

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



Projet de Fin de Cycle
Pour l'obtention du diplôme de Master en Réseau de
Télécommunication
Domaine : SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE
Filière : Télécommunication
Spécialité : Réseaux Et Télécommunication

Thème

Antenne Patch Pour La 5G Millimétrique

Présenté Par :

- 1) Si Ali Habib
- 2) Benamara Imene

Devant les jurys :

Dr.BENGHENIA Hadj Abdelkader	MCB UAT.B.B (Ain Temouchent)	Président
Dr.MERADI Abdelhafid	MCB UAT.B.B (Ain Temouchent)	Examineur
Dr.MOULESSEHOUL Wassila	MCB UAT.B.B (Ain Temouchent)	Encadrante
Mlle MOULFI Bouchra	Doctorante UAT.B.B (Ain Temouchent)	Co-Encadrante

Année universitaire 2022/2023

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Remerciment



En préambule à ce mémoire nous remercions ALLAH qui nous aidé et nous a donné la patience et le courage, la volonté pour accomplir ce mémoire.

Nous tenons à remercier très chaleureusement notre encadrante "Mme.Moulessehoul " qui nous apermis de bénéficier de son encadrement et pour tous ses efforts et ses précieux conseils pour nous tout au long de la réalisation de notre travail de recherche. Aussi sans oublier notre Co-encadrante" Mlle.Moulfi" pour son expérience qu'elle nous a fait partager, sans elle ce travail ne serait pas terminé.

Nous aimerions aussi d'exprimer nos sincères remerciements aux membres du jury « Dr. BENGHENIA Hadj Abdelkader » et « Dr. MERADI Abdelhafid » pour leurs temps qu'ils nous ont donné d'examiner et juger ce travail.

Nous exprimons de même notre gratitude envers nos chères familles et tous ceux qui nous ont accordé leur soutien, leur gentillesse et leur engagement.

Enfin nous adressons notre remerciement à nos enseignants durant les cinq années passées et tous nos collègues et notre promotion de Master, Spécialité : Réseaux et Télécommunication durant l'année 2023.

Dédicace



Au début, je remercie Allah qui m'a aidé à terminer ce travail et à terminer ma carrière universitaire.

C'est avec une joie que je dédie ce travail à ceux qui m'ont été une source d'inspiration et de volonté.

A ma mère et mon père et mes frères.

Un grand merci à « Dr.MOULESSEHOUL Wassila » et « Mlle MOULFI BOUCHRA » de nous soutenir et de nous aider dans cette recherche.

A toute mes amis en Mouvement National Des étudiants Algérien Nous avons beaucoup appris et passé de bonnes journées.

Une dédicace spéciale à tous mes amis : Amine, Amine et Hichem ,Halim,Malik , Walid , Fethi , Zahira ...

Habib

Dédicace



je remercie Allah qui m'a aidé à terminer ce travail et à terminer ma carrière universitaire.

Je dédie ce travail A ma mère et ma grande mère souhaitant qu'elle soit avec moi en ce moment.

A mon père, ma belle-mère et mon oncle et sa femme pour leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études.

A mes frères et mes sœurs : Meriem, khadija, Mohamed, Abderahman, Marwa et Romaisa.

A toute la famille : Abdellali, Benamara et Hassani.

A tous mes amis : Asma, Abir, Chahinez et ikram.

Je vous dis merci énormément.

Imene

Résumé:

En raison d'une latence plus faible, d'une vitesse de transmission plus élevée, d'une bande passante plus large et de la possibilité de se connecter avec plusieurs appareils plus nombreux, la cinquième génération (5G) millimétrique est en cours de développement et qui reste bien meilleur que les autres générations.

Dans cette étude, une antenne patch micro-ruban fonctionnant à 28GHz est étudiée et modélisé pour la future 5G millimétrique de communication. Le substrat utilisé dans ce travail pour l'antenne est Rogers. Le diélectrique du substrat est de 2.2 et l'épaisseur est 0.51 mm. Le logiciel CST Microwave STUDIO est utilisé pour notre simulation car il est pratique de l'utiliser. Une antenne imprimée a été proposé pour des meilleures performances pour la 5G millimétrique.

