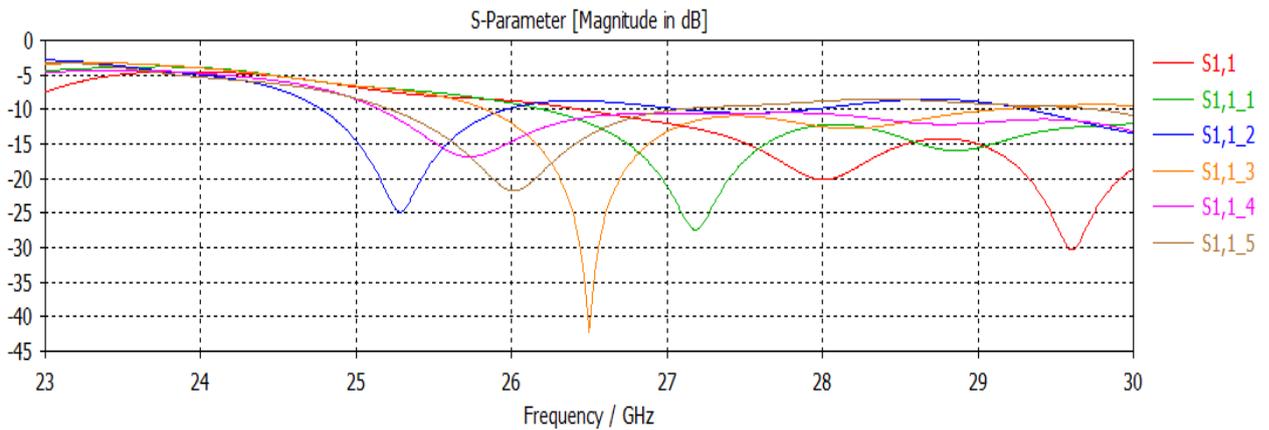


Figure III-17 : Le coefficient de réflexion S11 des essais.

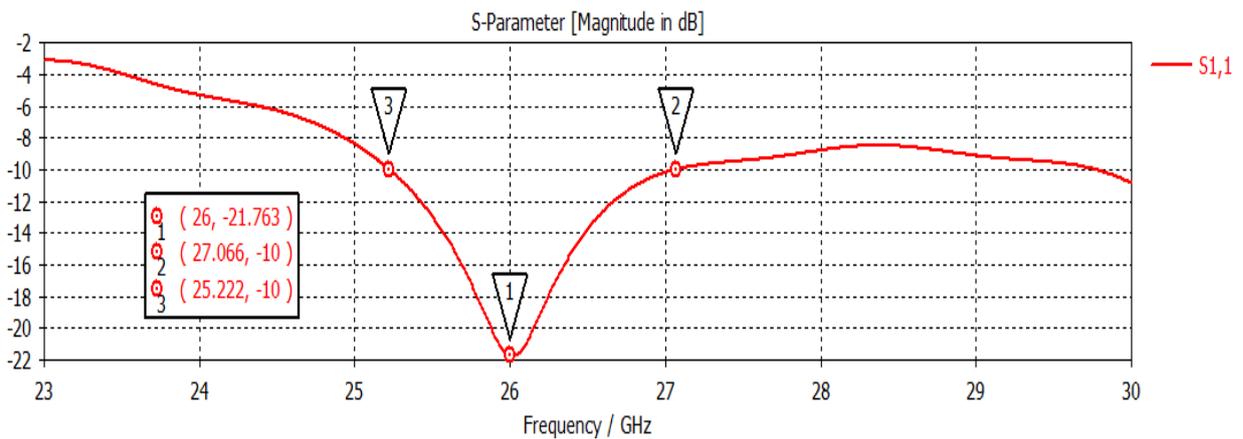


Figure III-18 : coefficient de réflexion S11 de réseau d'antenne.

On peut visualiser que le réseau d'antenne proposé à une largeur de bande maximale de 1.844 GHz autour de la fréquence de résonance 26 GHz dans l'intervalle 25.222 – 27.066 GHz.

c. Diagramme de rayonnement

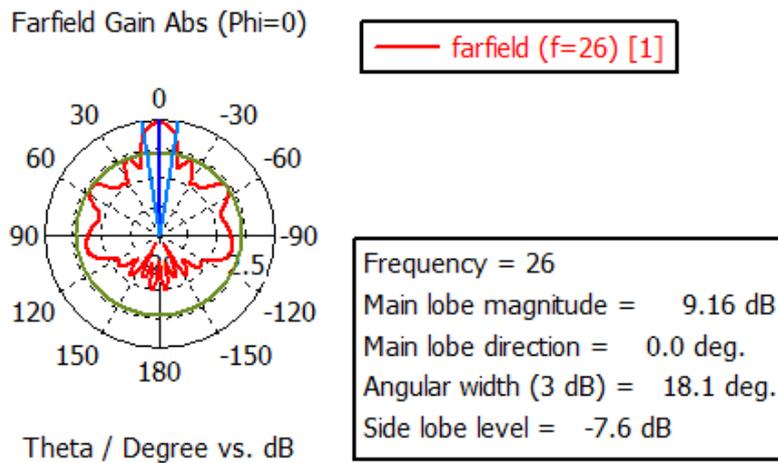


Figure III-19 : Diagramme de rayonnement polaire de réseau d'antenne.

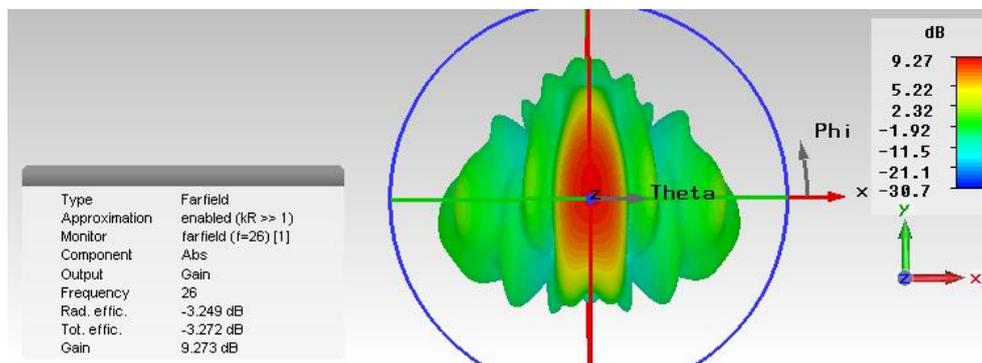


Figure III-20 : Diagramme de rayonnement du réseau d'antenne en 3D.

