

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITÉ MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE : TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT : ELECTRONIQUE

N° :



DOMAINE : SCIENCE ET
TECHNOLOGIE

FILIERE : TELECOMMUNICATION

OPTION : SYSTEME DE
TELECOMMUNICATION (STLC)

**Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de master Académique**

Par :

BOUKHAROUBA Imane

BENDIB Hadjer

Intitulé

**Conception et réalisation d'une
antenne 5G**

Soutenu devant le jury composé de :

Dr. BRIK YUCEF

Université de M'sila

Président

MCA. BAKHITI Haddi

Université de M'sila

Encadreur

MCA. BENTOUMI Miloud

Université de M'sila

Co-Encadreur

Dr. DJELID ASMA

Université de M'sila

Examineur

Année universitaire : 2022-2023

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Remerciement

Avant tout, nos remerciements en premier lieu, à DIEU qui nous a donné la foi, le courage et la patience de parvenir à finir ce modeste travail.

Nous tenons à remercier particulièrement nos parents ; nos succès demeurés loin le fruit de leurs longues années de sacrifices et de patience.

*Nous tenons à exprimer Nos vifs remerciements et ma gratitude à nos promoteurs **Dr.***

***BAKHTI HADDI** et **Dr. BENTOUMI MILOUD**, et nous les remercies pour leurs conseils ; leurs précieux commentaires qui m'ont permis de surmonter mes difficultés auxquelles nous étions confrontés, et de progresser dans cette présente étude, pour leurs précieux conseils et leur accompagnement indéfectible au cours de nos recherches, pour leurs avis éclairés et pour toutes les connaissances qu'ils nous ont transmises.*

*Nous tenons à remercier en particulier **Pr. chelal Mouloud** (professeur à l'Institut de génie électrique et électronique de boumerdas INELEC), et le **Dr. Brik Youcef**, le **Dr.***

***Attallah Bilal**, le **Dr. Benmeddour Fudila**, et le **M. Benmohamed Farhet** pour leur grande aide à notre égard. Les mots de remerciement ne peuvent peut-être pas exprimer pleinement notre gratitude pour vos efforts, mais je voudrais exprimer notre profonde gratitude à chacun d'entre vous et pour la précieuse contribution et le soutien que vous avez apportés pour nous dans les moments difficiles. Vous nous avez été d'un grand soutien et vous nous avez aidés à surmonter les défis et les difficultés.*

Nous savons que sans votre présence et votre soutien, la tâche aurait été beaucoup plus difficile

Nos remerciements s'adressent à tous les membres du jury qui ont accepté de juger notre travail

Nos remerciements s'étendent également à tous, nos enseignants durant les années d'études.

Enfin nous ne voudrais pas oublier de remercier toute personne qui Nous aidons de loin ou de près à réaliser ce travail.

Merci





***Au Nom d'Allah,
le Clément, le
Miséricordieux.***

Dédicaces

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

À ma très chère mère, quoi que je fasse ou que je dise, je ne saurai point te remercier comme il se doit. Ton affection me couvre, ta bienveillance me guide et ta présence à mes côtés a toujours été ma source de force pour affronter les différents obstacles, puisse dieu te protéger.

A mon très cher père, Qui était et est toujours un bon modèle et un premier soutien pour moi dans cette vie, quoi que je fasse ou que je dise, je ne saurai point te remercier comme il se doit puisse dieu te protéger.

À mon frère Youcef et sa femme à mes belles sœurs Hanane, Amel, Hadjira et mes neveux qui m'ont accompagné avec leur amour. Puisse dieu vous donne santé, bonheur, et surtout réussite.

A toute ma famille, et mes amis. Sans exception

Et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour que ce projet soit possible, je Vous dis merci.

A toute la promo de Télécommunication dont je fais partie. À mes professeurs qui m'ont aidé dans mes études et qui m'ont mené vers la porte du succès. A cette terre, notre chère et bien aimé ALGERIE, qui m'a vu naître (vive ma patrie).

BOUKHAROUBA IMANE

Merci





Dédicaces

A mes chers parents,

A mon cher oncle miloud,

A mes sœur et mes frères,

A mes chères amies ,

A tous qui m'aiment.

Merci 

Bendib Hadjer

Résumé :

Le but de ce travail est l'étude, la simulation, la conception et la réalisation d'une antenne patch miniature bi-bande pour les applications 5G. Cette antenne est spécifiquement conçue pour fonctionner dans deux bandes de fréquences différentes, l'une autour de 5 GHz et l'autre autour de 28 GHz, afin de répondre aux exigences des réseaux 5G. La bande autour de 5 GHz offre une meilleure portée et une pénétration accrue des obstacles, tandis que la bande autour de 28 GHz offre des vitesses de transmission plus élevées mais avec une portée plus limitée. De nos jours ce projet présente un très grand intérêt dans des applications IoT.

L'objectif principal de cette conception est de fournir une connectivité optimale dans les deux bandes de fréquences, ce qui permettra de tirer parti des avantages spécifiques offerts par chacune d'entre elles.

Pour réaliser cette antenne patch miniature bi-bande, des techniques de conception avancées et des simulations sont utilisées pour optimiser les performances dans les deux bandes de fréquences. La fabrication du prototype implique l'utilisation de matériaux et de techniques de fabrication spécifiques pour garantir une taille réduite tout en maintenant les performances requises.

Une fois le prototype réalisé, une série de tests est effectuée pour évaluer les performances de l'antenne, y compris le rendement, le gain et la directivité dans les deux bandes de fréquences. Ces tests permettent de vérifier si l'antenne atteint les objectifs de performance attendus et si elle est adaptée aux applications 5G.

Mots clé : Antenne / Patch / Miniaturisation / 5G

Abstract:

The aim of this work is the study, simulation, design and realization of a miniature dual-band patch antenna for 5G applications. This antenna is specifically designed to operate in two different frequency bands, one around 5 GHz and the other around 28 GHz, in order to meet the requirements of 5G networks. The band around 5 GHz offers a better range and increased penetration of obstacles, while the band around 28 GHz offers higher transmission speeds but with a more limited range. Nowadays this project is of great interest in IoT applications.

The main objective of this design is to provide optimal connectivity in both frequency bands, which will make it possible to take advantage of the specific advantages offered by each of them.

To realize this miniature dual-band patch antenna, advanced design techniques and simulations are used to optimize performance in both frequency bands. The manufacture of the prototype involves the use of specific materials and manufacturing techniques to guarantee a reduced size while maintaining the required performance.

Once the prototype is made, a series of tests are carried out to evaluate the performance of the antenna, including efficiency, gain and directivity in both frequency bands. These tests make it possible to verify if the antenna meets the expected performance objectives and if it is suitable for 5G applications.

Keywords: Antenna / Patch / Miniaturization / 5G

ملخص:

الهدف من هذا العمل هو دراسة ومحاكاة وتصميم وتحقيق هوائي تصحيح ثنائي النطاق مصغر لتطبيقات الجيل الخامس. تم تصميم هذا الهوائي خصيصا للعمل في نطاقي تردد مختلفين، أحدهما حوالي 5 جيجاهرتز والآخر حوالي 28 جيجاهرتز ، من أجل تلبية متطلبات شبكات الجيل الخامس. يوفر النطاق الذي يبلغ حوالي 5 جيجاهرتز نطاقا أفضل وتغلا متزايدا للعبات، بينما يوفر النطاق الذي يبلغ حوالي 28 جيجاهرتز سرعات نقل أعلى ولكن بنطاق محدود أكثر. في الوقت الحاضر هذا المشروع ذو أهمية كبيرة في تطبيقات إنترنت الأشياء.

الهدف الرئيسي من هذا التصميم هو توفير الاتصال الأمثل في كلا نطاقي التردد، مما سيجعل من الممكن الاستفادة من المزايا المحددة التي يقدمها كل منهما.

لتحقيق هذا الهوائي المصغر ثنائي النطاق، يتم استخدام تقنيات التصميم المتقدمة والمحاكاة لتحسين الأداء في كلا نطاقي التردد. يتضمن تصنيع النموذج الأولي استخدام مواد وتقنيات تصنيع محددة لضمان حجم مخفض مع الحفاظ على الأداء المطلوب.

بمجرد عمل النموذج الأولي، يتم إجراء سلسلة من الاختبارات لتقييم أداء الهوائي، بما في ذلك الكفاءة والكسب والاتجاهية في كلا نطاقي التردد. تتيح هذه الاختبارات التحقق مما إذا كان الهوائي يفي بأهداف الأداء المتوقعة وما إذا كان مناسباً لتطبيقات الجيل الخامس.

الكلمات المفتاحية : هوائي / رقعة / تصغير / G5

Sommaire

Remerciement.....	
Dédicaces	
Résumé :	
Sommaire	
Liste des figure	
Liste des tableaux	
Liste des abréviations	
Introduction générale :	1
Chapitre I: Défit de la cinquième Génération (5G).....	4
I.1. Introduction.....	5
I.2. Historique.....	5
I.3. La 5 ^{ème} Génération	7
I.4. Objectifs de la 5G.....	7
I.5. Vision de 5G.....	8
I.6. Applications	9
I.7. Fréquences utilisées pour la 5G	10
I.8. Antenne pour la 5G	11
I.9. Technologies émergentes pour réseaux 5G	11
I.9.1. MIMO Massive.....	12
I.9.2. Ondes millimétriques	13
I.9.3. Internet des objets (IoT).....	14
I.9.4. Communication Device-to-Device (D2D).....	14
I.9.5. Prise en charge native de la communication machine-to- machine (M2M).....	14
I.10. Différentes exigences de la 5G	14
I.10.1. Très hauts débits ou débit crête par utilisateur.....	15
I.10.2. Efficacité énergétique	16
I.10.3. Capacité de trafic par zone.....	16
I.10.4. Efficacité spectrale.....	17
I.10.5. Mobilité.....	18
I.10.6. Densité de connexion.....	18
I.10.7. Débit moyen par utilisateur.....	18
I.10.8. Latence	18
I.11. Avantages et inconvénients de la 5G.....	19

I.11.1. Avantages.....	19
I.11.2. Inconvénients	19
I.12. Conclusion	20
Chapitre II: Généralités sur les antennes patch	21
II.1. Introduction	22
II.2. Définition d'une antenne	22
II.3. Généralités sur les antennes.....	22
II.4. Principe de fonctionnement des antennes.....	23
II.4.1. Rôle des antennes	23
II.4.2. Différents types d'antennes	24
II.5. Terminologie et caractéristiques électriques et électromagnétiques des antennes	28
II.5.1. Caractéristique électrique	29
II.5.2. Caractéristiques électromagnétiques	31
II.6. Antennes micro-rubans.....	38
Fig.II.16. Structure de l'antenne micro-ruban	39
II.6.1. Différentes formes de patch des antennes micro-rubans	39
II.6.2. Technologie d'alimentation d'antenne micro-ruban.....	40
II.6.3. Mode d'excitation des antennes micro-ruban.....	44
II.6.4. Caractéristique spécifiques des antennes micro-rubans	45
II.6.3. Avantages et inconvénients des antennes micro-rubans.....	47
II.7. Conclusion	48
Chapitre III: Présentation du logiciel CST	49
III.1. Introduction	50
III.2. Présentation du logiciel CST STUDIO SUITE.....	50
III.2.1. Description générale du logiciel.....	51
III.2.2. Description générale de l'interface CST	54
III.2.3. Les différentes formes géométriques	55
III.2.3. Optimisation et variation de paramètre $ 61 $	58
III.4. Conclusion	60
Chapitre IV: Résultats et Discussions	61
IV.1. Introduction	62
Fig.IV.1. Antenne patch rectangulaire simple.....	62
IV.3. Calcul de l'impédance de la ligne d'alimentation.....	64
IV.4. Caractéristiques du substrat	66
IV.5.1. Présentation de la structure d'antenne Patch.....	66

IV.5.2. Résultats et discussions	67
IV.6. Etude paramétriques	68
IV.7. Structure finale de l'antenne	69
IV.8. Paramètres de l'antenne	70
IV.9. Résultats et discussions	70
IV.9.1. Coefficient de réflexion	70
IV.9.2. Bande passante	71
IV.9.3. Taux d'onde stationnaire (VSWR).....	72
IV.9.4. Diagramme de rayonnement	72
IV.9.5. Courant de surface.....	75
IV.9.7. Gain	76
IV.9.8. Directivité.....	76
IV.10. Etude comparatif.....	77
IV.11. Les étapes de réalisation de l'antenne.....	78
IV.11.1. Matériel nécessaire.....	78
IV.12. Les étapes de la réalisation du circuit imprimé.....	78
IV.12.1. Le typon (étude du tracé)	78
IV.12.2. Insolcusc/insolation.....	79
IV.12.3. Développement du Patch	79
IV.13. Le prototype réalisé.....	81
IV.14. Appareil de mesure analyseur de réseaux	81
IV.14.1. Mesures expérimentales.....	82
IV.15. Conclusion	82
Conclusion générale :	85
Références bibliographiques :	87

Liste des figure

Chapitre I: Défit de la cinquième Génération (5G)

Fig.I.1. Vue schématique de l'histoire des communications cellulaires.....	6
Fig.I.2. Evolution des applications de la 4G vers la 5G.....	10
Fig.I.3. Spectre des fréquences 5G.....	11
Fig.I.4. MIMO massive 5G.....	12
Fig.I.5. Plage de fonctionnement typique des communications mobiles existantes, par rapport au spectre des ondes millimétriques.....	13
Fig.I.6. Comparaison des différentes exigences de la 5G par rapport à la 4G.....	15

Chapitre II: Généralités sur les antennes patch

Fig.II.1. Système radio typique.....	22
Fig.II.2. Antenne dipolaire.....	24
Fig.II.3. Boucle magnétique.....	25
Fig.II.4. Antenne cornet.....	26
Fig.II.5. Réseau de fentes.....	26
Fig.II.6. Antenne à réflecteur parabolique.....	27
Fig.II.7. Antenne patch.....	27
Fig.II.8. Antenne patch avec alimentation à couplage électromagnétique.....	28
Fig.II.12. Diagramme omnidirectionnel d'une antenne.....	32
Fig.II.13. Diagrammes de rayonnement : (a) plan XZ, (b) plan YZ.....	33
Fig.II.15. Polarisation d'une antenne: a) Linéaire, b) Circulaire, c) Elliptique.....	38
Fig.II.16. Structure de l'antenne micro-ruban.....	39
Fig.II.17. Différentes formes de patch.....	39
Fig. II.18. Autres formes de patch.....	40
Fig.II.19. (a) Alimentation d'une ligne micro-ruban, (b) Photo d'une antenne réalisée [42,53].....	41
Fig.II.20. Alimentation d'une ligne micro-ruban d'un réseau d'antenne de (a) 4 patches,(b) 4x4patches. (Source des photos).....	41
Fig. II.21. (a)Alimentation par une sonde coaxiale, (b) Photo d'une antenne réalisée.....	42
Fig.II.22. Alimentation par couplage d'ouverture.....	42
Fig. II.23. Alimentation par couplage de proximité.....	43
Fig.II.24. Ligne de guide d'ondes coplanaire.....	43
Fig. II.25. Circuits équivalents pour les différentes configurations.....	44

Fig.II.26. Configurations de champ (modes) pour une antenne micro-ruban rectangulaire. ...	45
Fig. II. 27. Diagrammes de rayonnement typiques d'une antenne patch rectangulaire pour (a) plan E et, (b) plan H.	46
Fig.II.28. Polarisation circulaire des patches : (a) presque carré. (b) elliptique.....	47

Chapitre III: Présentation du logiciel CST

Fig.III.1. Création d'un nouveau projet.....	51
Fig.III.2. Choix du type de simulation	51
Fig.III.3. Choix de la zone de simulation.....	52
Fig.III.4. Choix du type d'antenne	52
Fig.III.5. Choix du type de simulation	52
Fig.III.6. Choix des unités.....	53
Fig.III.7. Différentes grandeurs et leurs unités.....	53
Fig.III.8. Choix des unités de fréquence	54
Fig.III.9. Fin de la création d'un nouveau projet.....	54
Fig.III.10. Interface du CST.....	55
Fig.III.11. Les différentes formes de bases	55
Fig.III.12. Dialogue d'ajout d'une forme de base.....	56
Fig.III.13. Matériau à utiliser	56
Fig.III.14. Création d'un nouveau matériau.....	57
Fig.III.15. Choix d'un modèle.....	57
Fig.III.16. Boîtes de dialogues de variation des paramètres de simulation.....	58
Fig.III.17. Etape et boîtes de dialogue d'optimisation	59
Fig.III.18. Rapport de l'optimisation	60

Chapitre IV: Résultats et Discussions

Fig.IV.1. Antenne patch rectangulaire simple.....	62
Fig.IV.2. Fenêtre de l'impédance de la ligne d'alimentation dans logiciel CST	64
Fig.IV.3. Variation de l'impédance de la ligne d'alimentation en fonction de la fréquence pour $h=0.8\text{mm}$	65
Fig.IV.4. Variation de l'impédance de la ligne d'alimentation en fonction de la fréquence pour $h=0.8\text{mm}$ et 1.6mm	65
Fig.IV.5. Modélisation de notre antenne dans CST.	66
Fig.IV.6. Résultats de simulation du coefficient de réflexion de l'antenne.....	67
Fig.IV.8. Le plan de masse.....	68
Fig.IV.9. Le coefficient de réflexion S11 en (dB) en fonction de la fréquence	69

Fig.IV.10. modification du patch	69
Fig.IV.11. Le coefficient de réflexion S11 en (dB) en fonction de la fréquence	69
Fig.IV.12. Géométrie finale de l'antenne bi-bande conçue	70
Fig.IV.13. Dimension d'une antenne	70
Fig.IV.15. Bande passante d'antenne pour la fréquence 5.2 GHz.....	71
Fig.IV.16. Bande passante d'antenne pour la fréquence 28 GHz.....	72
Fig.IV.17. Rapport d'onde stationnaire en fonction de la fréquence.	72
Fig.IV.18. Diagramme de rayonnement simulé pour les cas à $\Phi = 0$, $\Phi = 90$	73
Fig.IV.19. Diagramme de rayonnement simulé pour les cas à $\Phi = 0$, $\Phi = 90$	73
Fig.IV.20. Diagramme de rayonnement simulé en 3D pour 5.2 GHz.....	74
Fig.IV.21. Diagramme de rayonnement simulé en 3D pour 28 GHz.....	74
Fig.IV.22 : Courant de surface pour (a)-f=5.2 GHz et (b)-f=28 GHz	75
Fig.IV.23. Efficacité totale de l'antenne patch.....	76
Fig.IV.24. Graphiques de gain réalisé en fonction de la fréquence pour 5.2 GHz et 28 GHz. 76	
Fig.IV.25. Graphiques de directivité en fonction de la fréquence pour 5.2 GHz et 28 GHz ...	77
Fig.IV.26. Le typon du circuit	78
Fig.IV.27. Insolence double face pour circuit imprimé.....	79
Fig.IV.28 : Etape de révélation à l'aide d'hydroxyde de sodium.....	80
Fig.IV.29 : Etape de révélation à l'aide de perchlorure de fer liquide.	80
Fig.IV.31. Comparaison des dimensions avec 1 Euro	81
Fig.IV.32. Photo d'une antenne réalisée	Erreur ! Signet non défini.
Fig.IV.33. Analyseur de réseau vectoriel	81
Fig.IV.34. Comparaison entre les résultats simulé et réalisé du S11	82

Liste des tableaux

Chapitre I: Débit de la cinquième Génération (5G)

Tableau.1.1. Résumé des générations de communications mobiles [9,10].	6
Tableau.1.2. Capacités et valeurs clés 5G de l'UIT-R [2,17].	8

Chapitre II: Généralités sur les antennes patch

Tableau II.1. Modifications typiques de la forme du plan d'amplitude de l'antenne	35
---	----

Chapitre IV: Résultats et Discussions

Tableau. IV.1. Cahier de charge.	66
Tableau (IV.2) : Paramètres géométriques de l'antenne étudiée	67
Tableau (IV.3) : Paramètres géométriques de l'antenne	70
Tableau (IV.4). Comparaison entre notre étude et l'étude référencée	77

Liste des abréviations

1G : Première génération.

2G : Deuxième génération.

3G : Troisième génération.

4G : Quatrième génération.

5G : Cinquième génération.

Gbps : Giga bit par second.

MIMO: Multiple Input Multiple Output.

TDMA: Time Division Multiple Access.

CDMA : Code Division Multiple Access.

LTE: Long Term Evolution

QOS: Quality of Service.

Wi-Fi: Wireless Fidelity.

AN: Access Network (réseau d'accès).

5GC : 5G Core Network.

NG: New Generation

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

gNB: next Generation Node Base Station

AMF: Access and Mobility Management Function

UPF : User Plan Function

3GPP: 3rd Generation Partnership project

M2M: Machin to Machin

D2D: Device to Device

eMBB: Enhanced Mobile Broadband

FD: Full- Duplex

IOT: Internet of Things

Massive MIMO: Massive Multi Input Multi Output

MU-MIMO : Multi Utilisateur Multi Input Multi Output

NOMA: No orthogonal Multiple Access

UWB: Ultra Wide Band (Ultra Large Bande).

SDN: Software Defined Network

NFV: Network Function Virtualization

UIT-R: International Télécommunication Union Radio communication

MMTC: Massive Machine Type Communications

uRLLC :Ultra-Reliable and Low Latency

UIT-R: International Télécommunication Union Radio communication

3D : Trois dimensions

a₂ : Champs électriques de l'onde incidente à la sortie de la composante

a₁ : Champs électriques de l'onde incidente à l'entrée de la composante

b₁ : Champs électriques de l'onde réfléchie à l'entrée de la composante

b₂ : Champs électriques de l'onde réfléchie à la sortie de la composante

CST : Computer Simulation Technology

dB : decibel

ϵ_0 : permittivité du vide, $8.85411878 \times 10^{-12}$ F / m

ϵ_r : permittivité diélectrique relative du substrat

ϵ_{reff} : permittivité diélectrique effective du substrat

f_r : Fréquence de résonance de l'antenne

h : Épaisseur du substrat

J₀ : Fonction de Bessel d'ordre 0.

L : Longueur réelle de l'élément de rayonnement

L_{eff} : Longueur effective du patch

MMIC : Microwave Monolithic Integrated Circuits

MWT : Micro Wave Technology

R_{in} : Impédance d'entrée calculée du patch

R_{ligne} : Impédance de la ligne d'alimentation

VHF : Very High frequency

VSWR : Voltage Standing Wave Ratio

W : Largeur du patch

μ_0 : perméabilité magnétique du vide, $1.2566371 \times 10^{-6} \text{ N / A}^2$

B : Champ d'induction magnétique.

BP : Bande Passante.

C : Capacité.

c : Célérité de la lumière dans le vide ou l'air.

E : Champ électrique.

H : Champ magnétique.

R : Résistance.

ROS : Rapport d'ondes stationnaires

S : Paramètres S (scattering parameters).

S₁₁ : Facteur de réflexion (porte 1).

Γ : Représente le terme de propagation entre les faces avant et arrière de l'échantillon

T : Coefficient de transmission.

TE : Transverse électrique.

TEM : Transverse électromagnétique.

VSWR : Voltage Standing Wave Ratio

Y_p : Admittance parallèle.

Z₀ : Impédance caractéristique à vide.

Z_c : Impédance caractéristique.

Z_n : Impédance de normalisation,

Z_R : Impédance de charge.

Z_s : Impédance série.

Introduction générale

Introduction générale :

La nouvelle génération de télécommunication mobile connue sous l'acronyme de cinquième génération (5G), est une technologie évolutive visant à prendre en charge de nouvelles fonctionnalités et à améliorer la vitesse et la réactivité des réseaux sans fil. Compte tenu de ces objectifs, la 5G devrait combiner plusieurs technologies pour réaliser un réseau mobile pouvant répondre aux actuels exigences. Parmi ces technologies nous pouvons citer : l'utilisation des bandes millimétriques en exploitant les fréquences au-dessus de 5 GHz qui deviennent plus indispensable pour la 5G et facilitera l'intégration de centaines d'éléments rayonnants au niveau de la station de base en profitant de leurs faibles longueurs d'ondes.

Notre objectif est de concevoir, simuler et dans la mesure du possible réaliser une antenne fonctionnant dans deux bandes de fréquence 5 GHz et 28 GHz. Faire des tests par un analyseur du réseau pour s'assurer de la bande de travail et les fréquences de résonance, faire une comparaison avec les résultats pratiques. Les paramètres géométriques de l'antenne microruban sont déterminés sur la base de la théorie des antennes. La simulation de l'antenne proposée va être effectuée à l'aide du logiciel CST.

La technologie mobile continue d'évoluer et ses performances s'améliorent de manière exponentielle. L'utilisation des services vocaux, la messagerie, et enfin l'Internet mobile et les applications mobiles multiservices ont façonné l'évolution des réseaux mobiles et le passage d'une génération à l'autre. Le cycle de génération des téléphones mobile étant d'environ 10 ans, les téléphones mobiles sans fil de première génération sont sortis dans les années 1980 [1]. La 5G se situe au carrefour de ces nouveaux usages ; elle ambitionne de répondre mieux et simultanément à cette grande variété de besoins et ces nouvelles demandes, via une technologie unifiée qui prend en compte, dès sa conception, cette diversité [1]. Les réseaux 5G sont conçus pour délivrer le niveau de performance requis pour le déploiement à grande échelle des objets connectés. Cette technologie permet de livrer un monde entièrement connecté (IoT) [1]. Contrairement aux autres technologies de réseaux mobiles, la 5G est une technologie de rupture. Dès le début de sa conception, elle a été prévue afin de répondre à une multitude de cas d'usage, sur un périmètre large, adressant non seulement le grand public mais également les grands secteurs économiques [1]. La 5G utilise des ondes millimétriques, Il s'agit d'un réseau très coûteux composé d'un grand nombre d'antennes à très haut débit et à courte portée [1]. Les télécommunications ouvrent d'immenses perspectives dans le domaine du transport de l'information à l'échelle du monde. Toutes les communications sans fil nécessitent l'utilisation d'antennes aux deux extrémités de la liaison de télécommunication. Il est impossible de réaliser une transmission sans fil sans l'emploi d'antennes d'émission et de réception

[1]. De nombreuses antennes émettrices-réceptrices sont érigées afin de permettre la transmission des informations sous forme de signaux entre les utilisateurs. Cet appareil est la pierre angulaire des systèmes de télécommunications sans fil, permettant aux utilisateurs de communiquer, d'échanger des informations et d'accéder à l'Internet partout où ils se trouvent. L'antenne est présente aux deux extrémités de la liaison [1]. Les systèmes de communication sans fil, qu'il s'agisse de réseaux fixes ou mobiles, nécessitent nécessairement des débits très élevés pour faire face à la croissance exponentielle de la quantité de données transmises, notamment pour la vidéo haute définition. Les antennes font partie des applications qui attirent l'attention dans ce domaine [1]. La principale caractéristique des réseaux 5G est qu'ils sont conçus pour permettre aux utilisateurs de se connecter simultanément à plusieurs technologies sans fil et échanger entre eux. La 5G se concentre sur les appareils qui prennent en charge la voix sur IP (VoIP), permettant aux utilisateurs de voir des taux de transfert de données élevés (débits de données sortantes) et des volumes d'appels raisonnables. Cette technologie vise à répondre à tous les besoins des clients qui exigent des fonctionnalités avancées dans leurs téléphones mobiles [2,3].

Récemment, une partie du spectre électromagnétique connue sous le nom de bandes mmWave a été proposée pour une utilisation en 5G. Quelques GHz d'une partie de ce spectre peuvent être utilisés pour permettre aux utilisateurs de téléphones mobiles de contrôler de grandes quantités de données. , ces fréquences peuvent également prendre en charge la connectivité entre ces petites cellules. Un large spectre est disponible car il est actuellement inutilisé. Des mesures récentes montrent que les fréquences 28, 38, 71-76 et 81-86 GHz sont les plus confortables dans ce segment du spectre. La courte longueur d'onde de mmWave permet la production d'antennes de grande capacité dans les petits appareils mobiles et les stations de base [2,4,5,6,7]. Exécuter et analyser le comportement d'appareils tels que des antennes n'est pas facile sans des outils de simulation tels que CST Microwave Studio. CST Microwave Studio est spécialement conçu pour des calculs numériques rapides et précis, vous permettant d'économiser du temps et de l'argent dans le processus de mise en œuvre.

Pour atteindre les objectifs fixés, le présent manuscrit de recherche a été organisé et basé autour d'une Introduction générale, et quatre chapitres, une conclusion générale, et des recommandations, références bibliographiques et annexes.

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

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

Dans le troisième chapitre, on présente le logiciel de simulation CST Microwave Studio, et les différentes étapes de simulation. Nous insisterons notamment sur les étapes à suivre pour créer un projet.

Le quatrième chapitre, est dédié au travail pratique et à l'analyse et discussions des résultats obtenus soit par simulation ou bien pratique de l'antenne patch bi-bande ayant deux fréquences de résonance l'une autour de 5GHZ et l'autre tourne autour de 28 GHZ permettant ainsi de recevoir ou d'émettre un très grand taux d'échange d'informations. La comparaison des résultats pratiques et ceux obtenues par simulation dans la mesure du possible.

Chapitre I

Défit de la cinquième Génération (5G)

I.1. Introduction

La cinquième génération (5G) de la télécommunication sans fil est l'une des technologies les plus récentes dans le domaine des communications [8]. Cette avancée devrait fournir pour l'humanité un très grand service en termes de rapidité, de diversité et de facilité. Autrement dit, la 5G nous conduira à une « communauté de communication durable » où les appareils mobiles joueront un plus grand rôle dans le changement positif de la vie quotidienne des gens et la ou les objets peuvent communiquer entre eux.

