

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire

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

جامعة سعد دحلب البليدة  
Université SAAD DAHLAB de BLIDA 1

كلية التكنولوجيا  
Faculté de Technologie

قسم الإلكترونيك  
Département d'Électronique



# MEMOIRE DE MASTER

Filière : Télécommunication  
Spécialité : Réseaux et Télécommunications

Présenté par :

BOUGHEDAUI Linda

MENNA Dounia

## CONCEPTION ET REALISATION D'UNE ANTENNE A POLARISATION CIRCULAIRE POUR LES APPLICATIONS 5G

Proposé par :

Mme BERKAT Zeyneb

Année Universitaire : 2023-2024

## **REMERCIEMENTS**

*Nous exprimons notre gratitude à Allah le tout puissant pour nous avoir accordé la santé et la volonté de mener à bien ce projet, El Hamdoulillah !*

*Ce projet a pu être mené à terme grâce à une seule personne qui est bien notre promotrice **Mme Berkat Zeyneb**. Nous exprimons nos plus profondes gratitude et nos remerciements les plus sincères à notre promotrice, pour son rôle essentiel et inestimable dans la réussite de ce projet.*

*Dès les premiers instants, sa bienveillance, sa patience et son dévouement nous ont grandement réconforté et motivé à donner le meilleur de nous-même. Mme Berkat a fait preuve d'une écoute attentive et d'une grande pédagogie tout au long de cette aventure enrichissante. Sa rigueur scientifique alliée à sa générosité et sa clairvoyance ont été des phares guidant nos pas sur la voie de la réussite.*

*Que ce modeste travail soit le témoignage de notre profonde reconnaissance envers Mme Berkat pour sa contribution décisive et son accompagnement d'une qualité rare.*

*Nous exprimons notre profonde gratitude envers les membres distingués du jury, pour l'honneur qu'ils me font en acceptant d'évaluer ce modeste travail. Leurs remarques éclairées et leurs recommandations expertes sont d'une valeur inestimable.*

*Nos chaleureux remerciements s'adressent également à la Faculté d'Électronique et pour son accueil au sein d'un cadre propice aux études et à la recherche.*

*Nous tenons à exprimer notre gratitude envers tous les enseignants qui ont jalonné notre cursus universitaire, pour la qualité de leur enseignement et leur dévouement à transmettre leur savoir.*

*Nous tenons à exprimer aussi nos sincères remerciements aux agents de sécurité qui œuvrent sans relâche pour garantir notre quiétude et notre sécurité au quotidien. Leur dévouement et leur engagement méritent notre profonde reconnaissance.*

## **DEDICACES**

*Mon cher papa Menouer,*

*Tu as toujours été mon plus grand modèle, mon inspiration. Tu es l'homme le plus parfait et bosseur au monde, qui n'a jamais baissé les bras, qui a travaillé jour et nuit pour subvenir aux besoins de notre famille et nous offrir le meilleur. Tu as été là pour moi dans les bons comme dans les mauvais moments, me soutenant sans relâche et croyant en moi quand j'en doutais. Je ne pourrai jamais te remercier assez pour tout ce que tu as fait pour moi. Tu es un être exceptionnel, un père en or, et j'espère pouvoir un jour te rendre ne serait-ce qu'une infime partie de ce que tu m'as donné, grâce à ce que tu nous as appris durant toute notre vie, j'ai appris le courage, j'ai appris des valeurs que je ne trouverais nulle part ailleurs.*

*L'éducation que tu nous as donnée est si précieuse. Tu as su nous transmettre les principes essentiels pour traverser les moments difficiles avec dignité et persévérance. Tu es mon héros, mon roc, mon guide dans cette vie. Je t'admire profondément et je suis fière d'être ton enfant. Aujourd'hui, je suis arrivée à cet instant où je peux mentionner ton nom sur mon mémoire de fin d'études.*

*A ma chère maman,*

*Toi qui m'as donné la vie et m'a inlassablement épaulé sur le chemin de l'existence, tu occupes une place sacrée dans mon cœur. Ton amour inconditionnel, ton dévouement sans faille et ton bienveillance infinie ont été la colonne vertébrale de mon développement. Bien que les aléas de la vie aient parfois semé la discorde sur notre route commune, jamais tu n'as failli dans votre rôle de guide et de mentor. Tu es mon phare dans la nuit, ma boussole dans cette existence parfois tortueuse.*

*A mes chers grands-parents*

*A mes chères sœurs*

*A mes chers(e) cousines et cousins*

*A mes tantes et oncles*

*A tous mes proches*

*A tous mes amis(e)*

*A mon binôme*

*A tous ceux qui m'aiment*

*A tous ceux que j'aime.*

*Je dédie ce mémoire.*

**Boughedaoui Linda**

## **DEDICACES**

*Je dédie ce travail ...*

*A celle qui m'a transmis la vie, l'amour le courage à toi ma très chère et douce mère tu représentes pour moi la source de tendresse et l'exemple du dévouement qui n'a pas cessé de m'encourager et de prier pour moi*

*Au meilleur des pères: Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour. l'estime, le Dévouement et le respect que j'ai toujours eu pour vous*

*À ma sœur bien-aimée **Feriel** , qui a toujours su m'encourager et me pousser à donner le meilleur de moi-même, et dont l'intelligence, la créativité et la générosité d'esprit m'ont constamment inspiré tout au long de ce parcours.*

*A mon cher frère **Riad** qui n'a pas cessé de m'encourager et me soutenir tout au long de mes études.*

*A ma chère cousine **Narimene** et mes chères amies **Djazia** et **Salima** qui me donnent de l'amour et de la vivacité*

*Je tiens à remercier ma binôme, **Linda**, qui a contribué à la réalisation de ce modeste travail.*

*A tous ceux ou celles qui me sont chers et que J'ai omis involontairement de citer.*

*A tous mes enseignants tout au long de mes études.*

*A toute la promo de l'année (2023/2024)*

**MENNA DOUNIA**

## ملخص

في هذا المشروع النهائي، قمنا بتصميم وتحسين هوائي رقعة مستقطب دائريًا للنطاق الفرعي sub-6GHz، خصيصًا لتطبيقات الجيل الخامس (5G) كان هدفنا الرئيسي هو تعديل الاستقطاب مع الحفاظ على التكيف مع تردد 3.9 GHz لتحقيق ذلك، استخدمنا طريقة لتعديل الشكل الهندسي للرقعة، بهدف تحقيق الاستقطاب المطلوب وتصغير حجم الهوائي أيضًا.

أكدت نتائج المحاكاة على أداء الهوائي المسطح المقترح، مع معامل انعكاس أقل من 20 dB ونسبة محورية أقل من 3 dB تم إجراء جميع المحاكاة باستخدام برنامج CST Studio Microwave، مما يضمن تقييمًا دقيقًا وموثوقًا لتصميمنا.

**الكلمات المفتاحية:** النسبة المحورية، S11، CST Studio، الاستقطاب الدائري.

---

## Résumé

Dans ce projet de fin d'étude, nous avons conçu et optimisé une antenne patch à polarisation circulaire pour la bande sub-6GHz, spécifiquement pour les applications 5G. Notre principal objectif était de modifier la polarisation tout en maintenant une adaptation à la fréquence de 3,9GHz. Pour ce faire, nous avons utilisé une méthode de modification géométrique de la forme du patch, visant non seulement à obtenir la polarisation désirée mais aussi à miniaturiser l'antenne.

Les résultats des simulations ont confirmé les performances de l'antenne planaire proposée, avec un coefficient de réflexion inférieur à -20dB et un rapport axial inférieur à 3dB. Toutes les simulations ont été réalisées à l'aide du logiciel CST Studio Microwave, permettant ainsi une évaluation précise et fiable de notre conception.

**Mots clés :** Rapport Axial, S11, CST studio, Polarisation Circulaire.

---

## Abstract

In this final project, we designed and optimized a circularly polarized patch antenna for the sub-6GHz band, specifically for 5G applications. Our main objective was to modify the polarization while maintaining adaptation to the 3.9GHz frequency. To achieve this, we employed a method of geometric modification of the patch shape, aiming not only to achieve the desired polarization but also to miniaturize the antenna.

The simulation results confirmed the performance of the proposed planar antenna, with a reflection coefficient below -20dB and an axial ratio below 3dB. All simulations were conducted using CST Studio Microwave, ensuring a precise and reliable evaluation of our design.

**Keywords:** Axial Ratio, S11, CST Studio, Circular Polarization.

---

## Table des matières

<b>INTRODUCTION GÉNÉRALE</b> .....	1
<b>CHAPITRE I. ASPECTS GÉNÉRAUX SUR LA 5G</b>	
I.1. Introduction.....	5
I.2. Historique de la 5G.....	5
I.3. Présentation de la 5 <sup>ème</sup> génération.....	6
I.3.1. Principe de la 5 <sup>ème</sup> génération.....	6
I.3.1.1. Bandes de fréquences.....	7
I.3.1.2. Fréquences des ondes millimétriques.....	7
I.3.1.3. Microcellules.....	8
I.3.1.4. MIMO massif.....	8
I.3.1.5. Beamforming.....	8
I.3.1.6. Technique de transmission simultanée full-duplex.....	8
I.4. Architecture de la technologie 5G.....	8
I.4.1. Services innovants.....	9
I.4.2. Plateforme de validation (Architecture et gestion du réseau).....	10
I.4.3. Radio hyper-connectée.....	11
I.5. Objectifs de la 5 <sup>ème</sup> génération.....	11
I.6. Domaines d'application de la 5G.....	11
I.6.1. Télécommunications et connectivité.....	12
I.6.2. Véhicules autonomes et transport intelligent.....	12
I.6.3. Internet des objets (IoT).....	13
I.6.4. Industrie.....	13
I.6.5. Santé et télémédecine.....	13
I.6.6. Médias et divertissement.....	14
I.6.7. Agriculture.....	14
I.7. Conclusion.....	14
<b>CHAPITRE II. EXPLORATION DES ANTENNES</b>	
II.1. Introduction.....	16
II.2. Définition d'une Antenne.....	16
II.3. Caractéristiques d'une antenne.....	16
II.3.1. Directivité.....	16
II.3.2. Diagramme de rayonnement.....	16
II.3.3. Coefficient de réflexion.....	18
II.3.4. Gain.....	18
II.3.5. Polarisation.....	18
II.3.5.1. Polarisation Linéaire.....	18

## TABLE DES MATIERES

---

II.3.5.2. Polarisation elliptique.....	19
II.3.5.3. Polarisation Circulaire.....	19
II.3.6. Bande passante.....	20
II.4. Tendances actuelles en matière d’antennes pour la dernière génération.....	21
II.4.1. Antennes multi-éléments (MIMO).....	21
II.4.2. Antennes à faisceaux orientables (Beamforming).....	22
II.4.3. Antennes intégrées.....	22
II.4.4. Antennes à large bande.....	22
II.4.5. Antennes adaptatives.....	23
II.5. Conclusion.....	23

### CHAPITRE III . LES ANTENNES PLANAIRES (PATCH)

III.1. Introduction.....	25
III.2. Définition d’une Antenne patch.....	25
III.3. Différentes formes d’une antenne planaire.....	25
III.4. Principe de fonctionnement.....	26
III.5. Techniques d’Alimentation.....	27
III.5.1. Alimentation par une ligne micro ruban.....	27
III.5.2. Alimentation par une sonde coaxiale (alimentation coplanaire).....	28
III.5.3. Alimentation par Couplage de proximité.....	29
III.5.4. Alimentation par Couplage d’ouverture (fente).....	29
III.6. Avantages et inconvénients de l’antenne patch.....	30
VI.1. Avantages d’une antenne patch.....	30
VI.2. Inconvénients d’une antenne patch.....	30
III.7. Conclusion.....	31

### CHAPITRE IV . CONCEPTION ET SIMULATION D’UNE ANTENNE PATCH

IV.1. Introduction.....	33
IV.2. Caractéristiques de l’antenne.....	33
IV.3. Calcul les dimensions De l’antenne.....	33
IV.3.1. Calcul les dimensions du patch.....	33
IV.3.2. Calcul les dimensions du plan de masse et substrat.....	34
IV.3.3. Coefficient de Réflexion S11.....	35
IV.3.4. Rapport Axial d’antenne.....	36
IV.4. Etude d’influence paramétrique de différents paramètres.....	36
IV.4.1. Etude de l’Effet de la largeur du Patch $w_p$ .....	37
IV.4.2. Etude de l’Effet de la longueur de Patch $L_p$ .....	37
IV.5. Transformation structurale d’une antenne en vue d’attendre la polarisation circulaire ....	38
IV.5.1. Optimisation de l’adaptation d’impédance d’une antenne patch.....	38
IV.5.1.1. Coefficient de réflexion.....	39

## TABLE DES MATIERES

---

IV.5.1.2. Rapport Axial .....	39
IV.5.2. Ajout de quatre encoches .....	40
IV.5.2.1. Coefficient de réflexion.....	40
IV.5.2.2. Rapport Axial .....	41
IV.6. Processus d'optimisation géométrique .....	41
VI.6.1. Coefficient de réflexion.....	42
VI.6.2. Rapport Axial .....	43
VI.6.3. Diagramme de rayonnement de l'antenne patch optimisée.....	43
IV.7. Evolution des paramètres clés de l'antenne au fil des étapes de conception .....	44
IV.8. Conclusion .....	46
<b>CONCLUSION GÉNÉRALE.....</b>	<b>47</b>
<b>RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....</b>	<b>49</b>
<b>ANNEXE .....</b>	<b>53</b>
A.1. Définition de logiciel CST STUDIO SUITE.....	54
A.2. Description générale du logiciel.....	54
A.3. Description générale de l'interface CST .....	57
A.4. Principes caractéristiques de logiciel CST .....	59



Liste des Figures

Chapitre I : Aspects Généraux sur la 5G

Figure I.1. Evaluation de la 5G ..... 5  
 Figure I.2. Spectre de la 5G ..... 7  
 Figure I.3. Les techniques utilisées dans la 5ème génération ..... 7  
 Figure I.4. L'Architecture de la 5G ..... 9  
 Figure I.5. Les applications de réseaux 5G ..... 12

Chapitre II : Exploration des antennes

Figure II.1. Diagramme de rayonnement en valeurs logarithmiques (a), diagramme de rayonnement en 3D (b) ..... 17  
 Figure II. 2. Diagramme de rayonnement d'une antenne directive ..... 17  
 Figure II.3. Différentes formes de polarisation de l'onde électromagnétique ..... 18  
 Figure II.4. Polarisation linéaire ..... 19  
 Figure II.5. Polarisation elliptique ..... 19  
 Figure II.6. Polarisation circulaire ..... 19  
 Figure II.7. Différentes déformations d'une antenne imprimée ..... 20  
 Figure II.8. Variation de S11 en (dB) en fonction de la fréquence ..... 21  
 Figure II.9. Antenne multi-élément (MIMO) 5G ..... 22

Chapitre III : Les antennes planaires (Patch)

Figure III.1. Géométrie d'une antenne Patch ..... 25  
 Figure III.2. Les différents formes d'antenne patch ..... 26  
 Figure III.3. Rayonnement d'une antenne planaire ..... 27  
 Figure III.4. patch avec une alimentation par ligne micro ruban..... 28  
 Figure III.5. Alimentation par une sonde coaxiale ..... 28  
 Figure III.6. Méthode d'alimentation par couplage de proximité ..... 29  
 Figure III.7. Méthode d'alimentation par couplage d'ouverture ..... 30

Chapitre IV : Conception et simulation d'une antenne Patch

Figure IV.1. La géométrie de l'antenne ..... 35  
 Figure IV.2. Paramètre s11 et la bande passante de l'antenne patch ..... 35  
 Figure IV.3. Rapport axial en fonction de fréquences ..... 36  
 Figure IV.4. Effet de la largeur du Patch  $W_p$  sur le paramètre S11 en dB ..... 37  
 Figure IV.5. Effet de la longueur de Patch  $L_p$  sur le paramètre S11 en dB ..... 37  
 Figure IV.6. Représentation d'une antenne patch dotée de deux encoches ..... 38  
 Figure IV.7. Coefficient de réflexion S11 de l'antenne avec encoches ..... 39  
 Figure IV.8. Rapport Axial d'une antenne avec encoches ..... 39  
 Figure IV.9. Schéma de l'antenne avec quatre encoches ..... 40  
 Figure IV.10. Coefficient de réflexion de l'antenne avec les quatre encoches ..... 40

## LISTE DES FIGURES

---

<b>Figure IV. 11.</b> Rapport Axial de l'antenne avec les quatre encoches .....	41
<b>Figure IV.12.</b> La mise en place d'une antenne a polarisation circulaire.....	41
<b>Figure IV.13.</b> Antenne optimisée .....	42
<b>Figure IV.14.</b> Le S11 et la bande passante de l'antenne optimisée .....	42
<b>Figure IV.15.</b> Le rapport axial de l'antenne optimisée .....	43
<b>Figure IV.16.</b> Diagramme de rayonnement.....	43
<b>Figure IV. 17.</b> L'optimisation de S11 .....	44
<b>Figure IV. 18.</b> Variation du Rapport axial en fonction de la fréquence.....	45
<b>Figure IV.19.</b> Présentation iconographique du modèle d'antenne réalisé.....	45

**Liste des Tableaux**

**Tableau IV.1.** Le cahier de charge ..... 33  
**Tableau IV.2.** Les dimensions de l'antenne ..... 34  
**Tableau IV.3.** L'évolution des paramètres clés de l'antenne ..... 44

### Liste Des Abréviations

<b>API :</b>	Application Programming Interface
<b>CST :</b>	Computer Science Technology MICROWAVE STUDIO
<b>GTI :</b>	Global Time Division Long Term Evolution Initiative
<b>3GPP :</b>	Third Generation Partnership Project
<b>1G :</b>	Première Génération
<b>2G :</b>	Deuxième Génération
<b>3G :</b>	Troisième Génération
<b>4G :</b>	Quatrième Génération
<b>5G :</b>	Cinquième Génération
<b>IMT-A :</b>	International Mobile Telecommunications Advanced
<b>LTE :</b>	Long Term Evolution
<b>MIMO :</b>	Multiple-Input Multiple- Output
<b>MU-MIMO :</b>	Multi User-Multiple-Input Multiple- Output
<b>NFV :</b>	Network Function Virtualisation
<b>SDN :</b>	Software Defined Networking
<b>S11 :</b>	Coefficient of reflection
<b>TD-LTE :</b>	Time Division Long Term Evolution
<b>UHD :</b>	Ultra Haute Définition
<b>UHF :</b>	Ultra High Frequencies
<b>UIT :</b>	Union International Des Telecommunications
<b>UIT-R :</b>	Union internationale des télécommunications Secteur des radiocommunications
<b>VHF :</b>	Very High Frequencies

**Liste Des Symboles**

<b>AR :</b>	Rapport Axial
<b>BP :</b>	Bande passante
<b>C :</b>	Vitesse de la lumière
<b>Cot g :</b>	Cotangente de l'angle de pertes diélectriques
<b>Cos :</b>	Fonction cosinus
<b>D :</b>	Directivité
<b>dB :</b>	Décibel, unité logarithmique sans dimension
<b>dB<sub>i</sub> :</b>	Décibel par rapport à une antenne isotrope, unité de gain sans dimension
<b>E :</b>	Champ électrique
<b>E<sub>x</sub> :</b>	Composante x du champ électrique
<b>E<sub>y</sub> :</b>	Composante y du champ électrique
<b>E<sub>0</sub> :</b>	Amplitude du champ électrique
<b>F :</b>	Fréquence
<b>f<sub>(max)</sub> :</b>	Fréquence maximale
<b>f<sub>(min)</sub> :</b>	Fréquence minimale
<b>f<sub>coupure</sub> :</b>	Fréquence de coupure
<b>f<sub>r</sub> :</b>	Fréquence de résonance
<b>G :</b>	Gain
<b>GHz :</b>	Gigahertz, unité de fréquence
<b>h :</b>	Hauteur
<b>L :</b>	Longueur
<b>L<sub>eff</sub> :</b>	Longueur effective du patch
<b>L<sub>p</sub> :</b>	Largeur du patch
<b>L<sub>s</sub> :</b>	Largeur du substrat
<b>n :</b>	Nombre entier
<b>P<sub>a</sub> :</b>	Puissance absorbée
<b>P<sub>R</sub> :</b>	Puissance totale rayonnée
<b>P :</b>	Puissance rayonnée par l'antenne dans la direction
<b>S<sub>11</sub> :</b>	Coefficient de réflexion
<b>W :</b>	Largeur
<b>W<sub>s</sub> :</b>	Longueur du substrat
<b>W<sub>p</sub> :</b>	Longueur du patch

## LISTE DES SYMBOLES

---

<b>Z :</b>	Impédance
<b>Z<sub>e</sub> :</b>	Impédance d'entrée
<b>Z<sub>c</sub> :</b>	Impédance caractéristique
<b>Z<sub>0</sub> :</b>	Impédance de référence
<b>Γ :</b>	gamma (S11)
<b>π :</b>	Constante mathématique
<b>γ :</b>	Déphasage
<b>ΔL :</b>	Variation de longueur due à l'effet de débordement
<b>ε<sub>r</sub> :</b>	Permittivité relative
<b>ε :</b>	Permittivité électrique

# **INTRODUCTION GÉNÉRALE**

En raison de la forte demande de la population et de l'industrie, le secteur des télécommunications a connu d'importants progrès technologiques ces dernières années. Parmi les avancées qui ont suscité le plus d'intérêt dans ce domaine figurent les antennes. Ces composants jouent un rôle fondamental en permettant la transmission et la réception d'ondes électromagnétiques dans l'atmosphère ou l'espace terrestre. Leur fonction principale est de convertir l'énergie électrique d'un signal en énergie électromagnétique transportée par une onde électromagnétique, ou vice versa.