d. Le gain

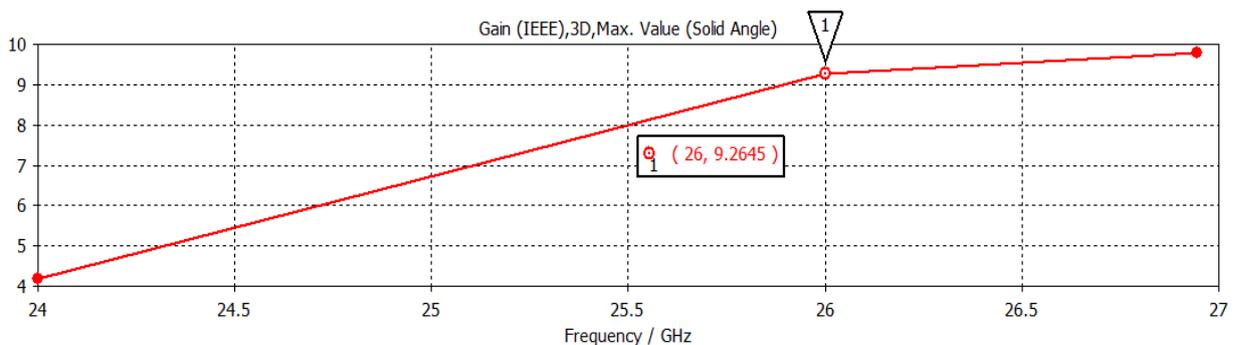


Figure III-21 : Le gain.

Nous remarquons bien que le gain est augmenté à une valeur très significative de 9.2645 dBi.

e. Rapport d'onde stationnaire (VSWR)

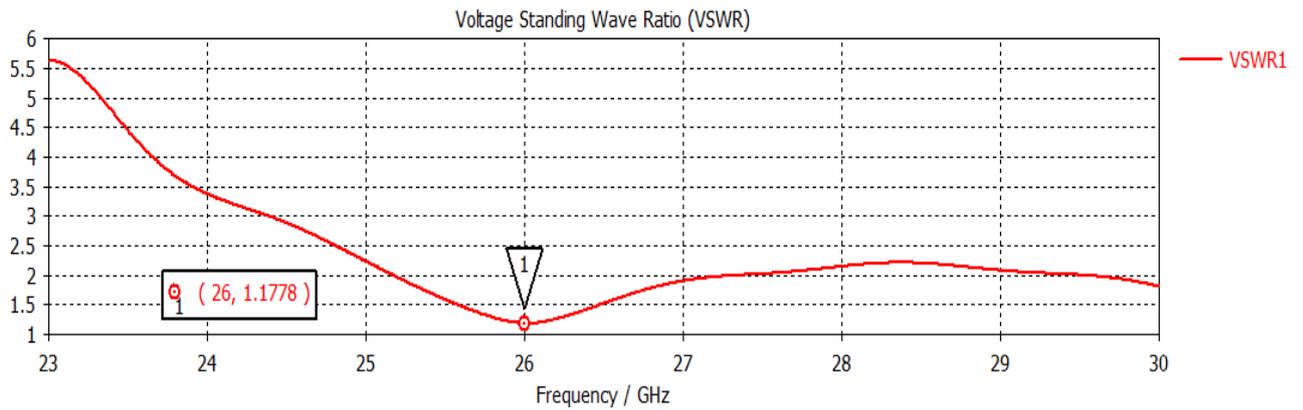


Figure III-22 : Rapport d'onde stationnaire.

Le VSWR de la Figure III-22 à la fréquence 26GHz est de 1.1778, ce qui montre une bonne adaptation d'impédance entre l'antenne et la ligne de transmission.

f. La Densité du courant de réseaux d'antenne

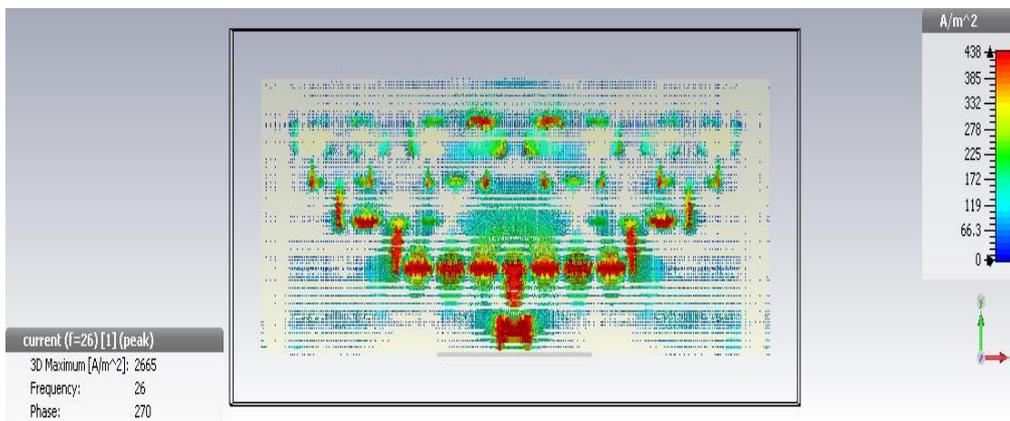


Figure III-23 : La densité du courant de réseau d'antenne.

La Figure III-23 montre bien la distribution de courant sur tout le réseau d'antenne patch proposé.

- Les paramètres précédemment analysés du réseau d’antennes proposé pour la bande des 26 GHz sont résumés dans le tableau III-7.

Paramètres	Valeur
Paramètre de réflexion S11	-21.368 dB
Gain	9.264 dBi
VSWR	1.778
Bande passante (BW)	1.844 GHz

Tableau III-7 : Paramètres fondamentaux de réseaux d’antennes (à 26GHz).

III.4 Comparaison avec des articles de recherche

Au cours des dernières années, des efforts importants ont été déployés sur la conception des antennes et réseau d’antenne pour l’application 5G. Afin de valider les performances de notre antenne et réseau d’antennes. Nous citons quelques références pour comparer notre travail avec d’autres résultats des recherches. Les tableaux III-8 et III-9 montrent la comparaison avec d’autres articles.

Reference	Fréquence résonante	S11	Bande passante	Gain
[38]	28 GHz	-42 dB	3.3 GHz	3.7 dBi
[39]	26.82 GHz	-29.78 dB	810 MHz	5.64 dBi
[40]	28 GHz	-16 dB	1.44 GHz	2.28 dBi
L’antenne proposée	26 GHz	-21.36 dB	3.77 GHz	4.755 dBi

Tableau III-8 : Paramètres de comparaison d’antenne proposée.