Il y a beaucoup de questions et de discussions sur la définition des caractéristiques clés de la 5^{ème} génération. Ce chapitre est dédié à un panorama général sur l'évolution de la technologie jusqu'à la 5^{ème} génération. Nous présentons un historique sur les différentes générations de technologie de télécommunications, nous passerons ensuite à éclaircir l'objectif de la 5G. Nous traitons également la vision et l'architecture de la 5G, les fréquences utilisées pour cette dernière. Une présentation de l'antenne de la 5G est donnée car cette dernière représente l'élément le plus important autour du quelle se base toute la technologie 5G. Les différentes exigences de la 5G sont aussi présent en considération, et à la fin nous citerons les avantages et les inconvénients de la 5G [2].

I.2. Historique

Les réseaux cellulaires ont connu plusieurs développements au fil du temps. Il y a 4 générations :

1^{ère} génération : Elle est apparue dans les années 1980 sur la base de systèmes de services vocaux analogiques mobiles.

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

3^{ème} génération : Au milieu des années 1990 et au début des années 2000, le développement a touché à l'accès multiple par répartition codée (CDMA).

4^{ème} génération : Développé en 2010, l'objectif principal de cette génération est l'augmentation des débits de données. Cette génération offre des services de messagerie multimédia (MMS), la diffusion vidéo numérique (DVB) et une clarté améliorée pour la télévision longue portée. Evolution (LTE) est le système 4G leader, offrant une meilleure qualité de service (QoS) et une meilleure sécurité des données par rapport aux générations précédentes.

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

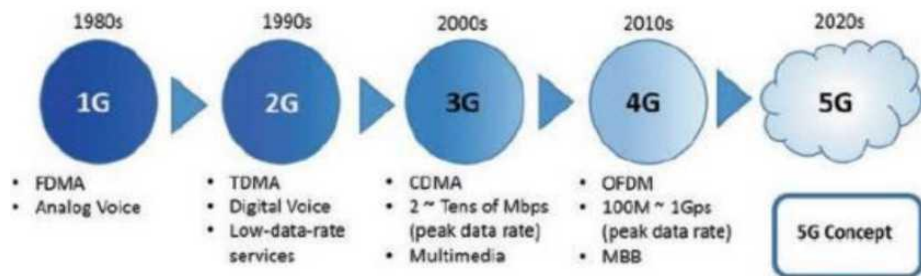


Fig.I.1. Vue schématique de l'histoire des communications cellulaires

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

Tableau.I.1. Résumé des générations de communications mobiles [9,10].

Génération	1G	2G	3G	4G	5G
1^{ère} année d'utilisation	1981	1992	2001	2010	2020
Débit de données	2 Kb/s	64 Kb/s	2 Mb/s	100 Mb/s	10 Gb/s
Fréquences	900 MHz	900 MHz et 1,8 GHz	800 MHz, 900 MHz, 1,7 à 1,9GHz, 2100 MHz	800MHz, 900MHz, 1800MHz, 2100MHz, 2600MHz	28GHz, 37 GHz, 39 GHz, 64 -71 GHz
Description fonctionnelle générale	Téléphones cellulaires analogiques	Téléphones cellulaires numériques (GSM/CDMA)	Première bande passante mobile utilisant des protocoles IP (WCDMA 2000)	Le haut débit mobile sur un standard unifié (LTE)	Internet tactile - Améliore le réseau de communication M2M

1.3. La 5^{ème} Génération

La 5G (réseaux cellulaires ou systèmes sans fil de cinquième génération) comprend un ensemble de technologies qui représentent la prochaine étape majeure dans les normes cellulaires par rapport à l'évolution actuelle de la norme 4G LTE (évolution à long terme). Les réseaux 5G sont en cours de validation par l'UITU (International Telecommunications Union) et le consortium 3GPP (3rd Génération Partner HIP Project), et la mise en œuvre de la norme sont officiellement entrées en vigueur vers 2020 [11]. Cependant, dans sa définition la plus simple, la 5G est la cinquième génération de réseaux cellulaires [12]. Il s'agit de la nouvelle étape de la technologie mobile, utilisant les téléphones mobiles et les tablettes pour les données.

Chaque génération nette a une durée de vie d'environ 20 ans. Les travaux sur la 4G ont débuté en 2003 avec un démarrage en 2010 et se poursuivent jusqu'en 2030. La 5G est à l'étude depuis 2012 et elle est lancée en commercialisation en 2020.

La nouvelle génération de téléphones mobiles est principalement spécifiée par deux acteurs : L'une est l'UITU-R (International Telecommunications Union) IMT-2020 Technical Performance Requirements, qui s'y est terminée en février 2017, et l'autre est le 3GPP (HIP Project) Scenarios and Requirements Technical Report for Third-Generation Partners [11].

La 5G vise à fournir des débits de données très élevés pour un grand nombre d'utilisateurs, à prendre en charge plusieurs communications en même temps, à utiliser un grand nombre de capteurs et à améliorer l'efficacité spectrale du réseau [2].

1.4. Objectifs de la 5G

Au moment où la 4G est en plein essor auprès du grand public, il faut déjà se projeter dans l'avenir pour mieux réfléchir sur la prochaine génération. Ainsi, l'UIT par son instance IMT-2020 (Télécommunications mobiles internationales) définira les standards de la 5G. Généralement pour atteindre les objectifs globaux d'une norme IMT, les processus et les échéances sont élaborés dans trois grandes phases : une phase vision, une phase développement et une phase déploiement.

Dans la première phase, les organismes se réunissent dans des conférences et des symposiums pour déterminer les objectifs, les exigences et les domaines d'intérêt. C'est dans cette phase de vision qu'on identifiera les techniques spécifiques et les technologies les plus prometteuses pour le développement de ces futurs réseaux 5G. Le groupe de travail de l'UIT-R a publié en 2015 un document nommant la recommandation IUT-R M .2083 qui marque les

trois ans de travail sur la normalisation de la 5G à l'échelle mondiale. Ce document a permis de définir les bases nécessaires pour la recherche et le développement de la 5G [13]. Après les pré requis définissant les besoins puis les technologies mobiles, l'objectif du IMT-2020 n'est rien d'autre que d'anticiper les besoins des utilisateurs de services mobiles dans les prochaines décennies. Dans cette deuxième phase qui sera marquée par le développement des standards, les chercheurs du monde entier ont jusqu'à 2020 pour proposer de nouveaux concepts et des technologies pour la 5G en s'appuyant sur la base des conclusions de la première phase.

Enfin vient la phase de d'exploitation sur la base des travaux déjà effectués dans les deux premières phases citées précédemment. Cette phase a débuté à partir de 2020 pour le grand public mais quelques phases test sur terrain ont déjà eu lieu à l'occasion des Jeux Olympiques d'hiver de 2018 Pyeongchang en Corée du Sud [14,15].

1.5. Vision de 5G

Les systèmes de communication mobile et sans fil 5G nécessitent une combinaison de nouveaux concepts de système pour améliorer l'efficacité spectrale et énergétique. La vision et les exigences des systèmes radio 5G sont décrites par le **Tableau.1.2.** Ci-dessous [16]

Tableau.1.2. Capacités et valeurs clés 5G de l'UIT-R [2,17].

Capacités clés	Définition	Valeurs
Débit maximal de données	Débit de données maximum atteignable par utilisateur	20 Gb/s
Taux de données expérimenté par l'utilisateur	Débit de données minimum atteignable pour un utilisateur dans un environnement réseau réel	0.1-1 Gb/s
Latence	Durée entre la transmission d'un paquet de données du nœud source et la réception réussie au nœud de destination	1 ms par voie hertzienne
Mobilité	Vitesse relative entre le récepteur et l'émetteur sous certaines conditions de performance	500 km/h
Densité de connexion	Nombre total d'appareils connectés par unité de surface	106/ km ²

Efficacité énergétique	Nombre de bits pouvant être transmis par joule d'énergie	100 fois comparé avec IMT - Avancé
Efficacité du spectre	Débit de données par unité de ressource spectrale par cellule (ou par unité de surface)	3-5 fois comparé avec IMT - Avancé

I.6. Applications

Le besoin de plus de données dans les réseaux sans fil, la demande d'une meilleure qualité de service et la baisse des prix sont parmi les facteurs qui ont conduit à l'émergence des réseaux 5G. L'un des plus grands avantages de la 5G est la possibilité de construire un réseau mondial. Ce réseau mondial repose sur l'utilisation de tous les moyens de communication disponible [2,18].

- I- **Agriculture** : Développé en utilisant des capteurs et des moteurs pour mesurer et relier la qualité du sol, la pluie, la température, le vent, etc. pour surveiller la croissance des cultures.
- I- **Véhicules** : De nombreuses applications sont liées à la communication sans fil intelligente, telles que la régulation des routes, la communication de véhicule à véhicule et la prévention des accidents.
- I- **Santé** : comprend plusieurs améliorations mineures ou complexes, comme des exercices de contrôle, capteur de la santé des consommateurs, la connectivité sans fil dans les hôpitaux, le suivi des patients, la télésanté, la chirurgie à distance, etc. [2,19].

La 5G apportera sans aucun doute des applications et des améliorations plus étonnantes à tous les niveaux **Figure (I.2)**.







	Aujourd'hui	Transition vers la 5G	Avec la 5G
 Réseau de radio-communication mobile à large bande	Internet, audio et vidéo partout	Outils supplémentaires	Expériences réelles avec 4K, AR (réalité augmentée) et VR (réalité virtuelle)
 Mobilité, transport et logistique	Informations à la demande	Informations en temps réel, mise en réseau des véhicules	Commande autonome
 Sécurité publique	Communication de données	Transmission des plans de bâtiments, photos et vidéos	Analyse en temps réelle de vidéos en haute définition, drones
 Production	Automatisation des processus	Surveillance à distance	Télécommande et commande de robot depuis le nuage
 Energie	Appareils de mesure et réseau électrique intelligent	Gestion des ressources et automatisation	Intelligence des machines et contrôle en temps réel
 Santé	Mise en réseau des médecins et des patients	Soins en ligne: Surveillance et administration de médicaments	Opérations à distance

Fig.I.2. Evolution des applications de la 4G vers la 5G.

1.7. Fréquences utilisées pour la 5G

La 5G est la première génération à fonctionner dans trois spectres radio différents: faible, moyen ou élevé

- La bande basse 5G fonctionne à des fréquences inférieures à 2 GHz. Ce sont les fréquences cellulaires les plus anciennes. Il couvre une bonne distance, mais les canaux larges ne sont pas disponibles et sont principalement utilisés en 4G. La bande basse 5G est donc relativement lente et ressemble à la 4G [20]. La 5G à bande moyenne utilise les fréquences de 2 à 10GHz. Ceci couvre la plupart des fréquences WIFI et cellulaires actuelles [20,10].
- La 5G moyenne bande utilise des fréquences de 2 à 10 GHz. Il couvre la plupart des fréquences Wi-Fi et cellulaires actuelles. [10,20]
- 5G haut débit, jusqu'à 8 canaux 100MHz disponibles. mmWave est vraiment une nouveauté. Ce sont des ondes de 20 à 100 GHz. Ces ondes sont rarement utilisés dans les applications grand public [10,24]. Le spectre des fréquences est illustré par la Figure (I.3) ci-dessous.

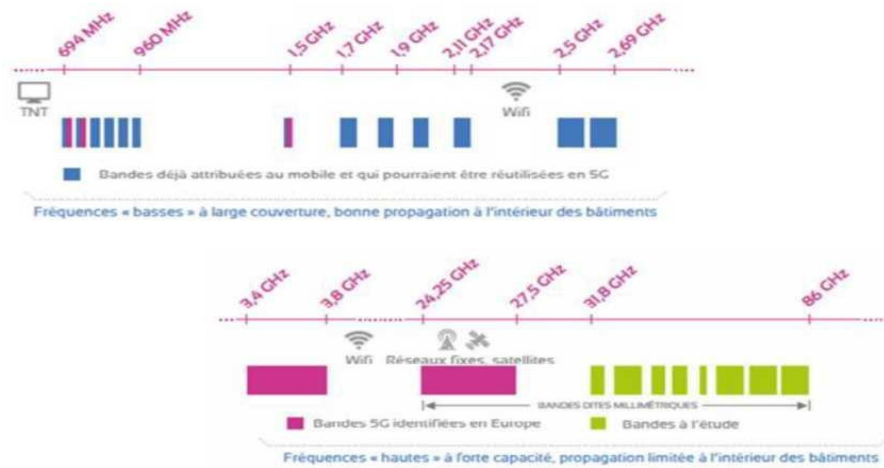


Fig.I.3. Spectre des fréquences 5G

Les réseaux cellulaires recherchent donc un équilibre entre les bandes basses afin de couvrir adéquatement toutes les populations. La haute bande est utilisée pour assurer une capacité suffisante dans les zones où la demande de trafic est la plus élevée [10,22].

1.8. Antenne pour la 5G

La 5G transformera l'environnement, les industries et nos vies en général. Malgré de récentes recherches approfondies sur les antennes pour la 5G, de nombreux défis subsistent qui nécessitent des solutions plus efficaces. Les antennes actuelles utilisées dans les systèmes de communication sans fil existants sont appelées antennes passives car elles utilisent des condensateurs, des conducteurs et des tiges métalliques.

Les dernières antennes proposées pour les réseaux 5G sont appelées antennes actives. Il s'agit d'une technologie clé qui différenciera les réseaux 5G des générations précédentes en termes de vitesse, de latence et de sécurité. Les réseaux 5G nécessitent l'utilisation d'antennes plus complexes et des réalisations de conception pour des vitesses plus élevées [23-24].

1.9. Technologies émergentes pour réseaux 5G

La demande des consommateurs est le moteur du développement des services mobiles à large bande. Pour répondre à la multiplication par 10 à 100 du trafic attendu entre 2020 et 2030, au doublement du nombre d'appareils et de services, et à la demande d'abordabilité et d'amélioration de l'expérience utilisateur, nous avons besoin d'une solution innovante. Le nombre d'appareils connectés à Internet devrait atteindre 50 milliards d'ici 2025 [1,25].

La question posée était de savoir comment la 5G a pu réaliser toutes ces choses, tandis que les générations précédentes restent très faibles.

Nous aborderons les technologies les plus importantes qui ont permis à 5G d'atteindre ce niveau.

1.9.1. MIMO Massive

Massive MIMO (Multiple Input Multiple Output) est une évolution du MIMO point à point unique et du MIMO multi-utilisateur (MU-MIMO). Avec MU-MIMO, un ensemble de stations de base avec plusieurs antennes (moins de 10) dessert un ensemble d'utilisateurs.

Chaque utilisateur est desservi par une seule antenne. Massive MIMO est le résultat d'un désir d'entendre la vision de MU-MIMO dans des systèmes d'antennes massives, chaque station de base étant équipée d'environ 100 antennes ou plus. Le concept a été proposé par Marzetta [1,26].

Les antennes multiples présentent deux possibilités d'utilisation : La première consiste à fournir un gain de réseau en focalisant l'énergie dans les directions souhaitées et en annulant les directions de signal indésirables (formant un faisceau).

Deuxièmement, il s'agit de fournir un gain de multiplexage spatial en envoyant des flux de données indépendants sur chaque antenne.

Les deux techniques peuvent être utilisées pour augmenter le débit de données global de l'utilisateur ou du système Figure (1.4).

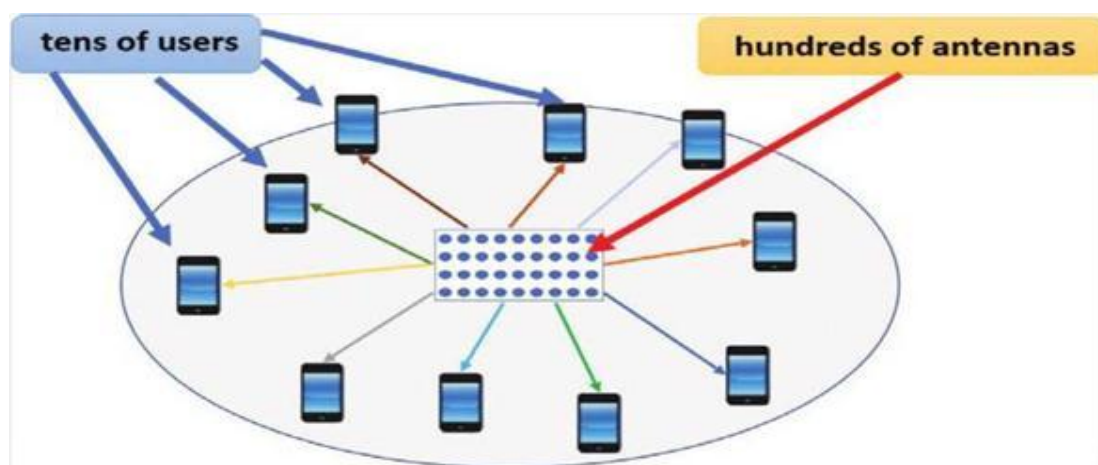


Fig.1.4. MIMO massive 5G

I.9.2. Ondes millimétriques

Pour comprendre ce que signifie le terme onde millimétrique, il faut revenir à la définition des ondes électromagnétiques. Quand on parle beaucoup de fréquence (Hertz), il faut se rappeler qu'une onde se définit avant tout par sa longueur. La longueur décrit la distance parcourue par une onde pendant une période d'oscillation lorsqu'elle se propage dans un espace particulier. Les ondes millimétriques sont simplement des ondes dont la longueur d'onde λ est en millimètres, car plus la longueur d'onde est longue, plus la fréquence est basse. C'est plus petit que la longueur d'onde en mètres ou en kilomètres utilisée pour les ondes radio.

La bande d'ondes millimétriques **Figure (I.5)** est définie comme la partie du spectre électromagnétique qui s'étend de 30 à 300 GHz avec des plages de longueurs d'onde correspondantes de 10 à 1 mm. Historiquement, les fréquences des ondes millimétriques étaient principalement utilisées pour les applications de défense et de radioastronomie, principalement en raison du coût élevé et de la disponibilité limitée de l'électronique à ces fréquences.

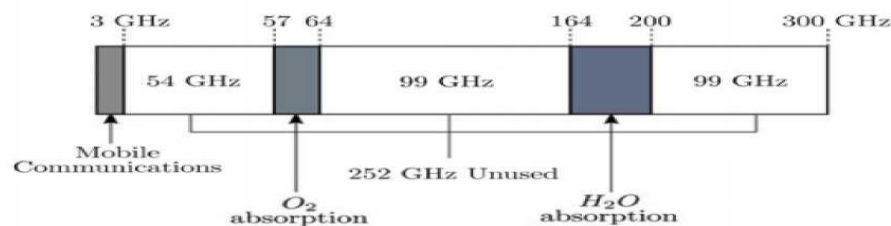


Fig.I.5. Plage de fonctionnement typique des communications mobiles existantes, par rapport au spectre des ondes millimétriques

Les ondes millimétriques [28] sont des ondes radio couvrant des fréquences de 30 à 300 GHz. La bande de fréquences mmWave fournit un spectre énorme qui peut s'adapter à l'augmentation du trafic mondial [29]. La 5G n'utilisera qu'une petite fraction de cette large gamme de fréquences [10].

Le spectre des ondes millimétriques offre les avantages suivants [10,30] :

1. Attribution massive de fréquences. Typiquement plusieurs GHz dans de nombreuses régions du monde.
2. Plus de puissance disponible. Malgré les limites de puissance d'émission strictes de l'UWB (ultra large bande), mmWave permet une EIRP (puissance rayonnée effective isotrope) significative.
3. Le spectre est propre, donc il y a peu d'interférences.
4. La courte longueur d'onde permet la conception de petites antennes à gain élevé pouvant

atteindre des valeurs EIRP élevées à l'aide d'amplificateurs RF de faible puissance.

I.9.3. Internet des objets (IoT)

Combinant les progrès de la détection, de l'informatique mobile et des plates-formes, l'Internet des objets (IoT) est devenu très important ces dernières années et est omniprésent dans le monde moderne. Alors que de plus en plus, d'applications sont déployées à l'aide des technologies IoT, la fragmentation des technologies IoT génériques est nécessaire pour cibler des industries spécifiques avec des exigences variables. Par exemple, un IoT personnalisé pour la surveillance environnementale de l'eau a des exigences différentes de celles d'un IoT personnalisé pour la surveillance médicale des patients.

Cette application IoT moderne nécessite des exigences de transfert de données et de sécurité en temps réel beaucoup plus avancées et strictes [1,31,32].

I.9.4. Communication Device-to-Device (D2D)

La communication D2D entre les appareils est considérée comme l'une des parties les plus importantes des réseaux sans fil 5G. En général, les avantages dérivés des opérations D2D incluent une efficacité spectrale nettement plus élevée, des débits de données utilisateur et une capacité par zone plus élevés, une plus grande couverture, une latence plus faible et une plus grande efficacité en termes de coût et de puissance [2,18].

I.9.5. Prise en charge native de la communication machine-to-machine (M2M)

Une considération majeure pour les communications M2M dans la 5G est de répondre à certaines exigences fondamentalement différentes liées aux différentes classes de services à bas débit. Grand nombre d'appareils connectés, très grande fiabilité de connexion, faible latence et fonctionnement en temps réel [2,33].

I.10. Différentes exigences de la 5G

Les membres de l'UIT, y compris des représentants des principales parties prenantes de l'industrie, des forums de l'industrie, des organismes de normalisation nationaux et régionaux, des régulateurs, des opérateurs de réseau, des fabricants d'appareils, des universités, des instituts de recherche et des États membres, se réunissent dans le cadre des activités de groupes de travail pour mener à bien une série d'études sur le sujet. Exigences de performance dans le domaine de la technologie 5G et de l'application du système IMT-2020 selon les trois catégories d'utilisation

mentionnées dans les paragraphes précédents [14,37,38]. Les exigences doivent être collectées et convenues pour obtenir une image claire du système, de l'utilisateur et des caractéristiques opérationnelles. Les prescriptions obligatoires pour les futurs systèmes IMT-2020 sont décrites dans la Recommandation UIT-R M.2083-0 [13,15].

La Figure (I.6) présente une étude comparative de ces exigences pour la 5G et la 4G. Notez que la modification de certaines de ces exigences n'est pas critique car les réseaux d'aujourd'hui offrent déjà certaines solutions. D'autre part, des exigences telles que la capacité de trafic par zone, l'efficacité énergétique, le débit de données maximal, etc. doivent faire de grands progrès dans les IMT-2020. Cela montre que le déploiement des réseaux cellulaires de nouvelle génération ne se limitera pas, comme c'était le cas avec les générations précédentes, à la seule vitesse pour répondre à une demande croissante.

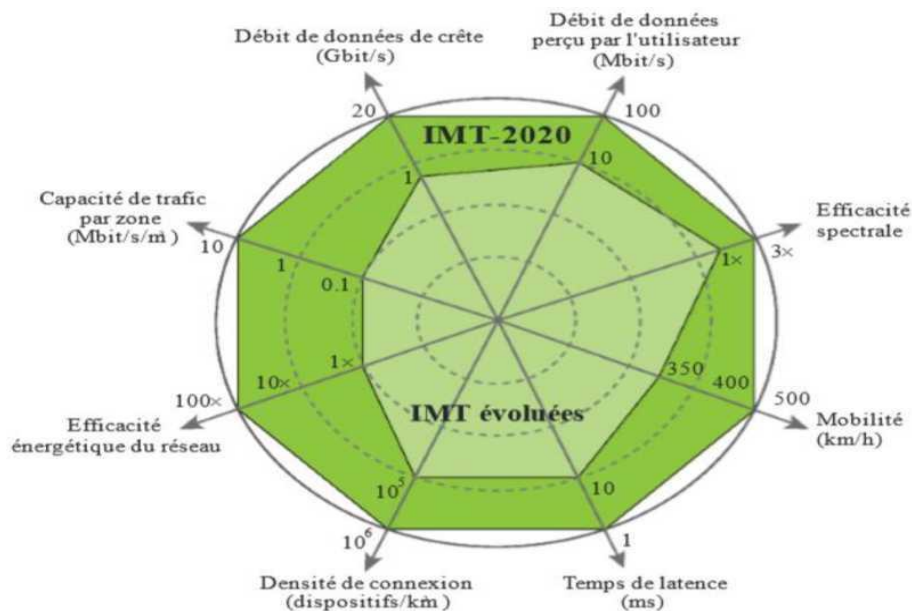


Fig.I.6. Comparaison des différentes exigences de la 5G par rapport à la 4G

I.10.1. Très hauts débits ou débit crête par utilisateur

Il s'agit d'une exigence définie principalement à des fins d'évaluation dans la catégorie d'utilisation eMBB. C'est simplement le cas, en supposant des conditions sans erreur lorsque toutes les ressources radio disponibles pour la connexion concernée sont utilisées (c'est-à-dire la synchronisation de la couche physique, à l'exclusion des radios de ressources utilisées pour les signaux de référence). Il est défini comme le débit de données maximal théorique réalisable qui peut être affecté à une seule station mobile. Ou pilote, bande de garde et sécurité) [15,39].

Le débit total de donnée R est déterminé dans une bande passante en fonction de

l'efficacité spectrale.

$$R = \sum_{i=1}^Q w_i \times SE_{pi} \quad (I.1)$$

w_i : Bande passante d'un canal ; SE_{pi} : Efficacité spectrale de crête dans cette bande

Selon les objectifs de la 5G, les exigences minimales pour le débit de données de pointe sont les suivantes [15,39].

- Le débit de crête de la liaison descendante est de 20 Gbit /s.
- Le débit de pointe de la liaison montante est de 10 Gbit/s

I.10.2. Efficacité énergétique

L'efficacité énergétique est définie comme le nombre de bits transmis par joule d'énergie et a deux dimensions :

> Côté réseau, l'efficacité énergétique correspond à la quantité de bits d'information (bits joule) émis et reçus par un utilisateur par unité de consommation d'énergie du réseau d'accès radio (RAN).

> Côté équipement, l'efficacité énergétique correspond à la quantité de bits d'information par unité d'énergie (bits/joule) consommée par le module de communication.

L'efficacité énergétique devrait être considérablement améliorée par rapport à la 4G afin d'augmenter la durée de vie des batteries des objets connectés. (Batteries pouvant être jusqu'à 100 fois moins énergivores) [15,39].

Tous les efforts d'optimisation de l'énergie doivent être faits pour assurer une bonne récupération d'énergie sans affecter les performances du réseau et des appareils. Cependant, la technologie devrait offrir aux opérateurs une flexibilité naturelle pour configurer les compromis d'efficacité énergétique et de performance selon les besoins.

Un compromis entre l'efficacité énergétique du réseau et la consommation d'énergie des objets connectés peut être observé dans les deux scénarios suivants.

- a) Excellente efficacité énergétique dans la transmission de données.
- b) Faible consommation d'énergie en l'absence de données.

I.10.3. Capacité de trafic par zone

La capacité de trafic par zone est définie comme étant le débit total de trafic fourni par zone géographique (en Mbit/s/m²) [15,39]. Les zones urbaines et les grands lieux à forte densité

tels que les concerts et les stades sont de bons candidats à la densification en raison de leur forte concentration d'utilisateurs. Par exemple, les densités d'utilisateurs dans les stades peuvent atteindre jusqu'à 2 millions/km² ou 2 utilisateurs par mètre carré. Même avec seulement 10 utilisateurs actifs, le réseau devrait pouvoir supporter 200 000 utilisateurs actifs/km². Pour prendre en charge ce trafic de manière rentable, la 5G doit fournir des solutions qui permettent une expansion de capacité de 1 000 à 10 000 fois dans les endroits à forte demande. Ceci est considéré comme l'exigence la plus souhaitée.

I.10.4. Efficacité spectrale

Le futur environnement des systèmes de télécommunications, qui devrait être très dense et surtout hétérogène, doit pouvoir accueillir les trois catégories d'usages évoquées ci-dessus, mais avec de nombreux services disponibles à tout moment et en tout lieu, ainsi qu'une transmission accessible et efficace. La transmission de données et les applications multimédia nécessitent une efficacité spectrale élevée. Ce dernier est défini comme la quantité de données binaires (bits) qui peut être transmise en une seconde sur une bande passante de 1 Hz (mesurée en bits s/Hz/cellule) [15,39].

Les améliorations de l'efficacité spectrale doivent être appliquées aux petites et grandes cellules dans les bandes de fréquences basses et hautes pour les scénarios de mobilité élevée et faible.

La mesure théorique de l'efficacité γ est donnée par l'équation suivante [15,39].

$$\gamma = \frac{\sum_{i=1}^N X_i}{T \cdot \omega \cdot M} \quad (1.2)$$

X_i représente le nombre de bits correctement reçus par utilisateur dans une liaison montante i ou dans une liaison descendante i dans un système comportant un nombre N populations d'utilisateurs et M cellules.

ω désigne la largeur de bande du canal de transmission et T le temps nécessaire pour que les bits d'informations puissent être reçus par l'utilisateur.

Cette exigence est définie principalement à des fins d'évaluation avec le cas d'utilisation eMBB. Les exigences minimales d'efficacité spectrale pour ITM-2020 sont : exigences minimales pour les efficacités spectrales pour la ITM- 2020 sont les suivantes :

- > L'efficacité spectrale maximale de la liaison descendante est de 30 bps/Hz.
- > L'efficacité spectrale maximale de la liaison montante est de 15 bps/Hz

I.10.5. Mobilité

Maintenir une très bonne qualité de service dans le cadre de la mobilité à haut débit est une exigence essentielle pour le développement de la 5G, notamment des véhicules autonomes.

Chaque classe de mobilité est prise en charge s'il existe quatre classes de mobilité différentes et la connexion du canal de trafic peut être maintenue pendant que l'utilisateur se déplace à vitesse maximale dans cette classe de mobilité.