Parmi les différentes configurations d'antennes, l'antenne patch planaire est largement utilisée en raison de sa simplicité de fabrication, de sa compacité et de ses performances satisfaisantes dans de nombreuses applications. Pour obtenir une antenne patch optimisée, il est essentiel de mener des études approfondies sur son comportement électromagnétique, sa directivité, sa bande passante et d'autres caractéristiques clés.

Les antennes planaires jouent un rôle crucial dans le déploiement et la performance des réseaux 5G. Cette technologie de pointe utilise des antennes planaires pour assurer une connectivité efficace et optimale. Les antennes planaires sont conçues avec un substrat diélectrique adapté aux hautes fréquences utilisées par la 5G. Elles sont capables de fournir une directivité élevée, une large bande passante et une faible perte de signal. Ces caractéristiques permettent aux antennes planaires d'offrir des performances supérieures en termes de transmission et de réception de signaux dans le contexte exigeant des réseaux 5G.

En ce qui concerne le deuxième critère étudié, la polarisation circulaire apparaît comme la solution idéale pour éliminer les pertes dues à la polarisation. Elle permet une orientation arbitraire entre l'antenne d'émission et l'antenne de réception, ce qui améliore la mobilité et réduit significativement les réflexions par trajets multiples. En raison de ces avantages, les antennes à polarisation circulaire sont largement utilisées dans diverses applications, telles que les communications mobiles, les communications par satellite et les systèmes radar.

L'objectif de ce mémoire est la conception et la réalisation d'une antenne à polarisation circulaire pour les applications 5G. Pour atteindre cet objectif, notre travail est réparti sur quatre chapitres :

Le premier chapitre introductif aborde les aspects généraux de la technologie 5G, en fournissant un bref historique de son développement, ses principes fondamentaux, son



architecture et ses différents domaines d'application.

Le second chapitre se concentre sur un état de l'art des antennes, en abordant leur définition. Il examine ensuite les principes théoriques qui régissent leur fonctionnement, en passant en revue leurs principales caractéristiques. Enfin, il énumère les différents domaines d'application où les antennes sont utilisées.

Le troisième chapitre est consacré à une description générale des antennes imprimés, en mettant en évidence leur principe de fonctionnement, avec une présentation des formes d'une antenne planaire et les différentes méthodes d'alimentation.

Le dernier chapitre est dédié à la conception d'antenne rectangulaire alimentée par une ligne micro-ruban, Dans la conception de l'antenne proposée, nous avons utilisé le logiciel de simulation « CST MICROWAVE STUDIO ».

**CHAPITRE I**  
**ASPECTS GENEREAUX SUR LA 5G**

## I.1. Introduction

Ce chapitre se consacrera à l'exploration des aspects généraux caractérisant la technologie 5G. Nous débuterons par un bref rappel historique relatif à l'émergence de cette cinquième génération de norme mobile. Ensuite, nous exposerons les principes fondamentaux ayant guidé la conception de la 5G. L'analyse portera alors sur l'architecture spécifique à cette technologie, pour finalement s'attacher à un examen de ses différents cas d'usage et domaines applicatifs.

## I.2. Historique de la 5G

L'évolution du système de téléphonie mobile est principalement divisée en cinq générations.

La première génération du système de communication mobile basé sur un signal analogique est née dans les années 1980 et a aidé les gens à se débarrasser des chaînes de la ligne téléphonique.

Dans les années 1990, des systèmes de communication mobile de deuxième génération (2G) plus efficaces basés sur la communication numérique ont vu le jour, et par la suite, les communications mobiles personnelles ont connu un développement rapide à l'échelle mondiale.

Après 2000, avec le déploiement des systèmes 3G, les gens peuvent profiter d'une expérience Internet mobile plus rapide, comme la visiophonie.

En 2010, le déploiement du réseau commercial 4G basé sur l'évolution à long terme (LTE) a encore amélioré la capacité du système et l'expérience utilisateur. Selon les statistiques de l'Initiative mondiale TD-LTE (GTI), 364 réseaux commerciaux LTE ont été lancés au troisième trimestre de l'année 2015.

Avec le déploiement des systèmes IMT-Advanced (IMT-A) dans le monde, les technologies de communication mobile de 5G émergent dans les domaines de la recherche. [1]

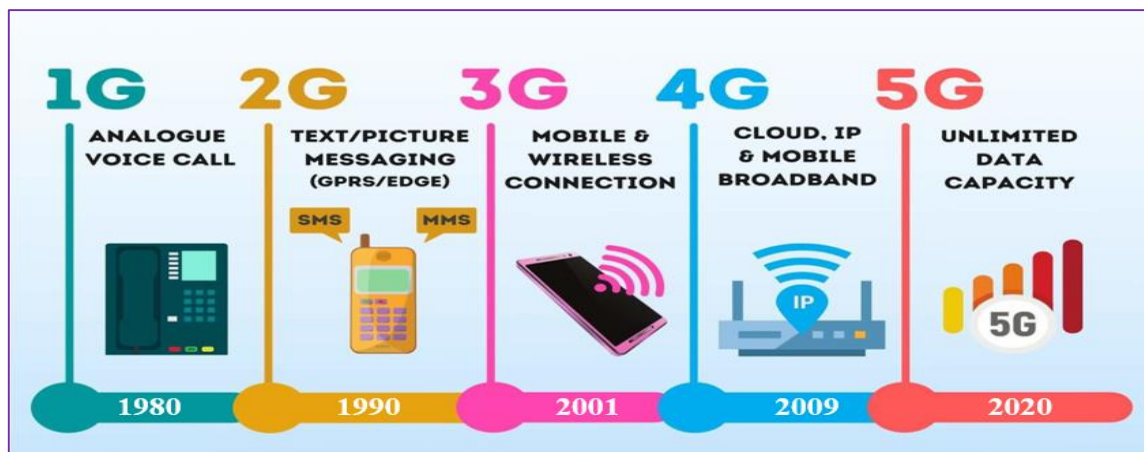


Figure I.1. Evaluation de la 5G [2]

### **I.3. Présentation de la 5<sup>ème</sup> génération**

Le concept de la technologie 5G, qui représente un bond en avant important dans les normes de télécommunications mobiles par rapport à la norme actuelle 4G LTE. Elle englobe les réseaux mobiles de cinquième génération et les systèmes sans fil, qui ont été approuvés pour le déploiement par des organisations telles que l'Union internationale des télécommunications (UIT) et le partenariat 3GPP. [3]

L'avènement de la 5G a été stimulé par les exigences de performance technique de l'UIT-R pour l'IMT-2020 et le rapport technique du 3GPP sur les scénarios et les exigences. La technologie 5G vise à atteindre des débits de données élevés pour un grand nombre d'utilisateurs tout en améliorant l'efficacité du réseau dans l'utilisation du spectre radioélectrique. [4]

Il est important de noter que le développement d'une nouvelle technologie mobile prend du temps, avec une durée de vie d'environ 20 ans pour chaque génération. Les travaux sur la technologie 4G ont commencé en 2003, ont abouti à son lancement commercial en 2010 et devraient se poursuivre jusqu'en 2030.

En revanche, la conceptualisation de la norme de télécommunication de pointe (La technologie 5G) a commencé en 2012 avec un déploiement commercial prévu en 2020. [5]

Cependant, en se basant sur les cycles de développement précédents des technologies mobiles, certains experts estiment que la 6G pourrait commencer à émerger vers la fin des années 2020 ou le début des années 2030. Cela dépendra largement des progrès réalisés dans les domaines clés de la technologie des télécommunications, ainsi que des besoins émergents des utilisateurs et des industries. Les caractéristiques potentielles de la 6G pourraient inclure des vitesses de données encore plus élevées, des latences extrêmement faibles, une connectivité massive des appareils IoT, une efficacité énergétique accrue et des capacités de traitement avancées.

#### **I.3.1. Principe de la 5<sup>ème</sup> génération**

La technologie utilise deux bandes de fréquence principales pour transmettre des données: la bande Sub 6GHz et la bande UHF (Ultra Haute Fréquence) entre 6 et 300 GHz. Voici une explication détaillée des éléments mentionnés :

**I.3.1.1. Bandes de fréquences**

- **Sub 6GHz** : Cette bande de fréquence inclut les fréquences en dessous de 6 GHz. Elle est utilisée pour les communications sans fil car elle offre un bon équilibre entre la portée et la capacité de transmission de données. Les signaux Sub 6GHz peuvent couvrir de plus longues distances et pénétrer les obstacles comme les murs .
- **UHF (6 à 300 GHz)** : Cette bande de fréquence comprend les fréquences ultra-hautes, qui peuvent transporter des quantités massives de données à des vitesses extrêmement rapides. Cependant, les signaux dans cette bande ont une portée plus limitée et sont plus facilement bloqués par des obstacles physiques. [6]

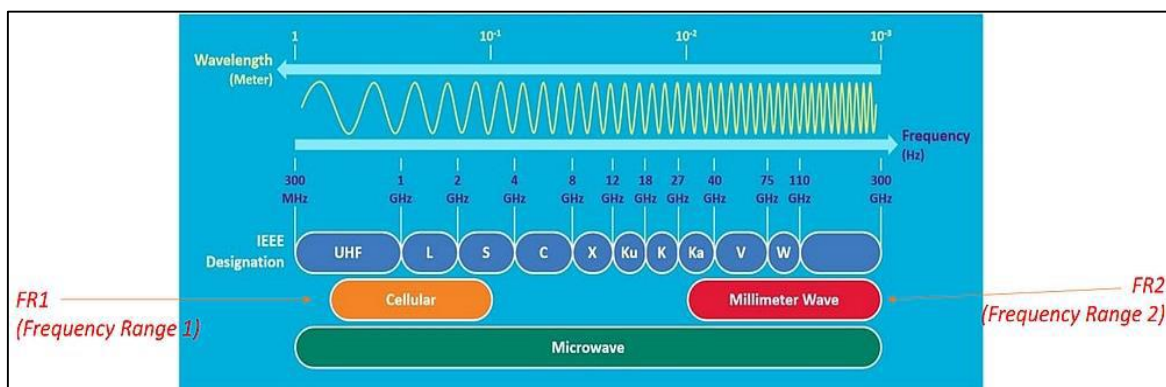


Figure I.2. Spectre de la 5G [6]

**I.3.1.2. Fréquences des ondes millimétriques**

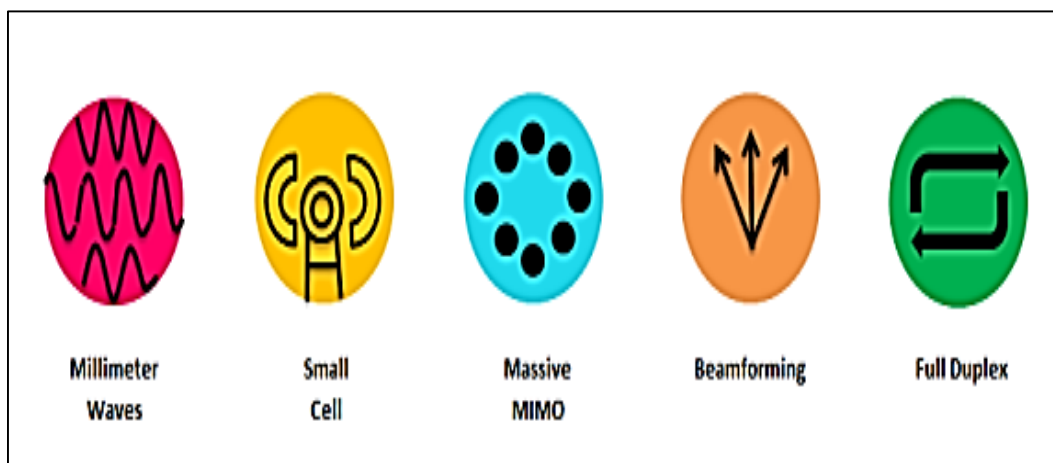


Figure I.3. Les techniques utilisées dans la 5ème génération [7]

Les fréquences millimétriques font référence aux ondes radioélectriques qui sont comprises dans la plage de fréquences allant de 30 à 300 GHz.

**I.3.1.3. Microcellules**

Les microcellules sont des dispositifs qui ont pour objectif d'améliorer l'efficacité spectrale d'une zone donnée tout en réduisant la taille des cellules, ce qui permet de diminuer le nombre d'utilisateurs par cellule. Grâce à cette diminution, le spectre peut être alloué plus efficacement pour chaque utilisateur. Cette technique permet ainsi d'augmenter considérablement la capacité totale du réseau, car le spectre peut être réutilisé de façon plus efficace. [7]

**I.3.1.4. MIMO massif**

Le MIMO massif se réfère à l'utilisation d'un grand nombre d'antennes dans un réseau MIMO (entrées multiples, sorties multiples) pour améliorer les performances de la transmission de données. Cette technique permet de réduire les interférences à travers plusieurs émetteurs et récepteurs pour améliorer la qualité du signal, augmenter la capacité de transmission des données et élargir la portée du réseau. [8]

**I.3.1.5. Beamforming**

Le beamforming se réfère à la capacité d'adapter le diagramme de rayonnement d'un réseau d'antennes selon un modèle spécifique, ce qui permet de concentrer le signal dans une direction particulière ou de former des faisceaux pour améliorer la qualité et la portée de la communication. Cette technique permet d'optimiser la transmission du signal pour des zones spécifiques, en concentrant la puissance d'émission dans la direction du récepteur souhaité et en minimisant les interférences avec d'autres signaux.

Il est souvent utilisé en conjonction avec d'autres technologies de télécommunications, telles que le MIMO, pour améliorer encore la qualité et la portée des communications. [7]

**I.3.1.6. Technique de transmission simultanée full-duplex**

La transmission full-duplex est une méthode de connexion ou de réseau qui permet la transmission et la réception simultanées de données sur une même liaison ou un même canal de communication. Cette technique autorise la communication bidirectionnelle sur une seule fréquence de transmission, permettant ainsi une utilisation plus efficace du spectre. En d'autres termes, la transmission full-duplex permet la réception de données tout en transmettant simultanément des données sur une même liaison de communication. [7]

**I.4. Architecture de la technologie 5G**

Un réseau 5G se compose de trois couches principales : "Services innovants", "Plateforme d'activation" et "Radio ultra-connectée". Chaque couche remplit un rôle fonctionnel spécifique

pour assurer le bon fonctionnement du réseau.

La première couche, « Services Innovants », offre des applications et des services avancés tels que la réalité virtuelle et augmentée, l'Internet des objets et les voitures autonomes, qui répondent aux besoins en constante évolution des utilisateurs finaux.

La deuxième couche, « Plateforme d'activation », fournit des fonctionnalités de virtualisation, d'automatisation et de programmable pour simplifier la gestion du réseau et garantir sa flexibilité.

La troisième couche, « Radio hyperconnectée », fournit une connectivité ultra-rapide et fiable à travers une large bande de fréquences, permettant des taux de transfert de données très élevés pour un grand nombre d'utilisateurs.

En combinant les capacités de ces trois couches, le réseau 5G est capable de gérer les besoins variés et exigeants des utilisateurs d'aujourd'hui, tout en offrant des performances améliorées en termes de débits de données, de vitesse de transmission et de capacité de communication. [9]

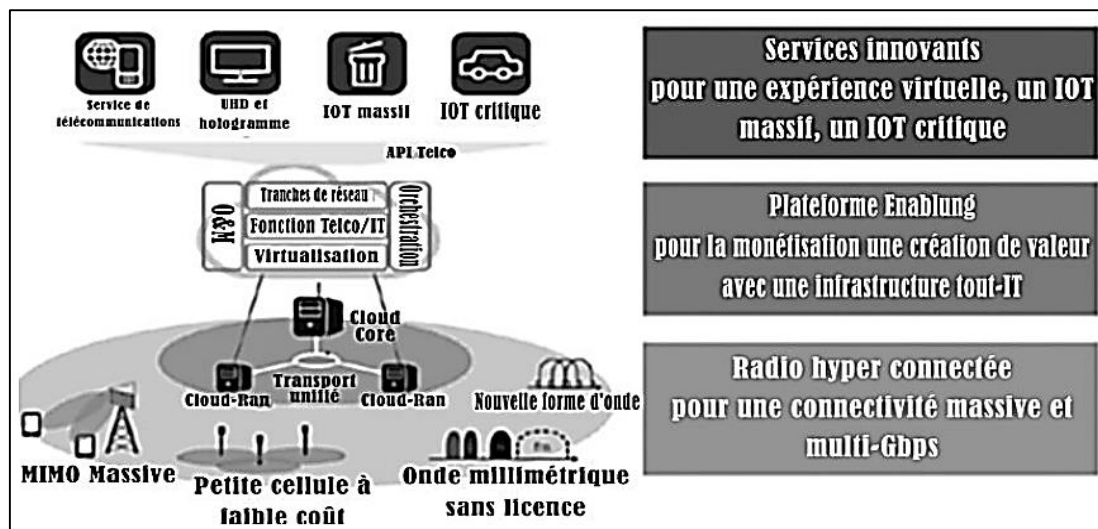


Figure I.4. L'Architecture de la 5G [10]

### I.4.1. Services innovants

La couche supérieure de l'architecture 5G regroupe les services novateurs offerts par cette technologie, exploitant toutes ses capacités. Les utilisateurs bénéficient d'une expérience immersive d'une grande fiabilité. Les services proposés par la 5G incluent le streaming vidéo ainsi que les hologrammes, réalisant des expériences virtuelles incroyables grâce à des formats

tels que la vidéo en ultra haute définition (UHD). De plus, grâce à la bande passante élevée et à la fiabilité accrue de la 5G, le déploiement de services de contrôle des robots à distance et de l'internet des objets sera facilité. [9]

#### **I.4.2. Plateforme de validation (Architecture et gestion du réseau)**

- ▶ La couche intermédiaire du réseau 5G se compose d'un réseau sous-jacent et d'une infrastructure axée sur les services. Son rôle est de créer des valeurs centrées sur les services pour soutenir la couche des services innovants, en intégrant de manière cohérente les différents éléments disparates de l'infrastructure. Pour accomplir cette tâche, deux activateurs clés ont été identifiés pour l'avenir des télécommunications : la virtualisation des fonctions réseau (NFV) et le réseau défini par logiciel (SDN).
- ▶ Le SDN (Software Defined Networking) a pour objectif de séparer la partie de contrôle du réseau de la partie opérationnelle, en centralisant le contrôle du réseau sous forme de logiciels sur des serveurs plus puissants de manière indépendante des spécifications des équipements. Cela permet le déploiement de services à forte valeur ajoutée dans des environnements divers tels que l'équilibrage de charge, le routage intelligent et la configuration dynamique.
- ▶ Le Cloud-RAN, qui est une innovation du SDN, implique une architecture de réseau différente de celle actuelle. Les unités de traitement du signal, généralement situées au niveau des stations de base, sont déportées vers le Cloud centralisé, proche des antennes, et communiquent avec les têtes de réseau via un réseau de fibre optique. Cette centralisation permet une vision globale de toutes les stations déployées, une gestion des interférences entre les cellules et les terminaux, ainsi qu'une coordination du traitement du signal.
- ▶ L'API (Application Programming Interface) est un ensemble d'interfaces de programmation d'applications bien défini permettant d'automatiser le réseau interne pour une gestion automatisée du réseau.
- ▶ Le NFV (Network Function Virtualisation), complément du SDN, vise à virtualiser les fonctions réseau en remplaçant le matériel par des logiciels exécutés sur des serveurs. Le NFV permet d'accélérer le déploiement des services et de permettre des changements rapides dans l'infrastructure réseau. [11]



### **I.4.3. Radio hyper-connectée**

La couche inférieure du réseau 5G fournit de manière efficace et transparente à la couche intermédiaire de la "plateforme d'activation" une quantité importante de données. Cette couche est essentielle pour répondre aux exigences strictes en termes de débit de données et de latence du réseau. Pour satisfaire ces exigences, la couche inférieure intègre de nombreuses nouvelles technologies de réseau qui font actuellement l'objet d'études et de recherches intensives par les organismes de recherche. Ces technologies permettent de faire face au trafic de données massif généré par les utilisateurs finaux et de fournir une expérience utilisateur fluide et de haute qualité, tout en garantissant la fiabilité et la sécurité du réseau. [10]