Paramètre	L'antenne proposée	Résultat article [41]
Fréquence résonante	26 GHz	27.905 GHz
Coefficient de réflexion S11	-21.763 dB	-19.66 dB
Gain	9.264 dBi	8.393 dBi
VSWR	< 2	< 2
La bande passante	1.844 GHz	400 MHz
Substrat	FR04 h= 1.5 mm $\epsilon_r = 4.3$	ROGERS ULTRAMLAM@3850ht h=2.9 mm $\epsilon_r = 2.2$

Tableau III-9 : Paramètres de comparaison de réseau d'antenne.

III.5 Prototypage et mesures du réseau d'antennes patch proposé pour la 5G millimétrique

Nous avons réalisé le prototype du réseau d'antennes patch proposé au laboratoire de télécommunication LTT de l'université de Tlemcen sous la direction du Docteur Ferouani souheyla, notre encadrante.

Les mesures de coefficient de réflexion et VSWR ont été effectuées au laboratoire d'Instrumentation & de Métrologie-AIT au département d'Assemblage, Intégration et Test au niveau du Centre du développement des satellites CDS sous la direction du Docteur Rabah, notre co-encadrant. Nous avons utilisé un analyseur de réseau type « Agilent technologie de type PNA network analyzer n5222a ». Ce dernier permet de mesurer les paramètres S dans la plage de fréquence entre 10 MHz jusqu'à 26.5 GHz avec calibration. Pour notre application en 5G millimétrique, nous avons utilisé une calibration entre 15-27 GHz. La figure III-24 montre le prototype du réseau d'antennes patch réalisé.

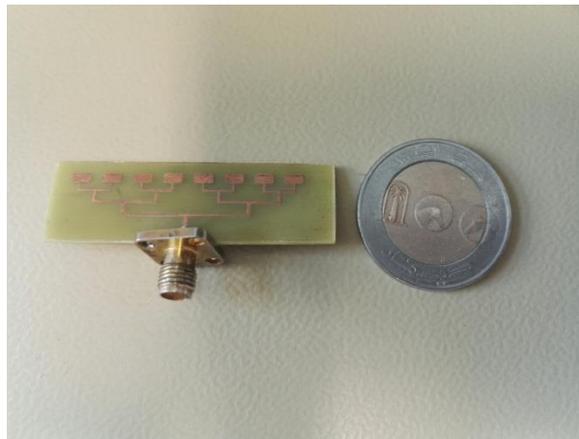


Figure III-24: Prototypé du réseau d'antennes patch réalisé.

III.6 Résultats de Mesure du réseau d'antenne patch pour la 5G millimétrique

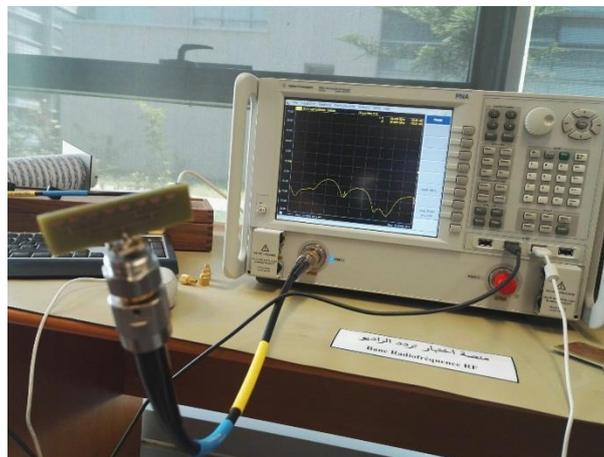


Figure III-25: Mesure du réseau d'Antennes patch proposé à l'aide de l'analyseur réseau.

III.6.1 Paramètre de réflexion S11

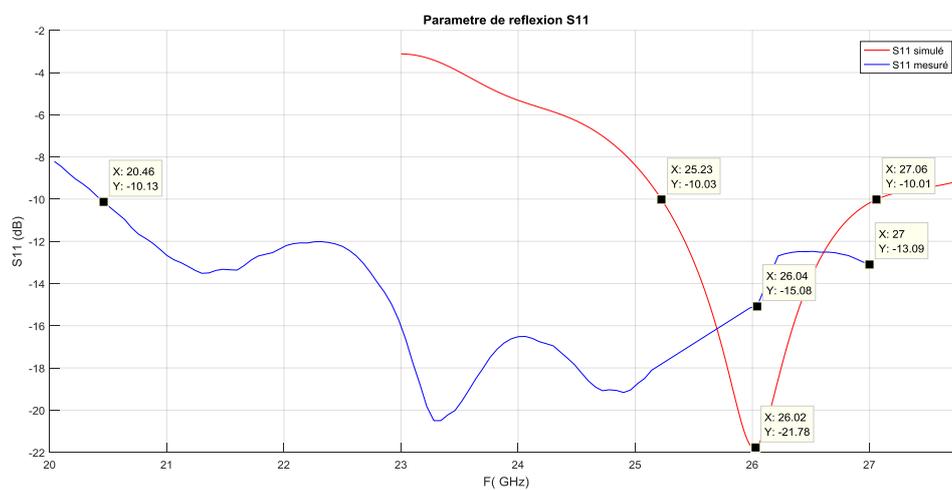


Figure III-26: Paramètre de réflexion S11 simulé et mesuré.

La figure III.26 montre un coefficient de réflexion de -21.78 à la fréquence 26GHz avec le simulateur CST Microwave, et -15.08 à 26 GHz avec l'analyseur réseau. La bande passante obtenue à l'aide de l'analyseur s'étale entre 20.46 GHz jusqu'à une valeur supérieure à 27GHz (limite de l'analyseur réseau Agilent utilisé). Les dimensions de notre antenne patch sont très petites et cela peut causer de légères variations en mesures pratique suite à une mauvaise calibration.