- 1 - Stationnaire : 0 km / h
- 2 - Piéton : 0 km / h à 10 km / h
- 3 - Véhicule : 10 km / h à 120 km / h
- 4 - Véhicule à grande vitesse : de 120 km / h à 500 km / h

I.10.6. Densité de connexion

La densité de connexion est la capacité à diffuser avec succès des messages d'une taille donnée sur une période de temps, même dans des endroits très densément peuplés tels que des gares ou des stades de football. Avec la 5G, multipliez ce nombre par 10 pour arriver à 1 million de connexions par kilomètre carré [15,39].

I.10.7. Débit moyen par utilisateur

Le débit de données par utilisateur est défini comme le débit moyen de l'utilisateur, c'est-à-dire le nombre de bits correctement reçus par un utilisateur. La valeur moyenne des débits par utilisateur varie selon les zones géographiques [15,39] :

- > Des débits 100 Mbps sont généralement réalisables dans les environnements urbains et suburbains.
- > Des débits de données d'au moins 10 Mbps devraient être disponibles presque partout, y compris dans les zones rurales peu peuplées des pays développés et en développement.

I.10.8. Latence

Cette exigence est définie comme le temps nécessaire à un paquet de données pour traverser un réseau de la source à la destination. L'introduction de cette nouvelle norme permettra une latence ultra-faible, inférieure à un dixième de la latence des systèmes de communication actuels. La très faible latence est due à la nécessité de prendre en charge de nouvelles applications. Les cas d'utilisation envisagés de la 5G tels que les voitures autonomes

connectées, les services d'urgence, les drones connectés et les opérations de télémédecine peuvent nécessiter une latence beaucoup plus faible que ce qui est possible avec les systèmes de communication mobiles actuels.

Face à ces exigences, diverses technologies suscitent l'enthousiasme de la communauté scientifique. Les technologies clés sélectionnées comme candidates idéales pour la couche physique pour répondre aux exigences de la 5G sont : Full Duplex, Massive MIMO et Small Cells dans les bandes de fréquences mmWave [15,40].

I.11. Avantages et inconvénients de la 5G

I.11.1. Avantages

Débit : La 5G va permettre une amélioration du débit de connexion, qui sera beaucoup plus vite : des débits de 10 Gbit/s par rapport aux 100 Mbit /s aujourd'hui. Ce débit est comparable aux réseaux de fibre optique standard disponible aujourd'hui [24,41].

Latence réduite : Indique le délai entre les déclencheurs d'action et de réaction.

Connectivité massive : Les utilisateurs peuvent se connecter simultanément sans affecter la vitesse de connexion [24,41].

Objets connectés : Tous les objets du quotidien peuvent être connectés facilement et à moindre coût au réseau. C'est une explosion des données transmises [24,41].

Une réduction de la consommation d'énergie : Cependant, cette technologie plus efficace consomme moins d'énergie, ce qui a un impact positif notamment sur l'autonomie de la batterie [33].

I.11.2. Inconvénients

Cependant, les futurs réseaux 5G soulèvent certaines inquiétudes, notamment en ce qui concerne le chargement des vagues. En fait, les effets des radiofréquences sur notre santé et l'environnement sont controversés. Comme pour la 4G, les déploiements 5G augmenteront inévitablement l'exposition aux ondes en installant de nouvelles antennes pour assurer une bonne couverture 5G dans une zone. Pour évaluer si la 5G présente des risques pour notre santé, un test pilote actuellement en cours permettra de mesurer l'exposition de la population à l'onde et de déterminer la limite sanitaire retenue pour le réseau 5G [24,41].

I.12. Conclusion

La technologie 5G est la révolution actuelle qui promet de développer de nouveaux services et d'améliorer les systèmes existants. Il s'agit d'un ensemble de protocoles et de méthodes de transfert d'informations. Elle est basée sur une architecture de réseau plus avancée, qui comprend des technologies telles que le Cloud Computing, l'Internet des Objets (IoT) et la virtualisation du réseau. Ces technologies permettent une communication plus efficace et une utilisation plus efficace des ressources du réseau, tout en offrant des fonctionnalités telles que la connectivité massive des objets, la communication ultra-fiable à faible latence et les applications à haut débit en temps réel. Dans ce chapitre, nous avons couvert de nombreux axes afin de faciliter la compréhension de la technologie 5G. Nous avons découvert l'importance de la 5G et de toutes les technologies associées dans le but d'atteindre des niveaux d'intelligence infinis en utilisant les dernières technologies. Il existe de nombreux services que cette technologie fournit. Nous citerons quelques avantages :

1. Le nombre d'appareils connectés aux réseaux sans fil ne cesse de croître
2. Amélioration de l'interopérabilité entre le matériel
3. Minimiser le temps de réponse (par ex : chirurgie à distance par robot)
4. Ville Intelligente, Véhicule Intelligent, ...
5. Améliorations de la vitesse (vitesses 5g en 2020 :10 Gbits/s, 10 fois plus que les ports 4g (LTE-Advanced)).

Les recherches vont vers la virtualisation dans un but d'exploiter au mieux les dispositifs de communication. Une étude détaillée sur les antennes patch va être menée dans le prochain chapitre.

Chapitre II

Généralités sur les antennes

patch

II.1. Introduction

Dans les applications aéronautiques, aérospatiales et militaires où le faible volume, le faible poids, le faible coût, les hautes performances et la facilité de mise en œuvre sont les principales exigences. Aujourd'hui, avec l'explosion des télécommunications, ces contraintes se retrouvent dans les applications commerciales sans fils. Pour répondre à ces exigences un nouveau type d'antenne a été proposé. Les antennes patch ont nettement pris le pas et ont fait une nouvelle révolution technologique.

Dans ce chapitre, nous présentons, en premier lieu, la définition des antennes. Nous donnerons ensuite leurs caractéristiques et domaines d'utilisation, leurs avantages ainsi que leurs inconvénients.

II.2. Définition d'une antenne

Une antenne peut servir à l'émission et à la réception des ondes électromagnétiques, c'est un dispositif servant à faciliter le transfert d'énergie entre une ligne de transmission et l'espace libre et vice versa **Figure (II.1)**.

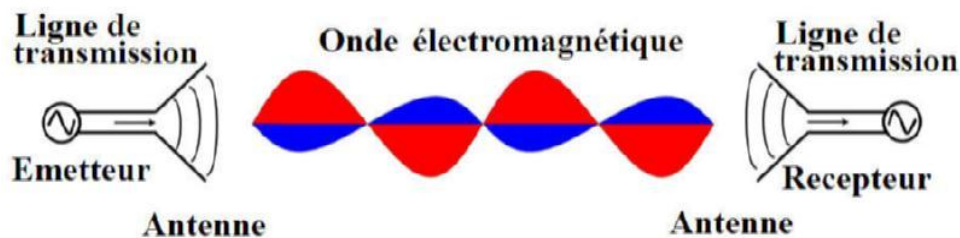


Fig.II.1. Système radio typique.

Les définitions normalisées IEEE des termes relatifs aux antennes (norme IEEE 145 - 1983) [42] définissent l'antenne comme étant la "Partie d'un système d'émission ou de réception conçue pour rayonner ou recevoir des ondes électromagnétiques".

II.3. Généralités sur les antennes

Une antenne est un transducteur entre une ligne de transmission connectée à un générateur et le milieu à travers lequel les ondes sont émises. Il est donc possible de définir l'antenne selon son mode de fonctionnement, émission ou réception. Une antenne connectée à une ligne de transmission et rayonnant dans l'espace libre peut être considérée comme un dispositif de couplage entre les ondes induites le long de la ligne et les ondes rayonnées dans l'espace. Par conséquent, une antenne est un appareil qui permet l'émission et la réception d'ondes radio. Convertit l'énergie conduite en énergie rayonnante et vice versa. Ce mécanisme

est généralement contradictoire. Lorsqu'elle est utilisée pour transmettre de l'énergie électromagnétique d'une source radio à un milieu de propagation, on l'appelle une antenne émettrice. Lorsqu'il est utilisé en inverse, il s'agit d'une antenne de réception. L'antenne a plusieurs tâches, dont les plus importantes sont :

1. Permettre une bonne correspondance entre l'équipement radio et le support de propagation.
2. Assurer la transmission ou la réception de l'énergie dans les directions privilégiées
3. Soumettez les informations aussi fidèlement que possible.

De plus, divers paramètres sont utilisés pour décrire les caractéristiques et les performances de l'antenne. Ces paramètres sont divisés en deux groupes. Le premier groupe caractérise l'antenne en tant qu'éléments de circuit électrique (Z_{in} et S_{11}) et le second groupe concerne les propriétés de rayonnement telles que le diagramme de rayonnement, la directivité et le gain. Notons enfin que la notion de puissance rayonnée joue un rôle important dans les recherches sur les antennes patch que nous développerons ultérieurement [43].

II.4. Principe de fonctionnement des antennes

II.4.1. Rôle des antennes

a. Antenne d'émission

Afin d'assurer la propagation dans l'air, il est nécessaire qu'un dispositif génère une onde rayonnée. Le rôle de l'antenne d'émission est de transformer la puissance électromagnétique guidée, issue d'un générateur en une puissance rayonnée. Dans ce sens, c'est un transducteur [44].

b. Antenne de réception

De façon inverse, la puissance rayonnée peut être captée par une antenne de réception. Dans ce sens, l'antenne apparaît comme un capteur et un transformateur de puissance rayonnée en puissance électromagnétique guidée. Elle joue le même rôle qu'un télescope qui capte la lumière issue des étoiles et la transforme [44].

c. Réciprocité

Dans la plupart des cas, une antenne peut être utilisée en réception ou en émission avec les mêmes propriétés rayonnantes. On dit que son fonctionnement est réciproque conséquence du théorème de réciprocité. Dans quelques cas exceptionnels pour lesquels les antennes comportent des matériaux non linéaires ou bien anisotropes, elles ne sont pas réciproques.

Du fait de la réciprocité des antennes, il ne sera pratiquement jamais fait de différence entre le rayonnement en émission ou en réception. Les qualités qui seront annoncées pour une antenne le seront dans les deux modes de fonctionnement, sans que cela soit précisé dans la plupart des cas [44].

II.4.2. Différents types d'antennes

Afin de comprendre comment s'effectue cette transformation entre la puissance guidée et la puissance rayonnée, nous allons présenter un certain nombre d'antennes. Elles sont classées ici selon un ordre qui suit approximativement leur chronologie d'apparition. Il n'est pas question dans ce paragraphe de présenter tous les types d'antennes, mais d'en introduire certains des plus utilisés. En conclusion, nous aboutirons à un classement des antennes selon le type de la source rayonnante qui apparaîtra soit comme un courant électrique, soit comme une surface caractérisée par un champ électrique [44].

II.4.2.1. Antenne dipolaire

L'antenne dipolaire est constituée de deux fils alignés, très courts et reliés chacun à deux fils parallèles et très proches constituant une ligne bifilaire Figure (II.2). En émission, cette ligne est reliée à un générateur alternatif, caractérisé par sa fréquence et son impédance interne. À la réception, la ligne bifilaire est branchée sur un récepteur.

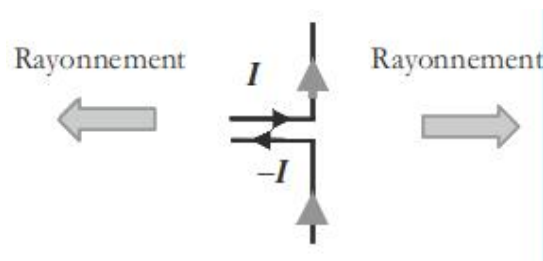


Fig.II.2. Antenne dipolaire

Dans la ligne bifilaire, les courants sont de sens contraire, alors que dans le dipôle les courants sont dans le même sens. L'influence de ces deux courants s'annule dans la ligne bifilaire. Ce sont les courants variables, de même sens, qui rayonnent et créent l'onde électromagnétique dans l'espace. Étant donnée la symétrie du dipôle, le rayonnement s'effectue autour de l'axe, matérialisé par le fil. Il est isotrope dans un plan perpendiculaire à cet axe. Le rayonnement est nul dans la direction du fil. On ne peut donc pas parler d'un rayonnement isotrope. À l'extrémité de chaque fil apparaissent des charges de signes opposées dont

l'existence s'explique par la conservation de la charge. En effet, la relation de conservation suivante lie les charges au courant [44].

$$I = \frac{dq}{dt} \quad (\text{II.1})$$

II.4.2.2. Boucle magnétique

La boucle magnétique est constituée d'un fil conducteur ayant une forme qui permet le retour du fil sur lui-même **Figure (II.3)**. La boucle est ainsi branchée sur une ligne bifilaire reliée au générateur. Le rayonnement, à grande distance, est maximal dans le plan de la boucle et s'effectue de façon radiale. Le courant circulant dans le fil crée un champ magnétique qui se propage. Sa variation engendre le champ électrique associé, d'où le rayonnement électromagnétique associé. En champ lointain, les boucles magnétiques ont été très utilisées pour les récepteurs de grandes ondes radio sous forme d'un cadre sur lequel étaient enroulées plusieurs spires de fil. En champ proche, on les utilise dans tous les dispositifs RFID (identification radio fréquence). Les cartes à puce sans contact sont munies de ce type d'antenne, incluse dans le support plastique. Les détecteurs d'objets métalliques sont aussi des boucles magnétiques sensibles au champ magnétique [44].

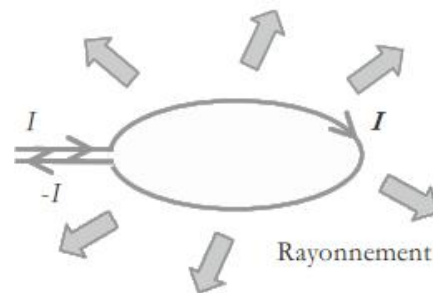


Fig.II.3. Boucle magnétique

II.4.2.3. Antenne cornet

Un dispositif très utilisé pour la propagation d'ondes guidées est le guide d'onde rectangulaire. Sa qualité de transmission est excellente. Pour cette raison, il est utilisé en haute fréquence. Le transformateur de puissance électromagnétique guidée en puissance rayonnée est l'antenne cornet **Figure (II.4)**. Sa forme permet de passer graduellement des dimensions du guide d'onde à l'espace libre. L'onde est ainsi naturellement projetée dans l'espace libre. C'est le même principe que le cornet acoustique. Les transitions présentent des formes variées: linéaires, exponentielles...etc. Le cornet sert de dispositif d'adaptation entre l'impédance du cornet et celle du vide. De façon très naturelle, le rayonnement a lieu dans l'axe du guide

d'onde. Cette antenne est plus directive que les précédentes, dans la mesure où la puissance n'est émise que dans une région de l'espace limitée [44].

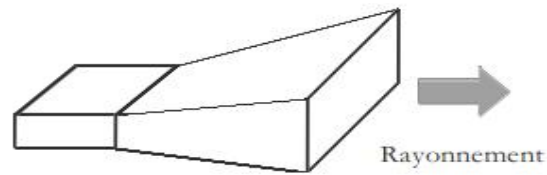


Fig.II.4. Antenne cornet

Le guide d'onde est un dispositif hyperfréquence très utilisé du fait des pertes très faibles engendrées par la propagation dans celui-ci, même à hautes fréquences et de sa capacité à supporter de la puissance. Les antennes cornets qui lui sont associées sont donc aussi très utilisées comme moyen de transformation de l'onde guidée en onde rayonnée. On les retrouve, dans toutes les bandes de fréquences, dans de nombreux systèmes tels que les radars, les antennes satellites.

II.4.2.4. Réseau de fentes

Toujours en utilisant le guide d'onde comme dispositif de transmission, il est possible d'envisager un rayonnement dans une direction différente de l'axe du guide, en usinant des fentes dans le corps du guide Figure (II.5).

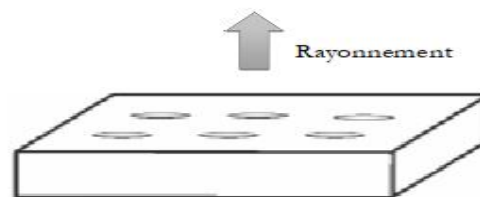


Fig.II.5. Réseau de fentes

Le rayonnement s'effectue alors perpendiculairement au plan troué du guide. Ce type de dispositif est utilisé lorsque le rayonnement doit être localisé. Par exemple, dans des tunnels, où la transmission des ondes s'effectue mal, on peut placer un réseau de fentes rayonnantes. En général la ligne est en haut du tunnel avec émission vers le bas [44].

II.4.2.5. Antenne à réflecteur parabolique

L'antenne à réflecteur est constituée de la source d'émission associée à une partie métallique réfléchissante, souvent de forme parabolique Figure (II.6).

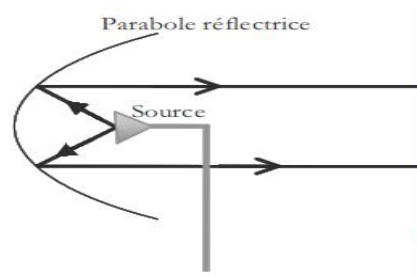


Fig.II.6. Antenne à réflecteur parabolique

La source, placée au foyer de la parabole envoie l'onde vers le réflecteur parabolique. Selon la propriété bien connue de la parabole, tous les rayons sont réfléchis parallèlement. Ce type d'antenne est utilisé pour viser dans une direction très précise, puisque tous les rayons passant par le foyer sortent parallèles. Par décalage de la source dans le plan focal, les rayons parallèles à la sortie du réflecteur, peuvent présenter une inclinaison par rapport à l'axe de la parabole. Ces antennes permettent de recevoir un signal d'un satellite, placé à très grande distance. Les antennes de ce type sont très répandues pour la réception de la télévision. Leur orientation est choisie de façon à viser un satellite particulier. Afin d'éviter les perturbations par la pluie ou la neige, ces antennes sont souvent recouvertes d'un radôme. C'est le cas des antennes très exposées aux conditions climatiques, utilisées pour les transmissions hertziennes. Elles sont reconnaissables par leur forme, parabolique à l'arrière et conique à l'avant du fait de la forme du radôme qui protège la source, placée au foyer [44].

II.4.2.6. Antennes micro-ruban

L'antenne plaquée, appelée aussi antenne patch est un type récent d'antenne dont le développement et l'utilisation sont de plus en plus fréquents. Elle est constituée d'un diélectrique, possédant un plan de masse métallique sur une face. Sur l'autre face, une gravure métallique permet de supporter des courants de surface qui créent le rayonnement électromagnétique Figure (II.7). Les courants sont amenés du générateur à l'antenne par une ligne micro ruban [44].

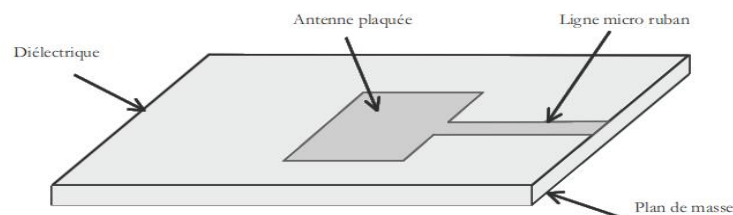


Fig.II.7. Antenne patch.

Cela a un avantage de poids sur les autres antennes. La gravure de pièces métalliques peut prendre des formes très différentes, selon la répartition spatiale souhaitée du rayonnement. Cela offre une grande flexibilité de conception. La géométrie de l'antenne patch peut être augmentée arbitrairement. Nous mentionnons qu'il existe des antennes avec alimentation par couplage **Figure (II.8)**. Dans ce type d'antenne l'alimentation est encastrée entre deux diélectriques. Le couplage électromagnétique entre l'extrémité de la ligne micro-ruban et le patch au-dessus de l'appareil peut exciter l'antenne. Le diélectrique supérieur agit comme un bouclier pour les lignes électriques. Sinon, cela peut interférer avec le rayonnement. Dans ce cas, il est avantageux de placer l'électronique de l'antenne active au niveau de ce deuxième diélectrique [44].

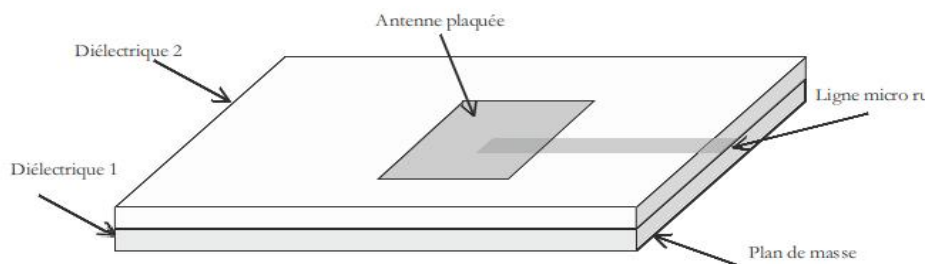


Fig.II.8. Antenne patch avec alimentation à couplage électromagnétique.

II.4.2.7. Antennes actives

Les progrès réalisés sur la fabrication des antennes plaquées, rendent possible le report d'un circuit actif sur l'antenne. L'antenne a des fonctions qui dépassent son rôle simple de transformateur d'énergie. Selon les fonctions électroniques adjointes, on obtient un dispositif complexe. On parle ainsi d'antennes intelligentes si le dispositif a une partie de contrôle et de commande. Les applications des antennes actives sont très diverses.

Une distinction est faite entre les antennes intégrées actives et les antennes hybrides dans lesquelles des composants sont transmis. Cependant, l'intérêt actuel est lié aux antennes intégrées, qui sont fabriquées simultanément sur le même substrat, se rapprochant ainsi au plus près des circuits intégrés [44].

II.5. Terminologie et caractéristiques électriques et électromagnétiques des antennes

Pour décrire les performances d'une antenne, les définitions de divers paramètres sont nécessaires.

II.5.1. Caractéristique électrique

II.5.1.1. Coefficient de réflexion

C'est le paramètre S_{11} de la **matrice de dispersion** extrait de l'analyseur de réseaux, il est exprimé en unité de décibel par la relation suivante :

$$S_{11}(dB) = 20 \log \left(\frac{\text{onde réfléchie}}{\text{onde incidente}} \right) \quad (II.1)$$

Plus ce coefficient (S_{11}) est faible, plus il y a une **bonne** adaptation de l'antenne.

Comme ordre de grandeur, on remarque que pour un coefficient de réflexion défini à -10 dB, presque 68,4 % de l'onde incidente est transmise par l'antenne, et pour un $S_{11} = -40$ dB, 99 % de l'onde incidente est transmise par l'antenne [45-46].

Le coefficient de réflexion est lié aussi à l'impédance d'entrée Z_e et à l'impédance caractéristique Z_0 de la ligne d'alimentation par:

$$\Gamma = S_{11} = \frac{Z_e - Z_0}{Z_e + Z_0} \quad (II.2)$$

Pour :

$$Z_e - Z_0 \ll Z_e + Z_0 \Rightarrow S_{11} \approx 0 \quad (II.3)$$

Dans ce cas, il n'y a pas d'onde réfléchie, on parle de l'adaptation de l'impédance d'entrée à la ligne [45-46].

II.5.1.2. Bande passante

Bande passante (Bande passante : **BandWidth** en anglais) est la gamme de fréquences généralement déterminée par le rapport d'onde stationnaire égal à 2, ce qui correspond à environ -10 dB dans la courbe des coefficients de réflexion. "Plage de fréquences sur laquelle les performances d'une antenne par rapport à des caractéristiques spécifiées répondent à des critères spécifiés.

Le VSWR d'antenne est le facteur le plus important limitant la bande passante [45-46].

Le rapport des valeurs maximales/ minimales de diagramme d'onde stationnaire le long d'une ligne de transmission à laquelle une charge est connectée. La valeur VSWR varie de 1 (charge adaptée) à l'infini pour une charge court-circuitée ou ouverte [45-46]. Pour la plupart des antennes, la valeur maximale acceptable de VSWR est d'environ de 2, une valeur meilleure est d'environ 1.

VSWR est lié au coefficient de réflexion Γ par :

$$VSWR = \frac{1+|\Gamma|}{1-|\Gamma|} \quad (II.4)$$

II.5.1.4. Impédance d'entrée

L'impédance d'entrée est une fonction complexe de fréquence avec des parties réelles et imaginaires. Elle est donnée par :

$$Z_e = Z_0 \frac{1+S_{11}}{1-S_{11}} \quad (II.5)$$

Z_0 : impédance caractéristique de la ligne d'alimentation.

S_{11} : le coefficient de réflexion.

L'impédance d'entrée peut être présentée graphiquement en utilisant l'abaque de Smith.

II.5.1.5. Facteur de qualité

Il représente les pertes liées à l'antenne. Un grand facteur mène à une largeur de bande étroite et faible rendement, il est donné par la formule suivante [45-46] :

$$\frac{1}{Q_T} = \frac{1}{Q_{rad}} + \frac{1}{Q_c} + \frac{1}{Q_d} + \frac{1}{Q_{sw}} \quad (II.6)$$

Où

Q_T : Facteur de pertes total.

Q_{rad} : Facteur de pertes dues à la radiation.

Q_c : Facteur de pertes ohmiques.

Q_d : Facteur de pertes diélectriques.

Q_{sw} : Facteur de pertes par onde de surface.

II.5.1.6. Rendement

Le rendement est le rapport entre l'énergie rayonnée par une antenne et celle fournie par l'alimentation, et s'exprime en fonction des facteurs de pertes. Il est donné par [45-46] :

$$\eta = \frac{\frac{1}{Q_{rad}}}{\frac{1}{Q_T}} = \frac{Q_T}{Q_{rad}} \quad (II.7)$$

II.5.2. Caractéristiques électromagnétiques

II.5.2.1. Diagramme de rayonnement et lobes de rayonnement :

C'est une représentation graphique (en 3-D ou 2-D) du rayonnement de l'antenne en fonction de la direction angulaire **Figure (II.9)**.

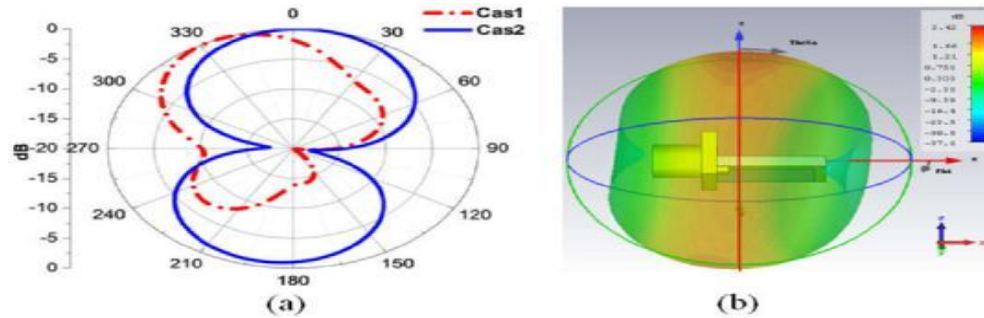


Fig.II.9. Diagrammes de rayonnement en : a) 2-D et b) 3-D [47].

Les performances de rayonnement de l'antenne sont généralement mesurées et enregistrées dans deux principaux plans orthogonaux (tels que le plan E et le plan H ou les plans verticaux et horizontaux). Le diagramme est généralement tracé en coordonnées polaires. Le diagramme de la plupart des antennes contient un lobe principal (majeur) et plusieurs lobes secondaires (mineurs), appelés lobes latéraux. Un lobe latéral apparaissant dans l'espace dans la direction opposée au lobe principal est appelé lobe arrière. Les Figures (II.11) et (II.12) représentent un diagramme polaire et linéaire, respectivement [42].

Un lobe de rayonnement est une "partie du diagramme de rayonnement délimitée par des régions d'intensité de rayonnement relativement faible".

Un lobe principal est défini comme "un lobe de rayonnement contenant la direction du rayonnement maximum" [42].

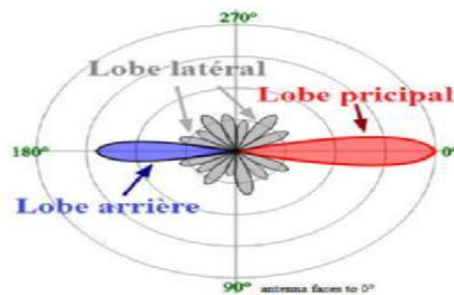


Fig.II.10. Lobe principal, latéral et arrière.

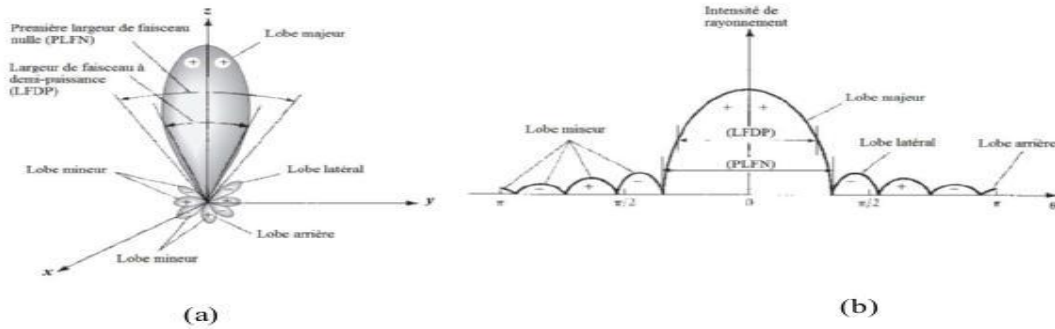


Fig.II.11. (a) Lobes de rayonnement et largeurs de faisceau d'un diagramme d'antenne, (b) Tracé linéaire du diagramme de puissance et de ses lobes et largeurs de faisceau associés [42].