### **I.5. Objectifs de la 5ème génération**

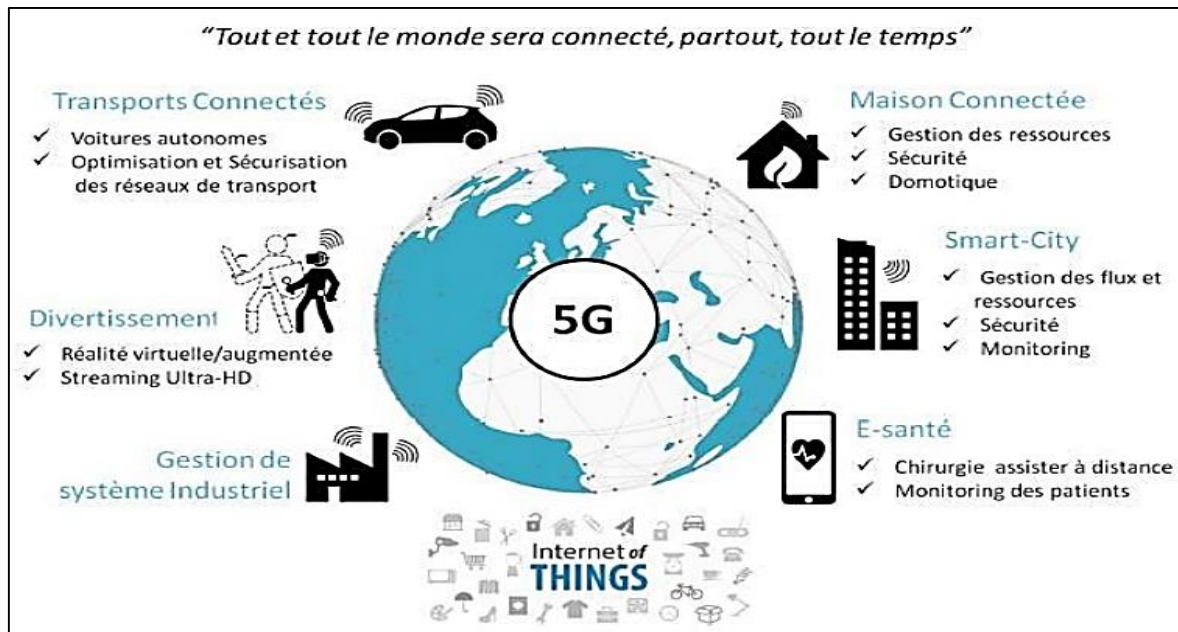
La technologie de la 5G est amenée à jouer un rôle important dans la société, tant sur le plan individuel que du point de vue des objets connectés. Cela est dû en grande partie à la demande croissante pour des services de données de meilleure qualité sur les réseaux sans fil. Les réseaux 5G ont émergé en réponse à cette demande, offrant des capacités accrues et une connectivité à l'échelle mondiale : [5]

- Offrir un accès Internet haut débit via des smartphones ou des tablettes.
- Atteindre des vitesses maximales allant jusqu'à 1 Go par seconde.
- Traiter des volumes de données considérablement plus importants, avec une multiplication par un facteur de 1 000.
- Améliorer la vitesse de transfert des données.
- Réduire la latence pour obtenir un réseau très réactif.
- Réduire le nombre d'antennes nécessaires, permettant une multiplication par 100 du nombre d'appareils finaux pouvant être connectés à chaque antenne. Cependant, le nombre d'antennes requis dépendra principalement des fréquences utilisées.
- Réduire la consommation d'énergie du réseau de 90%.
- Offrir une autonomie de batterie pouvant atteindre 10 ans.
- Augmenter la bande passante par unité de surface d'un facteur de 1 000.
- Assurer une disponibilité du réseau de 99,999%. [5]

### **I.6. Domaines d'application de la 5G**

Le besoin croissant en volume de données sur les réseaux sans fil, la demande pour des services de qualité supérieure et la pression concurrentielle pour réduire les coûts ont été des facteurs clés dans l'émergence des réseaux de cinquième génération. L'un des principaux atouts

de la 5G est sa capacité à créer un réseau mondial, basé sur l'utilisation de toutes les technologies de communication disponibles. Cette technologie offrira une grande variété d'applications et de services innovants, transformant les industries et les économies en favorisant des solutions plus efficaces et rentables. [12] .



**Figure I.5.** Les applications de réseaux 5G [10]

### I.6.1. Télécommunications et connectivité

La 5G apporte une amélioration significative à la connectivité mobile, grâce à des vitesses de données plus rapides, une latence réduite et une plus grande capacité du réseau. En conséquence, les utilisateurs peuvent bénéficier de communications plus rapides et plus fiables, ainsi que d'une expérience utilisateur améliorée pour les services de téléphonie mobile et d'Internet.

### I.6.2. Véhicules autonomes et transport intelligent

La technologie de la 5G joue un rôle crucial dans le développement des véhicules autonomes et du transport intelligent. Elle permet une communication en temps réel entre les véhicules, les infrastructures routières et les piétons, améliorant ainsi la sécurité routière, la gestion du trafic et l'efficacité des moyens de transport. Les vitesses de données plus élevées et la latence réduite de la 5G permettent une connectivité rapide et fiable, et offrent ainsi de nouvelles possibilités pour les systèmes de transport intelligents, comme la réduction de la congestion et l'amélioration de la sécurité pour tous les utilisateurs de la route.[14]

### **I.6.3. Internet des objets (IoT)**

La technologie 5G fournit une connectivité à grande échelle pour l'Internet des Objets (IoT), facilitant ainsi la connexion et la gestion simultanée d'un grand nombre d'appareils intelligents. La 5G permet un déploiement plus efficace de l'IoT dans différents domaines, tels que la domotique, les villes intelligentes, l'agriculture intelligente, la santé connectée, entre autres. Cette technologie offre des avantages pour améliorer la gestion de la performance, la sécurité et la protection de la vie privée des différents dispositifs IoT, en garantissant ainsi une connectivité fiable et rapide à grande échelle pour l'IoT.

### **I.6.4. Industrie**

La technologie de la 5G offre des capacités de communication avancées pour soutenir la transformation numérique de l'industrie. Elle permet une connectivité et un contrôle en temps réel des machines et des équipements industriels, ce qui favorise l'automatisation, l'efficacité opérationnelle ainsi qu'une gestion intelligente de la chaîne d'approvisionnement. La 5G permet également une optimisation de la productivité et une réduction significative des temps d'arrêt, ainsi qu'un meilleur contrôle de la qualité pour les processus de production automatisés grâce à la possibilité de surveiller et d'analyser en temps réel les données de l'ensemble du système. Ces avantages offerts par la 5G ont un grand potentiel pour améliorer l'efficacité opérationnelle et la rentabilité des entreprises de l'industrie et transformer leurs activités.

### **I.6.5. Santé et télémédecine**

La technologie 5G permet des applications de télémédecine avancées telles que la consultation à distance, la chirurgie assistée à distance, la surveillance médicale à distance, et bien plus encore. Elle rend possible la collecte et l'analyse en temps réel des données de santé, ce qui peut améliorer les soins de santé et la prévention des maladies de manière significative. Les capacités de communication avancées de la 5G permettent également une connectivité plus rapide et plus fiable pour les soins de santé à distance, offrant ainsi des opportunités pour les patients éloignés ou pour ceux qui ont des besoins spécifiques de se connecter facilement avec les professionnels de la santé. En somme, la 5G peut transformer les soins de santé en ouvrant de nouveaux horizons pour des applications de télémédecine plus avancées, offrant ainsi des innovations importantes pour la prévention, le diagnostic et le traitement des maladies. [14]

### **I.6.6. Médias et divertissement**

La technologie 5G offre des capacités avancées de diffusion en continu à haute qualité, de réalité virtuelle et de réalité augmentée. Cette technologie permet également de nouvelles expériences interactives, telles que des jeux en ligne à faible latence et des événements sportifs immersifs. Avec ses vitesses de données élevées et une latence réduite, la 5G favorise la mise en place de services de loisirs innovants et immersifs. Les diffuseurs de contenu peuvent fournir un contenu plus riche et plus dynamique, avec moins de temps d'attente, ce qui améliore l'expérience de visionnage. Les amateurs de jeux peuvent également bénéficier d'une connexion plus rapide et fiable, permettant une expérience plus fluide et plus rapide en ligne. En somme, la 5G représente une opportunité pour les joueurs, les amateurs de divertissement et les professionnels de la diffusion pour profiter pleinement des expériences immersives, créatives et innovantes. [14]

### **I.6.7. Agriculture**

Développe par l'utilisation de capteurs et de moteurs, par exemple, pour mesurer et relier la qualité du sol, la pluie, la température et le vent pour surveiller la croissance des cultures.

## **I.7. Conclusion**

Nous avons étudié l'impact majeur de la technologie 5G sur la transformation des communications sans fil. La 5G représente une avancée significative, offrant des vitesses de connexion plus rapides, une latence réduite et une capacité accrue pour répondre aux besoins croissants de l'Internet des objets et des applications exigeantes en données. Grâce à son architecture innovante et à ses nombreux domaines d'application, la 5G ouvre la voie à de nouvelles possibilités, révolutionnant notre façon de communiquer, de travailler et de vivre dans un monde toujours plus connecté. Cette technologie est promise à devenir un catalyseur essentiel pour une transformation numérique réussie, apportant des innovations cruciales pour répondre aux besoins de l'industrie, des soins de santé, de la mobilité, du divertissement et de la vie quotidienne.

**CHAPITRE II**  
**EXPLORATION DES ANTENNES**

## II.1. Introduction

L'objectif de ce chapitre sera de proposer une vue d'ensemble du concept d'antenne, en débutant par une clarification de ce qu'il recouvre. Nous nous attacherons dans un premier temps à exposer les principes théoriques sous-tendant leur fonctionnement, pour ensuite passer en revue leurs caractéristiques essentielles. Enfin, nous concluons par l'examen de leurs domaines d'utilisation les plus significatifs.

## II.2. Définition d'une Antenne

Une antenne est communément décrite comme un transducteur qui permet de convertir l'énergie électromagnétique guidée en une forme rayonnée, et inversement. En d'autres termes, une antenne est une structure qui permet de transformer une onde électromagnétique en une énergie électrique et vice versa. Elle est souvent définie comme une structure qui marque la transition entre un circuit de guidage et une onde dans l'espace libre. Cela signifie qu'une antenne peut être utilisée pour émettre de l'énergie électromagnétique dans l'espace environnant à partir d'une source d'alimentation électrique, ou inversement pour capter des ondes électromagnétiques et produire de l'énergie électrique qui peut être transférée à une charge. En somme, une antenne sert de médiateur entre les formes d'énergie électrique et électromagnétique pour permettre leur conversion et leur transmission dans des applications pratiques. [15] .

## II.3. Caractéristiques d'une antenne

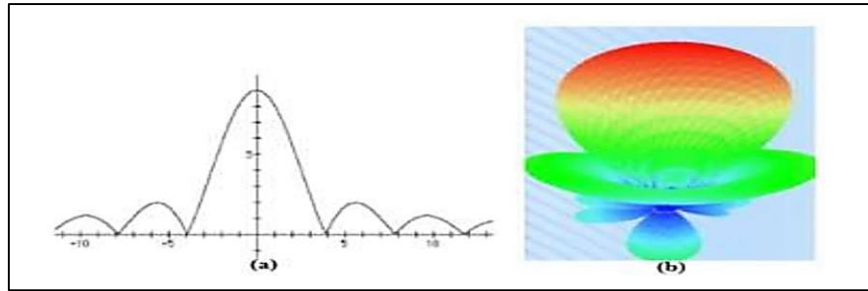
### II.3.1. Directivité

La directivité  $D(\Theta, \phi)$  d'une antenne dans une direction  $(\Theta, \phi)$  est le rapport entre la puissance rayonnée dans une direction donnée  $P(\Theta, \phi)$  et la puissance que rayonnerait une antenne isotrope [16] .

$$D(\theta, \varphi) = 4\pi \frac{P(\theta, \varphi)}{P_R} \quad [\text{II.1}]$$

### II.3.2. Diagramme de rayonnement

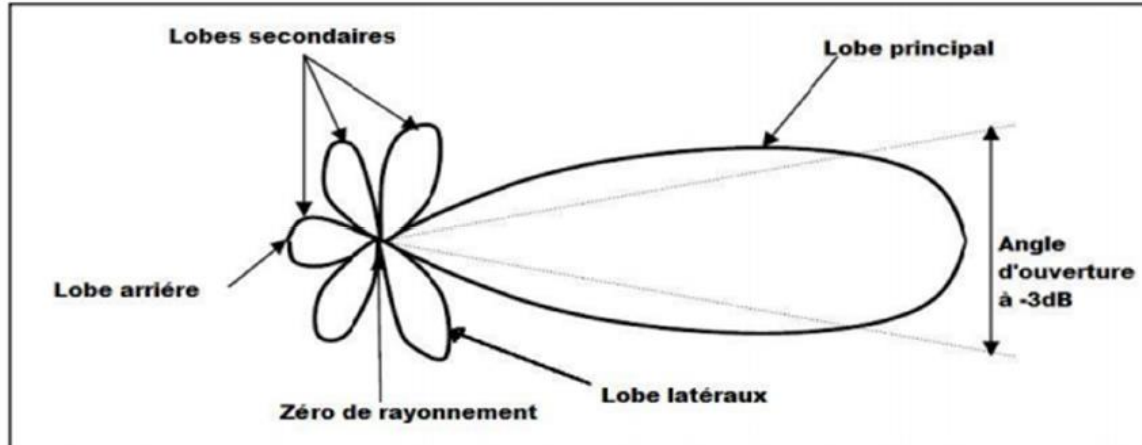
Le diagramme de rayonnement d'une antenne, présente les variations de la puissance rayonnée par l'antenne dans différentes directions de l'espace. Il indique la direction dans l'espace dans laquelle la puissance rayonnée est maximal [17].



**Figure II.1.** Diagramme de rayonnement en valeurs logarithmiques (a), diagramme de rayonnement en 3D (b) [17]

En règle générale, le diagramme de rayonnement est enregistré dans deux plans distincts : le plan E (vertical) et le plan H (horizontal), correspondant respectivement aux plans où les champs électriques et magnétiques atteignent leurs valeurs maximales [81]. Ce diagramme illustre les fluctuations de la puissance rayonnée par l'antenne par unité d'angle solide dans différentes directions de l'espace. En réalité, l'énergie rayonnée est répartie de manière inégale dans l'espace, avec certaines directions favorisées, appelées lobes de rayonnement.

Une variante plus pratique est l'antenne directionnelle, qui émet davantage de puissance dans certaines directions et moins dans d'autres. Le diagramme de rayonnement de l'antenne directive est représenté dans la "Figure II.1". [18]



**Figure II. 2.** Diagramme de rayonnement d'une antenne directive [18]

- **Un lobe principal :** C'est le lobe de rayonnement contenant le maximum d'énergie et la direction du maximum de rayonnement.
- **Un angle d'ouverture :** C'est l'angle de direction pour lequel la puissance rayonnée est la moitié de la puissance rayonnée dans la direction la plus favorable. Plus cet angle est étroit plus l'antenne est directive.
- **Des lobes secondaires :** Ils représentent le rayonnement de l'antenne dans les directions indésirables.

- **Un lobe arrière** : C'est le lobe secondaire présent dans la direction opposé à 180° du lobe principal.

### II.3.3. Coefficient de réflexion

De manière général lorsqu'une onde incident change de milieu de propagation, une partie de cette onde est réfléchié et l'autre partie et transmise dans l'autre milieu.

Le coefficient de réflexion d'une antenne se définit comme étant le rapport des amplitudes des ondes incidentes sur les ondes réfléchiés [16].

$$S_{11} = \frac{Z_e - Z_c}{Z_e + Z_c} \quad [\text{II.2}]$$

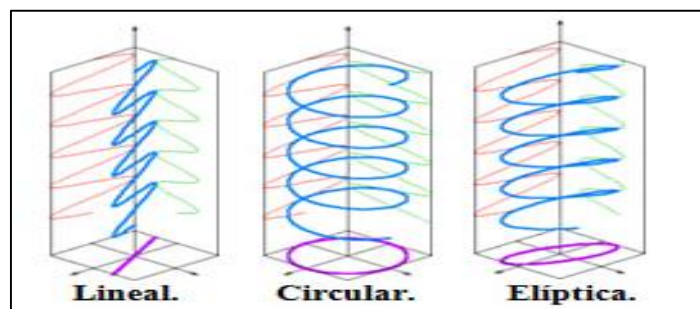
### II.3.4. Gain

Il est égal à la puissance rayonnée  $p$ , sur la puissance d'alimentation  $P_a$ . Il dépend de sa directivité, c'est le rapport entre la puissance rayonnante dans le lobe principal et la puissance rayonnée par une antenne de référence [17].

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

### II.3.5. Polarisation

La polarisation d'une antenne dérive de l'orientation du champ électrique émis. Elle est définie par le type de polarisation d'onde qu'elle transmet dans une direction donnée (généralement dans l'axe principal), et dans la zone lointaine. L'état de polarisation de l'onde qu'une antenne rayonne peut être : [19]



**Figure II.3.** Différentes formes de polarisation de l'onde électromagnétique. [17]

#### II.3.5.1. Polarisation Linéaire

Le champ  $E$  est toujours parallèle à une direction, durant la propagation. Il est contenu dans un plan qui contient la direction de propagation appelée plan de polarisation. Elle peut être produite par la combinaison des ondes polarisées linéairement et en phase (ou en opposition de phase). [15]



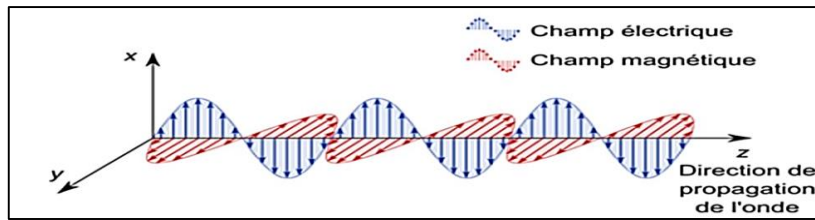


Figure II.4. Polarisation linéaire [19]

**II.3.5.2. Polarisation elliptique**

C'est le cas général, qui peut être produit par toute autre combinaison d'ondes. L'extrémité du vecteur E décrit alors une ellipse dans le plan perpendiculaire à la direction de propagation mais tourne à une vitesse angulaire non constante dans celui-ci [20].

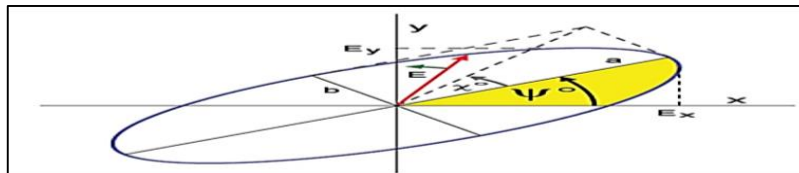


Figure II.5. Polarisation elliptique [20]

**II.3.5.3. Polarisation Circulaire**

A une coordonnée  $Z=Z_0$ , le long de l'axe de propagation, l'extrémité du champ harmonique E décrit un cercle à vitesse angulaire constante  $\omega$  dans le plan perpendiculaire à la direction de propagation. Elle peut être produite par deux ondes à polarisation linéaire de même amplitude et déphasées de  $\pm 90^\circ$ . Le sens de rotation sur le plan conduit à la classification circulaire gauche ou circulaire droite. [20].

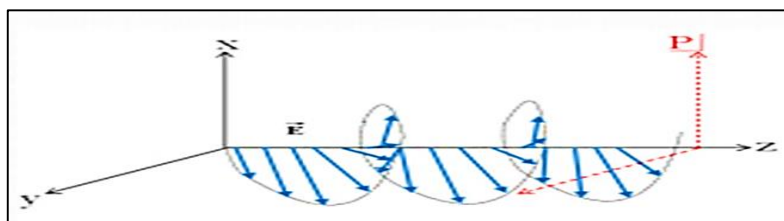


Figure II.6. Polarisation circulaire [17]

Le rapport axial (AR) qui est le rapport du grand axe au petit axe de l'ellipse :

$$AR = \text{Cotg } \varepsilon \tag{II. 4}$$

$\varepsilon$  est compris entre  $-45^\circ \leq \varepsilon \leq +45^\circ$  il se calcule :

$$\sin 2\varepsilon = \sin 2\gamma \sin \delta \quad [\text{II.5}]$$

L'angle  $\gamma$  comprise entre  $0^\circ \leq \gamma \leq 90^\circ$  est donné par :

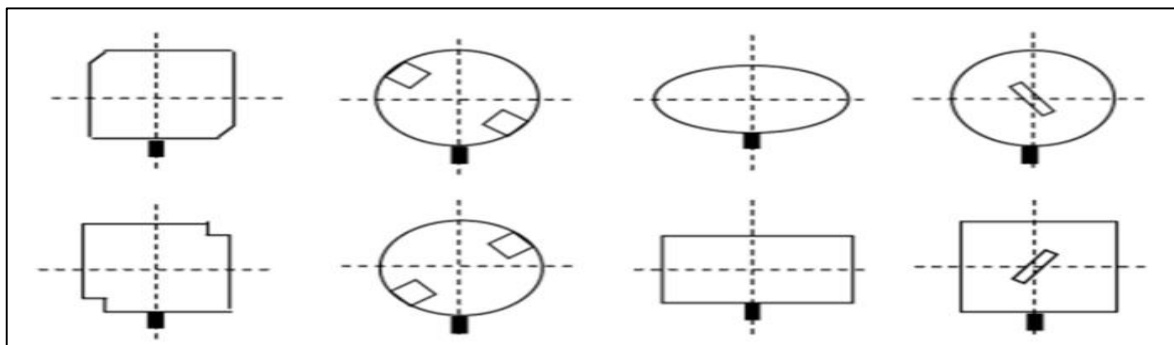
$$\gamma = \tan^{-1} \frac{E_2}{E_1} \quad [\text{II.6}]$$

**Le rapport axial (AR)** et l'angle  $\varepsilon$  déterminent la polarisation du champ magnétique. En effet Ces paramètres sont négatifs pour une polarisation circulaire droite et positifs pour une Polarisation gauche. En effet d'après les relations ci-dessus  $\sin 2\varepsilon$  est du même signe que :

$\sin \gamma$  Puisque  $2\gamma$  est toujours positif ( $0^\circ \leq 2\gamma \leq 90^\circ$ ) .