III.6.2 VSWR

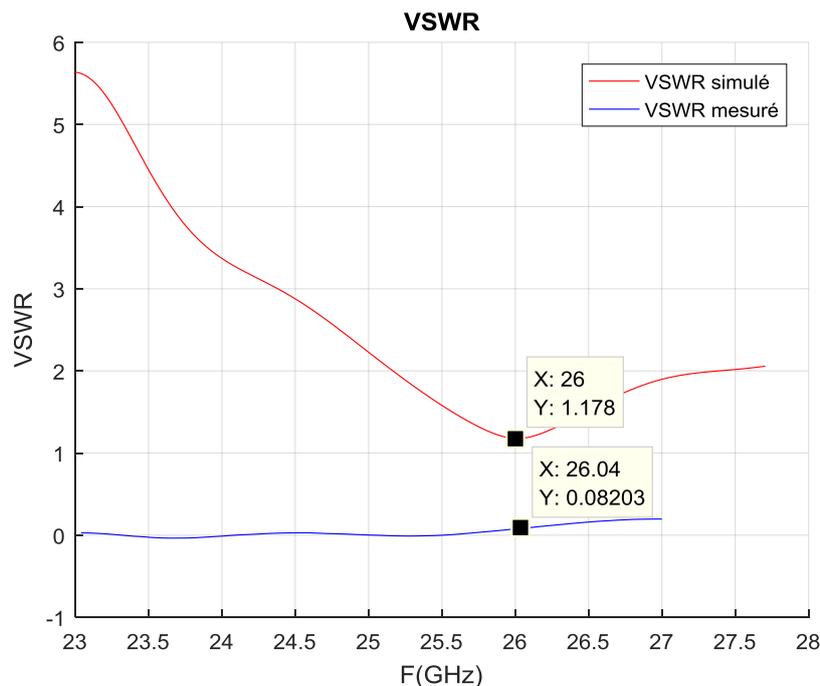


Figure III-27: VSWR simulé et mesuré

La figure III-27 montre un $\text{VSWR} < 2$ pour la simulation et les mesures à l'aide de l'analyseur réseau.

III.7 Conclusion

Dans ce chapitre, les étapes de conception et de simulation de réseau d'antenne patch fonctionnant à la fréquence 26GHz dans la bande des $[24.5-27.5]\text{ GHz}$ ont été présentées sous deux aspects généraux : la conception d'une seule antenne résonnante à la fréquence 26GHz , et l'utilisation de l'antenne patch unique dans la mise en place et la conception d'un réseau de patches. Pour ce faire, des outils CST Microwave Studio ont été utilisés pour l'étude et la

simulation. Ce réseau d'antenne a atteint un gain supérieur à 9 dB et une bande passante acceptable de 1.84 GHz. Les résultats de la simulation à savoir le S11 est adapté à une valeur inférieure à (-10 dB). L'étude comparative avec des travaux de recherche récents, confirme que notre antenne patch proposée est dédiée pour des applications 5G. Enfin, les mesures pratiques à l'aide de l'analyseur réseau sont presque identiques aux résultats de simulation.

Conclusion générale

Conclusion générale

Le principal objectif de ce travail été la conception et la simulation d'une antenne patch dédiée à la 5G dans les bandes des ondes millimétriques.

Dans le premier chapitre, nous avons mené à une étude bien détaillée sur les antennes imprimées, commençons par des petites définitions sur cette antenne et ces caractéristiques, ensuite on est parlé brièvement sur les techniques d'alimentations des antennes imprimées et leurs applications. En fin nous avons terminé notre chapitre par la présentation des réseaux d'antennes, leur type, les avantages et inconvénient des antennes imprimées.

Dans le deuxième chapitre, nous avons fait une petite présentation sur la technologie de la cinquième génération (5G), commençons par la définition de la 5G, ensuite nous sommes attachés à présenter les différentes familles d'usage de cette technologie et enfin nous avons citez les domaines d'application de la 5G et la vision d'avenir.

Dans le dernier chapitre nous avons simulé une antenne patch rectangulaire dans la bande millimétrique pour la 5 G. Afin d'améliorer le gain de notre antenne nous avons conçus un réseau d'antennes patch. Une bande passante de 1.8 GHz est obtenue à la fréquence centrale de 26 GHz.

Nos résultats de simulations et de mesures ont été comparés avec des articles qui montrent que les performances de notre antenne répondent aux exigences désirées en termes de coefficient de réflexion, adaptation, gain, diagramme de rayonnement.

Références Bibliographiques et webographie

- [1] **Andrews, J.G.; Buzzi, S.; Choi, W.; Hanly, S.V.; Lozano, A.E.; Soong, A.C.K.; Zhang, J.C.** « What Will 5G Be? » *IEEE J. Sel.Areas Commun.*, 32, 1065–1082, 2014.
- [2] **BOUHAFS, A. and ICHOU,** « Etude et conception d'un réseau d'antenne pour des applications 5G». Mémoire de Master, Université Tlemcen, 2019/2020.
- [3] **Rappaport, T.S.; Sun, S.; Mayzus, R.; Zhao, H.; Azar, Y.; Wang, K.; Wong, G.N.; Schulz, J.K.; Samimi, M.; Gutierrez, F.** « Millimeter Wave Mobile Communications for 5G Cellular: It Will Work! » *IEEE Access*, 1, 335–349, 2013.
- [4] **Constantine A. Balanis,** « Antenna Theory Analysis and Design », 2005, John Wiley & Sons, INC.
- [5] **Souhila, M., & Tine-hinane,** « Antenne de téléphonie mobile, caractérisation et optimisation ». Mémoire de Master, l'Université Abderrahmane Mira-Bejaia, 2016.
- [6] **DEGHFEL, W., & MERZOUGUI,** « Etude et conception d'une antenne patch ultra large bande ULB à bande rejetée». Mémoire de Master, Université Mohamed Boudiaf-M'SILA, 2017.
- [7] **Soltane,** « Etude et caractérisation d'antennes imprimées pour système ultra-large bande». Mémoire de Magister, Université Mohamed Khider-Biskra, 2015.
- [8] **Ziani Kerarti Djalal,** « Etude et conception d'antenne ultra large bande». Mémoire de Magister, Université Aboubakr Belkaïd, Tlemcen 2011.
- [9] **Mekaouche, M., Atti, B., & Rouha,** « L'effet des caractéristiques de l'antenne patch sur sa directivité». Mémoire de Master, Université abderrahmane mira béjaia, 2014.
- [10] **CHORFI Hamid,** « conception d'un nouveau système d'antenne réseau conforme en onde millimétrique », Thèse de doctorat, Université du Québec, 2012
- [11] **Gaha,** « Analyse et conception des antennes fractales: applications aux Télécommunications Large Bande». Thèse de Doctorat, L'institut national polytechnique de Toulouse, 2007.

Références Bibliographiques et webographie

[12] **Boyer**, « Antennes: Support de cours, Enoncé de travaux dirigés. INSA-Toulouse». 5ème année Réseau et Télécom, 2011.

[13] **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 of singapore, progress in electromagnetic research, Vol.127, pp.79-92, 2012.