II.5.2.2. Diagrammes isotropes, directionnels et omnidirectionnels

Le radiateur isotrope est défini comme "une antenne hypothétique sans perte ayant une intensité de rayonnement égale dans toutes les directions". Bien qu'il soit idéal et non réalisable physiquement, il est souvent pris comme référence pour exprimer les propriétés directives des antennes réelles [42].

Une antenne directionnelle est une antenne ayant la propriété de rayonner ou de recevoir des ondes électromagnétiques plus efficacement dans certaines directions que dans d'autres. Une antenne omnidirectionnelle est une antenne ayant un diagramme essentiellement non-directionnel dans un plan donné de l'antenne et un diagramme directionnel dans n'importe quel plan orthogonal [42].

Le plan omnidirectionnel est le plan horizontal, voir la Figure (II.12).

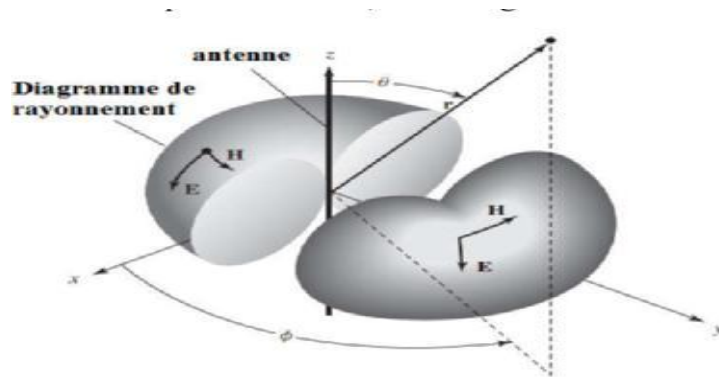


Fig.II.12. Diagramme omnidirectionnel d'une antenne

II.5.2.3. Principaux plans de diagramme de rayonnement

Pour une antenne polarisée linéairement, la performance est souvent décrite en termes de ses principaux plans E et H (Figure (II.13)). Le plan E est défini comme le plan contenant le

vecteur du champ électrique et la direction du rayonnement maximal [48]. Le plan E coïncide généralement avec le plan vertical (plan XZ (plan d'élévation ; $\varphi = 0^\circ$)). Le plan H est défini comme le plan contenant le vecteur de champ magnétique et la direction du rayonnement maximal. Le plan H coïncide généralement avec le plan horizontal (plan XY (plan azimutal ; $\theta = 90^\circ$)).

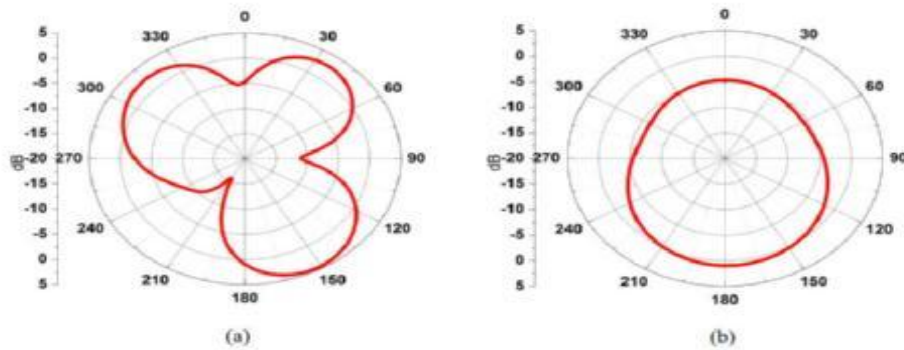


Fig.II.13. Diagrammes de rayonnement : (a) plan XZ, (b) plan YZ .

II.5.2.4. Régions de champs

L'espace entourant une antenne est généralement subdivisé en trois régions -comme le montre la Figure (II.14) désignées pour identifier la structure de champs dans chacune d'elles [42,48].

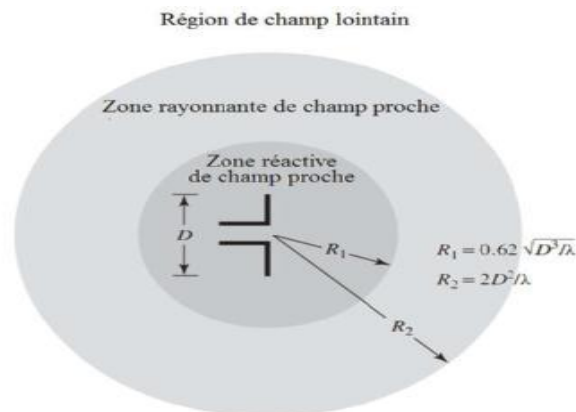


Fig.II.14. Zones de champ d'une antenne.

a. Région réactive de champ proche (zone de Rayleigh)

Elle est définie comme la partie de la région proche du champ qui entoure immédiatement l'antenne dans laquelle le champ réactif prédomine [48].

La limite externe de cette région est comprise entre $R < R_1$ à partir de la surface de l'antenne, avec :

$$R_1 = 0.62 \sqrt{\frac{D^3}{\lambda}} \quad (\text{II.8})$$

Où

λ : la longueur d'onde.

D : la plus grande dimension de l'antenne.

b. Zone rayonnante de champ proche (zone de Fresnel)

Elle est définie comme la région du champ d'une antenne entre la région réactive de champ proche et la région de champ lointain dont les champs de rayonnement prédominent et dont la distribution de champ angulaire dépend de la distance de l'antenne [48].

Les deux limites (interne et externe) de cette région sont données par : $R_1 \leq R < R_2$;

Avec :

$$R_2 = 2 \frac{D^2}{\lambda} \quad (\text{II.9})$$

Dans cette région, le diagramme de champ est une fonction de la distance radiale et la composante de champ radial peut être appréciable [48].




c. Région de champ lointain (zone de Fraunhofer)

Elle est définie comme étant "la région du champ d'une antenne dont la distribution du champ angulaire est essentiellement indépendante de la distance de l'antenne". Le diagramme de rayonnement est mesuré dans le champ lointain [48]. Cette région est supposée exister à des distances $R_2 \leq R < \infty$.

II.5.2.5. Le diagramme d'amplitude d'une antenne

Lorsque la distance d'observation varie du champ proche réactif au champ lointain, le diagramme d'amplitude change de forme en raison des variations des champs, en amplitude et en phase à la fois [48]. Le Tableau II.1 présente les modifications typiques de la forme du plan d'amplitude de l'antenne depuis le champ proche réactif vers le champ lointain.

Tableau II.1. Modifications typiques de la forme du plan d'amplitude de l'antenne

	Région de champs réactifs	Région de champs rayonnés	Région de champs lointains
Distribution de champs			

D'après le **Tableau II.1**, il est évident que dans la région réactive de champ proche, le diagramme est plus étalé et presque uniforme, avec de légères variations. Lorsque l'observation est déplacée vers la région rayonnante de champ proche, le diagramme commence à lisser et à former des lobes [48]. Dans la région du champ lointain, le diagramme est bien formé, constitué généralement de quelques lobes mineurs et d'un ou plusieurs lobes majeurs.

II.5.2.6. Densité de puissance de rayonnement

Les ondes électromagnétiques sont utilisées pour transporter des informations à travers un support sans fil ou une structure de guidage, d'un point à autre. Il est alors naturel de supposer que la puissance et l'énergie sont associées aux champs électromagnétiques [48].

La quantité utilisée pour décrire la puissance associée à une onde électromagnétique est le vecteur instantané de Poynting défini comme :

$$\mathbf{W} = \mathbf{E} \wedge \mathbf{H} \quad (\text{II.10})$$

Où ;

W: Vecteur de Poynting instantané (W/m^2)

E: Intensité du champ électrique instantané (V/m)

H: Intensité du champ magnétique instantané (A/m)

Puisque le vecteur de Poynting est une densité de puissance, la puissance totale traversant une surface fermée peut être obtenue en intégrant la composante normale du vecteur de Poynting sur toute la surface [48].

$$P = \oint_S \mathbf{W} \cdot d\vec{s} = \oint_S \mathbf{W} \cdot \vec{n} da \quad (\text{II.11})$$

Où

P : puissance totale instantanée (W)

\vec{n} : vecteur unitaire normal à la surface

da : surface infinitésimale de la surface fermée (m^2)

Le vecteur de Poynting moyen (densité de puissance moyenne) peut s'écrire :

$$W_{av}(x,y,z) = [W(x,y,z)]_{av} = \frac{1}{2} \text{Re}(E \times H^*) \quad (\text{W}/m^2) \quad (\text{II.12})$$

Si la partie réelle de $(E \times H^*)$ représente la densité de puissance moyenne d'une antenne dans sa région de champ lointain, la partie imaginaire représente la densité de puissance réactive (stockée) associée aux champs électromagnétiques [48].

Le facteur $1/2$ apparaît dans l'équation (II.12) car les champs E et H représentent des valeurs de crête. Basé sur la définition de l'équation (II.11), la puissance moyenne rayonnée par une antenne (puissance rayonnée) peut être écrite :

$$P_{rad} = P_{av} = \oint_S W_{rad} \cdot d\vec{s} = \oint_S W_{av} \cdot \vec{n} da = \frac{1}{2} \oint_S \text{Re}(E \times H^*) \cdot d\vec{s} \quad (\text{II.13})$$

II.5.2.7. Intensité de rayonnement

L'intensité du rayonnement dans une direction donnée est définie comme la puissance rayonnée d'une antenne par unité d'angle solide. L'intensité du rayonnement est un paramètre de champ lointain, qui peut être obtenu en multipliant la densité de rayonnement par le carré de la distance [48].

Elle est exprimée sous la forme suivante :

$$U = r^2 W_{rad} \quad (\text{II.14})$$

Où

U : Intensité du rayonnement (W/unité d'angle solide).

W_{rad} : Densité de rayonnement (W/m^2).

La puissance totale est obtenue en intégrant l'intensité de rayonnement, donnée par (2.13), sur tout l'angle solide de 4π .

Alors :

$$P_{rad} = \oint_{\Omega} U d\Omega = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} U \sin\theta d\theta d\varphi \quad (\text{II.15})$$

Où

$d\Omega = \sin\theta \cdot d\theta \cdot d\varphi$: élément d'angle solide.

II.5.2.8. Directivité de l'antenne

La **directivité** d'une antenne est définie comme le rapport de l'intensité de rayonnement dans une direction donnée de l'antenne à l'intensité de rayonnement moyenne dans toutes les directions. Elle peut être écrite sous la forme suivante [48] :

$$D = \frac{U}{U_0} \quad (\text{II.16})$$

L'intensité moyenne du rayonnement est égale à la puissance totale rayonnée par l'antenne divisée par 4π . Elle est donnée par :

$$U_0 = \frac{P_{rad}}{4\pi} \quad (\text{II.17})$$

Si la direction n'est pas spécifiée, elle implique la direction de l'intensité de rayonnement maximale qui s'exprime par :

$$D = D_0 = \frac{U_{max}}{P_{rad}} = \frac{4\pi U_{max}}{P_{rad}} \quad (\text{II.18})$$

Où

D : Directivité (sans dimension)

D₀: directivité maximale (sans dimension)

U: intensité du rayonnement (W/unité d'angle solide)

U_{max}: intensité maximale du rayonnement (W unité solide angle) **U₀**: intensité de rayonnement de la source isotrope (W/unité d'angle solide)

P_{rad}: puissance totale rayonnée (W) La **directivité** d'une source isotrope est égale à 1, puisque:

$$U = U_{max} = U_0.$$

II.5.2.9. Gain

Le gain d'une antenne (dans une direction donnée) est défini comme le rapport de l'intensité, dans une direction donnée, à l'intensité de rayonnement (obtenue si la puissance acceptée par l'antenne était rayonnée isotropiquement). L'intensité de rayonnement correspondant à la puissance isotrope rayonnée est égale à la puissance acceptée (entrée) par l'antenne divisée par 4π [48].

Dans la plupart des cas, nous traitons du gain relatif, défini comme le rapport du gain de puissance dans une direction donnée au gain de puissance d'une antenne de référence dans sa direction référencée. L'antenne de référence est une source isotrope sans perte.

$$G = 4\pi \frac{U(\theta, \varphi)}{p_e(\text{source isotrope sans perte})} \quad (\text{II.19})$$

Lorsque la direction n'est pas indiquée, le gain de puissance est généralement pris dans la direction du rayonnement maximal.

II.5.2.10. Résistance de rayonnement

Nous définissons la résistance de rayonnement en un point Q par :

$$R_Q = \frac{2P_r}{I_Q^2} \quad (\text{II.20})$$

P_r : La puissance active rayonnée par une antenne.

I_Q : Le courant en un point de cette antenne.

II.5.2.11. Polarisation

Une antenne rayonne ou reçoit des ondes électromagnétiques. Il y a trois façons fondamentales par lesquelles l'onde électromagnétique est rayonnée, c'est-à-dire linéairement (verticalement ou horizontalement), circulairement et elliptiquement [61,62], Figure (II.15).

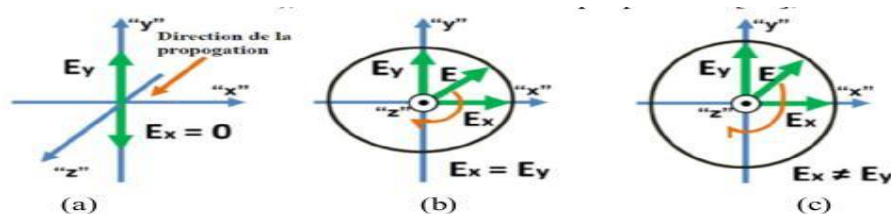


Fig.II.15. Polarisations d'une antenne: a) Linéaire, b) Circulaire, c) Elliptique [50].

La polarisation de l'antenne est définie en conséquence avec la polarisation de l'onde électromagnétique.

II.6. Antennes micro-rubans

G.A. Deschamps [51-52] a été le premier à donner le concept de radiateurs micro-rubans en 1953, la première documentation brevetée d'antennes micro-ruban est au nom de Gutton et Baissinot de France en 1955, mais le vrai développement ne s'est fait que dans les années 1970. Dans sa forme la plus basique, une antenne micro-ruban est constituée d'un élément rayonnant (patch) sur un côté d'un substrat diélectrique qui a un plan de masse de l'autre côté comme le

montre la **Figure (II.16)**. Le patch est généralement en matériau conducteur tel que le cuivre ou l'or et peut prendre n'importe quelle forme. Le patch rayonnant et les lignes d'alimentation sont généralement photo gravés sur le substrat diélectrique [51-52].

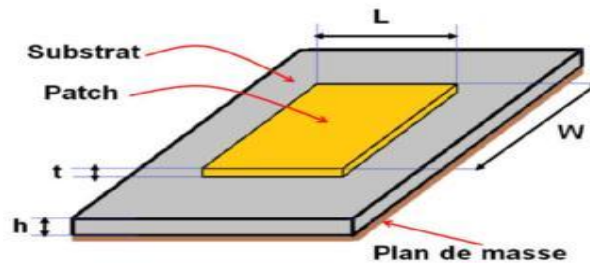


Fig.II.16. Structure de l'antenne micro-ruban

Les antennes patch rayonnent principalement à cause des champs de franges entre le bord de patch et le plan de masse [51-52].

Pour une bonne performance de l'antenne, un substrat diélectrique épais ayant une faible constante diélectrique est souhaitable, car il fournit une meilleure efficacité, une plus grande bande passante et une meilleure radiation [42].

II.6.1. Différentes formes de patch des antennes micro-rubans

L'élément rayonnant (patch) d'une antenne micro-ruban peut prendre plusieurs formes simples ou complexes ; parmi les formes simples et principales on peut citer la forme carré ou rectangulaire, la forme circulaire ou elliptique et la forme triangulaire. Parmi toutes les versions existantes, la forme rectangulaire est la plus utilisée puisqu'elle dispose deux degrés de liberté pour modifier les performances de l'antenne [47] La **Figure (II.17)** montre quelques formes simples de l'élément rayonnant :

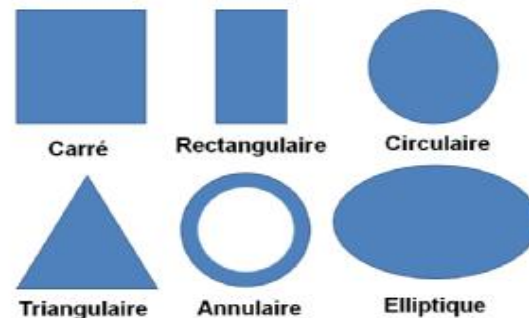


Fig.II.17. Différentes formes de patch .

La variation dans la surface de l'élément rayonnant est l'une des techniques d'amélioration de la bande passante. Cette variation peut engendrer un changement dans la trajectoire de courant ainsi que les lignes de champs électromagnétiques ce qui provoque une modification dans la fréquence de fonctionnement et le diagramme de rayonnement de l'antenne. Il existe d'autres formes **Figure (II.18)** dont le patch peut être modifié partiellement et tranché par des lettres (L, H, E, S, V...etc) ou peut prendre également d'autres formes telles que la forme spirale ou de méandre qui participent dans la miniaturisation des antennes (voir le chapitre III) [47].

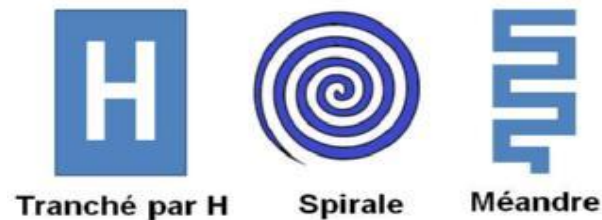


Fig. II.18. Autres formes de patch

II.6.2. Technologie d'alimentation d'antenne micro-ruban

Il existe cinq techniques largement utilisées pour alimenter les antennes micro-ruban. Toutes les techniques sont faciles à mettre en œuvre en utilisant des techniques de fabrication de cartes de circuits imprimés avec des processus de photogravure et ont une faible bande passante [42,53].

II.6.2.1. Ligne de transmission micro-ruban

Une ligne micro-ruban est une bande de transmission très étroite gravée au même niveau que le patch. L'alimentation par lignes micro-ruban **Figure (II.19)** peut être facilement conçue en utilisant les techniques de photogravure des circuits imprimés. Le conducteur central du port de connexion SMA (pour la version sub-miniature A) est soudé directement à cette ligne d'alimentation à l'extrémité de l'antenne et le conducteur extérieur est connecté au plan de masse. Ce type d'alimentation facilite la modélisation d'une antenne, mais se traduit par une bande passante étroite [42,53].

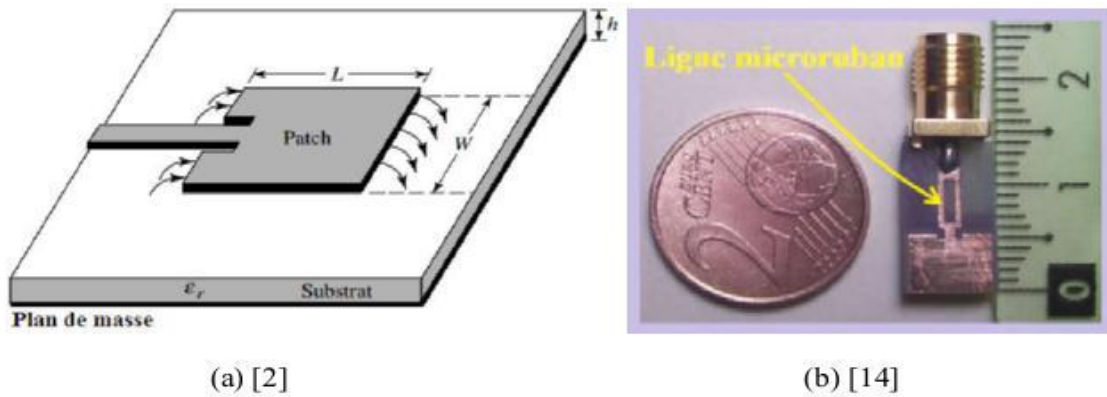


Fig.II.19. (a) Alimentation d'une ligne micro-ruban, (b) Photo d'une antenne réalisée [42,53]

La technique d'alimentation par une ligne micro-ruban est favorisée pour certaine application en réseau d'antenne **Figure (II.20)**, dans ce cas, les pertes de couplage par ondes de surface augmentent ce qui génère des parasites perturbant le rayonnement de l'antenne [54].

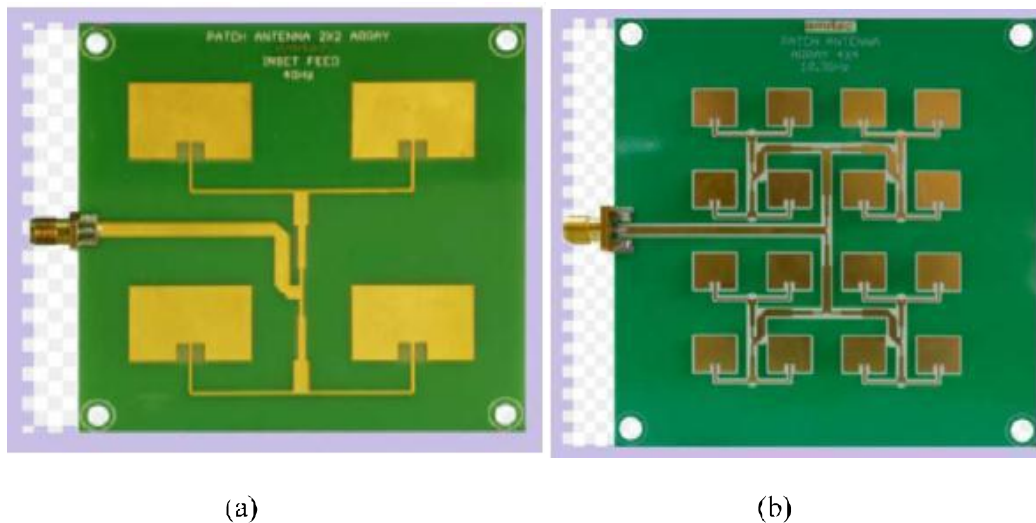


Fig.II.20. Alimentation d'une ligne micro-ruban d'un réseau d'antenne de (a) 4 patches,(b) 4x4patches.
(Source des photos)

II.6.2.2. Sonde coaxiale

Dans ce type, le substrat doit être percé afin de placer le connecteur central du port SMA **Figure (II.21)** dans le trou et le souder directement sur le patch ce qui permet de minimiser les pertes par rayonnement de la ligne [55].

La modélisation de l'impédance d'entrée est un peu difficile avec cette technique d'alimentation par variation de la position de la sonde aux bords de l'élément rayonnant (patch).

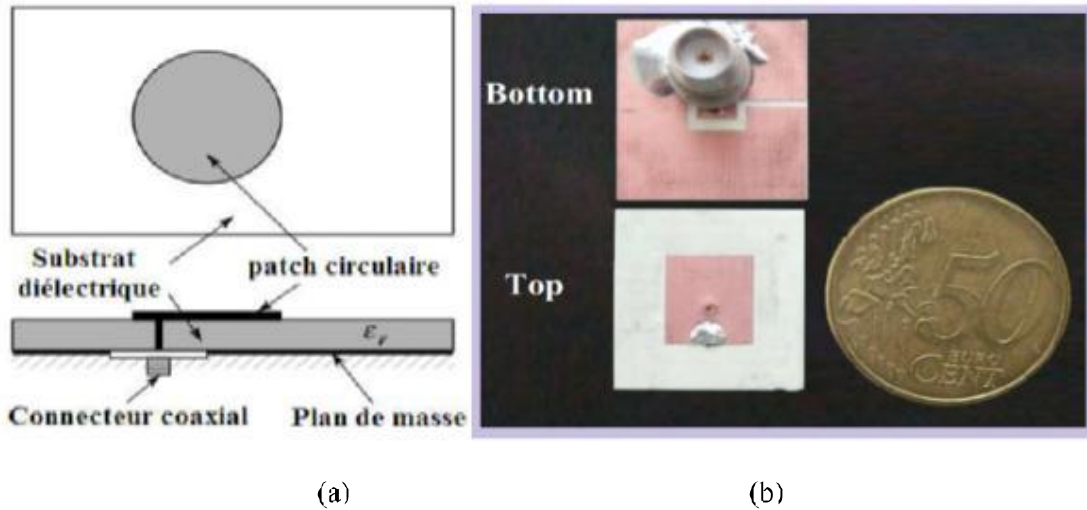


Fig. II.21. (a) Alimentation par une sonde coaxiale, (b) Photo d'une antenne réalisée.

II.6.2.3. Couplage par ouverture (fente)

Deux substrats ayant des permittivités différentes ϵ_1 et ϵ_2 sont superposés l'un sur l'autre (sandwich), entre lesquelles est imprimé un plan de masse complet tranché par une petite ouverture rectangulaire (ou autre forme) [55].

La ligne d'alimentation gravée sur la face inférieure du substrat 2 émet l'énergie à travers la fente vers le patch de substrat 1 **Figure (II.22)**.

Pour modéliser la conception, la position de la fente peut être centrée ou décalée sous le patch. Seuls les faisceaux des ondes électromagnétiques dirigés vers la fente qui réussit à pénétrer le substrat 1, les autres ondes sont réfléchies par la présence de plan de masse métallique qui sépare les deux substrats [55].

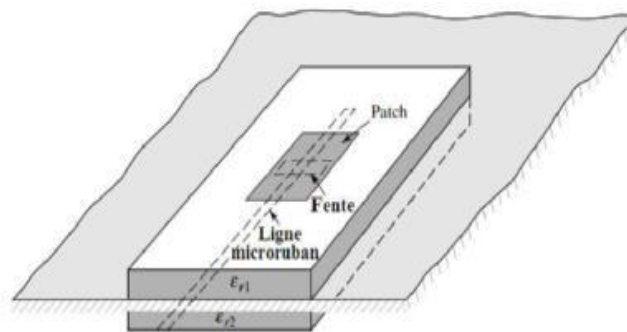


Fig.II.22. Alimentation par couplage d'ouverture.

II.6.2.4. Couplage par proximité

Dans cette structure, la ligne (bande) d'alimentation micro-ruban se trouve entre deux couches diélectriques **Figure (II.23)**.

- une couche supérieure qui comporte le patch en haut (substrat d'antenne);
- une couche inférieure dont le plan de masse est gravé en bas (substrat d'alimentation).

Le couplage électromagnétique se fait **indépendamment** et sans contact de la ligne d'alimentation avec le patch ce qui permet de minimiser le rayonnement parasites [55].

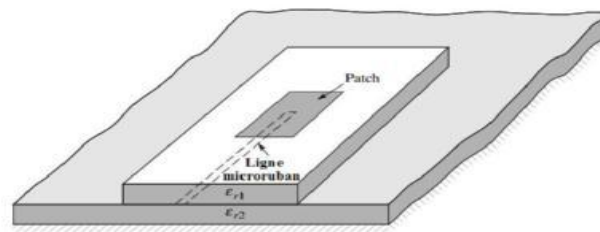


Fig. II.23. Alimentation par couplage de proximité .

Parmi les quatre alimentations décrites en haut :

- Le couplage de proximité a la **plus grande largeur de bande** (jusqu'à 13%).
- Le couplage par ouverture est le plus difficile à modéliser et à fabriquer.

II.6.2.5. Guide d'ondes coplanaire

Dans ce type d'alimentation, la ligne coplanaire et le plan de masse sont situés sur la même face **Figure (II.24)**, ce qui permet de placer des composants actifs de type CMS (composant monté en surface) et réaliser des modèles d'antennes reconfigurables ou de réseaux. Une antenne alimentée par un guide d'ondes coplanaire CPW (Coplanar Wave Guide) est plus simple que celle alimentée par couplage par fente [56].

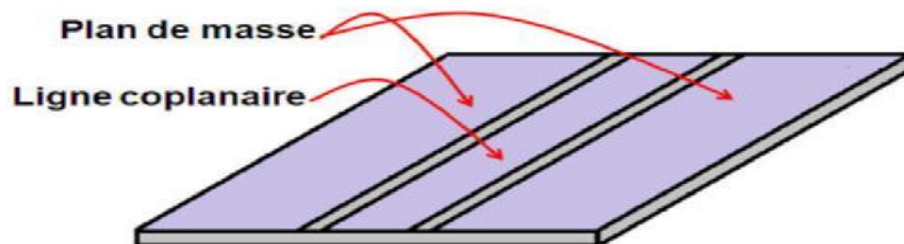


Fig.II.24. Ligne de guide d'ondes coplanaire.

Les avantages de cette structure sont : efficacité améliorée, bande passante élargie et meilleure isolation entre le circuit d'alimentation et l'élément rayonnant. Les trois modèles montrés sur la Figure (II.25) présentent des circuits équivalents de chacun de ces alimentations.

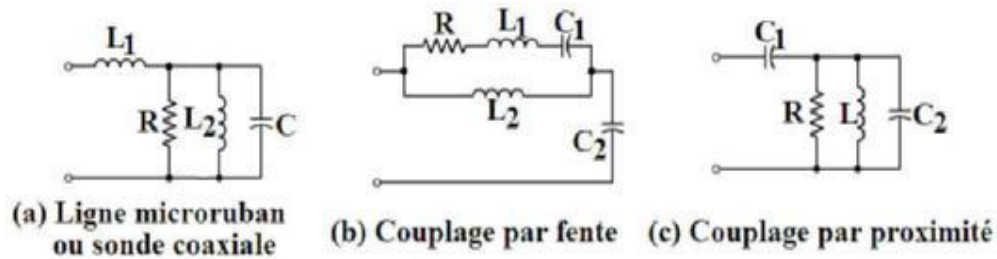


Fig. II.25. Circuits équivalents pour les différentes configurations.