Mots clés : la cinquième génération (5G), les antennes patch , CST Microwave Studio, le réseau d'antenne, la bande millimétrique.

Abstract:

Due to lower latency, higher transmission speed, wider bandwidth and the ability to connect with multiple more devices, fifth generation (5G) millimeter networks are much better than other generations.

In this study, a micro-ribbon patch antenna operating at 28GHz is studied and modeled for the future millimeter 5G communication. The substrate used in this work for the antenna is Rogers. The dielectric of the substrate is 2.2 and the thickness is 0.51 mm. CST Microwave STUDIO software is used for our simulation because it is convenient to use. The proposed printed antenna is developed to improve the performance for the 5G millimeter.

Keywords: fifth generation (5G), patch antennas, CST Microwave Studio, antenna array, millimeter band.

ملخص :

نظرا لانخفاض زمن الوصول وسرعة الإرسال العالية وعرض النطاق الترددي الأوسع والقدرة على الاتصال بأجهزة متعددة أخرى ، فإن شبكات الجيل الخامس (5G) المليمترية أفضل بكثير من الأجيال الأخرى.

في هذه الدراسة ، تمت دراسة تصميم هوائي مطبوع الذي يعمل بتردد 28 جيجا هرتز ونمذجته للاتصال الجيل الخامس المليمترية المستقبلية. الركيزة المستخدمة في هذا العمل للهوائي هي Rogers 5880. عازل الركيزة هو 2.2 وسمك 0.51 ملم. استخدمنا برنامج CST Studio للمحاكاة لأنه مناسب للاستخدام.

و قد قمنا بتطوير الهوائي المطبوع المقترح لتحسين أداء الجيل الخامس المليمترية .

الكلمات الدالة: الجيل الخامس (G5) ، هوائيات مطبوعة، CST Microwave Studio ، النطاق المليمترية.

Table Des Matières

Remerciment

Dédicace

Résumé

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction Générale:

Chapitre 01 : Généralités sur les antennes Imprimées

I.1. Introduction :	2
I.2. Historique :	3
I.3. Définition d'une antenne patch (imprimée)	3
I.4. Les formes des antennes patch :	4
I.5. Les paramètres géométriques des antennes imprimées :	5
I.6. Caractéristiques des antennes :.....	6
6.1. Coefficient de réflexion	6
6.2. Directivité	6
6.3. Gain.....	7
6.4. Rendement	7
6.5. Ouverture	7
6.6. L'impédance d'entrée	7
6.7. Diagramme de rayonnement.....	8
I.7. Techniques d'alimentations :	8
7.1. Alimentation avec contact :	8
1.1. Alimentation par ligne microstrip :	8
1.2. Alimentation par sonde coaxiale :	9
7.2. Alimentation sans contact :	10
2.1. Alimentation par couplage par fente :.....	10
2.2. Alimentation par couplage de proximité :	10
7.3. Comparaison entre les différentes techniques d'alimentation :	11

I.8. Techniques d'adaptations:	12
8.1. Adaptation par ligne quart d'onde :	12
8.2. Adaptation par stub	12
8.3. Adaptation avec encoches :	13
I.9. Application des antennes imprimées :	13
I.10. Les avantages et les inconvénients d'antenne patch :	15
10.1. Les avantages :	15
10.2. Inconvénient:	16
I.11. Conclusion	17

Chapitre 02 : La 5G millimétrique

II.1. Introduction :	19
II.2. Objectif De La 5G :	19
II.3. Pourquoi la 5G	20
II.4. Les fréquences utilisées par la 5G	22
II.5. Les défis de la 5g millimétrique	23
II.6. Architecture de réseaux mobile 5g	24
II.7. Composants du réseau central de la 5G	25
II.8. Impacts de la 5G millimétrique.....	26
8.1. Les impacts positifs de la 5G :	26
8.2. Les impacts négatifs de la 5G :	26
II.9. Conclusion :	27