[14] **Aissaoui, C., & Benghalia**, « Contribution à l'analyse des antennes microbandes avec excitation par la méthode du domaine spectral-Application à un réseau d'antennes microbandes». Thèse de Doctorat, 2017.

[15] **Bouttout**, « Modélisation des résonateurs microrubans à configurations simples et empilées par une analyse tridimensionnelle en utilisant une méthode intégrale». Thèse de Doctorat, Université de Batna 2, 2020.

[16] **Bahloul**, « Étude et conception de réseaux d'antennes imprimées larges bandes a polarisation diverse par l'utilisation d'architectures log périodiques». Thèse de Doctorat, Université Aboubakr Belkaïd-Tlemcen, 2017.

[17] **Yamina TIGHILT**,« Identification des antennes microrubans multicouches par la méthode spectrale et les réseaux de neurones». Thèse de Doctorat, 2010/2011.

[18] **Meftahi, A., & OUZZIR**, «Conception des nouvelles topologies des antennes multi fonctionnelles». Mémoire de Mastère, Université Aboubakr Belkaïd-Tlemcen, 2016.

[19] **Fouad Benamrane**, « Conception d'une antenne patch microstrip », Université Sidi Mohamed Ben Abdellah (Fès) MAROC - Master télécoms hyperfréquence 2011.

[20] **MEKIMAH, B., & MESSAI**, « Etude du fonctionnement en mode bifréquence des patches microbandes empilés et excentrés», Mémoire de Magistère, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2007.

[21] **BOUDGHENE STAMBOULI, D. R., & TABTI**, « Proposition des nouvelles Réseaux d'Antenne à très Haut Gain à Onde Progressive TWA Log-périodiques SIW», Mémoire de Master, Université Aboubakr Belkaïd-Tlemcen, 2019/2020.

[22] **Prasad, R. Ed**, « 5G Outlook-innovations and applications». River Publishers, 2016.

[23] **T. Janevski**, « 5G Mobile Phone Concept». IEEE on Consumer Communication and Networking Conference, 2009.

Références Bibliographiques et webographie

[24] **Hu, F. Ed**, “Opportunities in 5G networks: A research and development perspective”. CRC press, 2016.

[25] **Wavestone**, La révolution des fréquences millimétrique [<https://www.wavestone.com/fr/insight/5g-nouvelle-generation-technologique>]. Consulté le 28 Mai 2021.

[26] **Eficiens**, La 5G millimétrique, [<https://www.eficiens.com/c-est-quoi-la-5g-millimetrique>]. Consulté le 28 Avril 2021.

[27] **Rohde & Schwarz**, Le haut débit mobile amélioré (eMBB) [https://www.rohde-schwarz.com/fr/solutions/test-and-measurement/wireless-communication/wireless-5g-and-cellular/5g-test-and-measurement/embb/overview/embb_232150.html]. Consulté le 02 juin 2021.

[28] **Adam Chidley**, «vers la 5G –avnet- », magazine Focus 35, 2020.

[29] **Univers freebox**, Techniques utilisées dans la technologie 5G [<https://www.universfreebox.com/article/50589/5G-les-technologies-mises-en-oeuvre-expliquees-dans-une-video>]. Consulté le 13 Mai 2021.

[30] **François MAGNE**. «Télécommunications haut débit en ondes millimétriques»,10 mai 1998.

[31] **Docomo**, “DOCOMO 5G White Paper Requirements, Concept and Technologies,” 2014.

[32] **Ngom, Assane**. "Conception de petits réseaux d'antennes reconfigurables ou " Small Cells" pour le standard 5G.", PhD diss, Côte d'Azur, 2019.

[33] **Columbia engineering**, [<https://compeng.columbia.edu/biggest-component-full-duplex-wi-fi-radio-antenna>], Consulté le 21 Mai 2021.

[34] **5G Coverage Checker**, What is massive mimo technology,[<https://5g.co.uk/guides/what-is-massive-mimo-technology>]. Consulté le 24 Mai 2021.

[35] **Yifei, Y., & Longming, Z.** «Application scenarios and enabling technologies of 5G». China Communications, 11(11), 69-79, 2014.

[36] **Adda Sekrane Kheira et Cherier Ouissam**, « Etude et conception d’antenne reconfigurables pour radiocommunications », d’Ingénieur d’Etat en Télécommunications,

Références Bibliographiques et webographie

Institut National des Télécommunications et des Technologies de l'Information et de la Communication, 2016- 2017.

[37] **Tchouar Faiza et Bensenouci Rabea**, « Etude et Conception D'une Antenne Micro ruban pour des applications WBAN », Master en Génie de Télécommunications, Centre Universitaire Belhadj Bouchaib d'Ain-Temouchent, 2016/2017.

[38] **Ahmad, W., & Khan**, «Small form factor dual band (28/38 GHz) PIFA antenna for 5G applications». IEEE MTT-S International Conference on Microwaves for Intelligent Mobility (ICMIM), 2017.

[39] **El-Sayed, M., Gad, N., El-Aasser, M., & Yahia**, «Slotted Rectangular Microstrip-Antenna Design for Radar and 5 G Applications». International Conference on Innovative Trends in Communication and Computer Engineering (ITCE), 2020.

[40] **M. S. Ibrahim**, "Dual-band microstrip antenna for the fifth generation indoor/outdoor wireless applications," 2018 International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium (ACES), Denver, CO, 2018.