II.6.3. Mode d'excitation des antennes micro-ruban

Pour déterminer le mode dominant avec la résonance la plus basse, nous devons examiner les fréquences de résonance. Le mode avec la fréquence de résonance la plus basse est appelé mode dominant. Placer les fréquences de résonance dans l'ordre croissant détermine l'ordre des modes de fonctionnement. Pour toutes les antennes micro-ruban $h \ll L$ et $h <$

Si: $L > W > h$, le mode à fréquence la plus basse (mode dominant) est le TM_{010}^x dont la fréquence de résonance est donnée par:

$$(f_r)_{010} = \frac{1}{2L\sqrt{\mu\epsilon}} = \frac{v_0}{2L\sqrt{\epsilon_r}} \tag{II.21}$$

Où ;

v_0 : la vitesse de la lumière dans l'espace libre.

En plus, si: $L > W > L/2 > h$, le prochain mode d'ordre supérieur (second) est le TM_{001}^x dont la fréquence de résonance est donnée par:

$$(f_r)_{001} = \frac{1}{2W\sqrt{\mu\epsilon}} = \frac{v_0}{2W\sqrt{\epsilon_r}} \tag{II.22}$$

Cependant, si: $L > L/2 > W > h$, le mode de second ordre est le TM_{020}^x au lieu de TM_{001}^x dont la fréquence de résonance est donnée par:

$$(f_r)_{020} = \frac{1}{L\sqrt{\mu\epsilon}} = \frac{v_0}{L\sqrt{\epsilon_r}} \tag{II.23}$$

Si: $W > L > h$, le mode dominant est le TM_{001}^x dont la fréquence de résonance est donnée par

$$(f_r)_{020} = \frac{1}{L\sqrt{\mu\epsilon}} = \frac{U_0}{L\sqrt{\epsilon_r}} \quad (\text{II.24})$$

Alors que si: $W > W/2 > L > h$, le second ordre est le TM_{002}^x

La distribution du champ électrique tangentiel le long des parois latérales de la cavité pour les modes :

TM_{010}^x , TM_{001}^x , TM_{020}^x et TM_{002}^x sont représentée, respectivement, par la Figure (II.26).

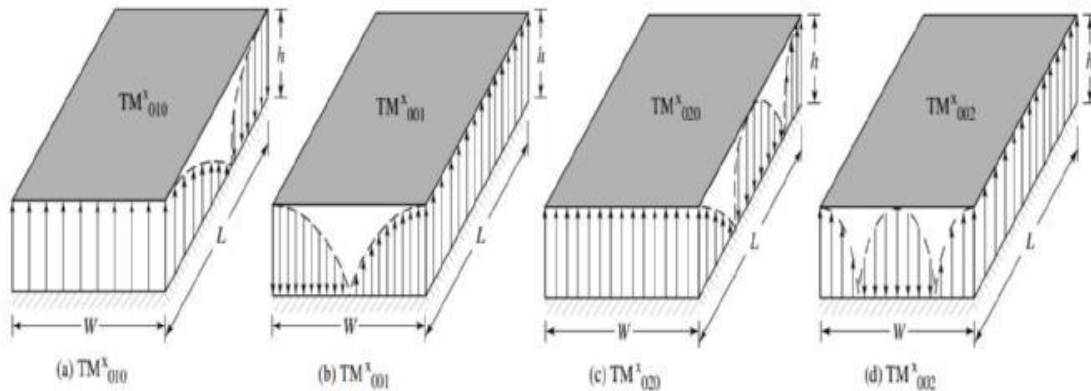


Fig.II.26. Configurations de champ (modes) pour une antenne micro-ruban rectangulaire.

Dans toute la discussion précédente, il a été supposé qu'il n'y a pas d'effet de peau (des champs le long des bords de la cavité). Ce n'est pas totalement valable, mais c'est une bonne hypothèse pour le calcul des champs [42].

II.6.4. Caractéristique spécifiques des antennes micro-rubans

Dans cette partie, nous allons expliquer brièvement quelques caractéristiques des antennes micro-rubans [57-58]:

II.6.4.1. Bande passante

Les antennes patch ont une bande passante étroite (pour un coefficient de réflexion < -10 dB) avec un rapport de bande passante entre 1% et 5% (Impedance BW ratio)

II.6.4.2. Facteur de qualité

Dans le cas général, le facteur de qualité est inversement proportionnel avec la taille de l'antenne en termes de longueur d'onde. Puisque la largeur de la bande passante est celle d'une antenne micro-ruban très petite, son facteur Q est faible. Le facteur de qualité typique d'un patch est entre 50 et 75.

II.6.4.3. Diagramme de rayonnement et directivité

Les diagrammes de rayonnement typiques dans les plans E et H sont illustrés sur la Figure (II. 27). Si le plan de masse est fini, un rayonnement qui fuit se produira vers le demi-plan inférieur.

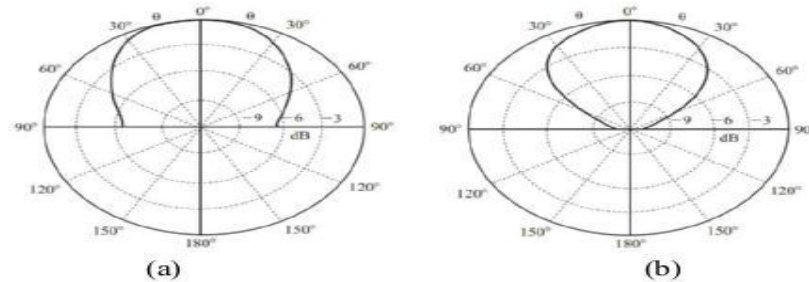


Fig. II. 27. Diagrammes de rayonnement typiques d'une antenne patch rectangulaire pour (a) plan E et, (b) plan H.

II.6.4.4. Gain

Une antenne micro-ruban construite avec un seul élément rayonnant (patch) aura un gain maximum d'environ 6 dBi.

II.6.4.5. Efficacité

Les antennes micro-rubans sont caractérisées par une faible efficacité.

II.6.4.6. Polarisation

La majorité des antennes micro-rubans sont conçues avec une polarisation linéaire. Il existe de nombreuses applications, telle que la création des films en 3D... etc, dans lesquelles il est plus fiable d'utiliser la polarisation circulaire. Les antennes micro-rubans à polarisation circulaire peuvent être classées en trois types : alimentation unique, double alimentation et rotation séquentielle. La Figure (II.28) montre quatre conceptions d'alimentation uniques. La Figure (II.28) (a) et (b) montre, respectivement, un patch presque carré et une forme presque circulaire (elliptique).

La Figure (II.28) (c) et (d) montre, respectivement, une pièce carrée avec des coins tronqués et une pièce circulaire avec des indentations. Bien que les sondes coaxiales soient montrées dans cette figure, les patches peuvent aussi être alimentés par une ligne micro-ruban ou par couplage à travers une ouverture. Cette conception est simple, mais souffre d'une bande passante très étroite pour les substrats minces.

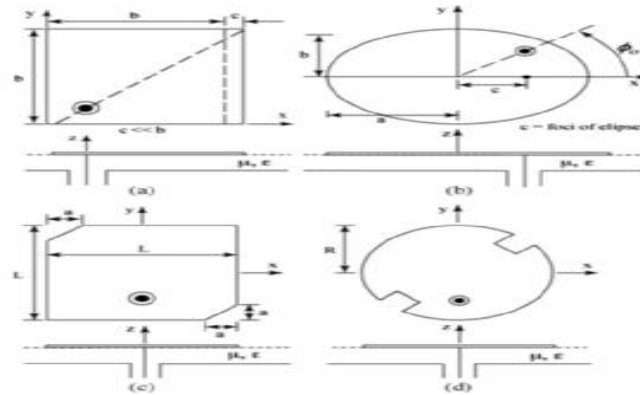


Fig.II.28. Polarisation circulaire des patches : (a) presque carré. (b) elliptique.

(c) carrée avec des coins tronqués. (d) circulaire avec indentations [58].

II.6.5. Avantages et inconvénients des antennes micro-rubans

II.6.5.1. Avantages

Les antennes micro-rubans offrent plusieurs avantages importants, tels que [59-60] :

- Faciles à fabriquer à l'aide de la technologie des circuits imprimés et leur réalisation n'est pas coûteuse ;
- Elles supportent la polarisation linéaire et circulaire à la fois ;
- Capacité d'intégration en extension avec d'autres modules hyperfréquences ;
- Structure rayonnante, ne nécessite pas de cavité ;
- Faible poids, encombrement minimal.

II.6.5.2. Inconvénients

Cette technologie souffre des limitations suivantes [59-60] :

- Bande passante étroite ;
- Gain de puissance plus faible (-6 dB) ;
- Onde de surface et perte ohmique ;
- Rayonnement parasite et orienté dans un demi-plan ;
- Une grande puissance d'alimentation provoque l'éclatement de l'antenne et de ses connexions.

II.7. Conclusion

Nous savons qu'il n'existe pas de règles générales pour concevoir des antennes patch avec des dimensions, des formes et des fréquences de résonance très précises. Par conséquent, l'utilisation du logiciel CST pour la conception d'antennes patch rectangulaires, les techniques de miniaturisation et les techniques d'optimisation ont montré de bons résultats pour répondre aux exigences. La conception et la simulation repose sur le logiciel de simulation CST. Nous cherchons toujours un gain, une directivité et une efficacité acceptables. Le troisième chapitre est dédié à la simulation et l'étude des performances et elle sera finaliser par une réalisation pratique nous permettant de faire une comparaison des résultats simulés et obtenus pratiquement.

Chapitre III

Présentation du logiciel CST

III.1. Introduction

Avant d'entamer une réalisation pratique d'une antenne patch, on procède à exploiter l'outil de simulation. Pour faire cette tâche, plusieurs logiciels sont à notre disposition tel que HFSS ...etc. On a opté pour le CST car il résout les équations qui caractérisent le champ électromagnétique et il peut gérer toutes sortes de structures homogènes et non homogènes, quelle que soit la technologie utilisée. Autrement dit, à cause de ces performances et sa souplesse. Ce chapitre est dédié à la présentation générale du logiciel CST (Computer Simulation technology) Microwave Studio. Nous allons décrire en détail le rôle de chaque fonction et nous allons également montrer les étapes pour la création d'un projet jusqu'à sa simulation [61].

III.2. Présentation du logiciel CST STUDIO SUITE

CST (Computer Simulation Technology) est une société allemande fondée en 1992. La première version de CST Microwave Studio fait sa première apparition en 1998. Le logiciel CST résout les équations qui caractérisent le champ électromagnétique.

Le logiciel que nous employons, fait usage de la méthode des intégrales finies (FIT, Finite Integration Technique) développée par Tomas Weiland [61-62] en 1977 alors qu'il travaillait à l'Université de Darmstadt. Il réécrit l'équation intégrale de Maxwell sous forme discrète, ce qui la rend compatible sur le plan informatique pour résoudre des problèmes géométriques complexes.

FIT procède en décrivant les équations de Maxwell dans un espace de grille, en préservant la propriété de conservation de l'énergie et en établissant certaines équations différentielles telles que l'équation de Poisson et l'équation d'onde. Il s'agit d'une approche très sophistiquée, et on peut l'utiliser à la fois dans le domaine temporel et dans le domaine fréquentiel [61-62].

L'avantage de cet outil, comme tous les simulateurs 3D, est qu'il peut gérer toutes sortes de structures homogènes et non homogènes, quelle que soit la technologie utilisée, avec un temps de simulation minimale par rapport à d'autres simulateurs.

III.2.1. Description générale du logiciel

Après avoir lancé le logiciel, vous verrez l'interface ci-dessous **Figure (III.1)** et créez un nouveau projet [61-64].

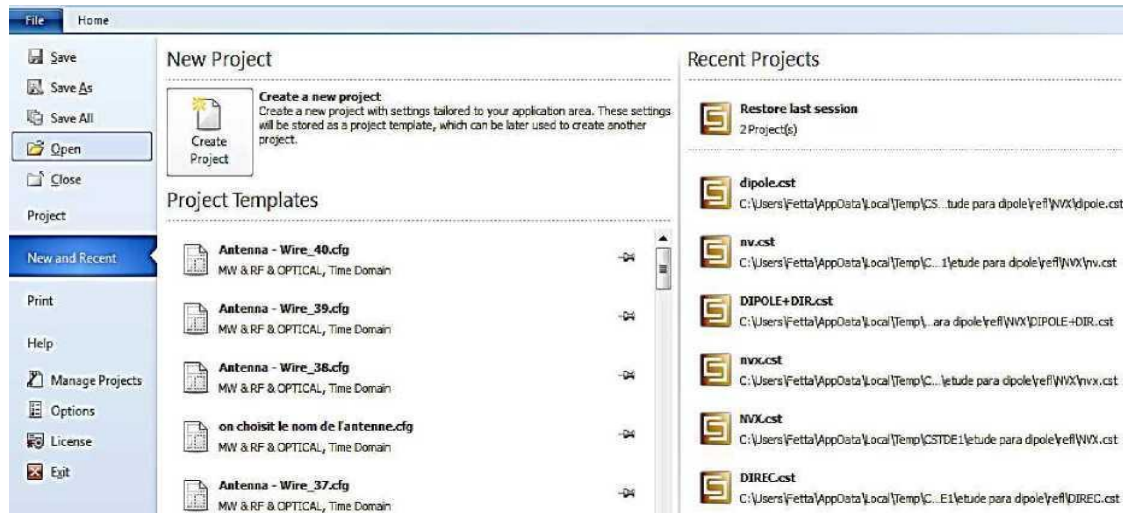


Fig.III.1. Création d'un nouveau projet

Cliquez sur l'icône 'create project' et sélectionnez le type de simulation que vous souhaitez exécuter [61,63,64] **Figure (III.2)**.

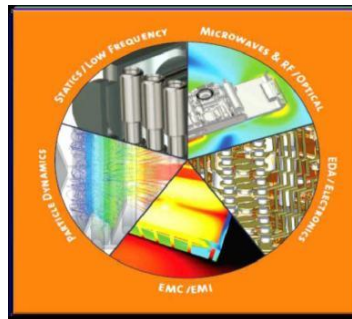


Fig.III.2. Choix du type de simulation

On clique sur MW & RF & OPTICAL puis sur 'antennas' une autre fenêtre apparaît **Figure (III.3)**.

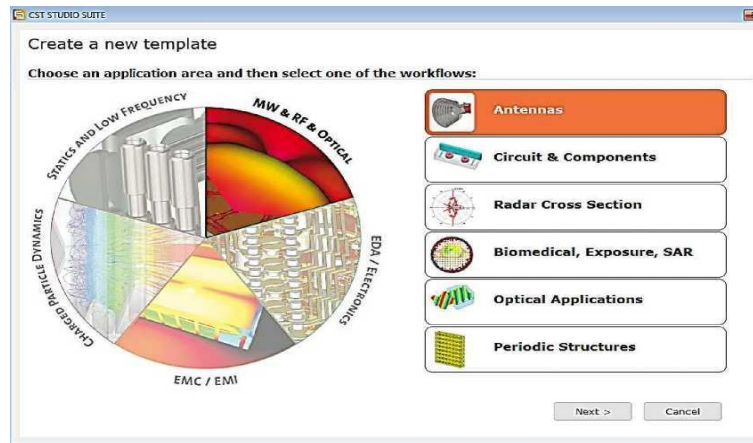


Fig.III.3. Choix de la zone de simulation.

Après avoir cliqué sur "Suivant", sélectionnez le modèle de la structure que vous souhaitez réaliser Figure (III.4).

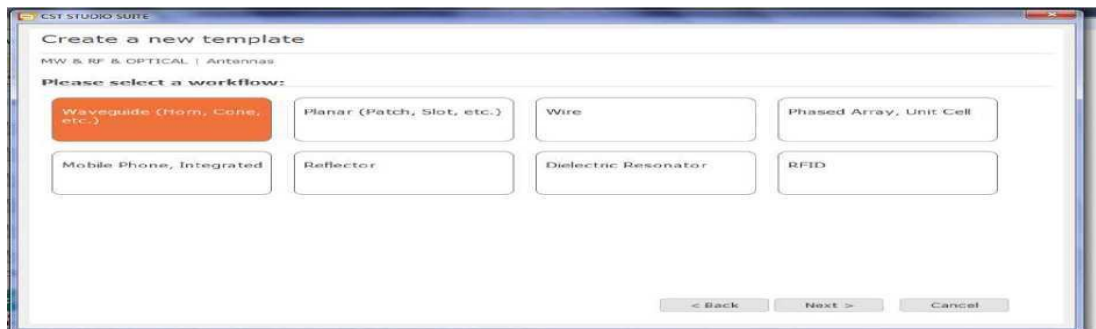


Fig.III.4. Choix du type d'antenne

Sélectionnez le type de simulation (dans notre cas se sera le domaine temporel) Figure (III.5).



Fig.III.5. Choix du type de simulation

Après avoir sélectionné le Time Domain, il vous sera demandé d'indiquer les unités et la gamme de fréquences à utiliser Figure (III.6).

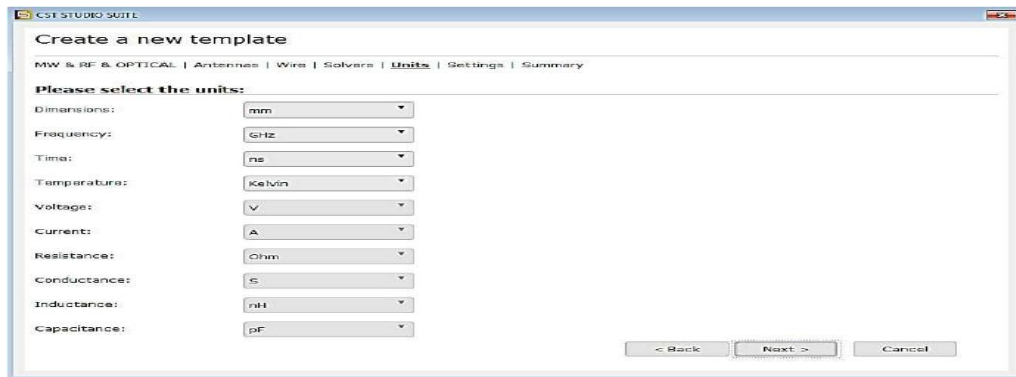


Fig.III.6. Choix des unités.

Les unités utilisées sont définies par défaut, mais peuvent être modifiées en cliquant sur la barre de menu Figure (III.7)

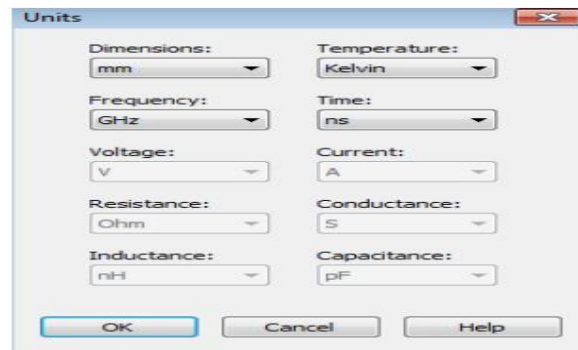


Fig.III.7. Différentes grandeurs et leurs unités

Il est très important de déterminer la gamme de fréquences de la simulation pour chaque modèle que vous créez. Pour calculer le gain du champ lointain, vous devez définir un moniteur de champ avant de démarrer la simulation. Le choix de la bande fréquentielle est indispensable Figure (III.8).

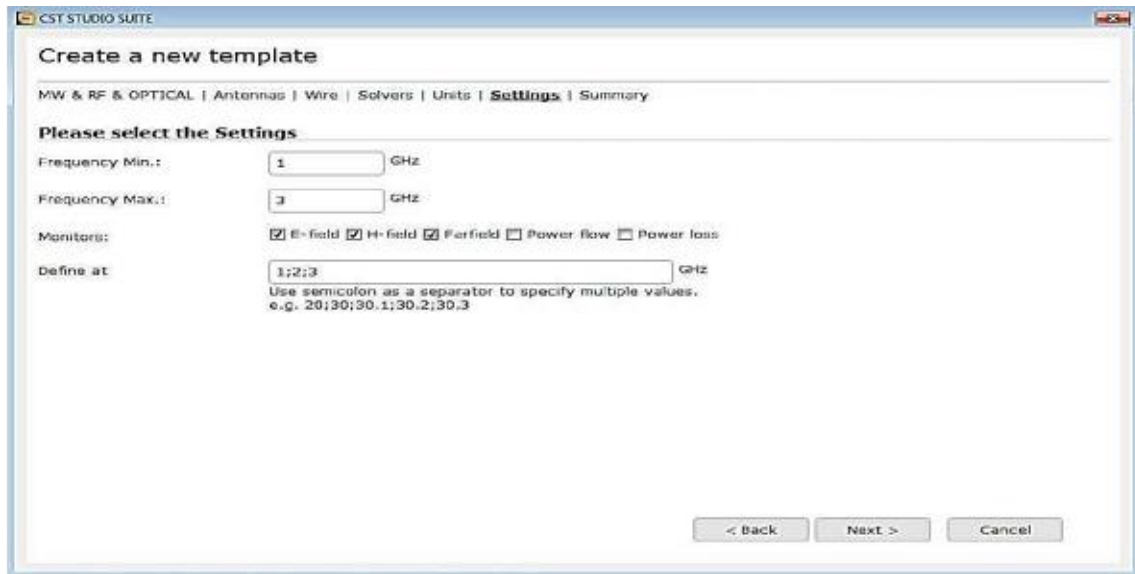


Fig.III.8. Choix des unités de fréquence

Enfin, vous verrez la fenêtre suivante. Cliquez sur 'Terminer' pour terminer la création de votre nouveau projet **Figure (III.9)**.

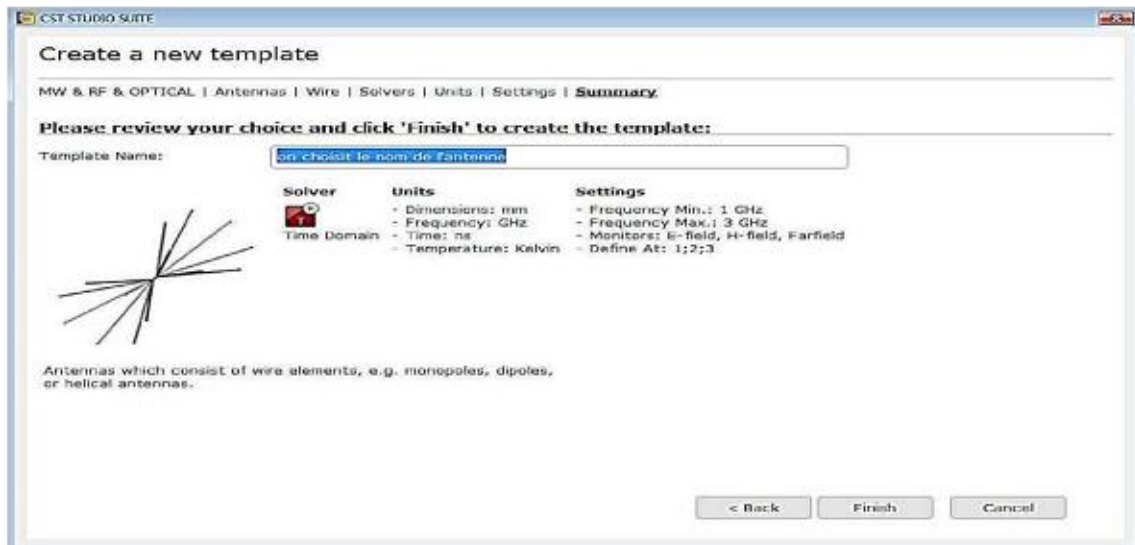


Fig.III.9. Fin de la création d'un nouveau projet

Maintenant on donne un nom à notre projet, on clique sur **Finish**. Ce qui nous permet d'accéder à l'interface d'utilisateur du CST [61,63,64].

III.2.2. Description générale de l'interface CST

Après avoir sélectionné le modèle structurel, accédez à l'interface utilisateur CST [61] **Figure (III.10)**.

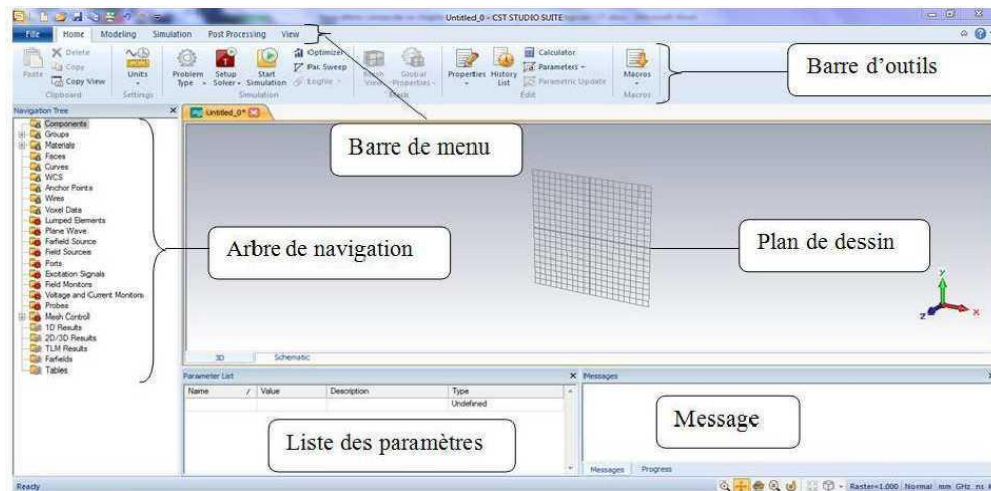


Fig.III.10. Interface du CST

- **liste des paramètres** : est la liste de toutes les variables utilisées pendant la simulation. Où on indique leurs valeurs, leurs descriptions et leurs types.
- **le plan de dessin** : est le plan de travail sur lequel on dessine la structure en trois dimensions (3D).
- **la barre d'outils** : est un ensemble de raccourcis de la barre de menu.
- **l'arbre de navigation** : est une partie essentielle de l'interface d'utilisateur. On peut accéder aux éléments structuraux et aux résultats de simulation.
- **Message** : donne le bilan de la simulation en nous informant sur chaque étape si elle est simulée avec succès ou dans le cas contraire elle nous signale des erreurs.

III.2.3. Les différentes formes géométriques

a) On a les formes de bases [64]

Les formes de base sont données par la **Figure (III.11)** ci-dessous.



Fig.III.11. Les différentes formes de bases

Par exemple, Pour créer un cylindre, **Figure (III.12)** cliquez sur Cylindre dans la barre d'outils. Une boîte de dialogue apparaît dans laquelle vous indiquez les coordonnées

de l'objet à créer.



Fig.III.12. Dialogue d'ajout d'une forme de base

b) Définir les matériaux [61]

Vous pouvez définir le matériau à utiliser avant de dessiner la structure Dans le répertoire 'Materials' de l'arbre de navigation: Par défaut, il y a déjà deux matériaux Créé **Figure (III.13)**.



Fig.III.13. Matériau à utiliser

-**PEC** : perfect Electrical conductor (Métal Parfait).

-**Vacuum** : le vide ou l'air.

Vous pouvez créer d'autres matériaux **Figure (III.14)** en faisant un clic droit sur le répertoire 'Materials'. Sélectionnez un 'New Material'. La fenêtre suivante apparaîtra.

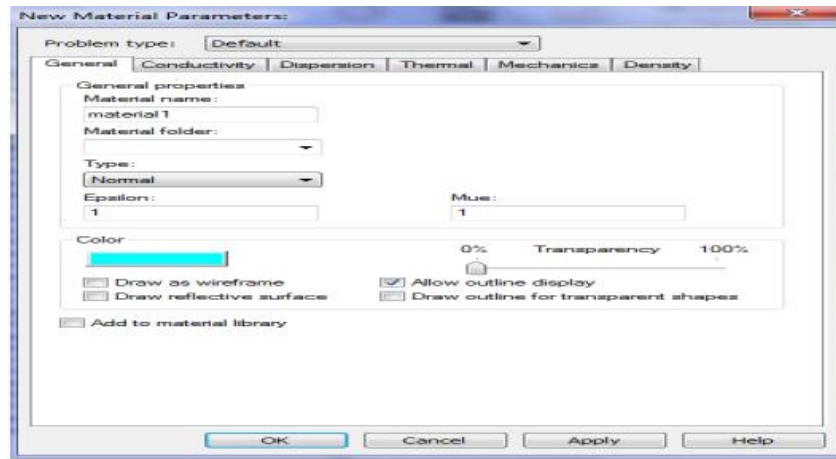


Fig.III.14. Création d'un nouveau matériau

Barre des outils et barre de menu : Contient tous les outils pour créer des modèles.

Sélectionner un point, une face, un coté....[65]

De nombreuses procédures de construction nécessitent que vous sélectionniez des points, des arêtes ou des faces modèles. La section suivante explique comment choisir un modèle.

Pour chaque opération « pick », vous devez d'abord sélectionner l'outil de sélection approprié à partir du menu **Objets pick pick Point / ...** ou à partir de la barre d'outils de sélection **Figure (III.15)**.



Fig.III.15. Choix d'un modèle

Double-cliquez sur l'élément souhaité après avoir activé l'outil de sélection. Pour annuler le mode de sélection, appuyez sur la touche ESC de votre clavier.

Remarque : Impossible de sélectionner plusieurs bords ou faces d'une forme ou d'une autre forme est actuellement sélectionné.

III.2.3. Optimisation et variation de paramètre [61]

Le menu de démarrage ou le menu de simulation dispose d'outils pour optimiser les résultats **Figure (III.16)**.

Alternativement, simulez en faisant varier les paramètres de la structure.