Chapitre 03 : Simulation et résultats

III.1. Introduction :	29
III.2. Présentation du logiciel CST :	29
III.3. Définition d'antenne patch circulaire :	30
III.4. Les performance d'antenne patch circulaire :	31
III.5. Calculs des dimensions d'antenne patch circulaire :	31
III.6. Simulation de l'antenne :	33
6.1. Plan de masse :	33
6.2. Le substrat:	33

6.3. Patch :	34
6.3. La ligne micro ruban :	35
6.4. Alimentation d'antenne patch :	35
III.7. Adaptation d'antenne patch :	37
III.8. Simulation final de notre antenne patch circulaire :	38
8.1. Analyse des résultats :	38
III.9. Réseaux d'antenne :	41
III..10. Simulation de réseau d'antenne patch circulaire	42
10.1. Les résultats (S11, Gain, Directivité) obtenus :	42
III.11. Comparaison entre les résultats :	44
III.12. Conclusion :	45
Conclusion Générale	46
Références	51

Listes Des Figures

Figure I.1: Structure de base d'une antenne imprimée.....	4
Figure I.2: Les différentes formes d'élément rayonnant	5
Figure I.3: Alimentation par ligne micro ruban.....	9
Figure I.4: Alimentation par sonde coaxiale	9
Figure I.5: Alimentation par couplage par fente.....	10
Figure I.6: Alimentation par couplage par fente.....	11
Figure I.7: Modélisation de l'antenne Quart d'onde	12
Figure I.8: adaptation par quart à adaptation d'onde	12
Figure I.9: Modélisation de l'antenne à stub	13
Figure I.10: stub en circuit ouvert Adaptation Simple	13
Figure I.11: Patch rectangulaire(a), L'équivalence en circuit(b),	13
Figure II. 1: De la 1G à la 5G[20]	21
Figure II. 2: Les bandes de fréquences 5G[21]	22
Figure II. 3: Architecture du réseau 5G.....	24
Figure II. 4: architecture de la 5G	25
Figure III. 1:Le logiciel CST	30
Figure III. 2:Création du plan de masse	33
Figure III. 3: la structure obtenue.....	33
Figure III. 4: : Création du substrat.	34
Figure III. 5: Structure obtenue.....	34
Figure III. 6:Structure du patch	34
Figure III. 7: structure de la ligne.....	35
Figure III. 8: Résultat finale de conception d'antenne patch circulaire.....	37
Figure III. 9: antenne patch initiale	37
Figure III. 10: Le Parametre S11	37
Figure III. 13: Taux d'ondes stationnaires en fonction de fréquence.....	39
Figure III. 14: Le Gain représenté en 3D et en polaire.....	40
Figure III. 15: La directivité en 3D et polaire.	40
Figure III. 16: réalisation de réseau à alimentation (a)linéaire en série, (b) linéaire en parallèle. (c) bidimensionnel en parallèle.....	41
Figure III. 17: Antenne patch micro ruban avec une matrice d'élément 2×1.....	42
Figure III. 20:présentation de la directivité de réseau d'antenne patch en 3D et polaire.	43
Figure III. 21: Taux d'onde stationnaire en fonction de fréquence d'un réseau d'antenne.....	44

Listes Des Tableaux

Tableau I.1: Comparaison entre les différentes techniques d'alimentation.....	11
Tableau III. 1: Les caractéristiques d'antenne patch.	31
Tableau III. 2: cahier de charge.	31
Tableau III. 3: les dimensions de l'antenne patch circulaire.	32
Tableau III. 4: Gain, directivité et le VSWR du l'antenne patch circulaire.	40
Tableau III. 5: Les résultats pour les deux différentes structures.	44