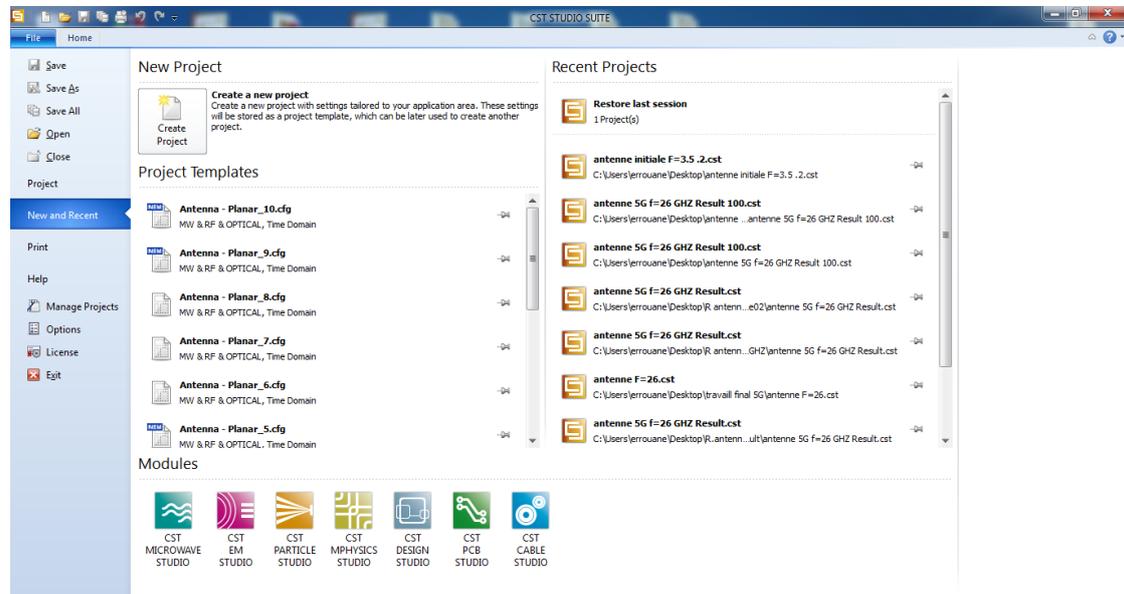
[41] **Safpbri Johari, Muhammad Abdul Jalil, Shaifol Ifrad Ibrahim, Mohd Nazry Mohammad and Norhafiza Hassan**, «28 GHz Microstrip Patch Antennas for Future 5G». Journal of Engineering and Science Research. 2 (4): 01-06, 2018.

ANNEXE

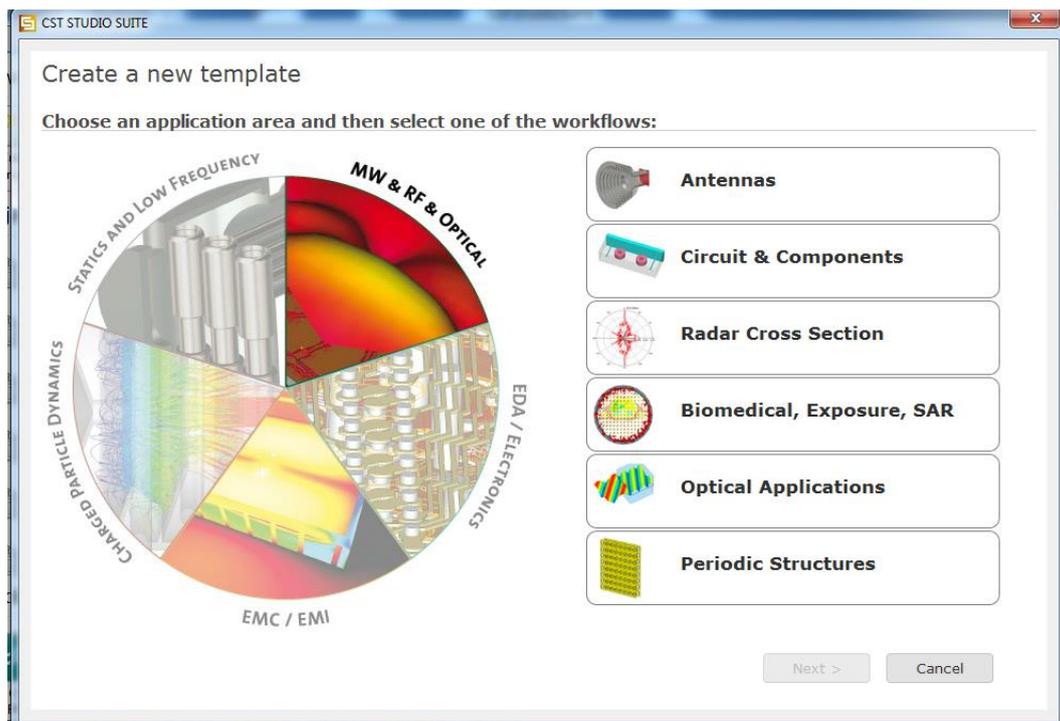
Annexe

LES ETAPES A SUIVRE POUR LA SIMULATION

1. Lancement de la fenêtre principale de CST Studio



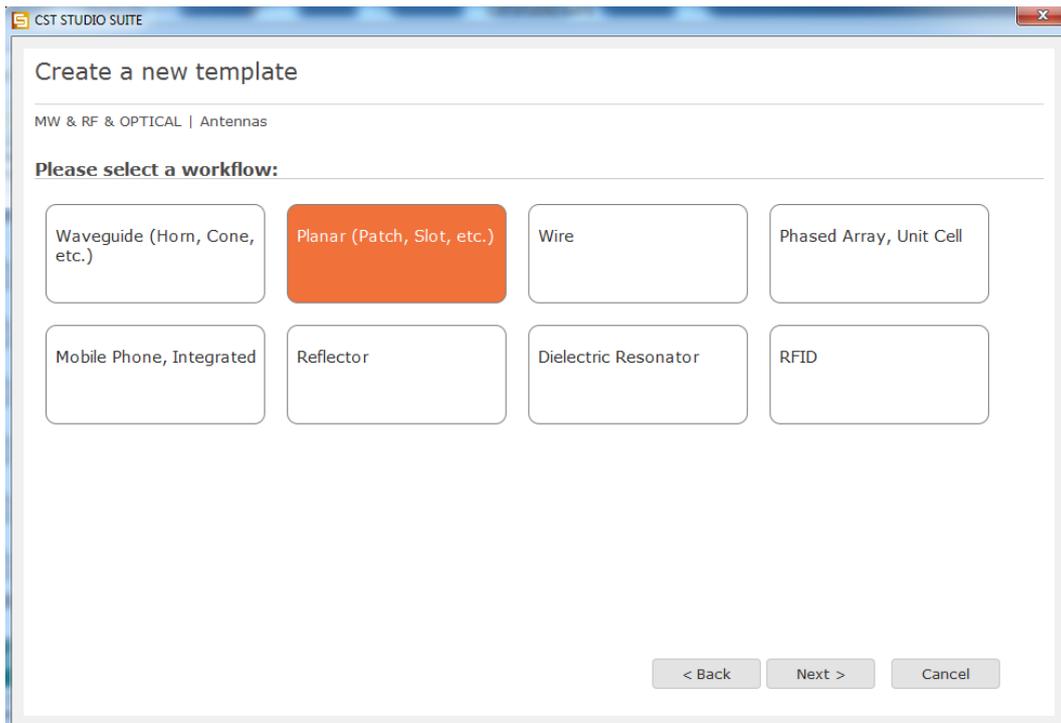
2. Sélection du domaine d'application dans CST