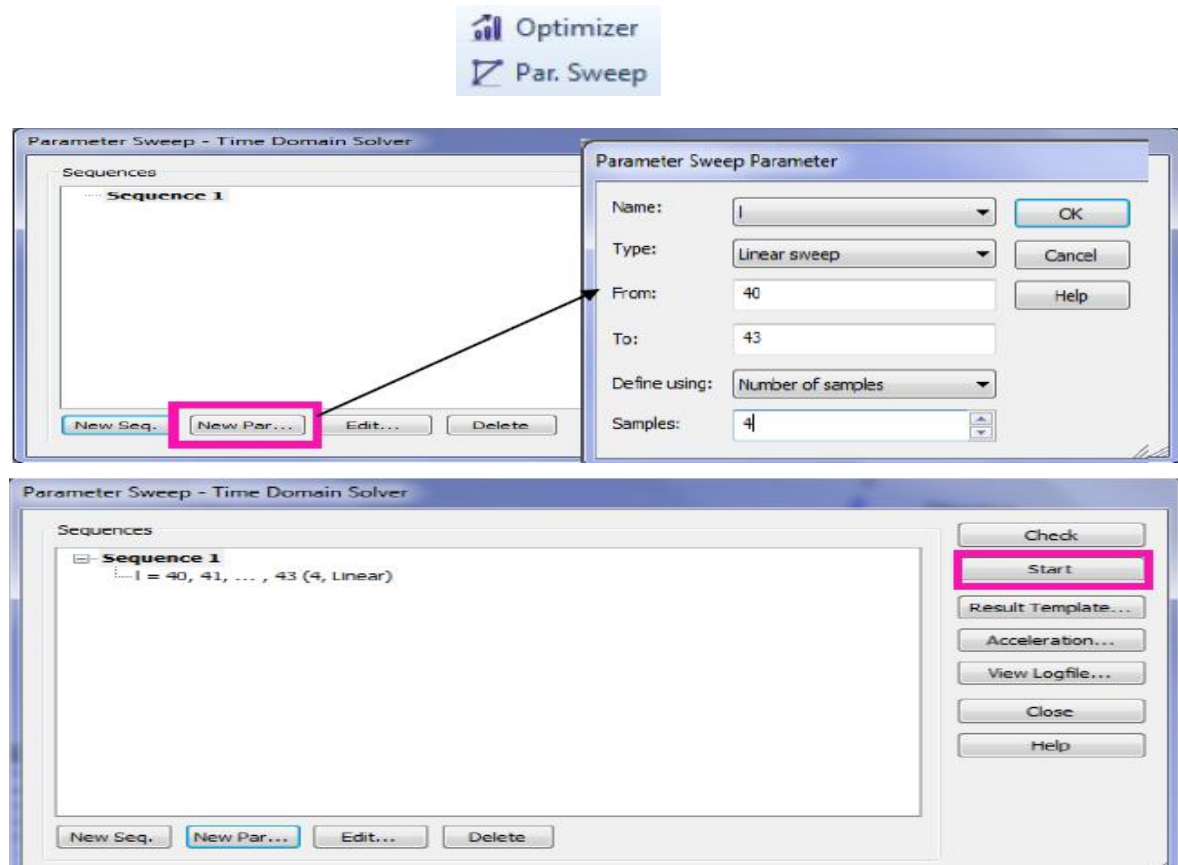


Fig.III.16. Boîtes de dialogues de variation des paramètres de simulation.

Optimisez le modèle à partir de la fenêtre de « setup Solver » ou directement depuis la barre d'outils 'home' **Par. Sweep**. Pour ce faire, il faut sélectionner les variables à optimiser, leurs bornes et le nombre d'échantillons. Ensuite, il faut établir une ou des fonctions cibles à atteindre, c'est-à-dire qu'il faut choisir un paramètre tel que comme l'amplitude du paramètre S11 qui quantifie le signal réfléchi. La **Figure (III.17)** montre la boîte de dialogue pour exécuter l'optimisation.

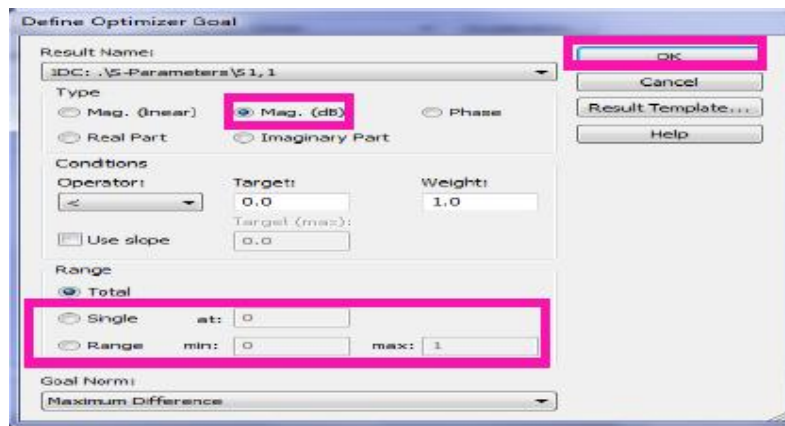
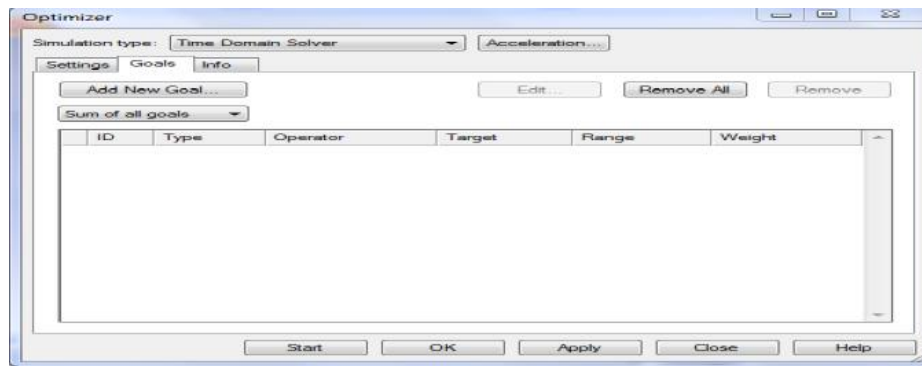
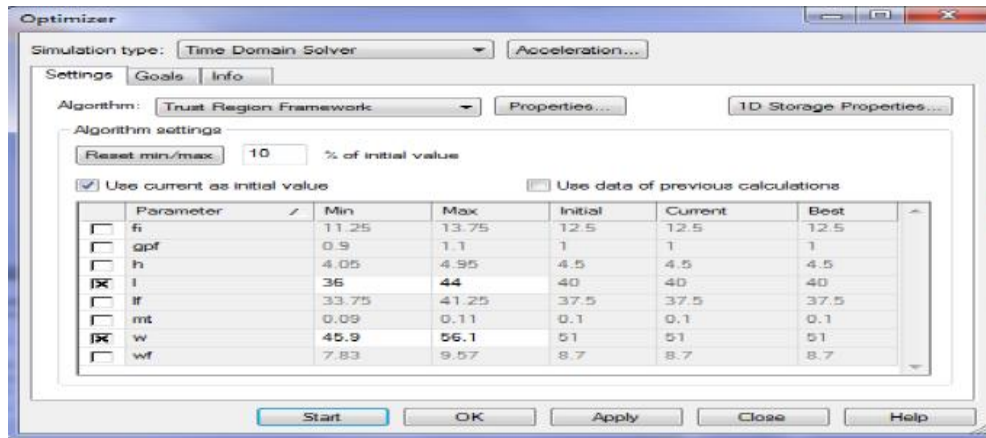


Fig.III.17. Etape et boites de dialogue d'optimisation.

Après avoir configuré l'optimisation, tout ce que vous avez à faire est de démarrer et d'attendre résultats (rapport d'optimisation) **Figure (III.18)**.

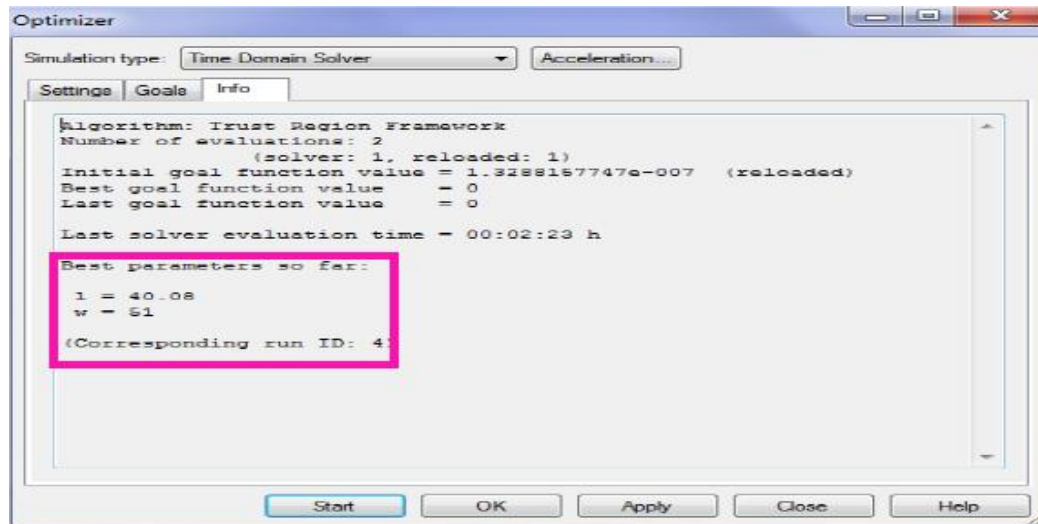


Fig.III.18. Rapport de l'optimisation

III.4. Conclusion

Une description générale des différents outils du logiciel CST a été présentée. L'utilisation de ce logiciel pour effectuer des simulations est simple quand nous connaissons son fonctionnement, pourtant son apprentissage est difficile étant donné le grand nombre de fonctions disponibles [61].

Les résultats numériques et les graphiques de simulation d'une antenne patch bi-bandes vont être donnés dans le quatrième chapitre. Sans oublier les étapes de réalisation pratique de cette antenne.

Chapitre IV

Résultats et Discussions

IV.1. Introduction

Depuis plusieurs années, les domaines de télécommunications et de nouvelles technologies connaissent un véritable essor. La technologie 5G exige des antennes avec des nouvelles fonctionnalités [66]. L'utilisation de la bande millimétrique dans la 5G est une solution appropriée pour répondre aux exigences de cette technologie. Les futures générations d'équipements vont faire appel à des antennes de plus en plus performantes et fonctionnant dans la bande 5G [10].

Aujourd'hui, le développement rapide des systèmes de communication sans fil a entraîné le besoin de miniaturisation des terminaux mobiles tels que les téléphones portables, les appareils portables sans fil pour se connecter à Internet, les appareils de communication à courte et longue portée, et la RFID à longue portée (Radio Frequency Identification), etc. Parallèlement, cette vulgarisation des dispositifs de communication sans fil a contribué à intensifier la recherche de solutions d'antennes miniaturisées et mobiles, susceptibles d'être intégrées dans des objets de communication compacts.

Ce chapitre est dédié à l'étude et la conception et réalisons d'une antenne patch bi-bande ayant deux fréquences de résonance l'une autour de 5GHZ et l'autre tourne autour de 28 GHZ permettant ainsi de recevoir ou d'émettre un très grand taux d'échange d'informations.

Pour la conception de notre antenne, nous avons choisi un outil de simulation électromagnétique 3D puissant et efficace, avec une méthode de calcul différente. L'outil CST Micro-wave studio, qui utilise la technique d'intégration finie (FIT) va être utilisé à cet effet. Les étapes de conception vont être éclaircis et nous terminerons par l'éclaircissement des performances de cette antenne en analysant les courbes obtenus.

IV.2. Calcul des dimensions de l'antenne

Pour démarrer, nous avons commencé par l'utilisation d'une géométrie classique de patch simple Figure (IV.1).

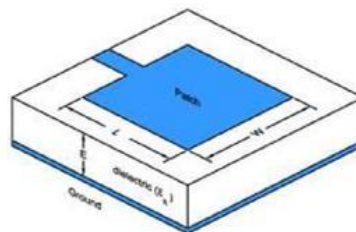


Fig.IV.1. Antenne patch rectangulaire simple.

Les dimensions de notre antenne miniature, nous avons calculé en utilisant les formules ci-dessous :

$$Wg = \frac{c}{2f_0 \sqrt{\frac{\epsilon_r - 1}{2}}} \quad (\text{VI.1})$$

$$\epsilon_{\text{eff}} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(\frac{1}{\sqrt{1 + 12 \left(\frac{h}{W} \right)^2}} \right) \quad (\text{VI.2})$$

$$Lg = \frac{c}{2f_0 \sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}} - 0.824 \left(\frac{(\epsilon_{\text{eff}} + 0.3) \left(\frac{h}{W} + 0.264 \right)}{(\epsilon_{\text{eff}} - 0.258) \left(\frac{h}{W} + 0.8 \right)} \right) \quad (\text{VI.3})$$

Pour calculer les dimensions de l'antenne on va appliquer le programme basé sur les équations de Wheeler en Matlab.

Pour f = 5.2 GHz

```

FILE          EDIT          NAVIGATE  BREAKPOINTS  RUN
Patch_dim.m x
1  % Données d'entrée
2 - freq = 5.2e9; % Fréquence centrale en Hz
3 - er = 4.4; % Constante diélectrique relative du substrat
4 - h = 1.6e-3; % Épaisseur du substrat en m
5
6  % Calcul des dimensions de l'antenne
7 - lambda = physconst('LightSpeed')/freq; % Longueur d'onde en m
8 - W = lambda/(2*sqrt(er)+1); % Largeur de l'antenne en m
9 - L = lambda/(2*(sqrt(er)+1)*sqrt(2*(er+1))); % Longueur de l'antenne en m
10
11 % Affichage des résultats
12 - disp(['Dimensions de l'antenne: ' num2str(W*1e3) ' mm x ' num2str(L*1e3) ' mm']);
13

```

Après exécution du programme pour la fréquence 5.2GHz, les dimensions du patch:

```

Command Window
New to MATLAB? Watch this Video, see Examples, or read Getting Started.
>> Patch_dim
Dimensions de l'antenne: 11.0972 mm x 30.5824 mm
fx >> |

```

Pour $f = 28$ GHz

```

Patch_dim.m x
1   % Données d'entrée
2   -   freq = 28e9; % Fréquence centrale en Hz
3   -   er = 4.4; % Constante diélectrique relative du substrat
4   -   h = 1.6e-3; % Épaisseur du substrat en m
5
6   % Calcul des dimensions de l'antenne
7   -   lambda = physconst('LightSpeed')/freq; % Longueur d'onde en m
8   -   W = lambda/(2*sqrt(er)+1); % Largeur de l'antenne en m
9   -   L = lambda/(2*(sqrt(er)+1))*sqrt(2*(er+1)); % Longueur de l'antenne en m
10
11  % Affichage des résultats
12  -   disp(['Dimensions de l'antenne: ' num2str(W*1e3) ' mm x ' num2str(L*1e3) ' mm']);
13

```

Après exécution du programme pour la fréquence 5.2GHz, les dimensions du patch:

```

Command Window
New to MATLAB? Watch this Video, see Examples, or read Getting Started.

>> Patch_dim
Dimensions de l'antenne: 2.0609 mm x 5.6796 mm
fx >> |

```

IV.3. Calcul de l'impédance de la ligne d'alimentation

Le choix de la ligne d'alimentation est basé sur le fait que cette ligne doit avoir une impédance caractéristique d'environ 50Ω . Parmi les différents types de lignes de transmission les plus couramment utilisées pour alimenter les antennes imprimées, nous avons choisi les lignes microruban. Le choix du type de substrat affecte directement l'impédance caractéristique de la ligne de transmission, en particulier la permittivité et l'épaisseur relatives, et peut fournir une impédance d'entrée bien adaptée. Il existe également une fenêtre permettant de calculer cette impédance à l'aide de la cartographie des paramètres d'influence. **Figure (IV.2)**

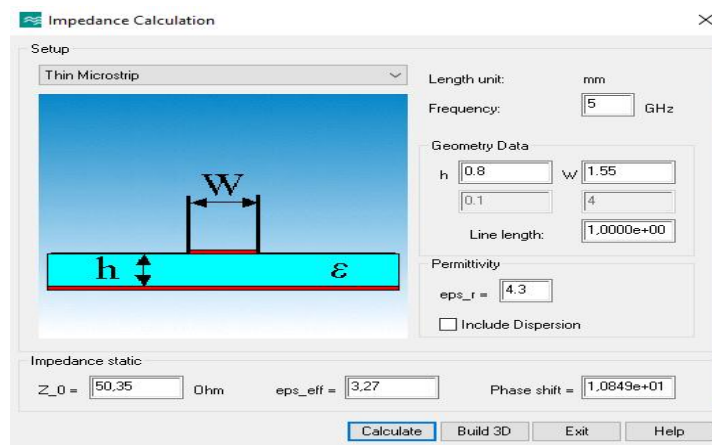


Fig.IV.2. Fenêtre de l'impédance de la ligne d'alimentation dans logiciel CST.

Comme le montre la figure ci-dessus, pour une entrée bien adaptée ($Z_0 = 50 \Omega$), les paramètres de la ligne électrique sont :

$h=1.6\text{mm}$, $t=0.035\text{mm}$, $W=1.55\text{ mm}$, $\epsilon_r = 4.3$ pour le Fr-4 époxy

La **Figure (IV.3)** (a) ci-dessous montre la variation de l'impédance en fonction de la fréquence pour $h = 0,8\text{ mm}$. Cette figure montre l'impédance de la ligne d'alimentation est bien adaptée et elle est autour de 50Ω .

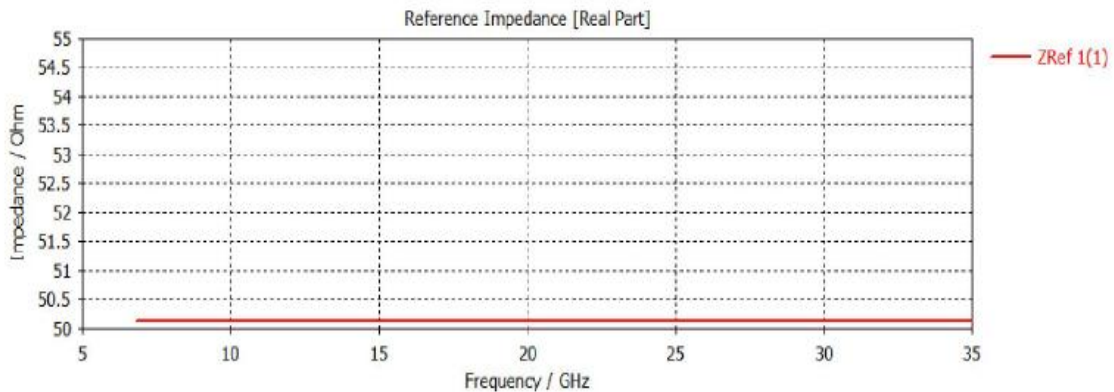


Fig.IV. 3. Variation de l'impédance de la ligne d'alimentation en fonction de la fréquence pour $h=0.8\text{mm}$

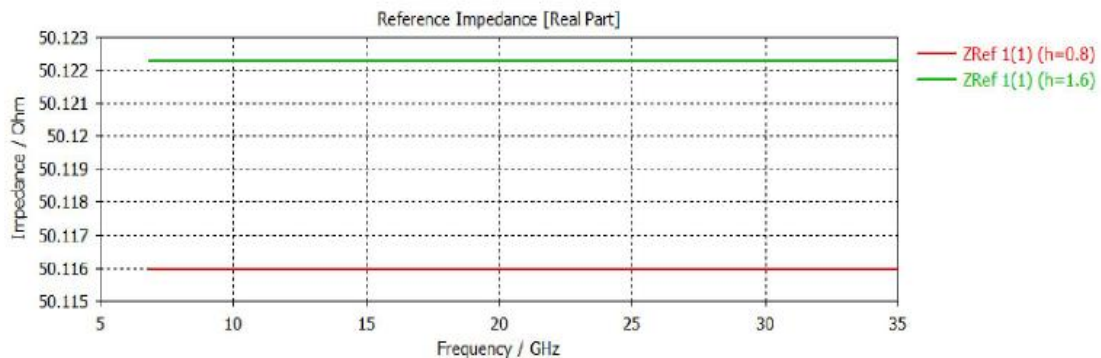


Fig.IV. 4. Variation de l'impédance de la ligne d'alimentation en fonction de la fréquence pour $h=0.8\text{mm}$ et 1.6mm

La **Fig.IV.4** montre la variation de l'impédance de la ligne d'alimentation en fonction de la variation de h de 0.8mm à 1.6mm et en fonction de la fréquence. La variation de h affecte légèrement l'impédance d'entrée de l'antenne. On verra prochainement l'effet de h sur le coefficient de réflexion.

IV.4. Caractéristiques du substrat

Le projet consiste à fabriquer une antenne patch microstrip pour les applications 5G à deux fréquences environ 6GHz et 28 GHz. Les valeurs des différents éléments de l'antenne sont données dans la spécification **Tableau (IV.1)**.

Tableau. IV.1. Cahier de charge.

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 et le Patch	0.035	

IV.5. Présentation des structures des éléments et simulation

IV.5.1. Présentation de la structure d'antenne Patch

La structure de base de l'antenne consiste en un patch rectangulaire excité par une ligne de transmission micro-ruban. La géométrie de cette antenne est représentée sur la **Figure (IV.5)**, et imprimée sur un substrat de type FR4 de permittivité relative $\epsilon_r=4.3$ et d'épaisseur $H = 1,6$ mm. Un plan de masse est un plan partiel imprimé sur la surface de dessous du substrat. Les principaux paramètres géométriques de l'antenne sont résumés dans le **Tableau (IV.2)**.

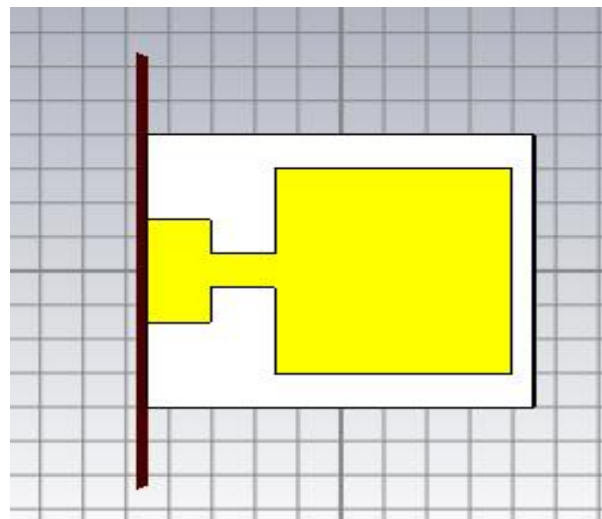


Fig.IV.5. Modélisation de notre antenne dans CST.

Le **Tableau (IV.2)** présente un résumé de toutes les dimensions de l'antenne.

Tableau (IV.2) : Paramètres géométriques de l'antenne étudiée

Paramètres	Variabes	Valeurs (mm)
Longueur du plan de masse L_g	L_g	9
Largeur du plan de masse W_g	W_g	8
Epaisseur de la couche conductrice	t	0.035
Epaisseur du substrat	h	0.8
La longueur de la ligne d'alimentation (LI)	l_f	-2
Largeur de la ligne de transmission	w_f	3
Longueur du patch	L_p	5
La largeur du patch	w_p	6
	L_{g1}	2

Le coefficient de réflexion de l'antenne étudiée est représenté dans la Figure (IV.6). On constate que le module du coefficient de réflexion de cette antenne est inférieur à -10 dB dans la bande de fréquence étudiée, donc l'antenne présente une mauvaise adaptation à fréquence de résonances 5.2 GHz et 28 GHz désirée.

IV.5.2. Résultats et discussions

IV.5.2.1. Coefficient de réflexion

La Figure (IV.6) ci-dessous montre la variation du coefficient de réflexion S_{11} en fonction de la fréquence. Ce dernier possède deux fréquences de résonance, une à 17 GHz avec un gain d'environ -39 dB et une autre à 28,27 GHz avec un gain de -36 dB.

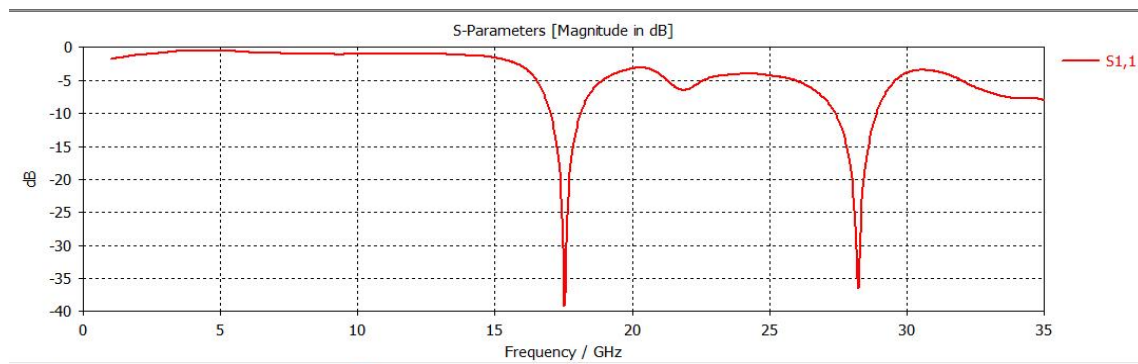


Fig.IV.6. Résultats de simulation du coefficient de réflexion de l'antenne.

Nous remarquons que le coefficient de réflexion S_{11} ne rayonne pas dans les fréquences de résonances 5.2GHz et 28 GHz. S_{11} est au-dessus de -10dB dans les deux fréquences de résonances 5.2GHz 28GHz, ce qui conduit à une désadaptation de l'antenne notamment à la fréquence désirée. Pour avoir une bonne adaptation de l'antenne, on doit faire une étude paramétrique sur la longueur de patch et la largeur de la ligne d'adaptation.

IV.5.2.2. Étude de l'effet de l'épaisseur du substrat

Nous avons changé l'épaisseur du substrat de 0.8mm au 1.6 mm le coefficient de réflexion est représenté sur la **Figure (IV.7)** ci-dessous.

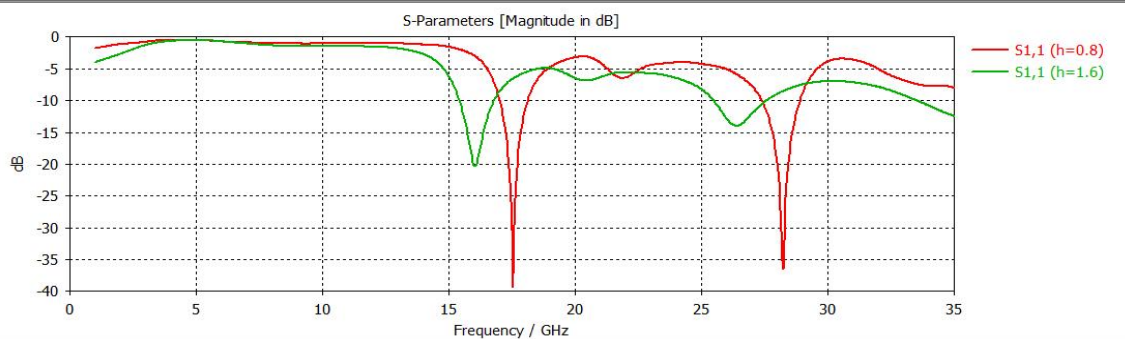


Fig.IV.7. Résultats de simulation du coefficient de réflexion de l'antenne avec les $h=0.8$ mm et $h=1.6$ mm.

En général, l'effet de l'épaisseur du substrat sur le gain d'antenne et la fréquence de résonance est évident. Dans ce cas le gain de la première fréquence est amélioré est atteint - 20dB par contre le gain de la deuxième fréquence de résonance est affaibli à -14dB et la nouvelle fréquence de résonance a décalée vers les basses fréquences (26.30GHz).

Sachant que nous voulions deux fréquence de résonance l'un autour de 6 GHz et L'autre autour de 28GHz. Ce qui nous a poussé à choisir des autres paramètres en utilisant le tuning et la technique d'optimisations. Nous introduisons maintenant des encoches dans le patch pour obtenir l'adaptation de l'antenne pour les deux fréquences requises de 5.2 GHz et 28 GHz.

IV.6. Etude paramétriques

Nous avons apporté plusieurs modifications à l'antenne patch. On a découpé le plan de masse comme le montre la **Figure (IV.8)**

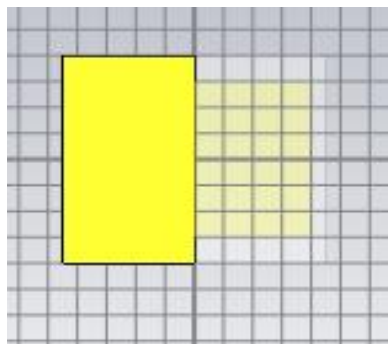


Fig.IV.8. Le plan de masse

Le coefficient de réflexion $S_{1,1}$ de l'antenne est représenté par la **Figure (IV.9)**

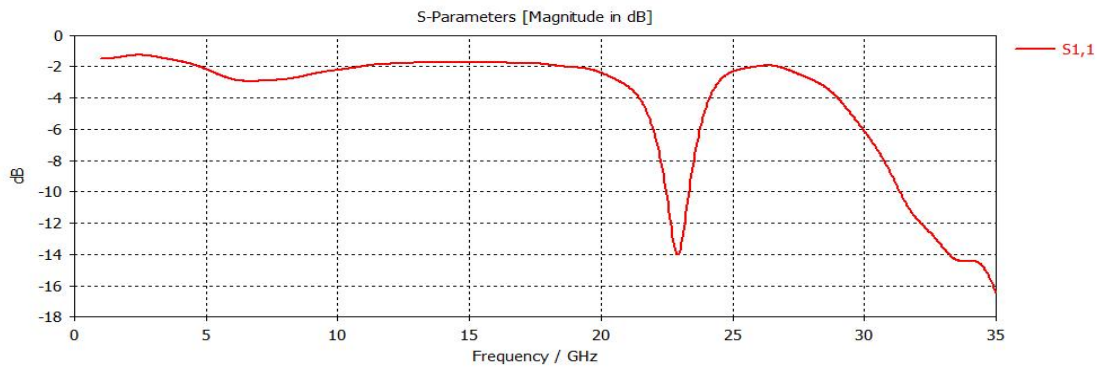


Fig.IV.9. Le coefficient de réflexion S_{11} en (dB) en fonction de la fréquence

Nous remarquons que le coefficient de réflexion S_{11} ne rayonne pas dans les fréquences de résonances 5.2GHz et 28 GHz.