Listes des abriviations

NSA : le mode non standalone

SA : le mode standalone

LTE : Évolution à long terme

NEF : fonction d'exposition réseau

NRF : référentiel réseau

PCF: Fonction de contrôle des politiques

UDM : Unifield Data Management

AUSF : fonction serveur d'authentification

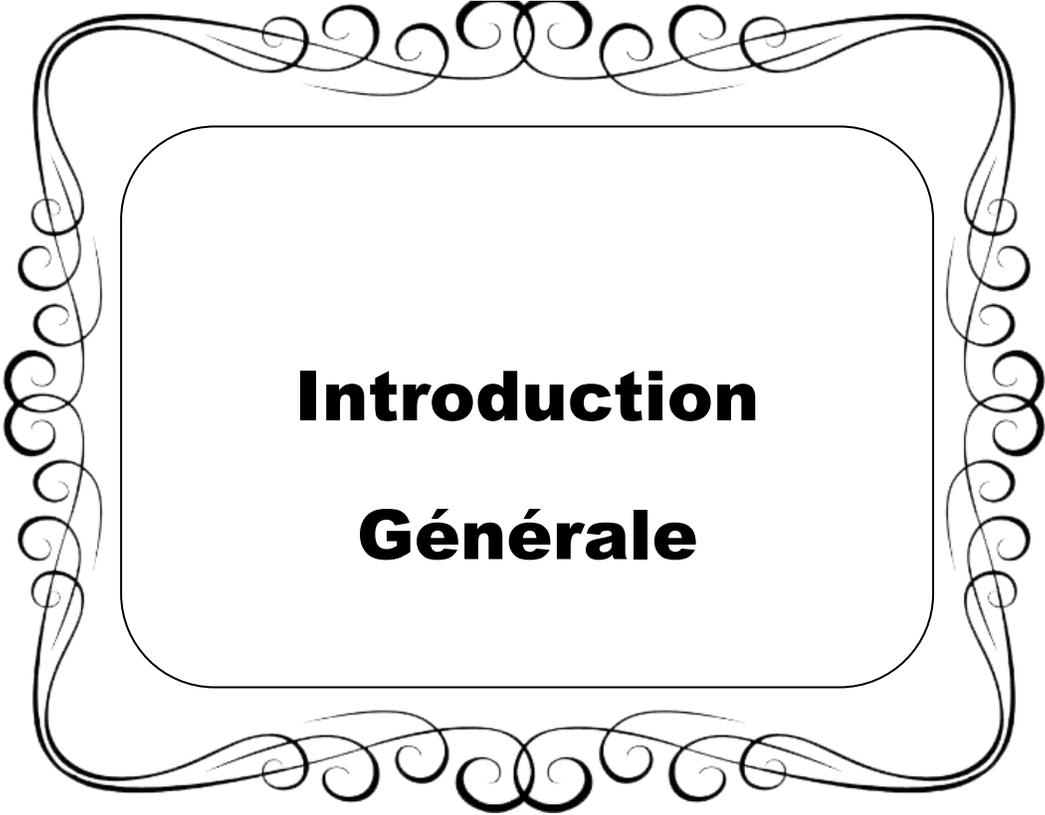
AMF : fonction de mobilité d'accès et de gestion

SMF : fonction de gestion de session

UE : équipement utilisateur

RAN : réseau d'accès radio

UPF : fonction de plan utilisateur



Introduction

Générale

Introduction Générale:

Pendant les dernières décennies, les télécommunications mobiles ont joué un rôle crucial dans la croissance économique et sociale des pays développés. De nos jours, elles sont devenues essentielles pour des millions de personnes à travers le monde, faisant partie intégrante de leur vie quotidienne. Cette tendance devrait se renforcer à l'avenir, rendant les communications mobiles encore plus indispensables.

Les opérateurs du monde entier adoptent le LTE (Long Term Evolution) afin de garantir un accès plus rapide et une efficacité accrue par rapport aux avancées de la 3G et de la 3.5G. De plus, le développement et la mise en œuvre du LTE-A représentent une évolution vers la 4G. Par conséquent, l'émergence de la 5ème génération dans le domaine des communications mobiles est susceptible de présenter des défis significatifs [1].

La principale caractéristique de la 5G réside dans sa capacité à permettre aux utilisateurs de se connecter simultanément à différentes technologies sans fils et de passer facilement de l'une à l'autre. La 5G se concentre particulièrement sur les appareils prenant en charge la voix sur IP (VoIP), offrant ainsi des débits de données élevés pour des transmissions rapides et des appels de qualité. Cette technologie vise à satisfaire les exigences des clients qui recherchent des fonctionnalités avancées sur leurs téléphones mobiles [2].