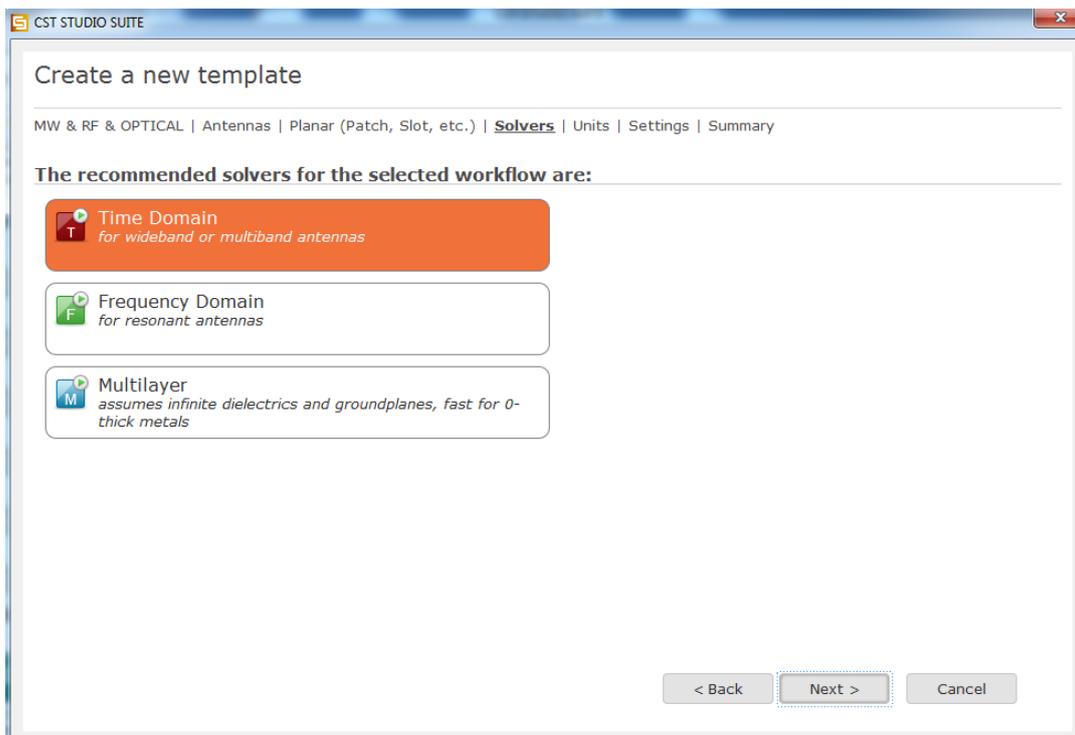
La fenêtre ci-dessus nécessite la sélection d'une zone d'application et la spécification du type de travail à effectuer, en sélectionnant dans ce cas le champ MW & RF & Optical, en particulier Antennes.