Pour remédier, nous avons coupé un rectangle du patch comme le montre la figure IV.10 suivante

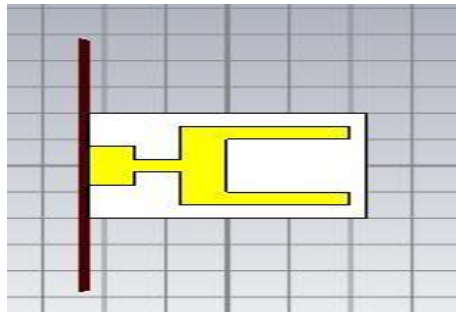


Fig.IV.10. Modification du patch

Le coefficient de réflexion S_{11} de l'antenne est représenté par la Figure (IV.11)

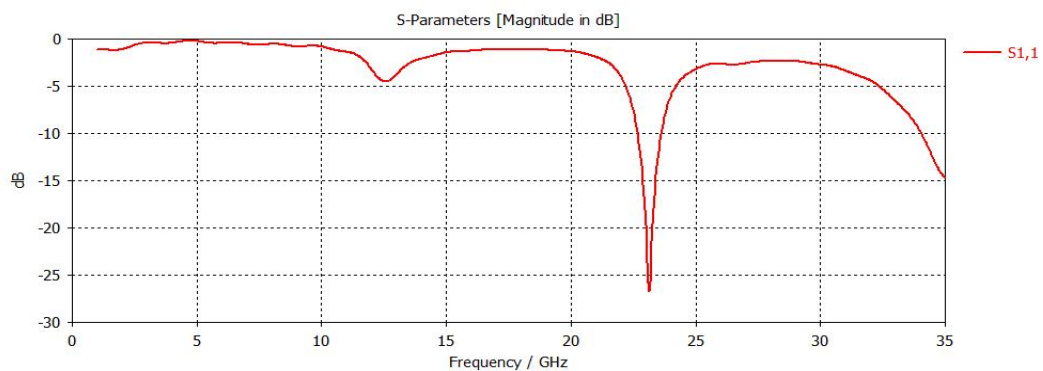


Fig.IV.11. Le coefficient de réflexion S_{11} en (dB) en fonction de la fréquence

IV.7. Structure finale de l'antenne

Pour améliorer les réponses de l'antenne, nous avons opté deux techniques l'une est la

déformation de la structure géométrique du patch ainsi que le plan de masse avec les techniques de miniaturisation **Figure (IV.12)**.

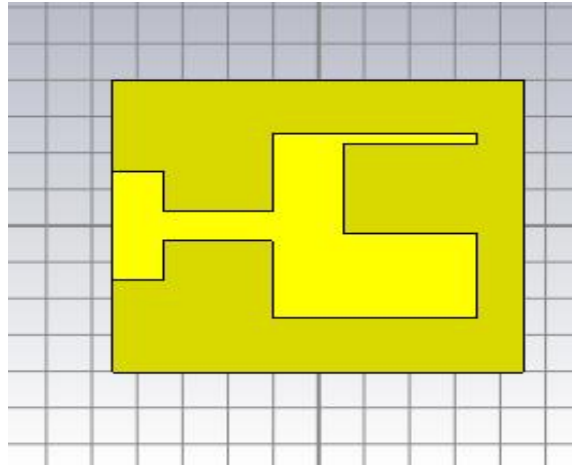


Fig.IV.12. Géométrie finale de l'antenne bi-bande conçue.

Le Tableau (IV.3) ci-dessous résume les dimensions de l'antenne

Tableau (IV.3) : Paramètres géométriques de l'antenne

Paramètres	Lg	wg	t	h	lf	wf	lp	wp	lg1	ls1	ls2	Ws1	Ws2
Valcurs (mm)	9	8	0.035	1,6	-2,4	3	4	5	0,5	0,55	4	0,225	2,225

IV.8. Paramètres de l'antenne

La **Figure (IV.13)** ci-dessous montre la dimension d'une antenne

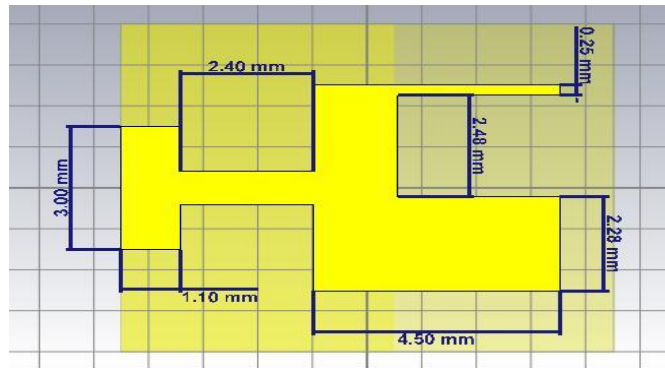


Fig.IV.13. Dimension d'une antenne

IV.9. Résultats et discussions

IV.9.1. Coefficient de réflexion

Le coefficient de réflexion S_{11} de l'antenne proposée est représenté par la **Figure (IV.14)**

Ce dernier montre que S_{11} et les fréquences de résonance répondent bien aux exigences nécessaires et peut répondre à l'exigence des applications 5G.

- 1- Les deux fréquences de résonances autour de 5.2 GHz et 28GHz.
- 2- Pratiquement acceptable S_{11} .

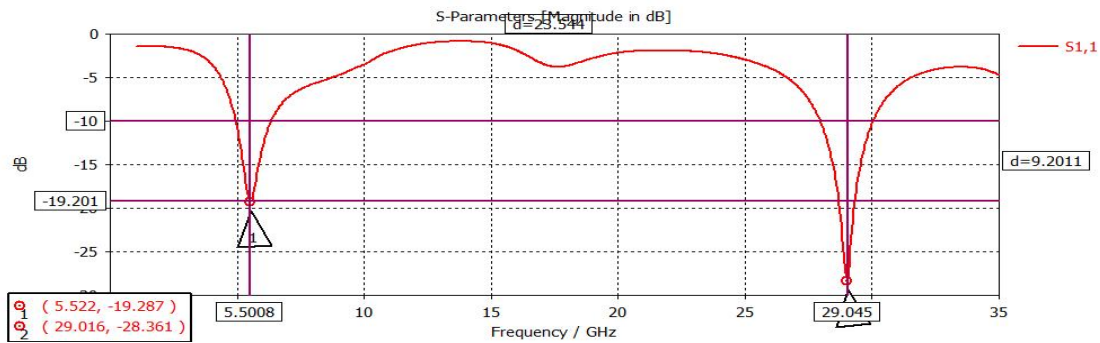


Fig.IV.14. Le coefficient de réflexion S_{11} en (dB) en fonction de la fréquence.

Le coefficient de réflexion S_{11} de l'antenne proposée de la Figure (IV.13) présente deux de fréquence de résonances l'une autour de 5.52 GHz avec un coefficient de réflexion -19.30 dB une bande passante de 1.4 GHz et l'autre autour de 29 GHz avec un coefficient de réflexion -1 -28.36 dB avec une bande passante de 1.97 GHz. Ce dernier montre que le S_{11} et les fréquences de résonance répondent aux exigences requises, et une perte de retour S_{11} est pratiquement acceptable.

IV.9.2. Bande passante

La Figure (IV.15) présente la bande passante pour la fréquence 5.52GHz.

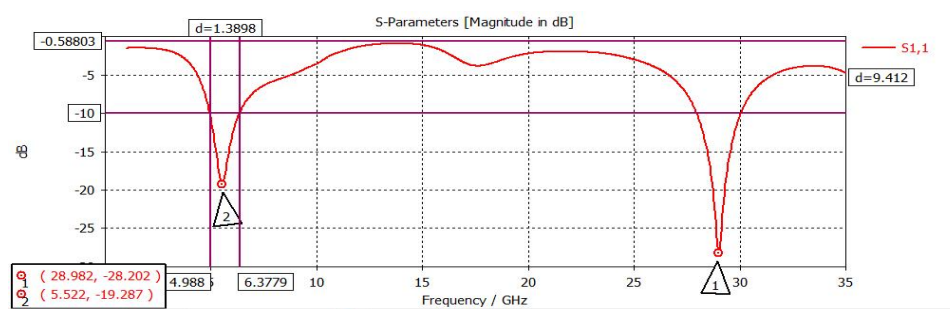


Fig.IV.15. Bande passante d'antenne pour la fréquence 5.2 GHz

La Figure (IV.16) présente la bande passante pour la fréquence 28 GHz.

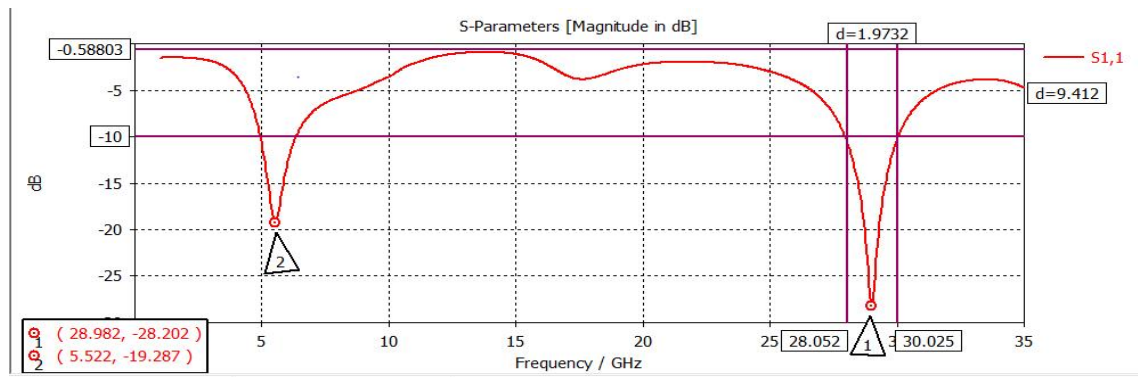


Fig.IV.16. Bande passante d’antenne pour la fréquence 28 GHz.

IV.9.3. Taux d’onde stationnaire (VSWR)

Le graphe du rapport d’onde stationnaire (VSWR) de l’antenne est présenté par la Figure (IV.17) Le niveau acceptable de VSWR pour la plupart des applications sans fil ne devrait pas dépasser idéalement 1. Comme on le voit sur la figure, la valeur de VSWR obtenue aux deux fréquences de résonances autour de 5.522 GHz et 28.982GHz est de 1 et ce qui est acceptable.

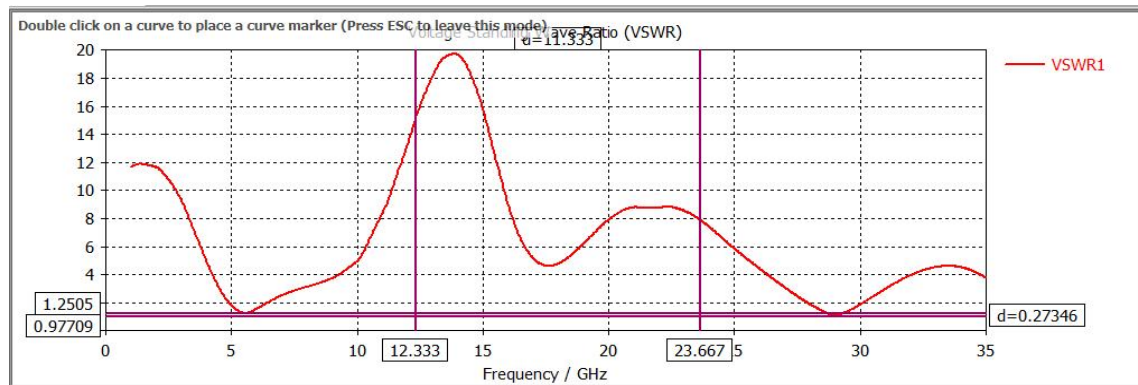


Fig.IV.17. Rapport d’onde stationnaire en fonction de la fréquence.

IV.9.4. Diagramme de rayonnement

Les figures ci-dessous présentent les diagrammes de rayonnement 2D simulé du gain et de la directivité, pour les fréquences 5.2 GHz et 28 GHz sont présenté par les Figure (IV.18) et Figure (IV.19).

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

a- La fréquence de résonance $f=5.2\text{GHz}$

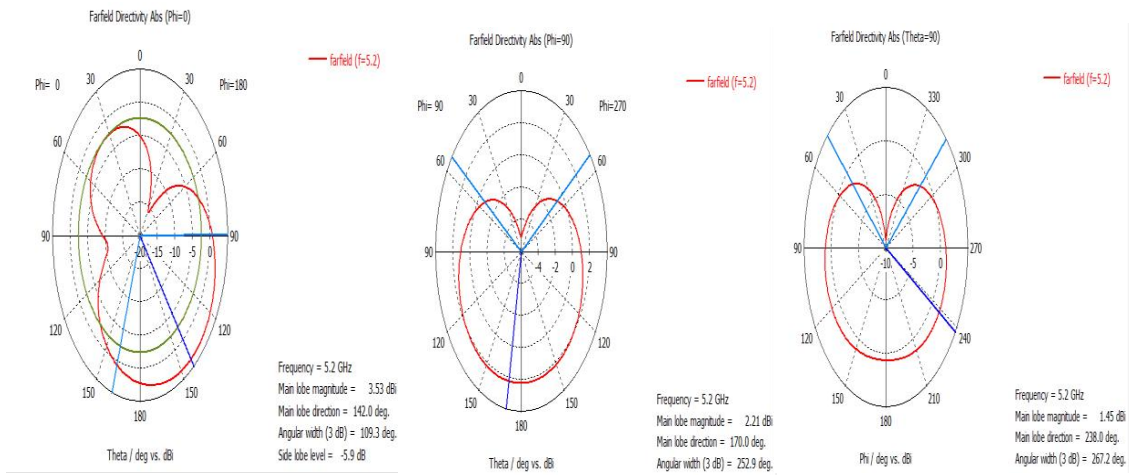


Fig.IV.18. Diagramme de rayonnement simulé pour les cas à Phi =0, Phi =90
Thêta=90 pour f=5.2GHz.

b- La fréquence de résonance f=28GHz

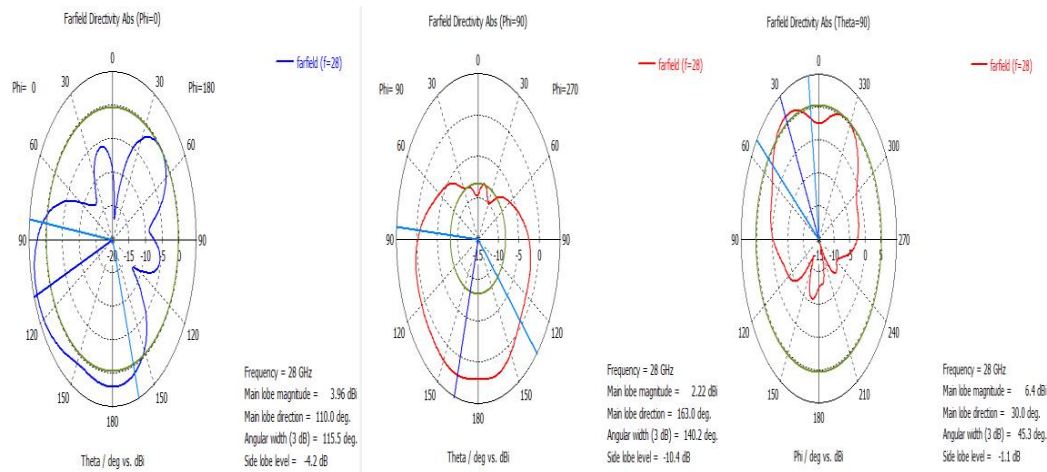


Fig.IV.19. Diagramme de rayonnement simulé pour les cas à Phi =0, Phi =90
Thêta =90 pour f=28GHz.

Ces gains sont relativement acceptables et peuvent toujours être améliorés avec un réglage. Les paramètres d'antenne peuvent être déterminés dans une autre étude pour obtenir plus de performance.

La **Figure (IV.20)** montre le diagramme de rayonnement 3D simulé du gain et de la directivité de l'antenne optimisée, à la fréquence de résonance 5.2 GHz.

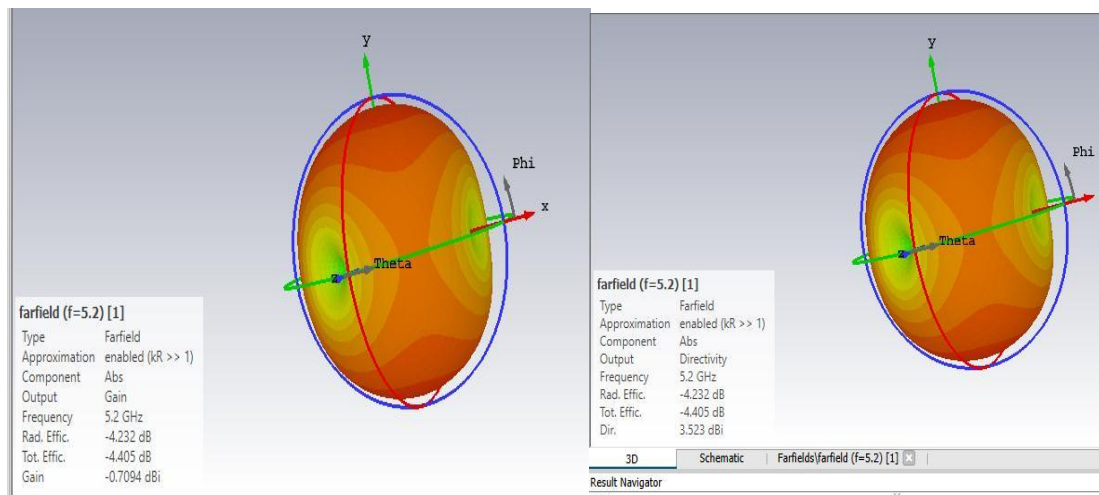


Fig.IV.20. Diagramme de rayonnement simulé en 3D pour 5.2 GHz

La **Figure (IV.21)** montre le digramme de rayonnement 3D simulé du gain et de la directivité de l'antenne optimisée, à la fréquence de résonance 28 GHz.

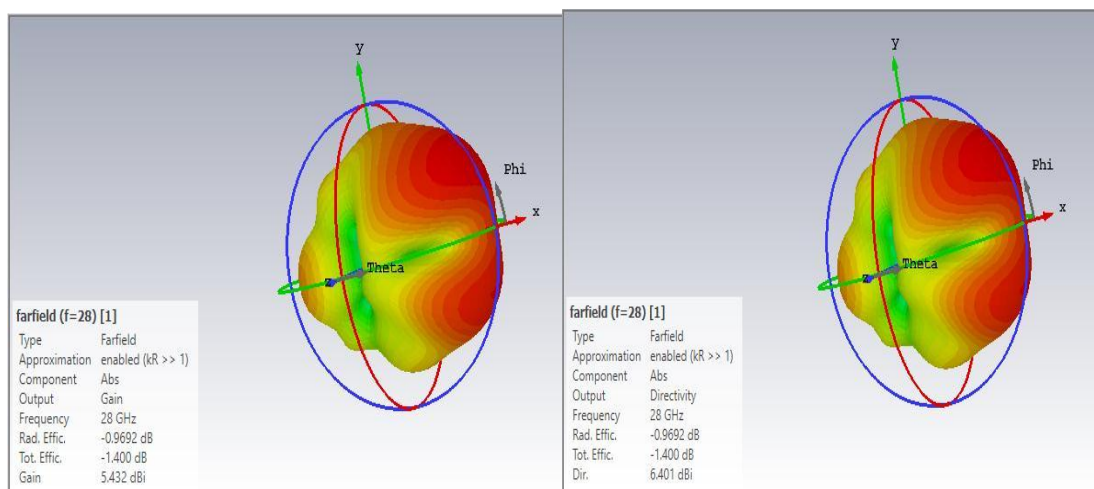


Fig.IV.21. Diagramme de rayonnement simulé en 3D pour 28 GHz.

L'antenne rectangulaire bi-bande a des résultats acceptables tels que la directivité et un bon rapport avant-arrière. Cette antenne rayonne dans la direction de l'axe z, avec un angle d'ouverture de $249,5^\circ$ dans la bande 5,2 GHz et de 60° dans la 28GHz bande, mais elle présente une bande passante étroite.

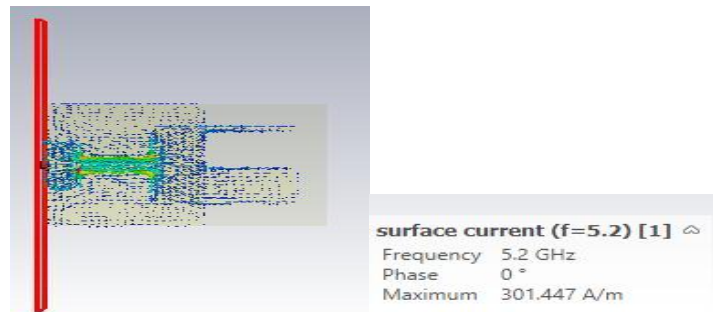
Comme cette antenne a des grandes dimensions, le courant de surface est relativement faible. Lorsque la bande passante est étroite, le facteur de qualité augmente.

Comme cette antenne présente une bande passante étroite, on souhaite réaliser un autre type d'antenne afin d'améliorer cet inconvénient.

IV.9.5. Courant de surface

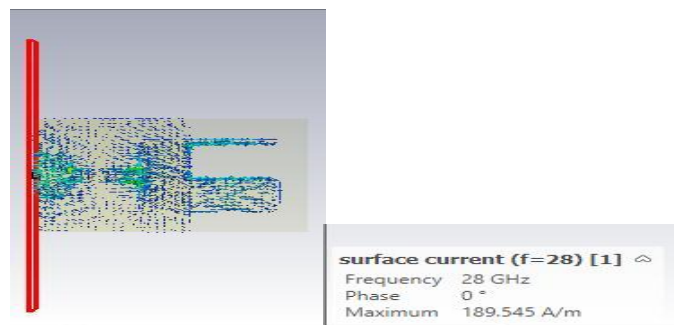
La **Figure (IV.22)** montre que le courant est distribué à la fois autour du patch et au milieu de la ligne. L'observation de la répartition du courant de l'antenne optimisée nous permet de mieux comprendre comment le courant est réparti sur la structure. On voit que le rayonnement est réparti sur les zones les plus critiques de l'antenne. Cela indique qu'il fonctionne correctement.

a. Pour $f=5.2$ GHz



(a)

b. Pour $f=28$ GHz



(b)

Fig.IV.22 : Courant de surface pour (a)- $f=5.2$ GHz et (b)- $f=28$ GHz

L'observation de la distribution du courant de l'antenne optimisée permet de mieux comprendre comment les courants sont répartis sur la structure. La (**Fig.IV.22**) montre que le courant est distribué autour de patch ainsi qu'au milieu de la ligne.

IV.9.6. Rendement

La **Figure (IV.23)** montre l'efficacité totale simulée par rapport à la fréquence.

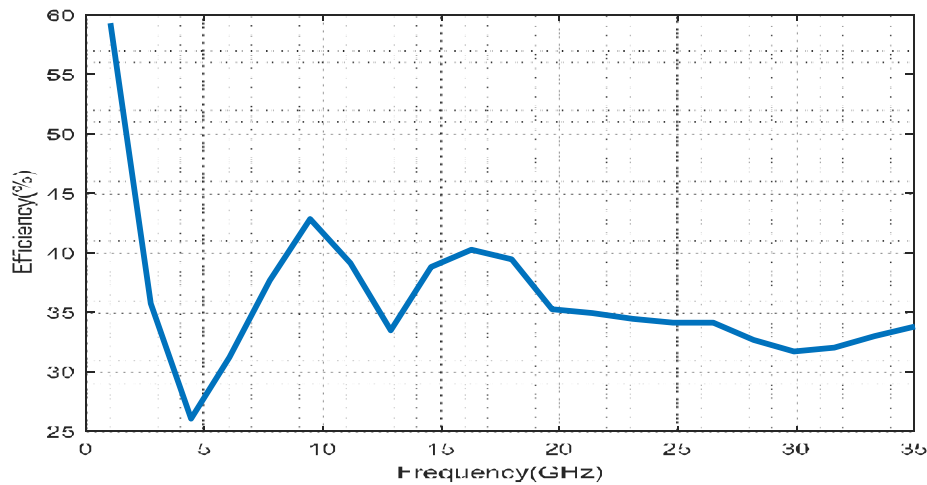


Fig.IV.23. Efficacité totale de l'antenne patch

On remarque que l'efficacité calculée est de l'ordre de 34 % pour la fréquence 5,2 GHz et 33 % pour la fréquence 28 GHz. Elles sont très bonnes est acceptable pour une antenne patch.

IV.9.7. Gain

Le tracé de gain réalisé pour l'antenne patch proposée est illustré par la Figure (IV.24). Cette figure représente, la variation du gain en fonction de la fréquence. On peut observer qu'il a subi des variations remarquables avec la variation de la fréquence et atteint sont maximum dans la marge de la bande passant de notre antenne.

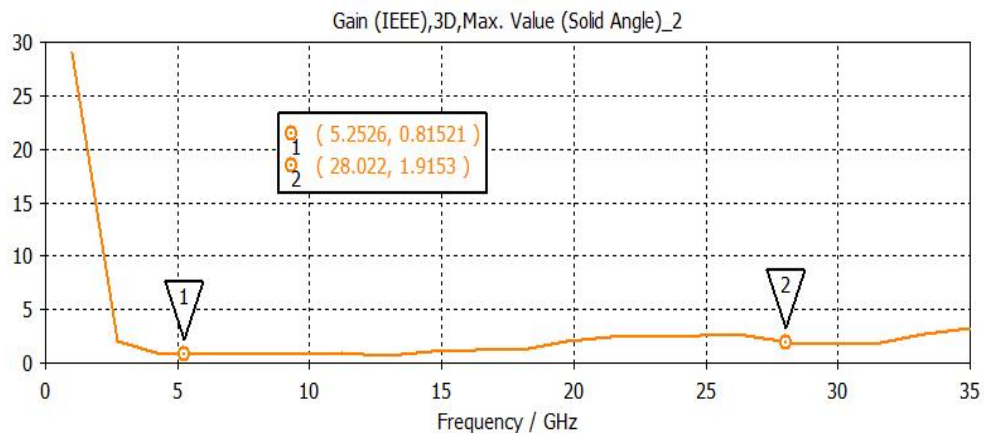


Fig.IV.24. Graphiques de gain réalisé en fonction de la fréquence pour 5.2 GHz et 28 GHz

Par les courbes de la Figure (IV.24), on peut observer que le gain est d'environ 0,15 dB à la fréquence de 5,2 GHz et environ 2dB pour la deuxième fréquence.

IV.9.8. Directivité

Le tracé de la directivité pour l'antenne patch proposée est illustré par la Figure (IV.25).

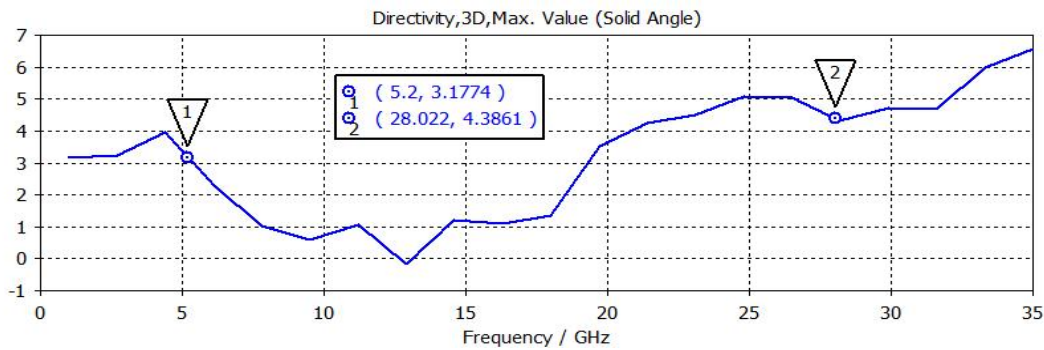


Fig.IV.25. Graphiques de directivité en fonction de la fréquence pour 5.2 GHz et 28 GHz

A travers les courbes de la Figure (IV.25), on peut observer que la directivité est d'environ 3.1 dB à la fréquence de 5,2 GHz et environ 4.7dB pour la deuxième fréquence 28 GHz.

Calcul du rendement :

$$\eta(\%) = 10^{\left(\frac{Gain(db) - Directivity(db)}{10}\right)} + 100 \quad (VI.4)$$

IV.10. Etude comparatif

Grâce à cette comparaison, nous essayons d'évaluer les résultats de notre travail par rapport à d'autres travaux, pour dire que nos résultats sont prometteurs.

L'article choisi qui est utilisé dans notre comparaison porte le titre "conception et réalisation d'une antenne 5G ", c'est-à-dire ; « conception et réalisation d'une antenne Patch bi-band 5 GHz et 28 GHz pour des applications 5G », avec CST MWS1. Nous avons choisi cet article car il propose un modèle d'un réseau de patch fonctionnant aux ondes millimétriques et précisément aux mêmes fréquences utilisées dans notre modèle proposé. Le tableau suivant résume les points de comparaison.