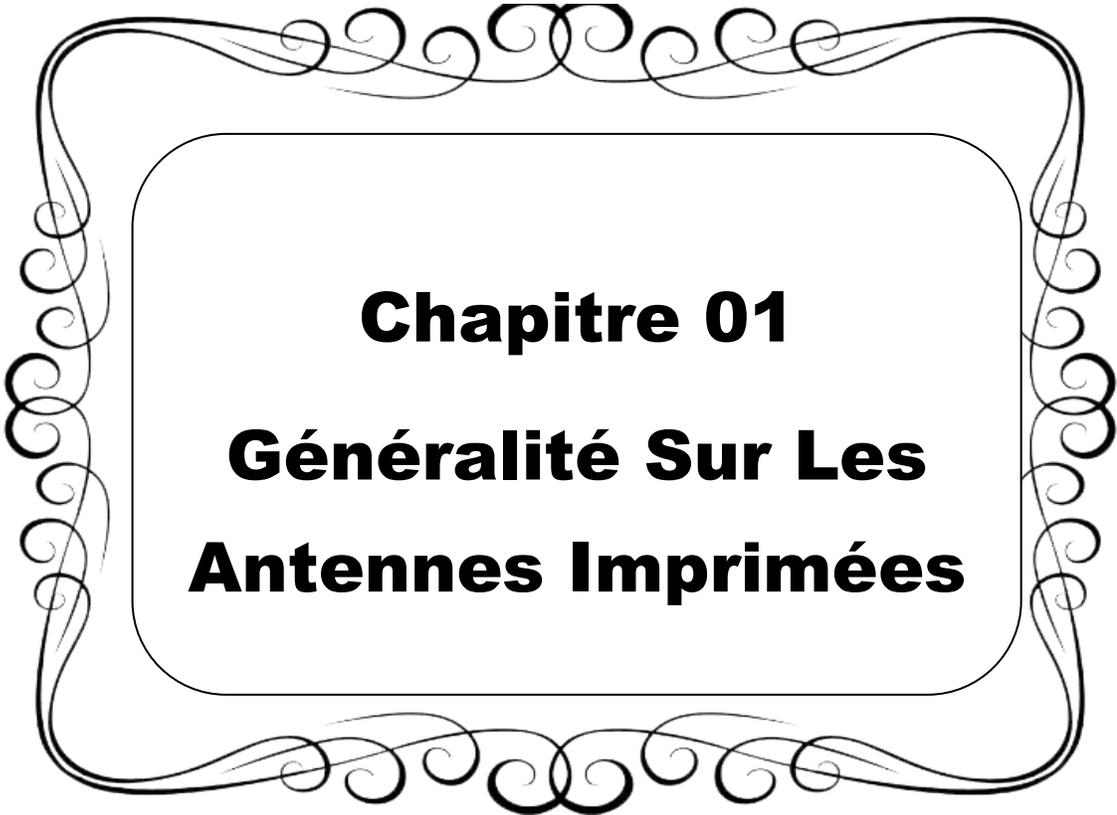
Récemment, une portion du spectre électromagnétique connue sous le nom de bande millimétrique a été proposée pour être utilisée dans le contexte de la 5G. Dans cette bande, plusieurs GHz sont disponibles pour permettre des transmissions de données à haut débit pour les utilisateurs de téléphones mobiles, ainsi que des connexions entre les petites cellules à ces fréquences. Cette partie du spectre offre un large éventail d'options car elle est actuellement peu utilisée. Selon des mesures récentes, les fréquences les plus favorables dans ce segment du spectre sont les suivantes : 28, 38, 71-76 et 81-86 GHz. Les ondes millimétriques ont des longueurs d'onde très courtes, ce qui permet la fabrication d'antennes à grande capacité à la fois pour les petits appareils portables et pour les stations de base.

L'utilisation d'outils de simulation spécialisés tels que CST Microwave Studio est essentielle pour faciliter l'exécution et l'analyse du comportement des appareils tels que les antennes. Ces outils permettent un calcul numérique rapide et précis, ce qui permet d'économiser du temps et des ressources lors de la mise en œuvre du processus.