Les caractéristiques de la polarisation d'une antenne étant définies, nous allons présenter quelques méthodes ou techniques qui permettent la création de la polarisation circulaire pour les antennes imprimées.

Des déformations géométriques, sur une antenne patch classique, permet de créer deux modes résonants orthogonaux à des fréquences sensiblement différentes et déphasés de  $90^\circ$ . Ces déformations peuvent être des encoches (de formes différentes), des fentes, un carré transformé en un rectangle ou d'un cercle en une ellipse . [21]



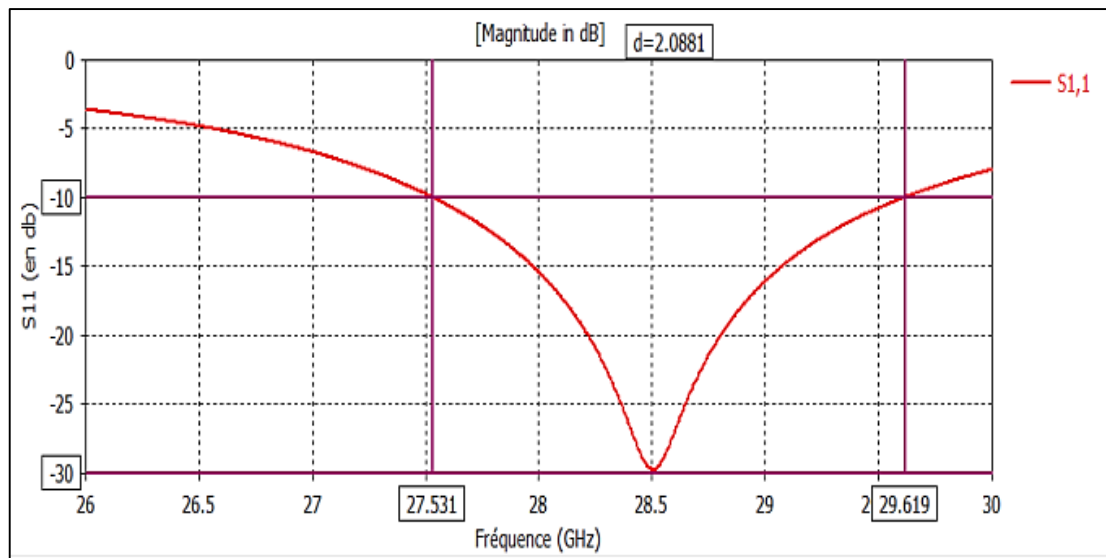
**Figure II.7.** Différentes déformations d'une antenne imprimée [21]

### II.3.6. Bande passante

La bande passante d'une antenne définit la plage de fréquence dans laquelle le coefficient de réflexion est inférieur à un seuil fixé arbitrairement.

On déduit souvent la bande passante à partir de la courbe de son coefficient de réflexion inférieur à -10 dB [22].

$$BP = \frac{f_{max} - f_{min}}{f_{coupure}} \quad [\text{II.7}]$$



**Figure II.8.** Variation de  $S_{11}$  en (dB) en fonction de la fréquence [22]

## II.4. Tendances actuelles en matière d'antennes pour la dernière génération

Dans le contexte de la 5G, les antennes ont un rôle essentiel à jouer en permettant des communications ultrarapides, une faible latence et une capacité accrue. Les antennes ont donc une influence importante sur les performances des réseaux de communication 5G. Ainsi, on observe actuellement plusieurs tendances émergentes en matière d'antennes pour la 5G, visant à améliorer les performances, la polyvalence et les fonctionnalités des systèmes de communication sans fil de la dernière génération. [23]

### II.4.1. Antennes multi-éléments (MIMO)

La technologie MIMO, qui signifie "Multiple-Input Multiple-Output", est une technique couramment utilisée dans le cadre de la 5G pour améliorer les performances des systèmes de communication. Les antennes MIMO ont la capacité d'utiliser plusieurs éléments d'antenne pour transmettre et recevoir des signaux simultanément, ce qui permet d'accroître la capacité du système, d'améliorer la qualité du signal et de réduire les interférences. Cette technologie est donc un outil clé pour répondre aux exigences croissantes en matière de débit de données et de qualité de transmission des signaux dans notre environnement sans fil. [23]



**Figure II.9.** Antenne multi-élément (MIMO) 5G [23]

#### **II.4.2. Antennes à faisceaux orientables (Beamforming)**

Le beamforming est une technique qui permet de diriger le signal radio vers une direction spécifique, ce qui améliore la qualité du signal et la couverture. Les antennes à faisceaux orientables dans la 5G utilisent des réseaux d'antennes avec des éléments d'antenne individuels pouvant être contrôlés de manière dynamique pour former des faisceaux étroits et orientables vers les utilisateurs.

#### **II.4.3. Antennes intégrées**

Avec la miniaturisation des dispositifs sans fil, les antennes intégrées sont devenues une tendance importante. Les antennes intégrées sont conçues pour être intégrées directement dans les appareils électroniques, tels que les smartphones, les tablettes et les objets connectés. Elles offrent une solution compacte et esthétiquement agréable, tout en améliorant les performances des communications sans fil. [23]

#### **II.4.4. Antennes à large bande**

La 5G utilise une large bande de fréquences pour prendre en charge les besoins en débit élevé. Par conséquent, les antennes à large bande sont essentielles pour couvrir efficacement cette large plage de fréquences. Les antennes à large bande permettent une utilisation plus efficace du spectre radioélectrique et facilitent la mise en œuvre de diverses fonctionnalités de la 5G, telles que les communications à haut débit et les applications d'Internet des objets.

### **II.4.5. Antennes adaptatives**

Les antennes adaptatives sont conçues pour s'adapter aux conditions changeantes de l'environnement sans fil. Elles utilisent des techniques avancées, telles que l'optimisation du faisceau en temps réel, pour ajuster les caractéristiques de rayonnement de l'antenne en fonction des besoins du système. Cela permet d'améliorer la qualité du signal, d'optimiser la couverture et de réduire les interférences. [21]

### **II.5. Conclusion**

Nous avons présenté une vue d'ensemble des antennes, en soulignant leur importance dans les systèmes de communication sans fil. Nous avons observé que les caractéristiques clés des antennes sont leur bande passante et leur rayonnement. Nous avons également expliqué les différents rôles que les antennes remplissent dans la transmission et la réception de signaux sans fil, ainsi que leurs nombreuses utilisations dans divers domaines. Dans l'ensemble, cette étude fournit des informations importantes pour comprendre l'importance des antennes dans les technologies de communication modernes comme la 5G.

## **CHAPITRE III**

### **LES ANTENNES PLANAIRES (PATCH)**

### III.1. Introduction

Ce chapitre se consacrera à la présentation des antennes planaires, également appelées antennes patch, qui connaissent aujourd'hui un vif succès et sont largement déployées. Nous mettrons en lumière leurs performances en matière de résonance, de polarisation, d'adaptation d'impédance ainsi que leur diagramme de rayonnement. Ces différents aspects cruciaux seront abordés de manière approfondie.

### III.2. Définition d'une Antenne patch

L'antenne patch micro ruban (planaire) est une conception d'une seule couche qui se compose généralement de quatre éléments : le patch (élément rayonnant), le plan de masse, le substrat et la partie alimentation. On peut considérer qu'elle est un élément résonant. Après la détermination de la fréquence, tout (comme le schéma de rayonnement, l'impédance d'entrée) est établi. Le patch se présente sous la forme d'une bande métallique rayonnante extrêmement fine ( $t \ll \lambda_0$ , où  $\lambda_0$  est la longueur d'onde de l'espace libre) [24].

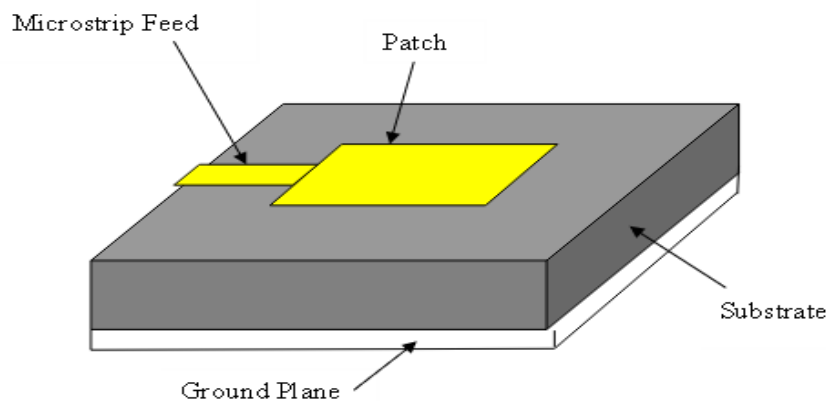


Figure III.1. Géométrie d'une antenne Patch [24]

### III.3. Différentes formes d'une antenne planaire

Il y a de nombreuses formes d'antennes patch ; elles ont été développées pour satisfaire des exigences particulières. La figure III.1 illustre certains des types les plus fréquents. Pour les fréquences d'ondes millimétriques, les patches rectangulaires, carrés et circulaires sont les plus faciles à comprendre pour comprendre les mécanismes de rayonnement.

Il est également crucial de prendre en compte la sélection du substrat, en prenant en compte la température, l'impact humain et d'autres niveaux de fonctionnement environnemental. La fréquence de résonance et la largeur de bande BW sont fortement influencées par l'épaisseur du substrat  $h$  [13].

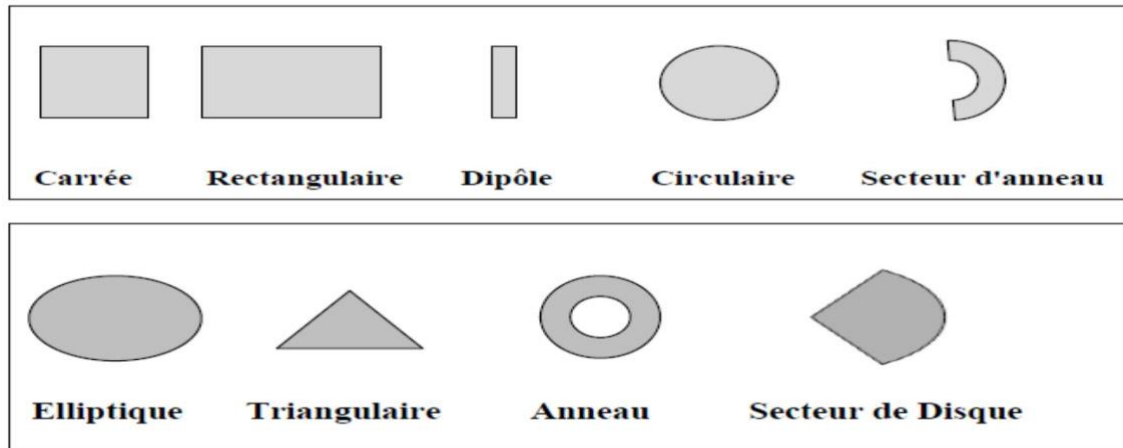


Figure III.2. Les différentes formes d'antenne patch [26]

### III.4. Principe de fonctionnement

Il est possible d'affirmer que l'antenne patch est une ligne de transmission micro ruban dont les deux extrémités sont ouvertes. La deuxième méthode de traitement d'une antenne plane consiste à la traiter comme une cavité résonante, en utilisant deux extrémités rayonnantes. Conçu avec des patches ; un plan de masse et des bords. La cavité joue le rôle de lieu de stockage des charges électriques et de génération d'un champ électrique à basse fréquence entre le patch et le sol. Le champ électrique s'étend sur l'axe Z et n'est pas lié à Z et à l'épaisseur du substrat. En effet, il est essentiel de maintenir l'épaisseur telle que : [26]

$$h \leq \frac{c}{4f\sqrt{(\epsilon - 1)}} \quad \text{[III. 1]}$$

Au fur et à mesure de l'augmentation de la fréquence, la répartition de la charge sur le patch n'est plus homogène, tout comme la répartition du courant et du champ électrique dans le plan xy. On trouvera également un champ magnétique. Le champ électrique dans la cavité rectangulaire est réparti de la façon suivante :

$$E_x = E_y = 0 \quad E_x = E_0 = \cos\left(\frac{m\pi x}{L}\right) \cos\left(\frac{n\pi y}{w}\right) \quad \text{[III.2]}$$

Pour la fréquence de résonance de la cavité (fréquence spécifique) liée à la taille de la cavité rectangulaire, la répartition du champ électrique permet d'optimiser le rayonnement.

$$F_{m,n} = \frac{c}{2\pi\sqrt{\epsilon_r}} \sqrt{\left(\frac{m}{L}\right)^2 + \left(\frac{n}{w}\right)^2} \quad \text{[III.3]}$$



Pour la fréquence de résonance de la cavité (fréquence spécifique) liée à la taille de la cavité rectangulaire, la répartition du champ électrique permet d'optimiser le rayonnement.

Prenons l'exemple de  $L > W$  afin d'analyser la répartition du champ électrique dans la cavité. Quand la longueur de la cavité  $L$  est environ  $\lambda / 2$ , l'antenne aura une résonance similaire à celle d'un dipôle demi-onde. En phase opposée, le champ électrique est le plus grand aux deux extrémités séparées par  $L$ . L'axe  $Y$  (parallèle à  $W$ ) présente un champ électrique pratiquement homogène. Le champ électrique n'est pas, en revanche, homogène le long de l'axe  $X$  (parallèle à  $L$ ). Il possède un seuil minimal et un seuil maximal, et passe par des zéros le long des deux extrémités séparées par  $L$  et le courant orienté selon l'axe  $X$ . [27]

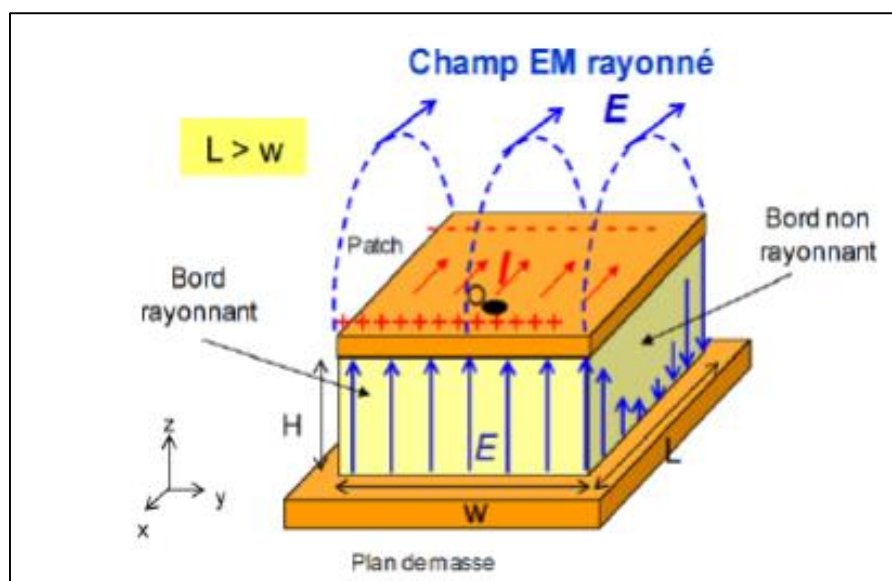


Figure III.3. Rayonnement d'une antenne planaire [27]

### III.5. Techniques d'Alimentation

Il existe de nombreuses méthodes pour alimenter une antenne microruban. Les méthodes les plus populaires sont :

#### III.5.1. Alimentation par une ligne micro ruban

Cette approche alimentaire est très répandue car elle est extrêmement facile à concevoir et à étudier, et extrêmement simple à produire. La représentation graphique illustre un patch qui est alimenté par une ligne micro ruban (habituellement de  $50\Omega$ ) depuis le côté du patch [28].

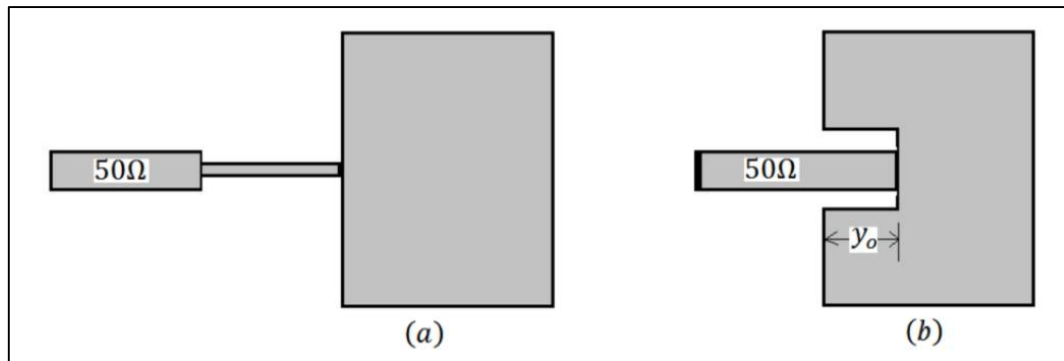


Figure III.4. Patch avec une alimentation par ligne micro ruban. [28]

### III.5.2. Alimentation par une sonde coaxiale (alimentation coplanaire)

L'utilisation d'une sonde pour connecter l'alimentation à l'antenne patch est une méthode extrêmement simple, abordable et performante. En cas d'adaptation du point d'alimentation à  $50 \Omega$ , le concepteur peut utiliser un câble coaxial de  $50 \Omega$  avec un connecteur coaxial de type N. La face arrière de l'antenne micro ruban (le plan de masse) est connectée au connecteur coaxial de type N, tandis que le connecteur central du coaxial traversera le substrat et sera soudé au patch, comme illustré dans la figure III.5 . [27]

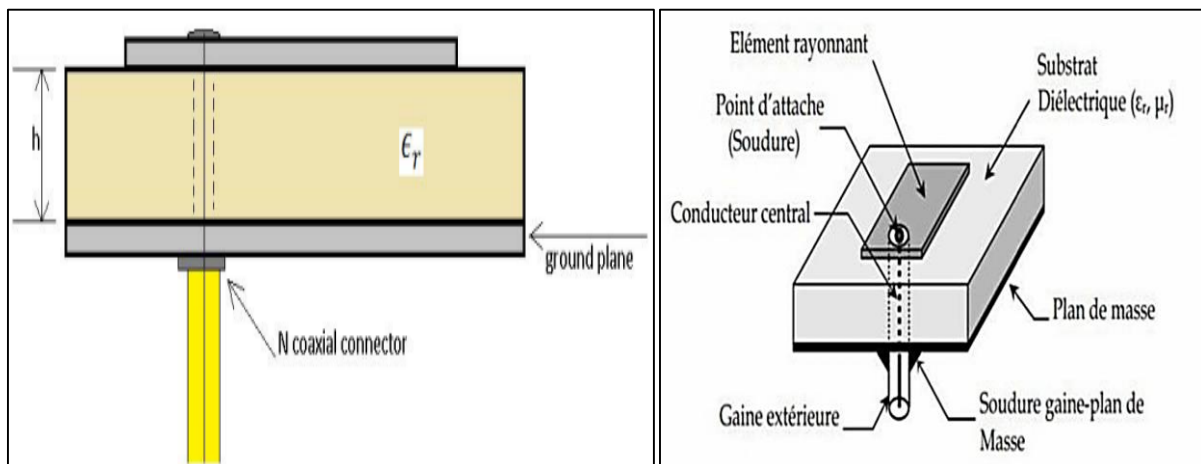


Figure III.5. Alimentation par une sonde coaxiale [29]

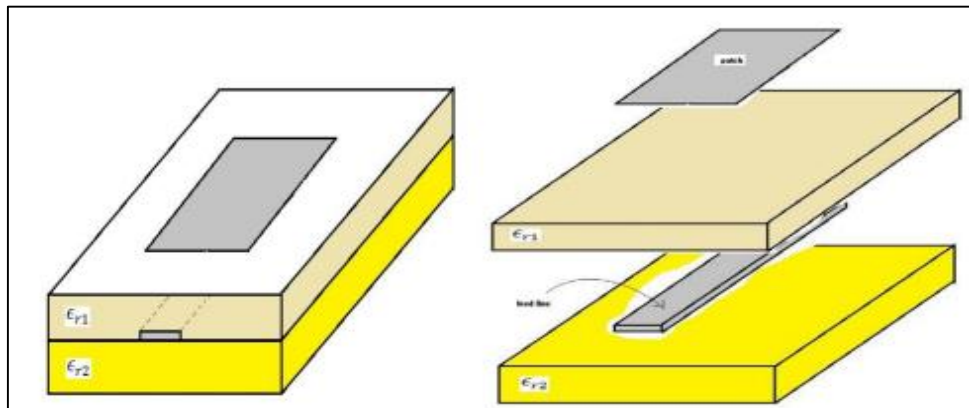
Le principal avantage de cette méthode d'alimentation est de placer l'alimentation GP sous l'élément rayonnant et d'utiliser une ligne non rayonnante (coaxiale), ce qui réduit considérablement le rayonnement parasite. De plus, elle peut être appliquée à n'importe quel endroit sélectionné à l'intérieur de l'antenne patch, ce qui facilite sa fabrication.