Tableau (IV.4). Comparaison entre notre étude et l'étude référencée [67].

Paramètres	Nos résultats	Les résultats de [67]
Coefficient de réflexion S11 (dB)	-18 et -28 dB	-17 et -22dB
Fréquence de résonance (GHz)	5.522 et 28.982GHz	7.4532 et 28.023GHz
VSWR	< 2	< 2
Directivité (dB)	3.523 et 6.401	2.956 et 6.079
Dimensions (patch)	4.50 x 5.55	3.32 x 6
Substrat	(FR-4) avec une hauteur de 1.6mm et $\epsilon_r=4.3$	(FR-4) avec une hauteur de 1.6mm et $\epsilon_r=4.3$

On peut constater qu'à partir de cette comparaison que les caractéristiques de l'antenne patch ont donné de meilleurs résultats et sont plus proches des exigences du téléphone mobile 5G (meilleures performances en termes de radiographie, directivité, gain et bande passante). Et surtout une directivité élevée allant jusqu'à 3.523 dB et 6.401 dB pour un débit élevé. Nous notons également que la taille de l'antenne est aussi petite que notre taille d'antenne.

IV.11. Les étapes de réalisation de l'antenne

Le travail est conclu par une réalisation pratique du circuit de l'antenne.

IV.11.1. Matériel nécessaire

- ❖ Plaque d'époxy pré-sensibilisé double face La scie à métaux pour découper l'époxy.
- ❖ Du perchlore de fer liquide.
- ❖ Une insoleuse (par défaut une simple ampoule de 100 Watts avec un plaque verre peu convenir).
- ❖ Hydroxyde de sodium (NaOH), également appelé soude caustique.

IV.12. Les étapes de la réalisation du circuit imprimé

IV.12.1. Le typon (étude du tracé).

Un typon est une image du circuit imprimé. Les pistes sont en noir et le reste doit être transparent à la lumière.

Notre méthode est d'exposer au rayons ultraviolet le typon sur une feuille transparente pendant 120 secondes **Figure (IV.26)**.



Fig.IV.26. Le typon du circuit.

IV.12.2. Insoleuse/insolation

Une insoleuse est un appareil fort simple, doté de très peu de composants, que l'on peut parfaitement fabriquer soi-même. Ce type d'appareil est doté de 1 à 4 tubes rayonnant des UV, et est destiné à insoler des plaques de circuit imprimé pré sensibilisées (sous-entendus sensibles aux UV) Figure (IV.27).



Fig.IV.27. Insoleuse double face pour circuit imprimé.

IV.12.2.1. Utilisation de l'insoleuse

Découper la plaque d'époxy à la taille du typon en laissant une marge de 0.5 à 1 et bien placer le typon sur la vitre de l'insoleuse (Vue cotée composantes). Retirer la pellicule protectrice de la plaque et placer le côté vert de la plaque sur le typon dans l'insoleuse et fermez le capot. - Régler la minuterie sur la valeur 4.

IV.12.3. Développement du Patch

Le révélateur doit être mis dans une bassine en plastique (PVC) ou en verre, le temps de révéler le circuit imprimé, Le temps de révélation peut varier de quelques secondes à quelques dizaines de seconde, mais cela reste rapide dans tous les cas, et est parfaitement visible. Pendant qu'on remue (délicatement) la bassine. On voit apparaître petit à petit le cuivre nu (couleur rose) aux endroits exposés aux UV, c'est à dire aux endroits qui ne devront pas subsister à l'étape de gravure finale Figure (IV.28).

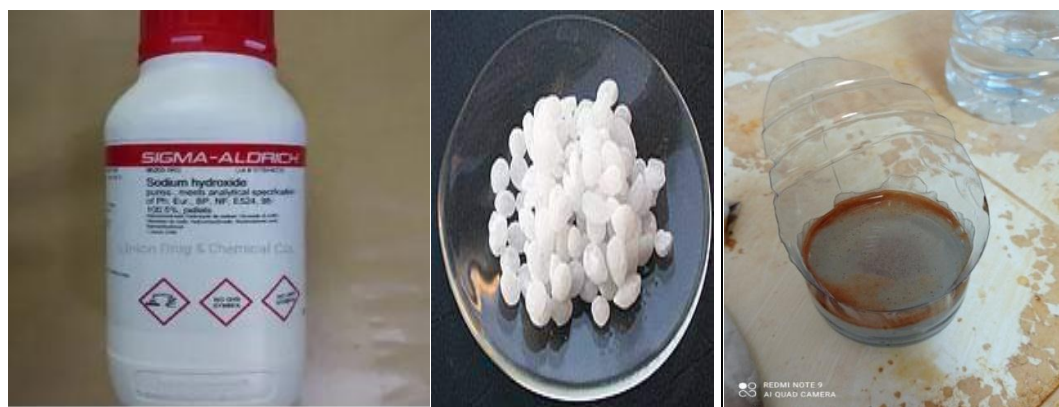


Fig.IV.28 : Etape de révélation à l'aide d'hydroxyde de sodium.

Ensuite, nous le sortons et le mettons dans un récipient en plastique à l'intérieur du perchlore de fer liquide. Alors que nous bougeons le bassin progressivement. Où le laiton disparaît et seule la forme que nous avons conçue apparaît **Figure (IV.29)**.



Fig.IV.29 : Etape de révélation à l'aide de perchlore de fer liquide.

Après plusieurs minutes, nous le sortons du récipient en plastique contenant du perchlore de fer liquide. Où le laiton disparaît et seule la forme que nous avons conçue apparaît **Figure (IV.30)**.

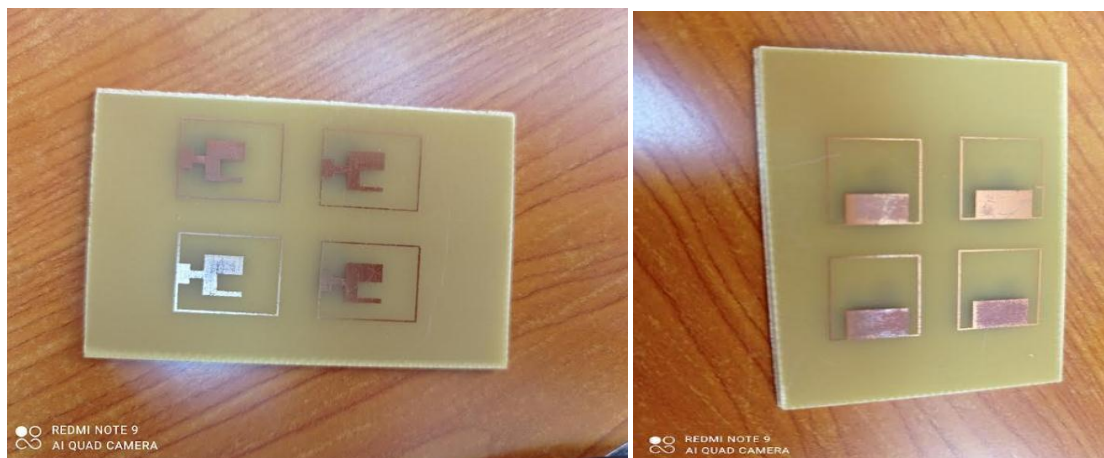


Fig.IV.30. Après l'avoir sorti de perchlore de fer

IV.13. Le prototype réalisé

Nous avons réalisé un prototype d'antenne Patch miniature bi-bande fonctionnant sur des fréquences 5 GHz et 28 GHz pour les applications 5G Comme indiqué sur la Figure IV.31.

Cette dernière montre que notre antenne est très petite avec un patch de dimension de l'ordre

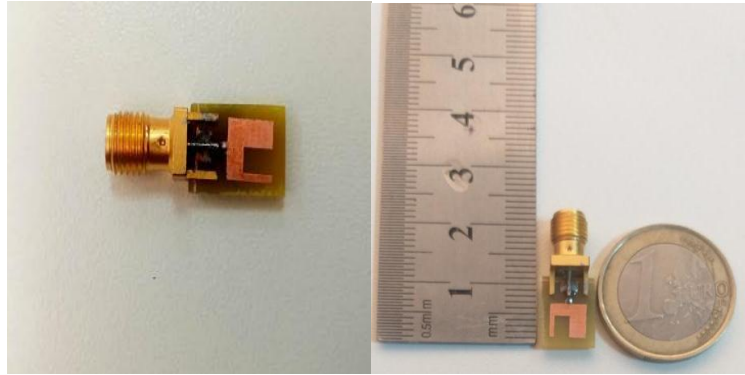


Fig.IV.31. Comparaison des dimensions avec 1 Euro et avec une règle

IV.14. Appareil de mesure analyseur de réseaux

L'analyseur de réseaux (Rohde&Schwarz R&S ZNB20 Vector Network Analyser) de 10 MHz à 20 GHz fréquence limite de l'analyseur sert à mesurer les paramètres S et l'impédance d'entrée de l'antenne, voir la figure (IV.32)

Dans la majorité des cas, l'antenne est liée à l'analyseur de réseaux à travers des câbles et des connecteurs qui rajoutent au signal un affaiblissement et un déphasage. Alors, il faut éliminer l'influence de cette liaison. L'opération qui permet d'éliminer les erreurs systématiques dues au calibrage, c'est une opération qui permet de compenser les erreurs par égalisation. Elle se fait en liant au bout de la liaison, au lieu de l'antenne, une charge assimilée à un circuit ouvert, une charge de 50ohm et enfin un court-circuit.



Fig.IV.32. Analyseur de réseau vectoriel

IV.14.1. Mesures expérimentales

Mesure du coefficient de réflexion

Le coefficient de réflexion est mesuré à l'aide de l'analyseur de réseau vectoriel (Rohde & Schwarz R & S ®ZNB20 Vector Network Analyser)

Les résultats expérimentaux sont illustrés sur la figure (IV.33)

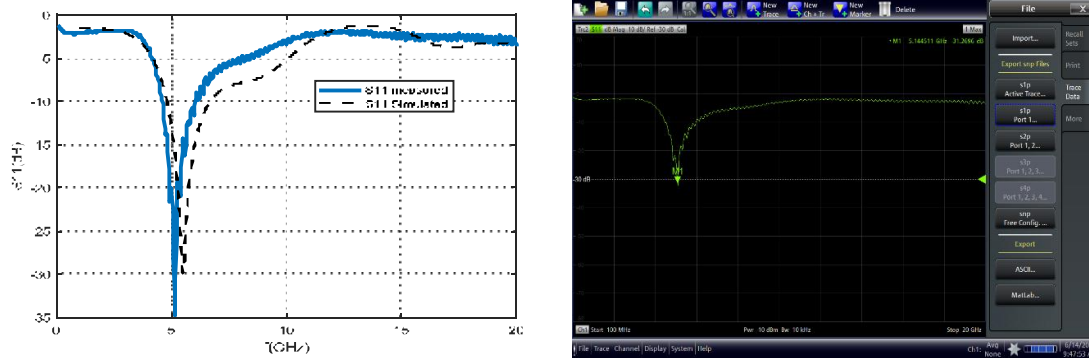


Fig.IV.33. Comparaison entre les résultats simulé et réalisé du S11

On remarque que les résultats expérimentaux sont presque identiques aux résultats de la simulation. Cette petite différence peut s'expliquer par des influences externes sur l'antenne réalisée.

IV.15. Conclusion

Les antennes imprimées, bien qu'elles présentent des géométries simples, exigent des études approfondies théoriques et numériques dans leur conception. L'utilisation d'un logiciel adapté pour la conception et caractérisation d'une antenne est une étape incontournable dans un souci de gain de temps et d'optimisation de la structure aux paramètres désirés.

Dans ce chapitre nous avons présenté les résultats de simulation et de réalisation d'une antenne Patch bi-band miniature pour les applications 5G, les techniques de miniaturisations, et les techniques d'optimisation nous ont abouti à des bons résultats répondant aux exigences demandées. La conception de cette antenne a été faite en utilisant le logiciel CST studio.

Dans la première partie, les étapes de la conception d'une antenne bi-band résonnante à la fréquence d'intérêt sont présentées. Les résultats présentés concernant les caractéristiques les plus importantes de l'antenne, tels que le coefficient de réflexion, le diagramme de rayonnement, le gain et le rapport d'onde stationnaire (ROS) de l'antenne ont été éclairci.

Finalement, les résultats obtenus ont été analysés et comparés à un travail de recherche qui propose de son côté un récent modèle d'antenne fonctionnant dans la même bande de fréquence.

Nous avons procédé à la réalisation du modèle, et décrit les outils utilisés dans cette partie, puis nous avons réalisé une antenne patch miniature double bande fonctionnant à 5,2GHz et 28GHz.

Dans la dernière partie on a procédé à la réalisation du modèle, tous d'abord nous avons décrit les instruments utilisés dans cette partie, ensuite nous avons comparé les résultats de simulation et de mesure en termes de coefficient de réflexion S_{11} . Nous pouvons dire qu'il y a une petite différence entre les résultats de simulation et pratique, cette différence s'explique par les influences extérieures sur l'antenne réalisée ou les problèmes provoqués par la machine de gravure.

Conclusion générale

Conclusion générale

Dans ce mémoire de fin d'étude, nous nous sommes intéressés à l'étude et à la conception d'une antenne patch bi-bande de la cinquième génération en fréquence et en diagramme de rayonnement. La réalisation pratique de cette antenne a fait part de ce travail. Une comparaison éventuelle des résultats de simulation qui ont été faite par le logiciel CST et les résultats obtenus pratiquement vont nous aider de s'assurer que l'antenne que nous avons réalisée travaille dans cette gamme de fréquence. A cet effet, dans le premier chapitre un panorama général a été dédié sur l'évolution de la technologie jusqu'à la 5ème génération. Nous avons présenté un historique sur les différentes générations de technologie de télécommunications, ensuite nous nous sommes passés à éclaircir l'objectif de la 5G. Nous avons traité également la vision et l'architecture de la 5G, les fréquences utilisées pour cette dernière. Une présentation de l'antenne de la 5G a été donnée car cette dernière représente l'élément le plus important autour duquel se base toute la technologie 5G. Les différentes exigences de la 5G sont aussi prises en considération, et à la fin nous avons cité les avantages et les inconvénients de la 5G. Ensuite dans le deuxième chapitre nous avons abordé, en premier lieu, la définition des antennes. Nous avons donné ensuite leurs caractéristiques et domaines d'utilisation, leurs avantages ainsi que leurs inconvénients. Finalement, nous avons également abordé brièvement la bande millimétrique et les équations de Maxwell afin de donner le lien théorique des antennes patch. Le troisième chapitre est réservé au logiciel de simulation CST. Ce dernier a été décrit en détails afin de savoir utiliser toutes ces composantes pour pouvoir simuler et obtenir des résultats et à base de ces résultats savoir optimiser afin d'améliorer les résultats obtenus ou les performances de notre antenne. Dans le quatrième chapitre une description de la réalisation pratique de l'antenne a été présentée ainsi que l'étude et la conception d'une antenne patch fonctionnant dans la gamme des fréquences allant de 6 GHz à 29 GHz. L'analyse des résultats obtenus par simulation ont fait part de notre travail. Nous avons constaté que les résultats de mesure obtenus pratiquement sont similaires avec les résultats de simulation avec des petites différences qui peuvent être expliquées par une incertitude dimensionnelle lors de la construction de l'antenne patch.

Références bibliographiques

Références bibliographiques :

- [1] **ALJOUAT Mahfoud, BOUZAKARIA Ferialle** (2020/2021) «ETUDE ET CONCEPTION D'UNE ANTENNE MILLIMETRIQUE MULTISERVICE POUR APPLICATION 5G » MASTER ACADEMIQUE, Systèmes des Télécommunications, Université SAAD DAHLAB de BLIDA 1.
- [2] **BOUAKA Asma, TEMMAR Louiza** (2017/2018) «Simulation d'un réseau d'antennes pour les mobiles 5G avec CST Microwave Studio» MASTER ACADEMIQUE, Systèmes des Télécommunications, UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA.
- [3] **R.Sapakal, S. Kadam** .2013 « 5G Mobile Technology » Journal international de recherche avancée en génie informatique et technologie volume 2, p. 568-571, 2013.
- [4] **Shailesh D. Nandgaonkar S.K. Bodhe, B.G. Hogade** .2014« Beamforming Techniques for Smart Antenna using Rectangular » Journal international du génie électrique ET informatique, volume 4, numéro 2, p. 257-264, 2014.
- [5] **S.SunY.T.S. Rappaport** .2013 « Multi-beam antenna combining for 28 GHz cellular link Improvement in urban environments » Journal international, volume 8, p. 12, 2013.
- [6] **J.G. Andrews, S. Buzzi, W. Choi, S. Hanly, A. Lozano, A. C. Soong, y J. C. Zhang**, 2014« What will 5G be ? » IEEE les systèmes de communication, 12 mai 2014.
- [7] **T.S. Rappaport, S. Sun, R. Mayzus, H. Zhao, Y. Azar, K. Wang, G. N. Wong, J. K.Schulz, M. Samimi, y F. Gutierrez**. 2013« Millimeter Wave Mobile Communications for 5G Cellular : It Will Work ! » IEEE Journal international, volume 1, p 335-349, 2013.
- [8] **P .Latina** « Comienza China pruebas de tecnologia 5G » numéro 7, La Habana, Cuba, 5 janvier 2016.
- [9] **M. H. Abu Saada** « Design Of Efficient Millimeter Wave Planar Antennas For 5g Communication Systems » Mémoire de Master, Université Islamique de Gaza 2017.
- [10] **SERIR Fatima Zohra**, (2020/2021) «Conception d'antennes pour les mobiles 5G», Présenté pour l'obtention du diplôme de MASTER, Systèmes et Télécommunications, UNIVERSITE ABOU BAKR BELKAID, TLEMCEM.
- [11] **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.
- [12] **Abdoulaye Chaibo, A. Ngom**, Mahamoud Youssouf Khayal, Kharouna Talla, Aboubaker Chedikh Beye “A Novel Bow-Tie Antenna with Triple Band- Notched Characteristics for UWB Applications” Journal of Electromagnetic Analysis and Applications, 2016, 8, 271-282.
- [13] **International Telecommunications Union Radiocommunication Sector (ITU-R)**, “Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond,” 2015.

- [14] **E. C. Strinati and T. Choi**, “The first 5G system PoC in conjunction with the PyeongChang winter Olympics,” 2018.
- [15] **Assane Ngom**. Conception de petits réseaux d’antennes reconfigurables ou ”Small Cells” pour le standard 5G. Electronique. COMUE Université Côte d’Azur (2015 - 2019); Université Cheikh Anta Diop (Dakar), 2019.Français .NNT :2019AZUR4027 .tel-02492090.
- [16] **E.Hossain, M. Rasti, Il. Tabassum, A. Abdel Nasser** « Evolution towards 5g Multi-Tier Cellular Wireless Networks: An Interference Management Perspective » IEEE Wireless Communications Conference 17 Feb 2014.
- [17] **W. Xiang, K. Zheng, X. Sherman** « 5g Mobile Communications » Livre, 14 octobre 2016.
- [18] **FEI Hu** « Opportunities in 5g Networks a Research and development Perspective » Livre, 5 avril 2016.
- [19] **A.Osseiran, J. F. Monserrat, P. Marsch** « 5g Mobile and Wireless communications Technology » Livre, Juin 2016.
- [20] www.lcbigdata.fr/5g-tout-savoir.
- [21] **E. G. Larsson**, “Massive MIMO for Next Génération Wireless Systems,” IEEE Commun. Mag., vol. 52, no. 2, pp. 186-195, 2014.
- [22] (<https://www.anfr.fr/petites-antennes>). ANFR: l’agence national des fréquences.
- [23] **N.Meer/Zafarullah,K.UllahMagsi** «A Review Of 5G Technology: Architecture, Security and wide Application»,vol. 7.No.05,May 2020.
- [24] **Remidi Assian Et Sayeh Basma** (2020/2021) «Conception d’une antenne patch pour la récupération de l’énergie RF sur les réseaux mobiles de la 5G» MASTER ACADEMIQUE, Systèmes des Télécommunications, Université Akil Mohand Oulhadj – Bouïra.
- [25] **Libby Allen** “5G, Internet of Things (IoT)”, on JANUARY 7, 2019.
- [26] **T. L. Marzetta**, “Noncooperative Cellular Wireless with Unlimited Numbers of Base Station Antennas,” IEEE Trans. Wirel. Commun., vol. 9, no. 11, pp. 3590-3600, Nov. 2010.
- [27] **Conception de simulation de modèle de systèmes d’antenne intelligente pour les systèmes de réseau sans fil 5G** ,novembre 2018 ,DOI : 10.5772/intechopen.79933 ,Dans le livre : Array Pattern Optimization [Titre de travail], Auteurs: Vincenzo Inzillo ; Floriano De Rango(Université de la Calabre) ;Luigi Zampogna ; Alfonso Ariza Quintana (Université de Malaga)
- [28] **François MAGNE**. «Télécommunications haut débit en ondes millimétriques»,10 mai 1998.
- [29] **Jaco du Preez et Saurabh Sinha** : Introduction to the world of millimeter-wave systems. In Millimeter-Wave Antennas: Configurations and Applications, pages 1- 18. Springer, 2016.

- [30] **J. Qiao**, «Enabling Millimeter Wave Communication for 5G Cellular Networks: MAClayer Perspective», University of Waterloo, 2015.
- [31] **L. Atzori, A. Iera, and G. Morabito**, “The Internet-of-Things: A survey,” 4 aDIEE, University of Cagliari, Italy University “Mediterranea” of Reggio Calabria, Italy Comput.
- [32] **J. Gubbi, R. Buyya, S. Marusic, and M. Palaniswami**, “Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions,” *Future Gener. Department of Electrical and Electronic Engineering, the University of Melbourne, Vic - 3010, Australia Comput. Syst.*, vol. 29, no. 10, pp.1645-1660, 2013.
- [33] **W. Robert, Heath Jr, Angel Lozano** « Five Disruptive Technology Directions For 5g » article IEEE Communications Février 2014.
- [34] **J. Rodriguez** « Fundamentals Of 5g Mobile Networks » Livre, Institut des Télécommunications, Aveiro, Portugal, 2015.
- [35] **DERRIDJ Kaci Anis GHERRAS Noureddine**, “Conception et développement d’un outil de Dimensionnement de réseau Packet Core Virtualisé dédié pour la 4G et 5G “, Date de soutenance 07/2016, Université mouloud Mammeri de Tizi Ouzou .
- [36] “**Mobile-Edge Computing - Introductory Technical White Paper**,” Sep-2014. [Online]. Available:https://portal.etsi.org/portals/0/tbpages/mec/docs/mobileedge_computing_-_introductory_technical_white_paper_v1%2018-09-14.pdf. |Accessed: 16-Mar-2017
- [37] **D. Number, P. Name, and T. I. Society**, “Scenarios , requirements and KPIs for 5G mobile and wireless system Scenarios , requirements and KPIs for 5G mobile and wireless system,” 2013
- [38] **NGMN 5G Alliance**, “5G White Paper,” *Deliverable*. 2015.
- [39] **5G white paper**, “5G Vision , Requirements , and Enabling Technologies,” *Deliverable*, vol. 2.0, pp. 10-14, 2016.
- [40] **J. G. Andrews et al.**, “What Will 5G Be ?,” vol. 32, no. 6, pp. 1065-1082, 2014.
- [41] **A. Djerda ,I.Hamdani** /«Conception d’antennes planaires à base de métamatériaux et son application pour la 5ème generation-5G» Mémoire de Master ,l’Université de Abou bakrBelkaïd, Tlemcen , Algérie, 2020.
- [42] **Constantine A. Balanis**. *Antennas Theory - Analysis and Design. 3rd Edition*. John Wiley&Sons, Inc, 2005.
- [43] **Mourad HASSAD** (2008/2009)«MODÉLISATION D'UNE ANTENNE PATCH RÉALISÉE SUR UN SUBSTRAT À TENSEURS DE PERMITTIVITÉ ET DE PERMÉABILITÉ DIAGONAUX » Micro-ondes pour Télécommunication , Mag is t e r e n E l e c t r o n i q u e, université Batna
- [44] **livre LES ANTENNES Théorie**, conception et application Préface de Maurice Bellanger

- [45] Thèse de doctorat, Mondher LABIDI, ‘*Conception et application des métamatériaux pour des circuits RF*’, Ecole Supérieure des Communications de Tunis, 2012.
- [46] Thèse de doctorat, Mickaël Jeangeorges, ‘*Conception d’antennes miniatures intégrées pour solutions RF SiP*’, Électronique, Université de Nice-Sophia Antipolis, 2 Déc. 2010.
- [47] Farouk Chetouah, Salih Aidel, Nacerdine Bouzit, Idris Messaoudene, “*A miniaturized printed monopole antenna for 5.2-5.8 GHz WLAN applications*”, Int J RF Microw Comput Aided Eng., 2018.
- [48] F. Chetouah, N. Bouzit, I. Messaoudene, S. Aidel, M. Belazzoug, Y. Braham Chaouche, “*Miniaturized Wideband Printed Rectangular Patch Antenna for X- and Ku-Bands*”, Pp. 847, 13th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC), , 26-30 June 2017, Valencia, Spain.
- [49] Thèse de doctorat, Maria De Los Angeles Castillo Solis, ‘*Dielectric resonator antennas and bandwidth enhancement techniques*’, Université de Manchester, 2014.
- [50] Kraus, J.D. [1950], “*Antennas*,” New York-Toronto-London Mc Graw-Hill Book company, Electrical and Electronic Engineering Series, Frederick Emmos Terman, Consulting Editor; W.W Harman and J.G Truxal, Associate Consulting Editors; ISBN 07-035410-3; pp 465.
- [51] Rachmansyah, Antonius Trianto, A. Benny Mutiara, “*Designing and Manufacturing Microstrip Antenna for Wireless Communication at 2.4 GHz*”, International Journal of Computer and Electrical Engineering, Vol. 3, No. 5, Oct. 2011.
- [52] Ribhu Abhusana Panda, Upasana Patnaik, Nibedita Bisoyi, Kiran Tripathy, “*Microstrip Patch Antenna Design at 5.2GHz*”, IJISCI, Vol. 7, Issue No.4, 2017.
- [53] F. Chetouah, N. Bouzit, I. Messaoudene, S. Aidel, M. Belazzoug, Y. B. Chaouche, “*Miniaturized printed rectangular monopole antenna with a new DGS for WLAN applications*”, International Symposium on Networks, Computers and Communications (ISNCC), Marrakech, Morocco, 16-18 May 2017.
- [54] <https://qph.ec.quoracdn.net/main-qimg-329c8b8d3ce6e67396b1f30208e89b00>
- [55] A. A. Salih, M. S. Sharawi, “*Highly miniaturized dual band patch antenna*”, 10th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), Davos, Switzerland, 10–15 April 2016.
- [56] <http://qucs.sourceforge.net/tech/node86.html>
- [57] Robert A. Sainati, “*CAD of Microstrip Antennas for Wireless Applications*”, Artech House Antennas and Propagation Library, Pp. 5, 1996.
- [58] Kai-Fong Lee, Kin-Fai Tong, “*Microstrip Patch Antennas—Basic Characteristics and Some Recent Advances*”, Proceedings of the IEEE, Vol. 100, No. 7, Pp. 2169 – 2180, July 2012.

- [59] Zhi Ning, Chenand Michael, Y. W.Chia, “*Broadband Planar Antennas: Design and Applications, Chapter two: Broadband Microstrip Patch Antennas*”, John Wiley & Sons, 2006.
- [60] **Mémoire de maître ès sciences ‘Etude et réalisation des antennes ultra large bande à double polarisation’**, Rabia Yahya, Université du Québec INRS- ÉMT, 2011.
- [61] **BERROUA Nora et GIERIS Akila (2016/2017) «Etude paramétrique et simulation de l’antenne patch sous CST» MASTER ACADEMIQUE, Télécommunication et réseaux, UNIVERSITE MOULOU MAMMERI DE TIZI-OUZOU.**
- [62] **ADIL KAMIL,** « conception d’une antenne patch ultra-large bande (3.1 ghz-10.6 ghz) », Université du Québec, 2011.
- [63] **SIZINE Fetta (2016/2017) «Etude paramétrique de l’antenne YAGI sous le logiciel CST» MASTER ACADEMIQUE, Télécommunication et réseaux, UNIVERSITE MOULOU MAMMERI DE TIZI-OUZOU.**
- [64] **BELABAS Lynda et CHEMMOUN Lila (2017/2018) «Miniaturisation de l’antenne PATCH sous CST» MASTER ACADEMIQUE, Réseaux et Télécommunication, Université Mouloud MAMMERI de Tizi-Ouzou.**
- [65] **BENAOUDIA Samir et BERROUCHE Kenza (2013/2014) «Simulation d’antennes sous CST (Computer Simulation Technology) » MASTER ACADEMIQUE, Télécommunications et Réseaux, UNIVERSITE MOULOU MAMMERI DE TIZI-OUZOU.**
- [66] **W. Roh et al.,** “Millimeter-Wave Beamforming as an enabling technology for 5G cellular communications: theoretical feasibility and prototype results”, *IEEE Comm. Magazine*, pp. 106-113, Feb. 2014.
- [67] **Haddi Bakhti; Miloud Bentoumi; Messaoud Mayouf; Aimad-Eddine Debbi.** Design of a miniature bi-band patch antenna with asymmetrical feedline for 5G applications. 2022 International Conference of Advanced Technology in Electronic and Electrical Engineering (ICATEEE). 10.1109/ICATEEE57445.2022.10093102