Notre étude vise à analyser la communication de la cinquième génération (5G) ainsi que le domaine des antennes fonctionnant avec des ondes millimétriques. Afin de répondre à notre problématique de recherche, nous proposons l'objectif général suivant : Industrie un antenne patch circulaire à base de cuivre , à une fréquence 28 GHz pour la 5G millimétrique .

Afin d'accomplir les objectifs établis, ce document de recherche a été structuré en trois chapitres:

- Chapitre 1 : Généralités sur les antennes patches .
- Chapitre 2 : La 5g millimétrique .
- Chapitre 3 : Simulation et résultats .
- Conclusion Générale



Chapitre 01
Généralité Sur Les
Antennes Imprimées

I.1. Introduction :

Les antennes imprimées sont des dispositifs utilisés pour la réception et la transmission d'ondes électromagnétiques, telles que les signaux radio, les signaux Wi-Fi, les signaux de télévision et bien d'autres. Elles sont appelées "imprimées" car elles sont fabriquées à l'aide de techniques d'impression, généralement en utilisant des procédés d'impression sur substrat flexible.

L'une des principales caractéristiques est leur faible encombrement et leur profil plat. Contrairement aux antennes traditionnelles qui sont souvent volumineuses et encombrantes, les antennes imprimées sont conçues pour être compactes et discrètes, ce qui les rend particulièrement adaptées aux applications nécessitant une taille réduite, comme les dispositifs électroniques portables, les téléphones mobiles, les tablettes et les objets connectés.

Elles offrent également une flexibilité de conception significative. Grâce aux techniques d'impression, il est possible de créer une grande variété de formes et de motifs d'antennes, ce qui permet de les adapter à différentes contraintes de conception et d'optimiser leurs performances en fonction des besoins spécifiques de l'application.

En plus de leur taille réduite et de leur flexibilité de conception, ces antennes présentent d'autres avantages. Elles sont souvent moins coûteuses à produire que les antennes traditionnelles, car elles peuvent être fabriquées en masse à l'aide de processus d'impression industriels. De plus, elles peuvent être intégrées directement sur le substrat du circuit imprimé, ce qui simplifie l'assemblage des dispositifs électroniques.

Cependant, les antennes imprimées ont également quelques limitations. Leur efficacité et leur gain peuvent être légèrement inférieurs à ceux des antennes traditionnelles, notamment dans les fréquences plus élevées. De plus, leur performance peut être affectée par la proximité d'objets métalliques ou d'autres interférences électromagnétiques.

Malgré ces limitations, cette technologie est de plus en plus utilisée dans de nombreuses applications, en raison de leurs avantages en termes de taille, de flexibilité de conception et de coût. Leur adoption croissante contribue à la miniaturisation des dispositifs électroniques et favorise le développement de la connectivité sans fil dans de nombreux domaines, de la communication mobile à l'Internet des objets.

I.2. Historique :

L'idée des antennes imprimées est apparue en 1953 grâce à l'américain Deschamps. Il a proposé d'alimenter un réseau d'éléments d'antenne patch en utilisant des lignes d'alimentation micro-ruban. Les éléments introduits par Deschamps étaient des plans évasés cornes et non des patchs micro-ruban.

En France, après trois ans, Gutton et Baissinot ont obtenu un brevet pour une conception de micro-ruban qui a suscité davantage d'attention en tant que ligne de transmission planaire [3].

En 1960, Lewin a réalisé une étude sur l'émission de rayonnement par les discontinuités présentes dans les strip-lines. Cette même année, Wheeler Purcel a développé la conception et les méthodes des lignes de transmission à microbandes. En 1969, Denlinger a fait une découverte en dévoilant le mécanisme de rayonnement permettant aux résonateurs à microbandes rectangulaires et circulaires d'émettre de manière plus efficace [4].

Dans un document de symposium en 1970, Munson a introduit pour la première fois l'antenne patch micro-ruban. Ensuite, en 1974, un article de journal a été publié, abordant à la fois les antennes micro-rubans enveloppantes et les patchs rectangulaires.