Cependant, de cette méthode présente des inconvénients au niveau du diagramme de rayonnement. [29]

### III.5.3. Alimentation par Couplage de proximité

L'utilisation du couplage de proximité nécessite l'emploi de deux substrats  $\epsilon_{r1}$  et  $\epsilon_{r2}$ . Dans la figure III.6, on peut observer que le patch se trouve en haut, le plan de masse en bas et la micro-ruban est reliée à l'alimentation et se trouve entre les deux substrats. Ce genre est aussi connu sous le nom d'« alimentation micro-ruban à couplage électromagnétique ». Ce mécanisme repose sur le fait que le comportement entre le patch et la ligne d'alimentation de la bande est capacitif.

Il est plus difficile d'analyser et de concevoir cette antenne que celles abordées dans les sections précédentes, car le concepteur doit prendre en compte la capacité de couplage entre le chargeur de bande et le patch, ainsi que le circuit résonant équivalent RL-C, qui représente le patch et les deux substrats (calcul de  $\epsilon_{r1}$  et  $\epsilon_{r2}$ ). [29]



**Figure III.6.** Méthode d'alimentation par couplage de proximité [29]

### III.5.4. Alimentation par Couplage d'ouverture (fente)

Les couches de l'antenne patch microstrip utilisant le mécanisme d'ouverture sont illustrées dans la figure III.7. L'ouverture du plan de masse est en forme de cercle ou de rectangle et sépare deux substrats : le substrat supérieur  $\epsilon_{r1}$  sur lequel se trouve le patch et le substrat inférieur  $\epsilon_{r2}$  sur lequel se trouve la ligne d'alimentation en micro ruban. Ce genre de connexion offre une bande passante accrue. Ce type présente également la particularité de réduire le rayonnement de la ligne d'alimentation grâce à l'effet de blindage du plan de masse.

Ce phénomène renforce la pureté de la polarisation . [30]

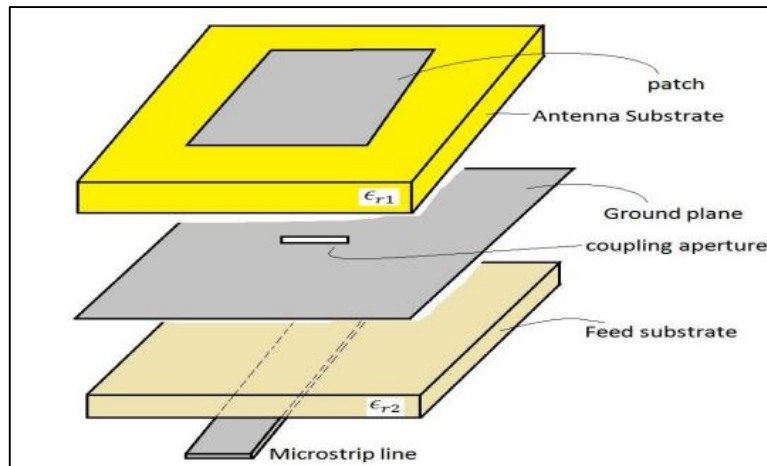


Figure III.7. Méthode d'alimentation par couplage d'ouverture [30]

### III.6. Avantages et inconvénients de l'antenne patch

#### VI.1. Avantages d'une antenne patch [31]

- ✓ Un poids réduit.
- ✓ Des coûts de fabrication réduits, possibilité de production en masse.
- ✓ Convient à la fois aux surfaces planes et non-planes (avec des substrats mous).
- ✓ Simple à réaliser Utilisation de polarisation linéaire et circulaire pour les communications.
- ✓ Stable en ce qui concerne la fréquence de résonance.
- ✓ Il est facile d'intégrer les circuits MMICs (Un circuit intégré monolithique hyperfréquence) sur un substrat identique.
- ✓ Leur intégration dans des appareils électroniques transportables peut être possible (téléphones mobiles, ordinateurs personnels, PDA, récepteurs portables GPS, transpondeurs RFID).

#### VI.2. Inconvénients d'une antenne patch [32]

- ✓ Faible efficacité de rayonnement.
- ✓ Possibilité de fonctionnement en faible puissance.
- ✓ Faible pureté de polarisation.
- ✓ Effet de couplage du rayonnement de l'alimentation.
- ✓ Largeur de bande de fréquence très étroite (en général seulement une fraction d'un pour cent ou à la plupart des quelques pour cent).
- ✓ Le gain légèrement inférieur comparé aux antennes conventionnelles à micro-ondes.

**III.7. Conclusion**

Au cours de ce chapitre, nous avons exposé les antennes planaires sous divers angles. Nous avons exploré les multiples configurations possibles, telles que le rectangle et le triangle, ainsi que leur fonctionnement et leur mécanisme de rayonnement. De plus, nous avons analysé leur structure, examiné les techniques d'alimentation, étudié les caractéristiques propres aux antennes patch, et enfin, examiné les avantages et les inconvénients inhérents à l'utilisation des antennes planaires.

**CHAPITRE IV**  
**CONCEPTION ET SIMULATION**  
**D'UNE ANTENNE PATCH**

## IV.1. Introduction

L'objet de ce chapitre est de présenter et d'analyser les résultats de simulation de diverses structures d'antennes, obtenus via l'outil de simulation électromagnétique CST Studio Suite. Nous entreprendrons la simulation d'une antenne patch alimentée par ligne micro-ruban, et étudierons l'impact du positionnement de celle-ci sur la fréquence de résonance. Puis, nous décrirons la structure d'une antenne patch utilisant le mode d'alimentation coaxial, de loin le plus courant.

## IV.2. Caractéristiques de l'antenne

Ce projet consiste à réaliser une antenne patch pour les alimentations Microstrip 5 G à une fréquence (3.9 GHz), Les données des différents éléments de l'antenne sont présentées dans le tableau suivant :

**Tableau IV.1.** Les caractéristiques d'antenne

Le type de matériaux	Les composants d'antenne	Hauteur (mm)	Permittivité diélectrique
FR-4 (Lossy)	Substrat	1.6	4.3
Copper (annealed)	Plan de masse & Patch	0.035	

## IV.3. Calcul les dimensions De l'antenne

### IV.3.1. Calcul les dimensions du patch

Nous avons calculé la longueur et la largeur de l'antenne patch rectangulaire à partir des équations suivantes :

► **La largeur du patch :**

$$W_P = \frac{c}{2fr} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad [\text{IV.1}]$$

$c = 3 \cdot 10^8$  [la vitesse de la lumière].

$f_r = 3,9 \text{ GHz}$  [Fréquence de résonance].

$\epsilon_r = 4.3$  [permittivité relative].

► **La longueur du patch :**

$$L_P = L_{eff} - 2\Delta L \quad [\text{IV.2}]$$

Avec :

L : la longueur de patch.

$L_{eff}$  : la longueur de patch en présence de l'effet de débordement (fringing effects)

$$L_{eff} = \frac{c}{2fr\sqrt{\epsilon_{reff}}} \quad [IV.3]$$

$$\epsilon_{reff} = \frac{\epsilon r+1}{2} \times \frac{\epsilon r-1}{2} \times \left(1 + 12 \frac{h}{Wp}\right) \quad [IV.4]$$

Avec :  $\epsilon_{reff}$  représente la permittivité effective de l'antenne

$$\Delta L = 0,412 \times h \times \frac{(\epsilon_{reff}+0,3) \times \left(\frac{Wp}{h}+0,264\right)}{(\epsilon_{reff}-0,258) \left(\frac{Wp}{h}+0,8\right)} \quad [IV.5]$$

### IV.3.2. Calcul les dimensions du plan de masse et substrat

► La largeur du substrat :

$$W_S = 6 \times h + W_P \quad [IV.6]$$

► La longueur du substrat :

$$L_S = 6 \times h + L_P \quad [IV.7]$$

Le tableau ci-dessous présente un résumé de toutes les dimensions de l'antenne :

**Tableau IV.2.** Les dimensions de l'antenne

Paramètres	Description	Valeur (mm)
<b>W<sub>S</sub></b>	Largeur de substrat et le plan de masse	60
<b>L<sub>S</sub></b>	Longueur de substrat et le plan de masse	40
<b>W<sub>P</sub></b>	Largeur du patch	24,9
<b>L<sub>P</sub></b>	Longueur du patch	19,5
<b>W<sub>F</sub></b>	Largeur de la ligne Microstrip	2
<b>L<sub>F</sub></b>	Longueur de la ligne Microstrip	11,2
<b>h</b>	Hauteur de substrat	1.6
<b>h<sub>P</sub></b>	Hauteur de patch et le plan de masse	0.035



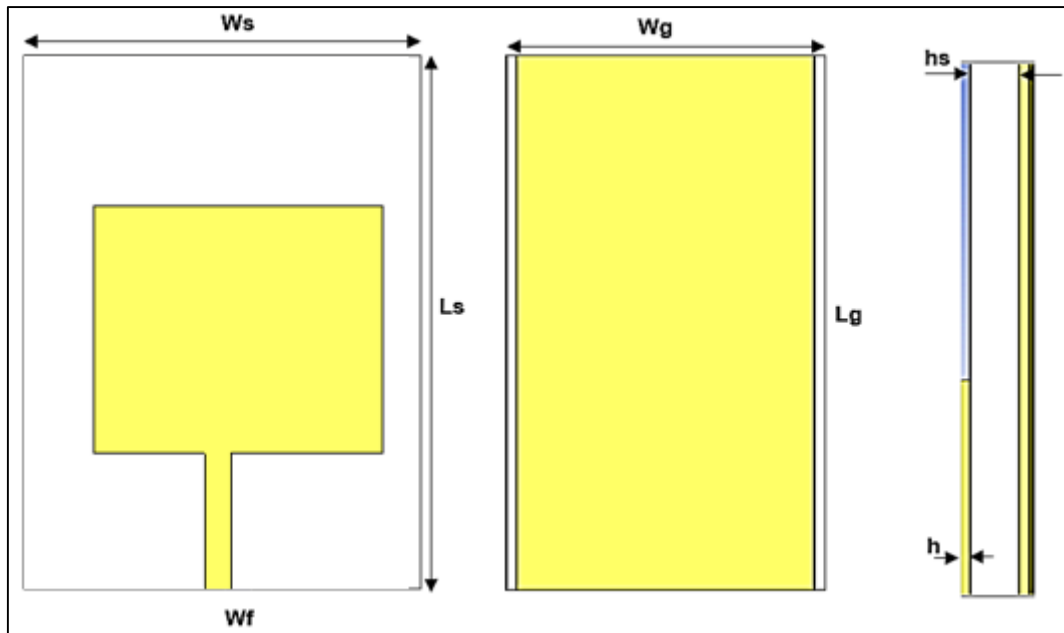


Figure IV.1. La géométrie de l'antenne .

L'objectif ici est d'analyser tous les paramètres de l'antenne, et les résultats seront présentés sous deux formes différentes : Le coefficient de réflexion S11 en dB et le rapport axial.

### IV.3.3. Coefficient de Réflexion S11

Le coefficient de réflexion et en évidence le transfert d'énergie par l'antenne. Dans un système électrique caractérisé par les paramètres S, lorsque le coefficient S11 connaît une forte atténuation à une fréquence donnée appelée fréquence de résonance, il y a un maximum de transfert de puissance entre le générateur et la charge. C'est sur ce paramètre que l'on se base pour optimiser l'antenne. Le coefficient de réflexion imposé selon les normes doit être inférieur à -10dB, et il caractérise le taux de réflexion des ondes stationnaire sur la structure.

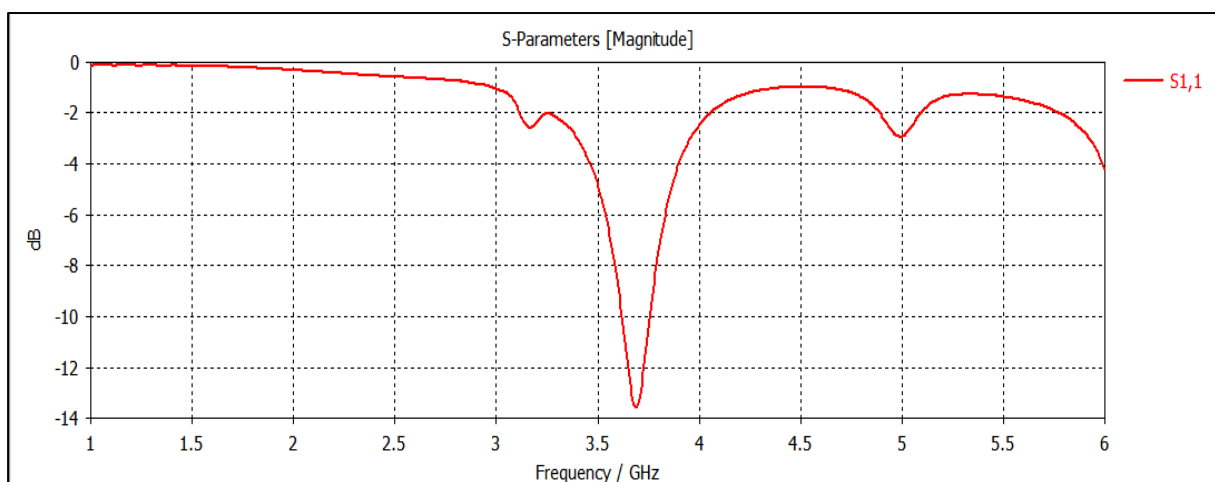
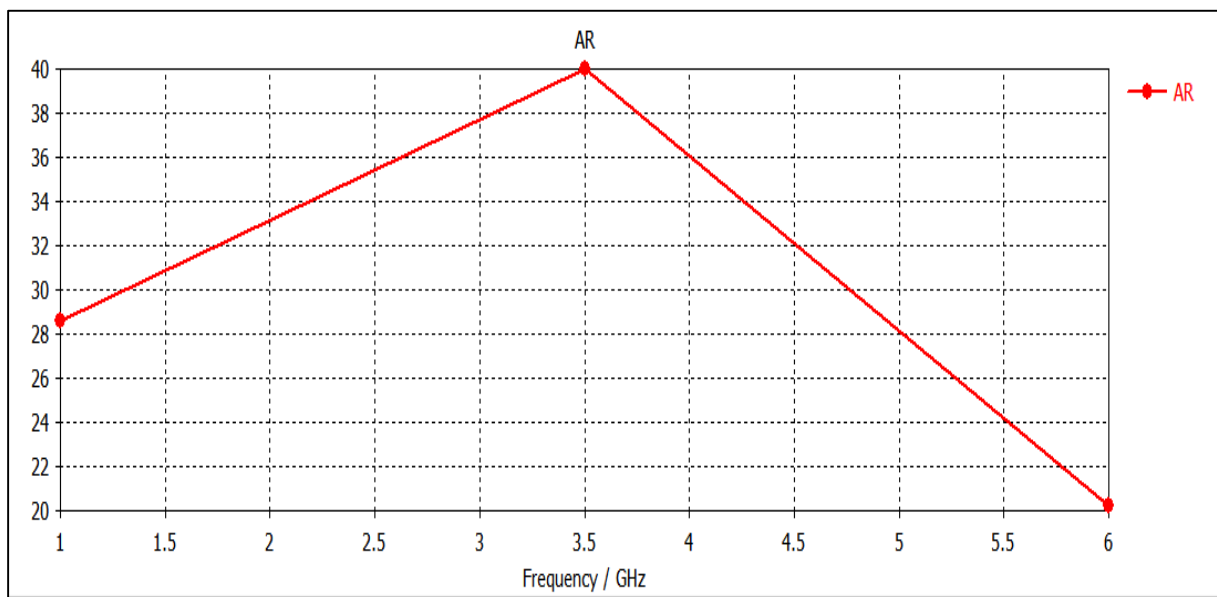


Figure IV.2. Paramètre S11 et la bande passante de l'antenne patch

Le coefficient de réflexion issu de notre premier modèle de simulation est présenté dans la Figure IV.2. Il est notable qu'une légère adaptation à la fréquence de 3,6 GHz a été observée, avec un S11 de -13,98 dB.

### IV.3.4. Rapport Axial d'antenne

Les simulations ont révélé que le rapport axial de premier prototype simulé est supérieur à 3 dB dans fréquence de résonance 3.6 GHz . Ce rapport axial élevé indique que la polarisation de l'antenne est de type linéaire.



**Figure IV.3.** Rapport axial en fonction de fréquences

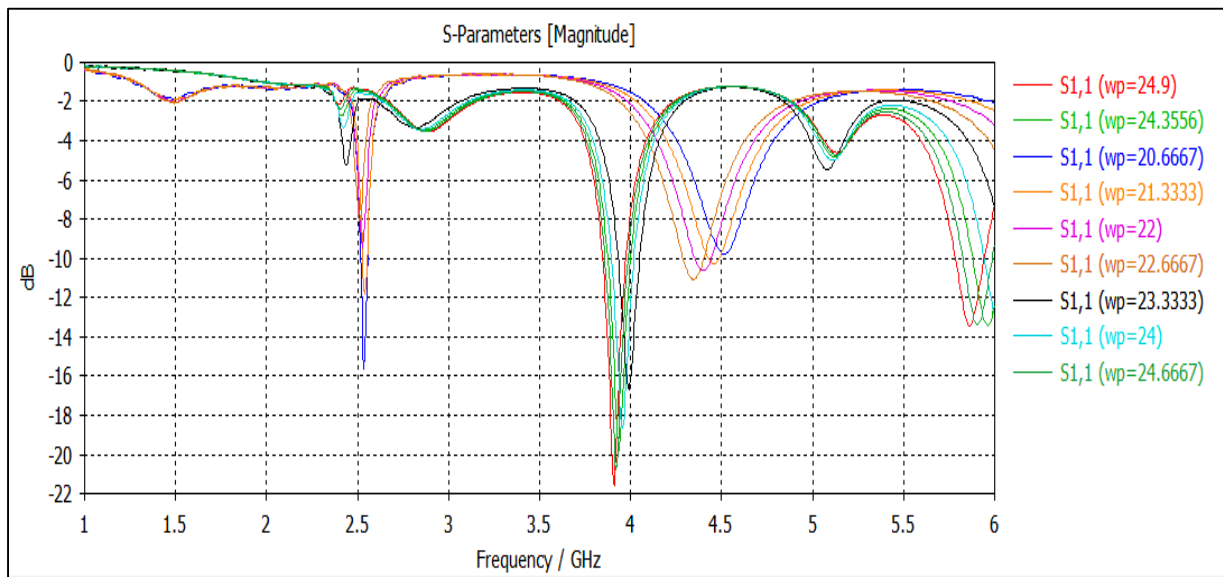
En conséquence, il est nécessaire de procéder à des modifications et à une optimisation du premier modèle afin de se rapprocher le plus possible d'une polarisation circulaire idéale.

### IV.4. Etude d'influence paramétrique de différents paramètres

L'étude de l'influence de différents paramètres sur le coefficient de réflexion S11 est abordée dans diverses études paramétriques afin d'approfondir notre compréhension du fonctionnement de l'antenne.

Une étude paramétrique a été réalisée pour comprendre les effets des différents paramètres et obtenir une structure finale efficace et optimisée.