ANNEXE

3. Choix du type d'antenne à mettre en œuvre dans CST

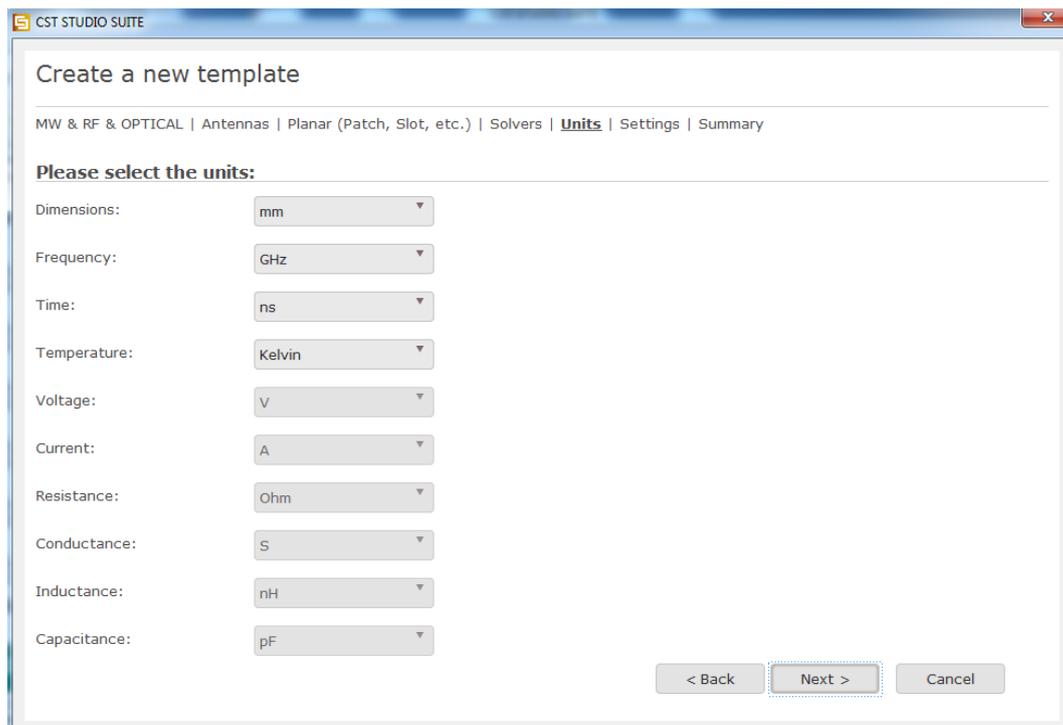


4. Sélection du type de simulation à utiliser dans CST

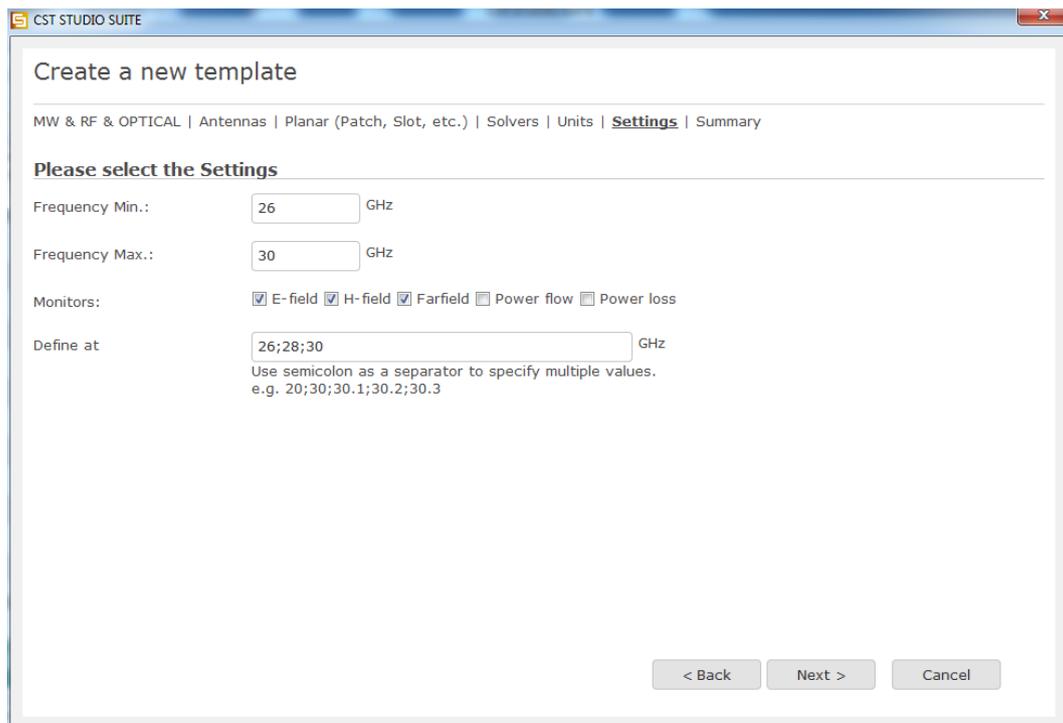


ANNEXE

5. Sélection des unités de mesure à utiliser dans CST



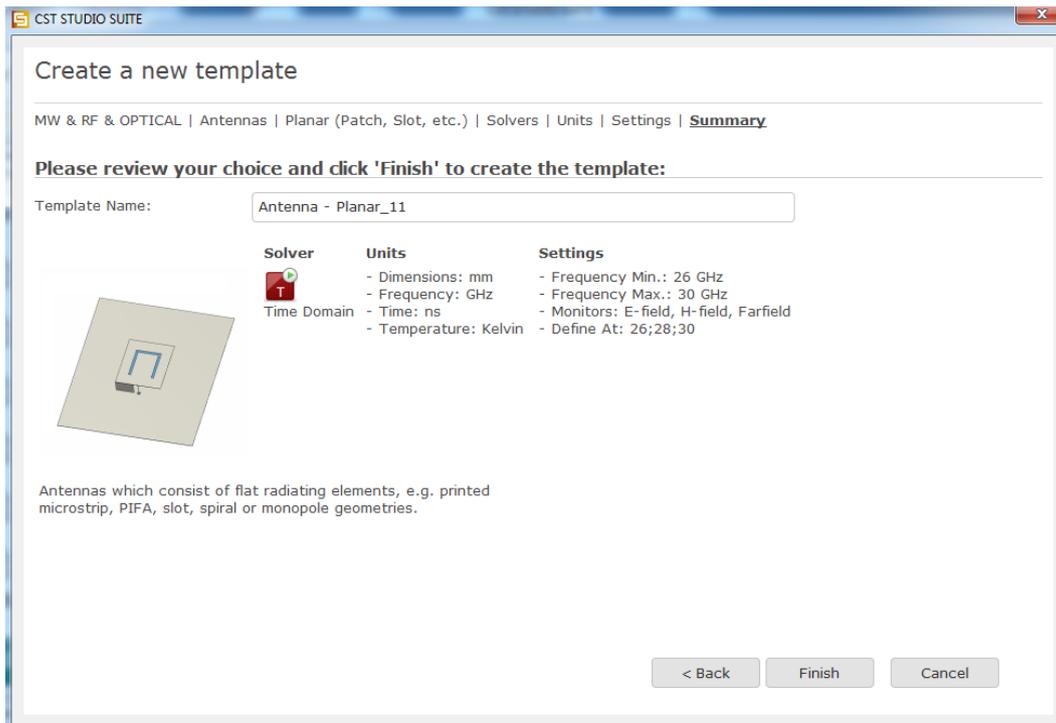
6. Configuration de la gamme de fréquences et des moniteurs à analyser



Dans cette étape, nous définissons les fréquences d'intérêt et ce qui doit être surveillé.

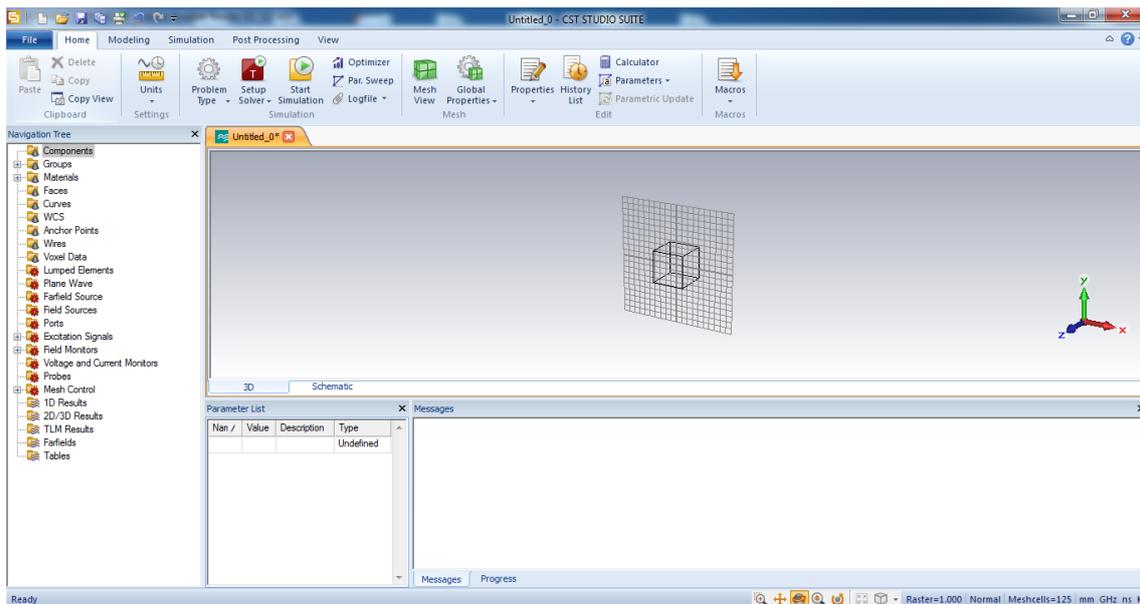
ANNEXE

7. Nom et résumé des configurations de modèles créés dans CST



Enfin, un résumé du projet à réaliser est affiché et le modèle est nommé Patch Antenne.

8. Espace de travail CST Microwave Studio



Dans cette phase, un modèle de projet est créé dans CST Microwave Studio.