Au fil du temps, les antennes patch ont connu des évolutions. En 1972, JhonHowell a créé une antenne imprimée à polarisation linéaire et circulaire pour la NASA, utilisant les bandes L et UHF. Parallèlement, Robert Munson a développé une antenne imprimée qui s'étendait sur toute la circonférence d'un missile [5].

I.3. Définition d'une antenne patch (imprimée)

Une antenne imprimée, également connue sous le nom d'antenne micro ruban ou microstrip, se compose d'une pièce métallique rayonnante appelée patch, positionnée sur un côté d'un substrat diélectrique, avec un plan de masse situé de l'autre côté, comme illustré dans la Figure(I.1). Le patch est généralement fabriqué à partir d'un matériau conducteur tel que le cuivre ou l'or, en raison de leur conductivité élevée. Il peut prendre différentes formes, mais pour simplifier l'analyse de la structure, des formes régulières telles que le carré, le cercle ou le triangle sont généralement utilisées. Le patch rayonnant et les lignes d'alimentation sont habituellement créés par photogravure sur le substrat diélectrique [6].

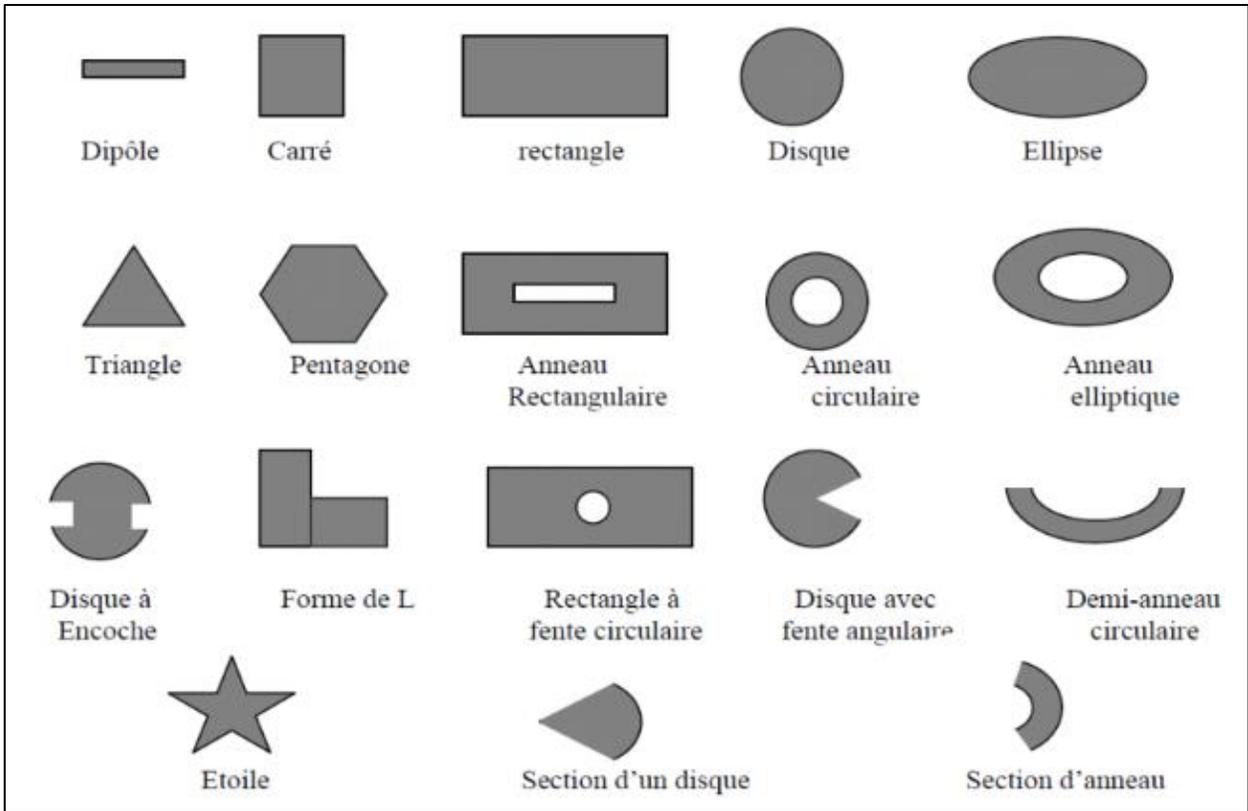


Figure I.2: Les différentes formes d'élément rayonnant [7]