### IV.4.1. Etude de l'Effet de la largeur du Patch $w_p$

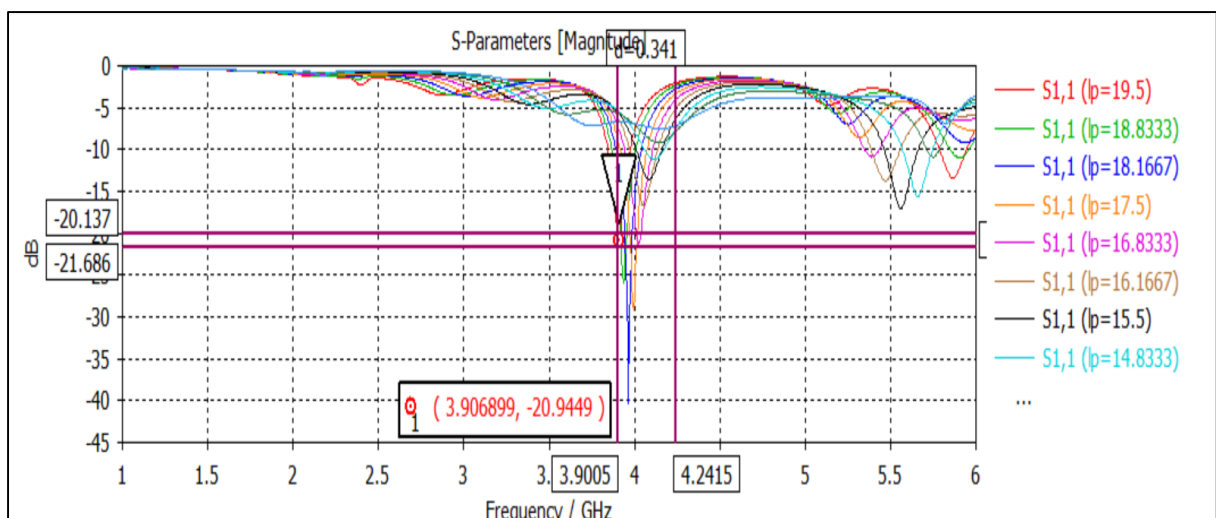


**Figure IV.4.** Effet de la largeur du Patch  $w_p$  sur le paramètre  $S_{11}$  en dB

Ce graphique illustre l'étude paramétrique de l'impact de la largeur du patch rayonnant sur le coefficient de réflexion d'une antenne à polarisation linéaire. Les multiples courbes représentent les paramètres de diffusion  $S_{11}$  en fonction de la fréquence pour diverses largeurs du patch.

Cependant, l'analyse paramétrique de cette dimension du patch n'a pas permis d'améliorer de manière satisfaisante l'adaptation aux deux fréquences cibles. Par conséquent, nous avons décidé de conserver les dimensions initiales pour notre modèle, car même de légères variations du substrat ou du patch nécessiteraient des ajustements d'adaptation..

### IV.4.2. Etude de l'Effet de la longueur de Patch $L_p$



**Figure IV.5.** Effet de la longueur de Patch  $L_p$  sur le paramètre  $S_{11}$  en dB

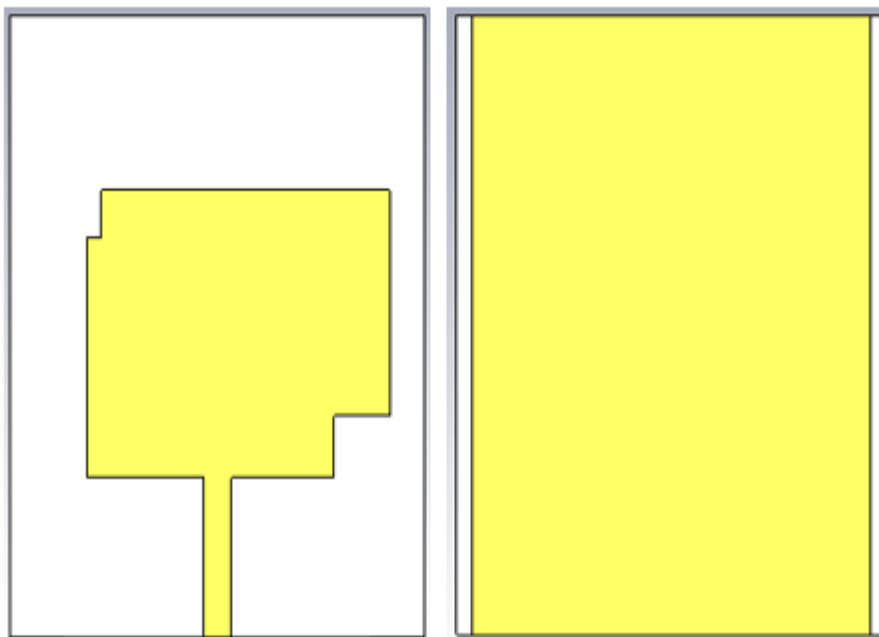
Cette représentation graphique illustre l'étude paramétrique de l'impact de la longueur du patch rayonnant sur les paramètres de diffusion S11 (coefficients de réflexion), au vu de la configuration avec une longueur de patch de 18.1667 mm apparaît comme un excellent choix pour l'optimisation des performances de cette antenne autour de 3,9 GHz avec un S11= -40dB.

#### **IV.5. Transformation structurale d'une antenne en vue d'attendre la polarisation circulaire**

Une méthode fréquemment utilisée pour convertir la polarisation d'une antenne de linéaire à circulaire consiste à ajouter des fentes ou des encoches aux extrémités d'antenne patch. Ces modifications sont généralement disposées de manière symétrique autour de l'élément rayonnant, ce qui altère la distribution du champ électromagnétique et permet ainsi de générer une polarisation circulaire. La première tentative d'implémentation de cette technique est illustrée dans la figure ci-dessous.

##### **IV.5.1. Optimisation de l'adaptation d'impédance d'une antenne patch**

Pour atteindre notre objectif de concevoir une antenne à polarisation circulaire, nous avons adopté une technique éprouvée consistant à modifier notre prototype en ajoutant deux encoches de chaque côté du patch. Nous avons évalué les performances de cette conception, notamment en termes d'adaptation d'impédance, de rapport axial et de diagrammes de rayonnement.



**Figure IV.6.** Représentation d'une antenne patch dotée de deux encoches

### IV.5.1.1. Coefficient de réflexion

La figure IV.7 représente les variations du coefficient de réflexion  $S_{11}$  de l'antenne a polarisation circulaire en fonction de la fréquence  $f$  dans l'intervalle [1GHz 6GHz]. Nous remarquons que l'ajout des deux encoches aux cotes n'as pas donne un bon résultat d'adaptations.

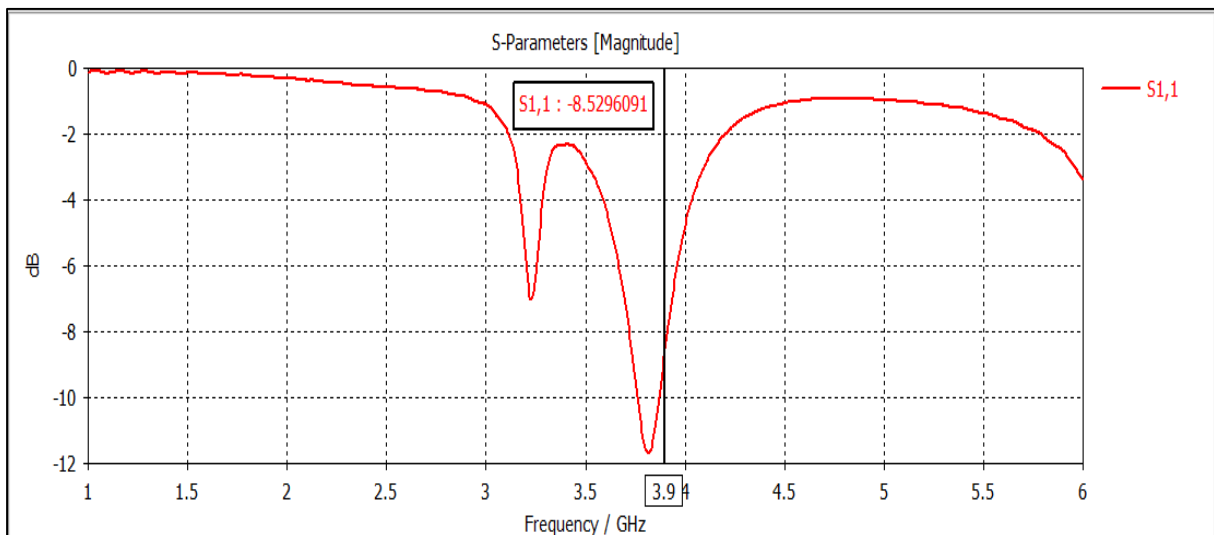


Figure IV.7. Coefficient de réflexion  $S_{11}$  de l'antenne avec encoches

### IV.5.1.2. Rapport Axial

La figure IV.8 illustre l'effet de l'ajout d'encoches aux extrémités, entraînant une légère amélioration du rapport axial. Toutefois, malgré cette modification, la polarisation demeure linéaire. Par conséquent, l'incorporation de la fente n'a pas modifié le type de polarisation.

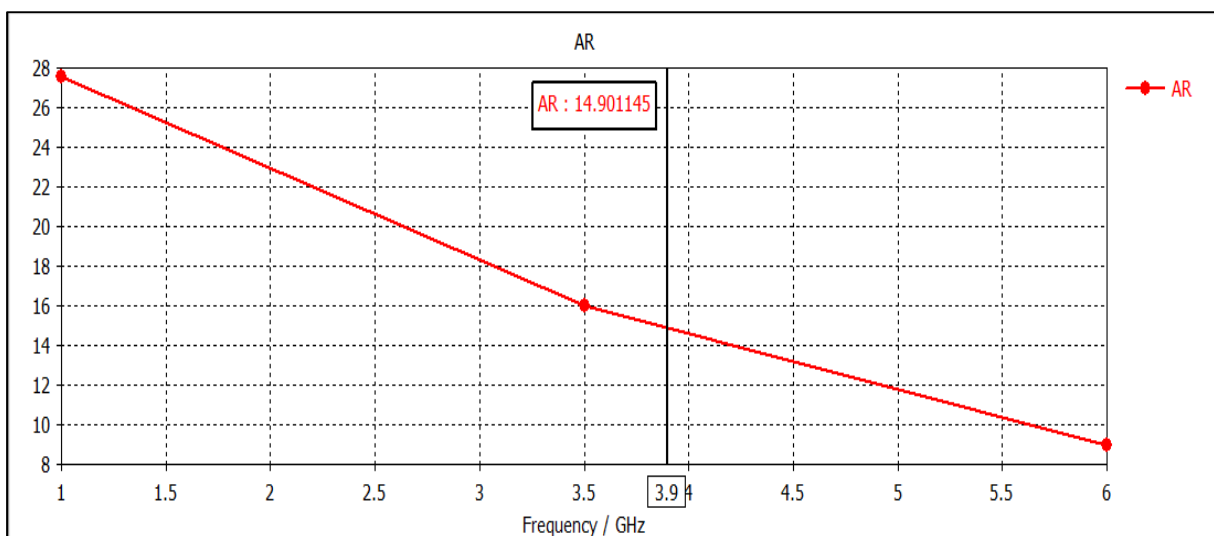


Figure IV.8. Rapport Axial d'une antenne avec encoches

### IV.5.2. Ajout de quatre encoches

Pour atteindre notre objectif de concevoir une antenne à polarisation circulaire, nous envisageons d'utiliser une technique éprouvée qui consiste à créer quatre encoches symétriques sur notre prototype. Ces encoches seraient positionnées sur les quatre côtés du patch.

Nous examinerons de près les performances de cette conception comportant quatre encoches, en évaluant son adaptation via le coefficient de réflexion et son rapport axial.

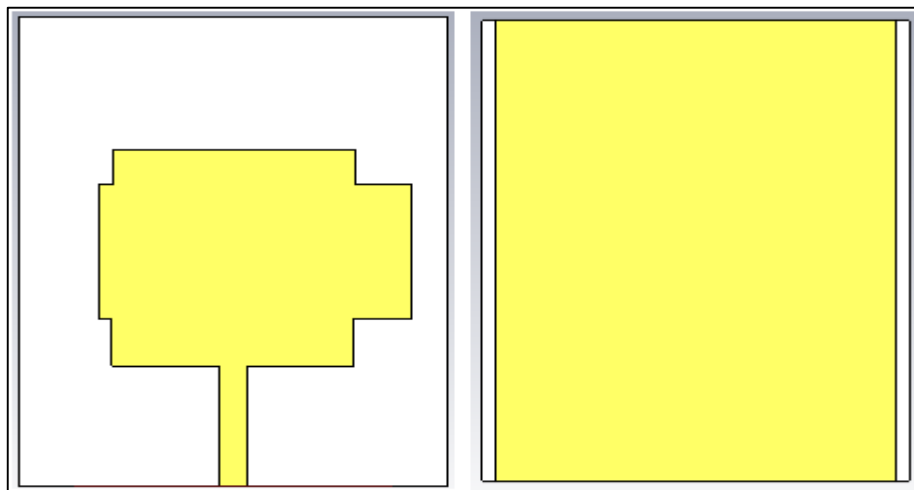


Figure IV.9. Schéma de l'antenne avec quatre encoches

#### IV.5.2.1. Coefficient de réflexion

Le coefficient de réflexion, tel qu'illustré dans la Figure IV.10, indique que nous avons perdu l'adaptation de l'antenne à la fréquence cible de 3.9 GHz. Des ajustements du modèle seront donc nécessaires pour recentrer la fréquence de résonance et améliorer cette adaptation.

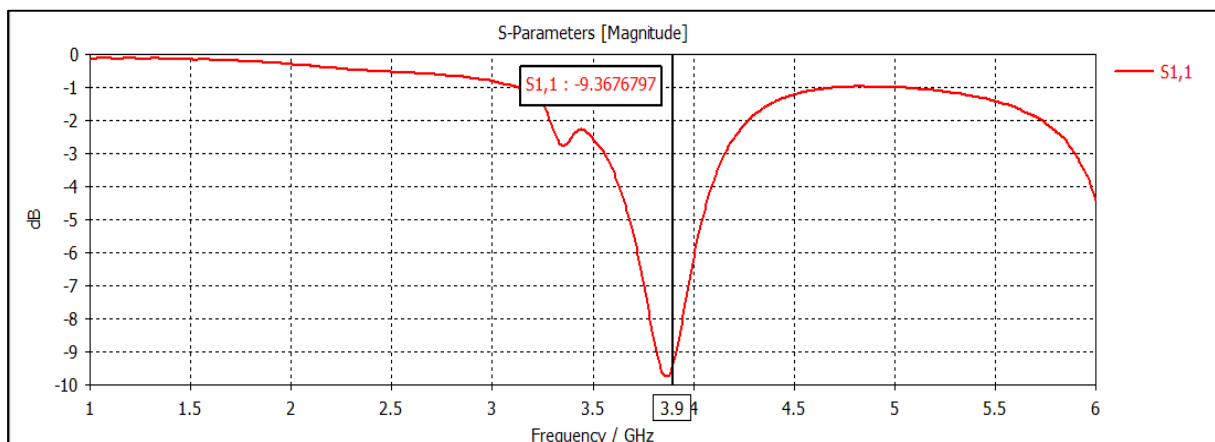


Figure IV.10. Coefficient de réflexion de l'antenne avec les quatre encoches

### IV.5.2.2. Rapport Axial

On constate que malgré l'adjonction des quatre encoches, le rapport axial illustré sur la figure IV.11 demeure supérieure à 3 dB. Pour cela, nous contrainst à renoncer à l'aménagement de fentes à l'intérieur du patch, qui aurait pourtant permis d'améliorer davantage ce paramètre crucial.

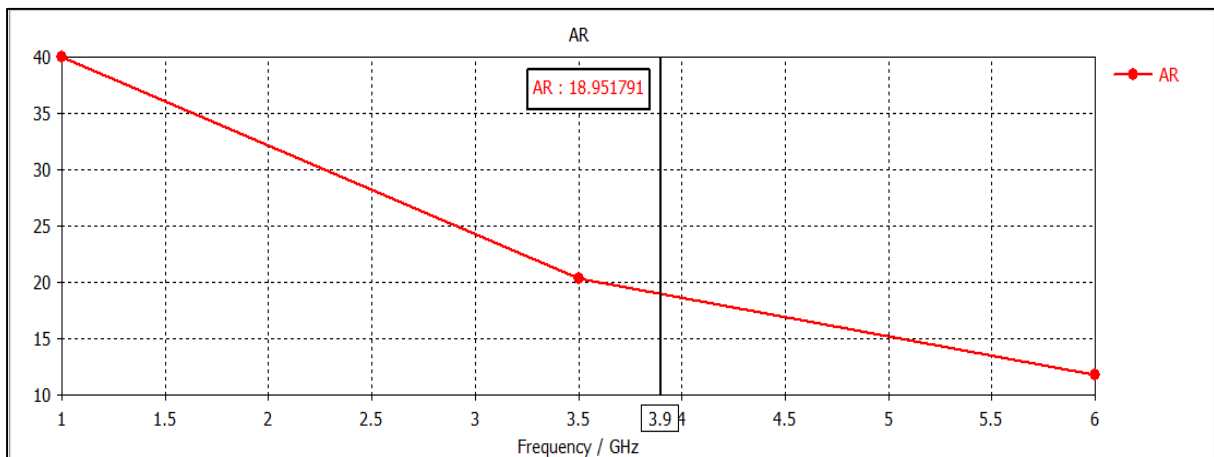


Figure IV. 11. Rapport Axial de l'antenne avec les quatre encoches

## IV.6. Processus d'optimisation géométrique

Afin de répondre à notre objectif de concevoir une antenne à polarisation circulaire, notre prototype final optimisé a été soumis à une série d'ajustements géométriques. La conception de la structure de l'antenne implique un processus comprenant plusieurs étapes, telles qu'illustrées dans la figure IV.12 .

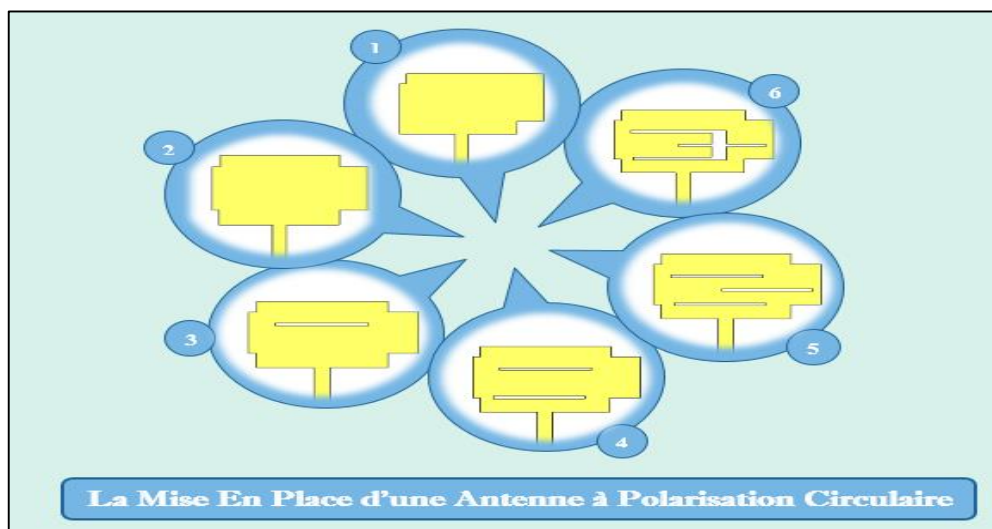


Figure IV.12. La mise en place d'une antenne a polarisation circulaire

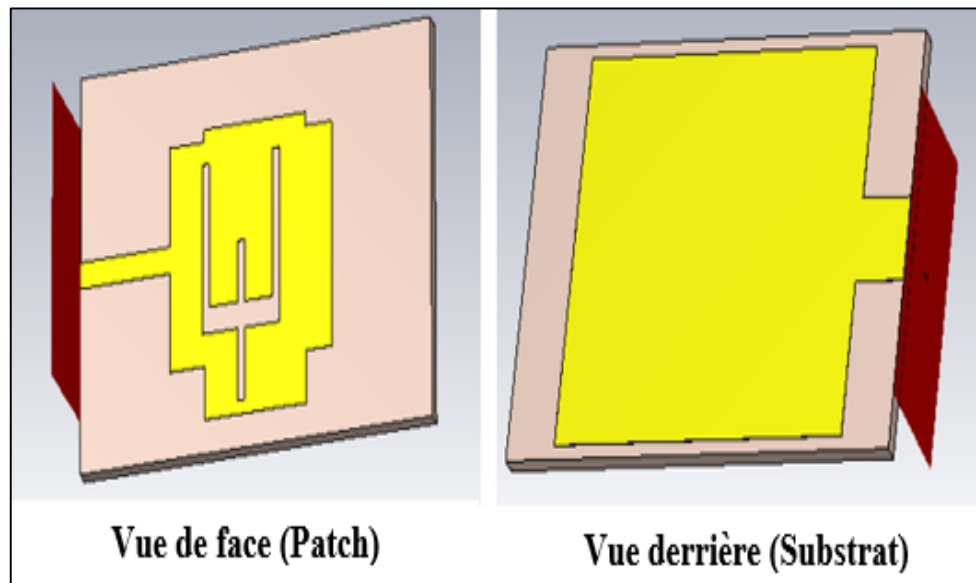


Figure IV.13. Antenne optimisée

### VI.6.1. Coefficient de réflexion

Les résultats de simulation du coefficient de réflexion de l'antenne en fonction de la fréquence sont présentés dans la Figure IV.14, mettant en évidence la bande passante à -10 dB.

Il est observé que l'antenne présente une double bande de résonance aux deux fréquences distinctes  $f_1 = 3,91$  GHz et  $f_2 = 5,86$  GHz. Cette observation indique une bonne amélioration du coefficient de réflexion  $S_{11}$  par rapport aux cas précédents.

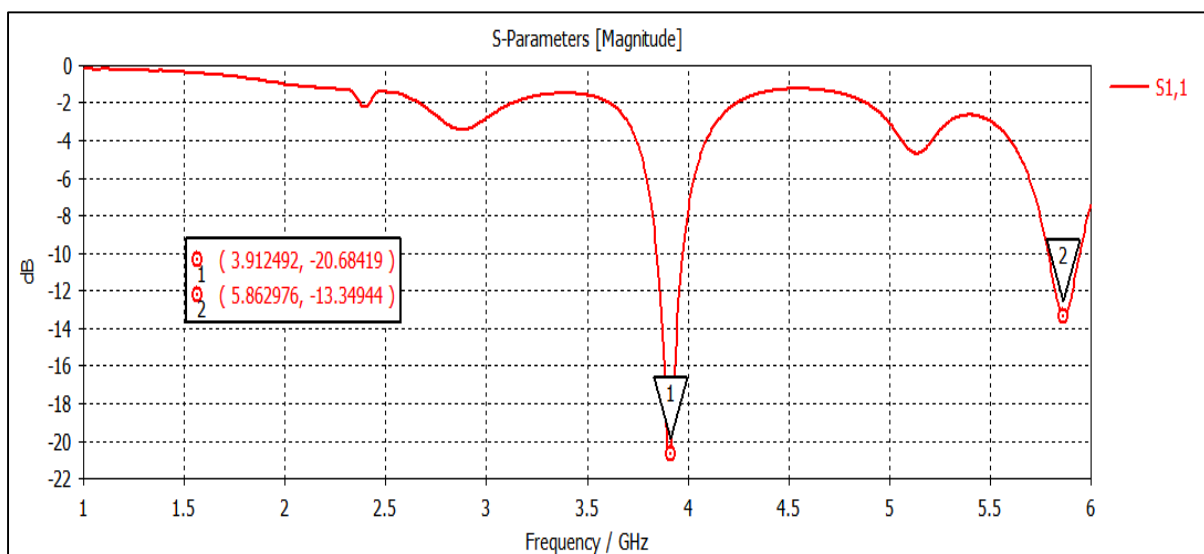


Figure IV.14. Le  $S_{11}$  et la bande passante de l'antenne optimisée



### VI.6.2. Rapport Axial

La Figure IV.15 met en évidence que, à la fréquence  $f = 3,9$  GHz, le rapport axial est inférieur à 3 dB, indiquant une polarisation circulaire. Ces résultats démontrent que notre objectif d'obtenir une antenne à polarisation circulaire a été accompli.

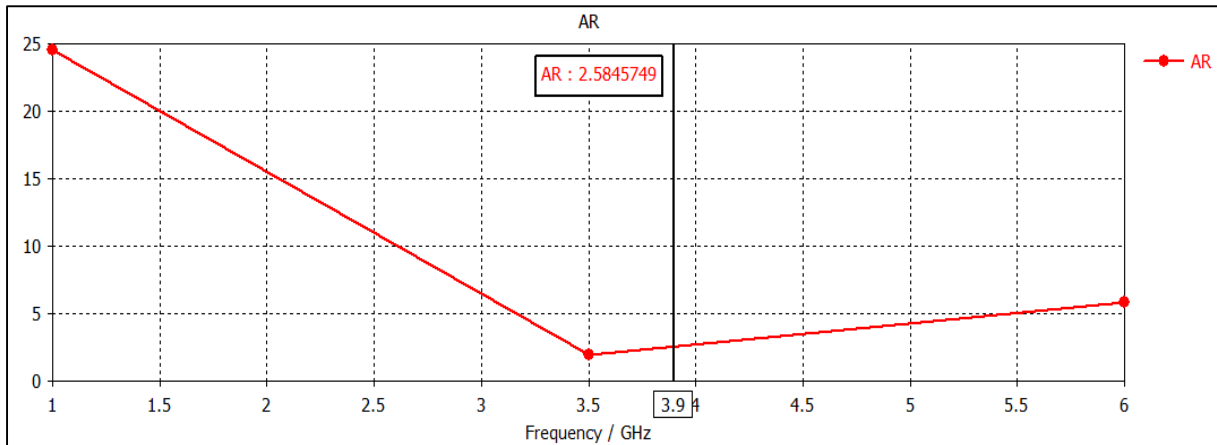


Figure IV.15. Le rapport axial de l'antenne optimisée

### VI.6.3. Diagramme de rayonnement de l'antenne patch optimisée

Le diagramme de rayonnement décrit dans la figure IV.16 montre un rayonnement omnidirectionnel de l'antenne, avec un gain positif de 3,27 dBi avec un déphasage de 90°.

Ainsi que Le tracé du diagramme de rayonnement en 3D illustre la répartition de la puissance rayonnée par l'antenne dans l'espace.

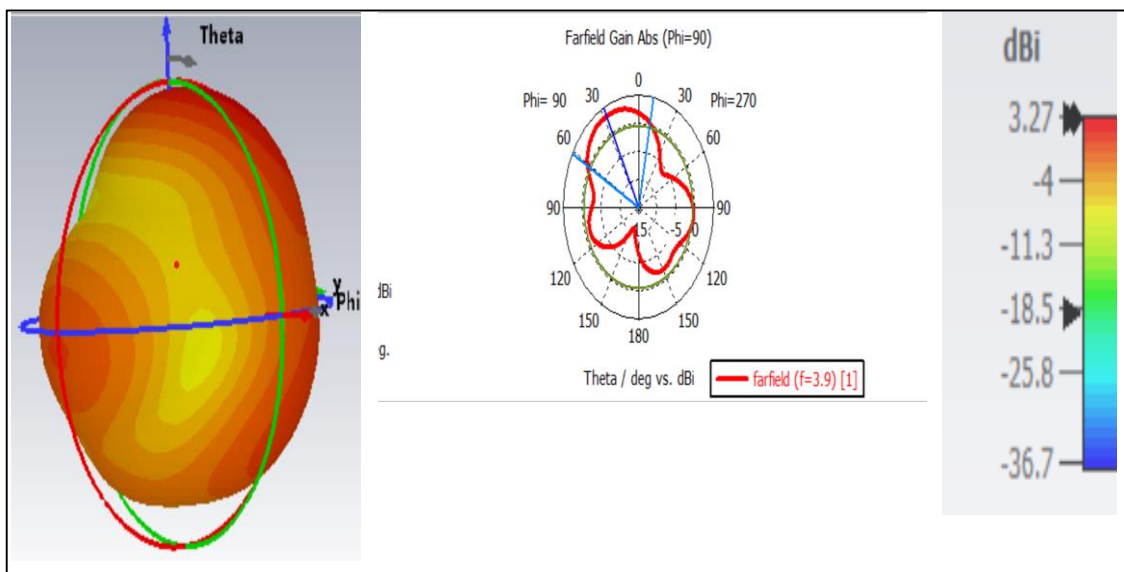


Figure IV.16. Diagramme de rayonnement

### IV.7. Evolution des paramètres clés de l'antenne au fil des étapes de conception

**Tableau IV.3.** L'évolution des paramètres clés de l'antenne

	Coefficient de Réflexion (dB)	Rapport Axial (dB)	Le Gain (dBi)
<b>Etape 1</b>	-8.5296091	14.901145	2,409
<b>Etape 2</b>	-9.3676797	18.951791	2,332
<b>Etape 3</b>	-20.68419	2.5845749	3.27

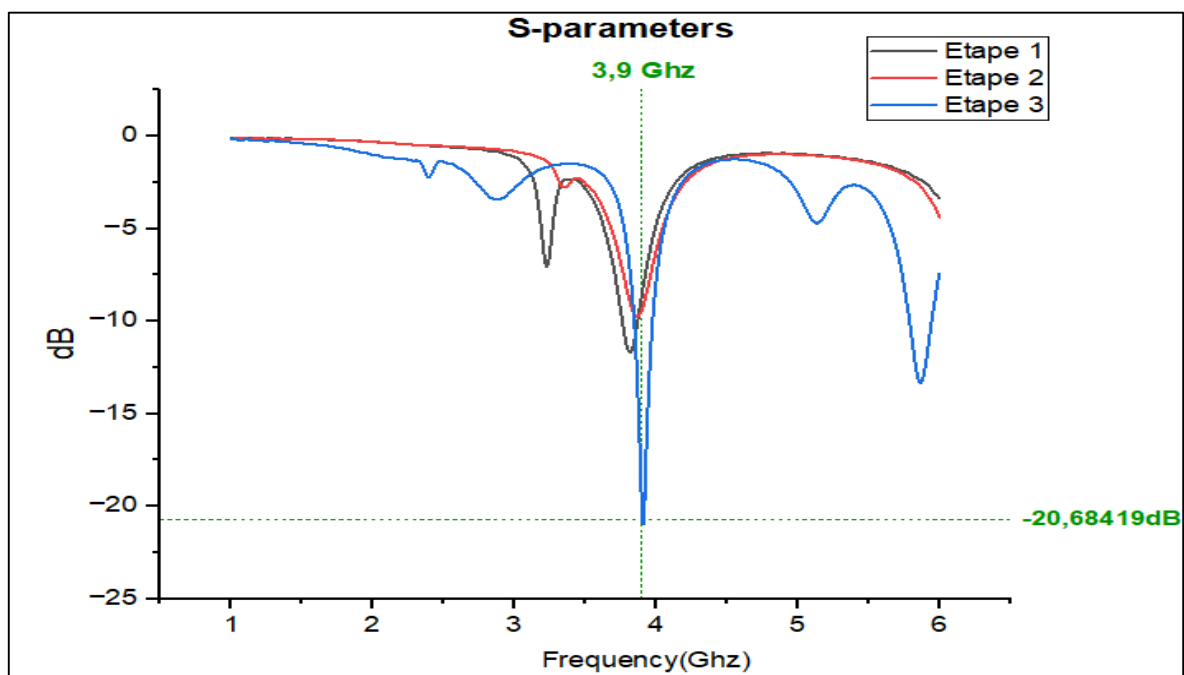
La Figure IV.17 présente le coefficient de réflexion, qui mesure le degré d'adaptation d'impédance de l'antenne. Une valeur inférieure à -10 dB est généralement considérée comme favorable. À troisième étape, un coefficient de -20,68 dB est enregistré, témoignant d'une excellente adaptation d'impédance.

La figure IV.18 montre le rapport axial, indicateur de la qualité de la polarisation circulaire de l'antenne. Une valeur inférieure à 3 dB est souhaitable pour une bonne polarisation circulaire.

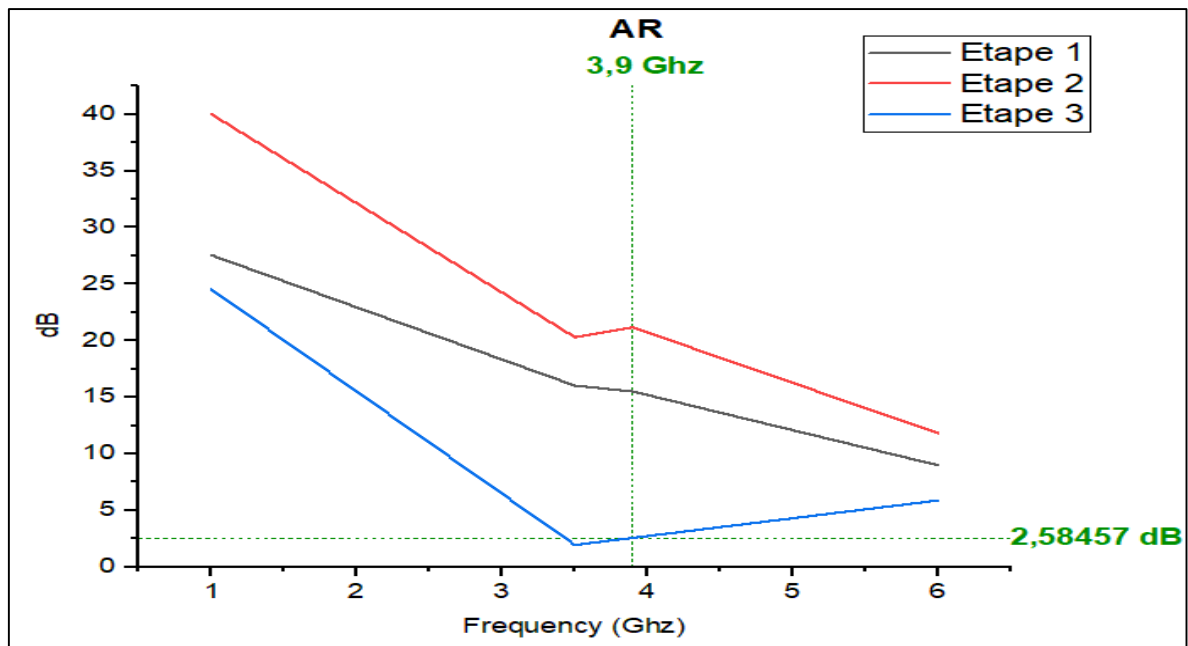
Les étapes 1 et 2 affichent des valeurs acceptables de 14.90 dB et 18,95 dB respectivement.

Le gain représente la capacité de l'antenne à concentrer la puissance rayonnée dans une direction donnée. Un gain positif est bénéfique. À l'étape 3, un gain de 3,27 dBi est enregistré, le plus élevé parmi les configurations simulées.

Ces résultats suggèrent que l'étape 3 représente probablement la conception optimale de l'antenne recherchée, répondant aux exigences de performance pour l'application visée.



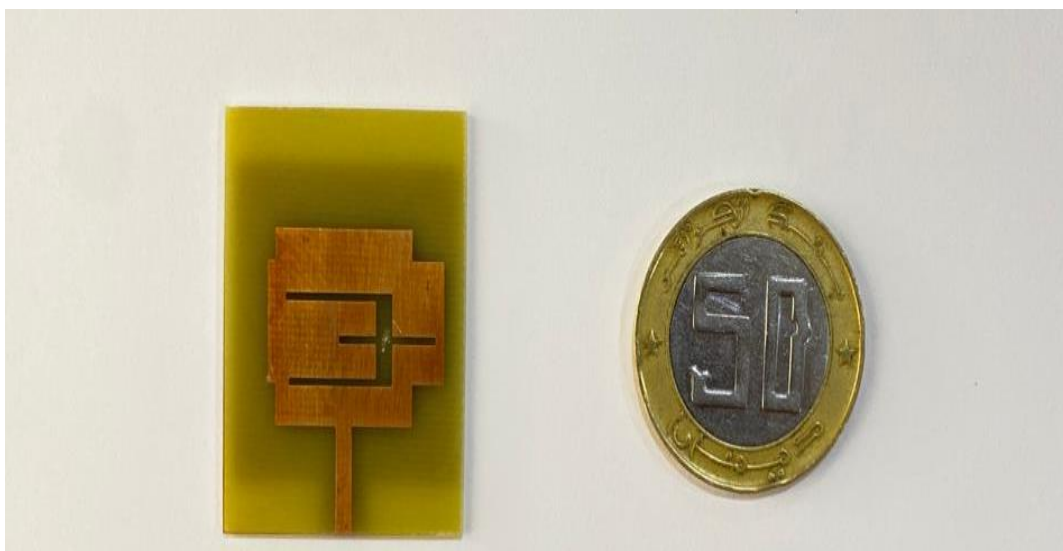
**Figure IV. 17.** L'optimisation de S<sub>11</sub>



**Figure IV. 18.** Variation du Rapport axial en fonction de la fréquence

### ➤ Représentation iconique du modèle d'antenne nouvellement réalisé

La figure IV.19 illustre la réalisation d'antenne optimisée, mettant en évidence sa structure physique. On y observe la disposition précise des éléments tels que le patch, les encoches et éventuellement d'autres caractéristiques de conception. La figure peut également inclure des annotations décrivant les matériaux utilisés, les dimensions spécifiques et les paramètres de conception qui contribuent à l'optimisation de l'antenne pour ses performances désirées.



**Figure IV.19.** Présentation iconographique du modèle d'antenne réalisé

### IV.8. Conclusion

La conception d'antennes imprimées nécessite une approche rigoureuse, combinant études théoriques et simulations numériques. Dans ce chapitre, nous avons exploré des géométries simples inspirées des antennes micro-rubans rectangulaires.

La première partie de notre travail a été consacrée à une étude paramétrique approfondie visant à comprendre les effets des différentes variables géométriques sur la performance de l'antenne. Nous avons constaté que le coefficient de réflexion et le rapport axial de l'antenne imprimée sont particulièrement sensibles aux variations des dimensions du substrat, du patch et du plan de masse.

La deuxième partie de notre étude a porté sur l'arrondissement des coins du patch et l'ajout des fentes, suivi d'une analyse comparative des résultats obtenus pour le coefficient de réflexion  $S_{11}$  et le rapport axial, grâce au logiciel de conception CST-MWS.

L'antenne que nous proposons présente des avantages significatifs : elle est compacte, sa structure est simple, elle offre une bande passante étroite et un diagramme de rayonnement stable. De plus, son bon rapport axial pour la bande Sub 6G, confirmant l'efficacité de la polarisation circulaire, en fait un choix pertinent pour les applications 5G.

# **CONCLUSION GÉNÉRALE**

Le travail réalisé dans le cadre de ce master a porté sur la conception et la réalisation d'une antenne planaire à polarisation circulaire pour les applications 5G. Grâce à une approche méthodique en utilisant le logiciel CST, nous avons pu aboutir à une conception optimisée répondant aux exigences techniques des systèmes 5G.

A travers l'analyse bibliographique, nous avons établi les progrès technologiques atteints dans le domaine des télécommunications, notamment les antennes, et avons mis en évidence les avantages des antennes patch planaires afin de répondre aux exigences des réseaux 5G en termes de performance, de compacité et d'efficacité.

Notre travail a consisté à réaliser une antenne et à effectuer des travaux de simulations pour son évaluation et validation de la conception de cette antenne. Les résultats de simulation ont permis d'analyser et de quantifier les performances de l'antenne planaire, en termes de directivité, de gain positif, de coefficient de réflexion inférieur à -10 dB et de rapport axial inférieur à 3 dB.

Ces résultats exceptionnels montrent que cette antenne est parfaitement adaptée aux applications 5G. En effet, la polarisation circulaire souhaitée a bien été obtenue à la fréquence de 3,9 GHz, répondant ainsi parfaitement aux exigences des futurs réseaux sans fil à haut débit.

Cette antenne conçue répond ainsi aux critères requis pour une utilisation optimale dans les réseaux 5G et ouvre la voie à de futurs développements d'applications pratiques.

Au terme de ce travail, nous recommandons trois pistes de travaux de recherche en guise de perspectives d'amélioration des antennes.

D'abord, poursuivre l'optimisation des performances des antennes par l'étude des autres formes de patch (circulaire, elliptique, etc.) afin d'améliorer davantage le gain, la directivité et la bande passante.

Ensuite, améliorer les performances des antennes planaires dédiées aux systèmes 5G par l'optimisation de la polarisation en vue d'accroître l'efficacité de rayonnement et la pureté de la polarisation circulaire.

Et enfin, appliquer cette technologie d'antenne dans d'autres secteurs par l'exploration de variantes de design dans d'autres bandes de fréquences 5G comme les radars, les satellites ou les communications par ondes millimétriques.

**RÉFÉRENCES  
BIBLIOGRAPHIQUES**

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

---

- [1] Guangyi Liu, Dajie Jiang 5G. « **Vision and Requirements for Mobile Communication System** », Article in Chinese Journal of Engineering, April 2016 .
- [2] Samsung Within Innovation 5G ,2019, [https://www.samsung.com/ch\\_fr/explore/brand/what-is-5g-and-how-will-it-affect-your-life/](https://www.samsung.com/ch_fr/explore/brand/what-is-5g-and-how-will-it-affect-your-life/) , Consulté le 11 Avril 2024 .
- [3] A. Gohil, H. Modi, S. K. Patel. « **5g Technology Of Mobile Communication : A Survey**» Conférence Internationale Sur Les Systèmes Intelligents Et Le Traitement Du Signal, 2013.
- [4] FEI Hu « **Opportunities in 5g Networks a Research and development Perspective** » Livre 1st Edition, 5 avril 2016.
- [5] DAOUD, Khedidja. « **Simulation Comparative Des Techniques FBMC et OFDM pour les réseaux 5G** » . Faculté de Technologie, l'université de Tlemcen, 2016.
- [7] M. DAHMANE , A. BOUHAFER . «**Etude et Analyse de Méthodes de Beamforming pour des Systèmes Multi-utilisateurs Pour la 5G** », Faculté des sciences et de la Technologie, Université 8Mai 1945 – Guelma , 2019 .
- [8] B. SADOU , D. ALQUIDAMI . « **Etude des techniques de modulation pour les réseaux mobile 5G et 6G de nouvelle génération** » , Faculté des sciences et de la Technologie, Université Mouhamed Elsedik ibn yahia , Jijel , 2020 .
- [9] A.BENDAHMANE, R.GHERMOUL. « **Etude les Méthodes de Beamforming à maximisation du rapport signal sur bruit pour systèmes FBMC** », Faculté de Technologie, Université Aboubekr Belkaid-Tlemcen, 2018 .
- [10] M. AZZEDINE, M .Yahiaoyu : « **Architecture et transmission de l'information dans les réseaux radio-mobile 5G** » , Faculté des sciences et de la Technologie, Université 8 Mai 1945 – Guelma , 2021.
- [11] S. Sébastien, « **Les Enjeux De La 5G** » , Autorité de régulation des communications électroniques et des postes ARCEP, République Française, 2017 .
- [12] FEI Hu . « **Opportunities in 5g Networks a Research and development Perspective** », Livre 1st Edition, 5 avril 2016.
- [13] Boris MORET. « **Amplificateur de puissance autonome pour applications OFDM et beamforming de la 5G aux fréquences millimétriques en technologie CMOS avancée** », Université de Bordeaux, 5 octobre 2017.



## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

---

- [14] A.Osseiran, J. F. Monserrat, P. Marsch . « **5g Mobile and Wireless communications Technology** », Cambridge University Press, Juin 2016.
- [15] Odile Picon et Coll : « **Les Antennes Théorie, conception et application** », Paris,2009.
- [16] Bruno Delorme : « **les antennes dans les réseaux de téléphonie mobile** », Paris,2010.
- [17] Chorfi Hamid , « **conception d'un nouveau système d'antenne réseau en onde millimétrique** », thèse de doctorat , Université du Québec ,Montréal, 2012.
- [18] F.T Ulaby , « **Fundamentals of Applied Electromagnetic** » ,Prentice Hall, 1999.
- [19] A.Duthu, « **L'étude de l'influence du champ magnétique sur l'évolution stellaire** » , Thèse de doctorat, Université de Bordeaux , France, 11 Octobre 2017.
- [20] A.Hafiane, « **Etude du couplage d'antennes imprimées par la méthode des différences finies et extraction du modèle électrique** » , Thèse de doctorat, Université de Marne la vallée , 2003.
- [21] H.Ragad , « **Etude et conception de nouvelles topologies d'antennes à résonateur diélectrique dans les bandes UHF et SHF** » , thèse de doctorat, l'Université de Tunis El Manar–Tunisie , 22 novembre 2013 .
- [22] Oumy Diop. « **Etude de miniaturisation du facteur de qualité d'antenne miniature conçue pour des petits objets communiquant** » , thèse de doctorat , l'Université de Nice.2013.
- [23] TEMMAR L, « **Simulation d'un réseau d'antennes pour les mobiles 5G avec CST Microwave Studi** » , Mémoire MASTER ACADEMIQUE , UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA, 2018.
- [24] Constantine A. Balanis, «**Antenna theory: analysis and design**» , third edition,Hoboken, NJ: Wiley, United States of America, 2005.
- [25] Ahmed FatthiAlsager : « **Design and Analysis of Microstrip Patch Antenna Arrays** », HÖGSKOLOLAN I BORÅS Institutionen ingenjörshögskolan, 2011.
- [26] Ouallil Lamia, « **Simulation des antennes sous HFSS (High Frenquency Structure Simulator** » , Faculté de Technologie, Université mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou, 2013.
- [27] S. FERSITI, F. MEHIEDDINE. «**Antennes à Plan de Masse Partielle de type Hilbert pour un fonctionnement Ultra Large Bande**», Université Aboubakr Belkaïd– Tlemcen, 2018 .

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

---

- [28] Yi. Huang and K. Boyle, John Wiley . « **Antennas from Theory to Practice** », internet archive books, dlarc-library, americana, 2008.
- [29] Diaoui Rida , « **Conception d'une nouvelle antenne ULB avec caractéristique de suppression de plusieurs bandes (WLAN, WiMax)** », Université 8Mai 1945-Guelma, Mai 2013.
- [30] Ramesh G. Artech house , « **Microstrip antenna design handbook** » , Indian Institute of Technology, 2001 .
- [31] KHEZAZNA Safa , BENAYAD Khaoula : « **Simulation des antennes imprimées par le logiciel CST** » , UNIVERSITE BADJI MOKHTAR – ANNABA , 2020-2021.
- [32] N. Belgacem, « **Conception Des Antennes Pifa Mono-Bande Et Multi-Bandes Gsm, Dcs, Pcs, Umts Et Wifi Pour Téléphones Mobiles** » , Mémoire de Master, Université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen 2013.
- [33] <https://www.3ds.com/fr/produits-et-services/simulia/produits/cst-studio-suite> , Consulté le 15 Avril 2024 .
- [34] <https://www.goengineer.com/cst-studio-suite> , Consulté le 15 Avril 2024 .

**ANNEXE**

## A.1. Définition de logiciel CST STUDIO SUITE

En 1992, la société allemande CST STUDIO à été fondée. Apres de nombreuses recherches, la première version de CST Microwave studio fut apparue en 1998. Cette dernière a pour but la conception magnétique. Elle permet l'analyse rapide et précise des dispositifs à haute fréquence tel que : les antennes, les filtres ...etc.

CST «Computer Science Technology» Microwave Studio est un logiciel de simulation électromagnétique de structure passives en 3 dimensions basée sur la résolution des équations de Maxwell suivant la technique des équations intégrales finies (Finité Intégration Technique) .Cette méthode numérique offre une discrétisation de l'espace permettant la description directement en 3 dimensions de tous les composants des systèmes décrits, ce qui lui permet d'être appliqué à de nombreux problèmes électromagnétiques allant de la statique aux hyperfréquences en analyses temporelle et fréquentielle . [33]



Figure A.1. Icône de logiciel CST Studio Tutorials [34]

## A.2. Description générale du logiciel

- ✓ Apres avoir lancé notre logiciel, l'interface ci-dessus apparait pour créer un nouveau projet :

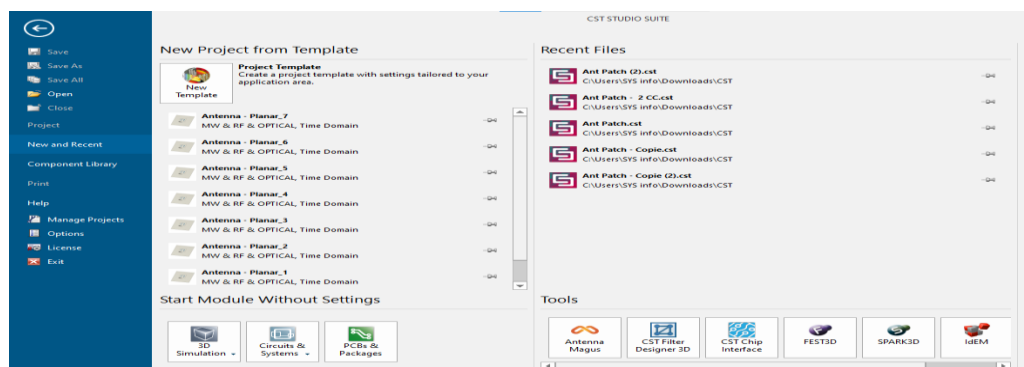
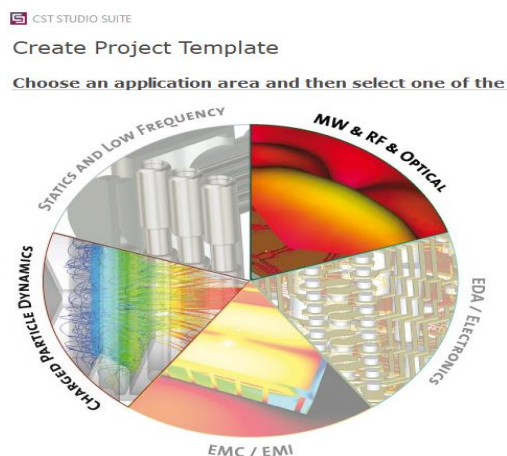


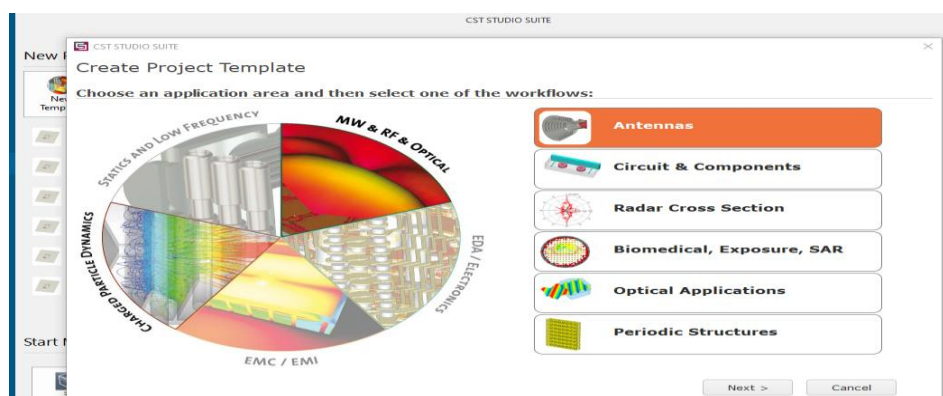
Figure A.2. Création d'un nouveau projet

- ✓ On clique sur l'icône 'Project Template' et on choisit le type de simulation qu'on souhaite réaliser (dans notre cas on a choisi **MW . RF OPTIC**),



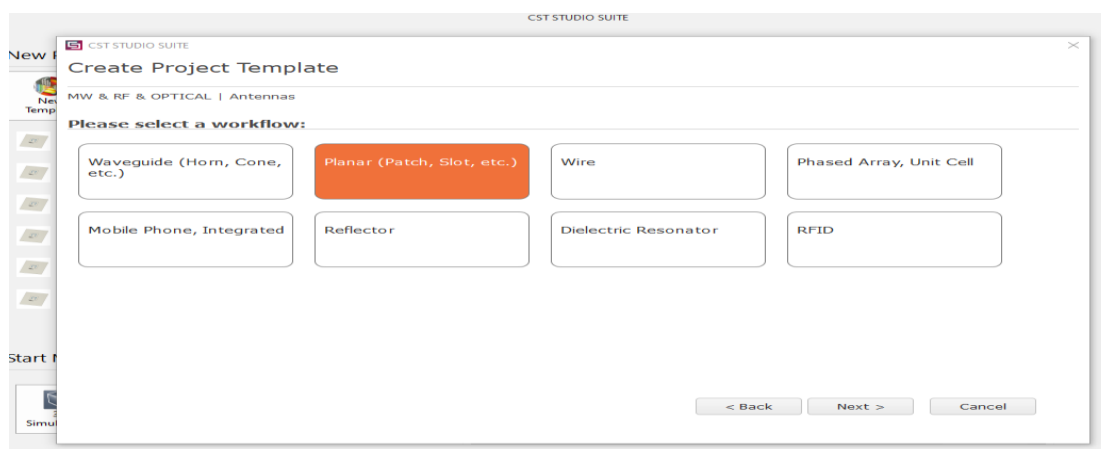
**Figure A.3.** Choix du type de simulation

- ✓ On clique sur MW & RF & OPTICAL puis sur 'antennas' → Next



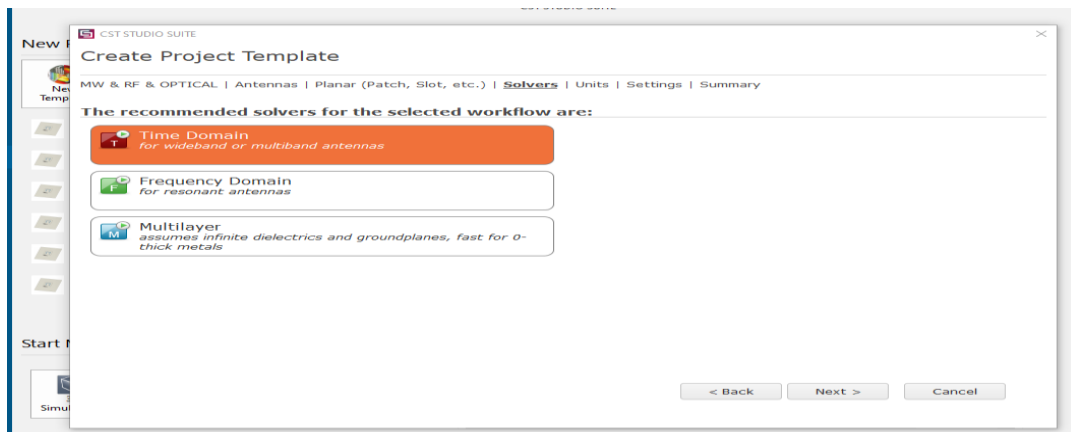
**Figure A.4.** Choix de la zone de simulation

- ✓ Une fois cliqué sur « NEXT », on choisit le modèle de la structure qu'on veut réaliser, (dans notre cas nous avons choisi **Planar (Patch, Slot, etc.)**) puis sur Next.



**Figure A.5.** Choix du type d'antenne

- ✓ On sélectionne le type de simulation ((dans notre cas nous avons choisi **Time Domain**)).



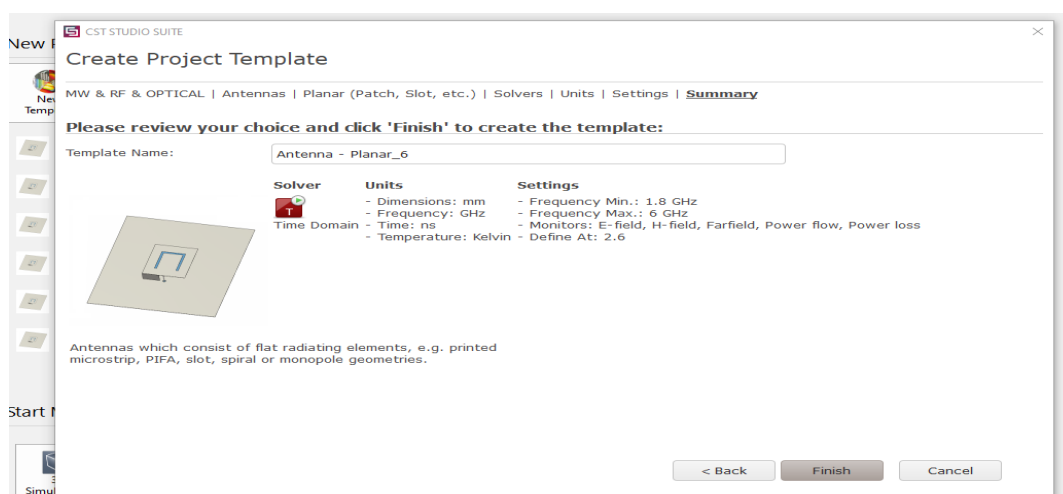
**Figure A.6.** Choix du type de simulation

- ✓ Après avoir sélectionné le **Time Domain**, on doit effectuer les unités de fréquences à utiliser.



**Figure A.7.** Choix des unités de fréquence

- ✓ En fin, la fenêtre suivante apparaît et on clique sur '**Finish**' pour terminer la création du nouveau projet.



**Figure A.8.** Fin de la création de nouveau projet

### **A.3. Description générale de l'interface CST**

Une fois le projet est créé, on accède à l'interface d'utilisateur du CST.

- A l'entête de l'interface, on trouve la barre d'outils qui est un ensemble de raccourcis de la barre de menu.
- A gauche de l'interface, nous avons l'arbre de navigation d'où on peut accéder aux éléments structuraux et aux résultats de simulation.
- Au corps de l'interface se trouve le plan de travail sur lequel la structure est en 3D.
- Au pied de l'interface, nous avons :
  - ✓ La liste des paramètres d'où on trouve les variables utilisées pendant la simulation.
  - ✓ Le message qui informe si chaque étape est simulée avec succès. Dans le cas contraire, un message d'erreur apparaît.

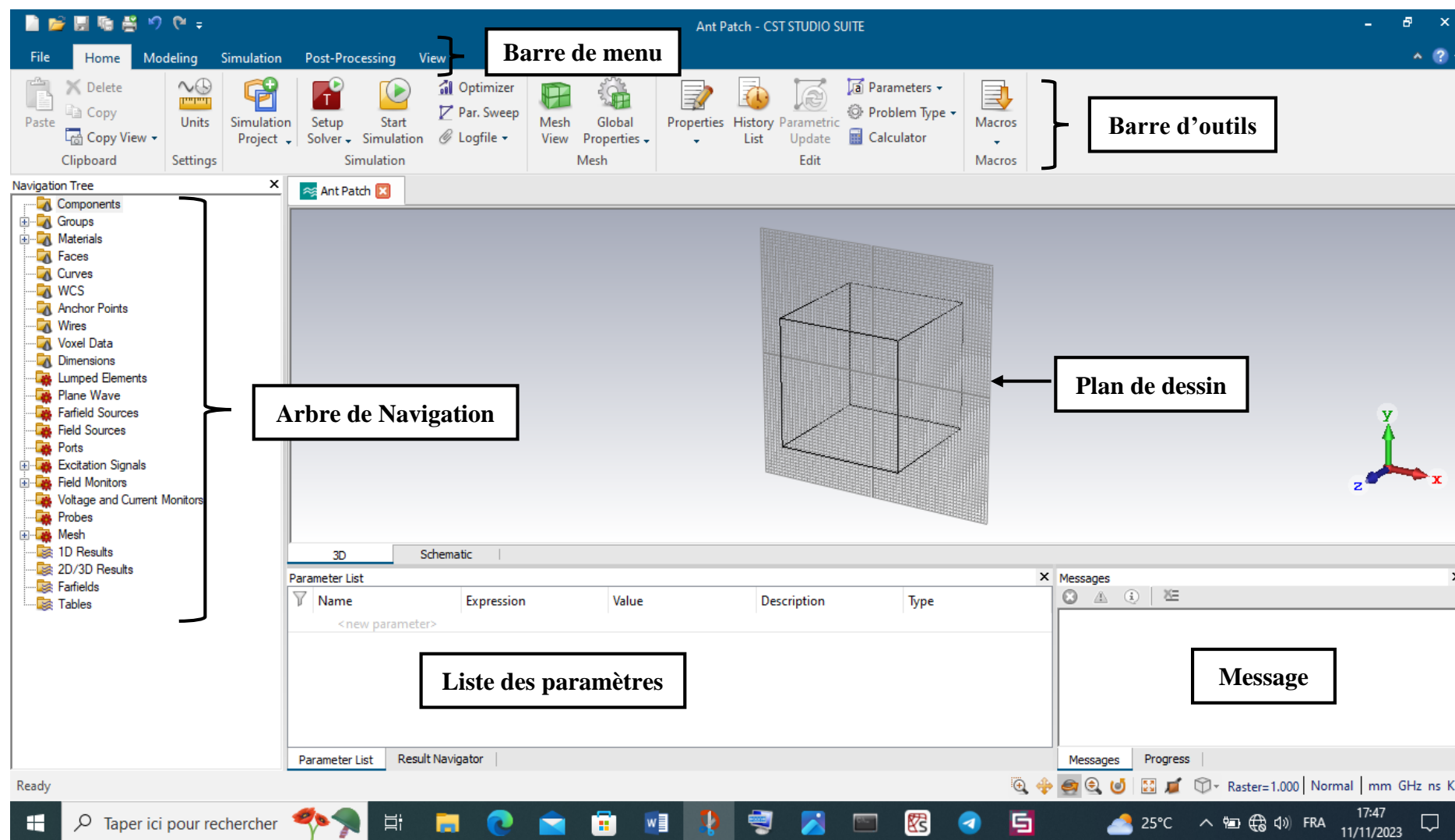


Figure A.9. Interface du CST



#### **A.4. Principes caractéristiques de logiciel CST**

Les principales caractéristiques de logiciel CST Microwave Studio sont :

- Rapide et de la mémoire technique efficace d'intégration finie.
- Très bonne performance en raison de rapprochement frontière Perfect (PBA).
- La structure peut être vue soit comme un modèle 3D ou un schéma. Ce dernier permet un raccordement facile de l'EM de simulation avec la simulation de circuit .
- modélisation de la structure.
- Avancée basée sur ACIS1, paramétrique fin solide devant la modélisation avec une excellente la visualisation de structures.
- Caractéristique hybride à base de modélisation permet rapides changements structurels.
- Importation de données EDA de la conception, y compris les flux Cadence Allegro .
- L'importation de conceptions de PCB provenant de SimLab PCBMod / CST PCB Studio.
- Interface utilisateur graphique basée sur Windows XP, Windows Vista, Windows 7 et Linux.