I.5. Les paramètres géométriques des antennes imprimées :

Les paramètres géométriques des antennes imprimées jouent un rôle essentiel dans leurs performances et leurs caractéristiques. Voici quelques-uns des paramètres géométriques couramment utilisés dans la conception des antennes imprimées :

Dimensions du patch : Les dimensions du patch métallique, telles que la longueur, la largeur et l'épaisseur, déterminent la fréquence de résonance de l'antenne et influencent sa bande passante. Ces dimensions sont généralement définies en fonction de la longueur d'onde du signal de travail.

Forme du patch : La forme du patch, telle que carrée, circulaire, triangulaire ou autre, peut influencer les propriétés de rayonnement de l'antenne, notamment la directivité et le diagramme de rayonnement. La forme peut être choisie en fonction des exigences de couverture spatiale et de polarisation.

Substrat diélectrique : Le substrat diélectrique sur lequel le patch est monté a un impact significatif sur les performances de l'antenne. Les propriétés diélectriques du matériau, telles

que la permittivité et la perte diélectrique, affectent la fréquence de résonance, la bande passante, le rendement et l'impédance d'entrée de l'antenne.

Lignes d'alimentation : Les paramètres géométriques des lignes d'alimentation, tels que leur largeur et leur longueur, sont importants pour assurer une adaptation d'impédance efficace entre la source d'alimentation et le patch. Des dimensions appropriées des lignes d'alimentation aident à minimiser les pertes et les réflexions indésirables.

Espacement entre le patch et le plan de masse : L'espacement entre le patch et le plan de masse, également appelé substrat diélectrique, peut affecter les propriétés de rayonnement de l'antenne, en particulier la directivité et l'impédance d'entrée. Un espacement optimal est déterminé en fonction des objectifs de conception et des contraintes spécifiques.

Taille du plan de masse : La taille du plan de masse, qui se trouve à l'arrière du patch, peut influencer les performances de l'antenne en termes de gain, de directivité et de rayonnement. Un plan de masse plus grand peut aider à réduire les lobes secondaires indésirables et à améliorer l'efficacité rayonnée de l'antenne.

Il est important de considérer ces paramètres géométriques lors de la conception et de l'optimisation des antennes imprimées afin d'obtenir les performances souhaitées. Des outils de modélisation et de simulation électromagnétique sont souvent utilisés pour analyser et ajuster ces paramètres en fonction des spécifications de l'application.

I.6. Caractéristiques des antennes :

Les antennes ont différentes caractéristiques qui définissent leurs performances et leur utilisation. Voici quelques-unes des caractéristiques importantes des antennes :

6.1. Coefficient de réflexion

Le coefficient de réflexion S_{11} met en évidence l'absorption de l'énergie par l'antenne. C'est sur ce paramètre que l'on se base lors de l'optimisation et l'adaptation des antennes, sa valeur doit être inférieure ou égale à -10dB [8].

6.2. Directivité

La directivité d'une antenne caractérise la manière dont cette antenne concentre son rayonnement dans certaines directions de l'espace. La directivité d'une antenne dans une direction (θ, φ) est le rapport de la puissance $P(\theta, \varphi)$ à la puissance que rayonnerait une antenne isotrope par unité d'angle solide.

$$D(\theta, \varphi) = \frac{p(\theta, \varphi)}{\frac{p_r}{4\pi}} = 4\pi \frac{p(\theta, \varphi)}{p_r} \quad (I.1)$$

$$D(\theta, \varphi) = \frac{p(\theta, \varphi)}{\frac{p_r}{4\pi}} \quad (I.2)$$

$$p_r = \iint_0^{4\pi} P(\theta, \varphi) d\Omega \quad (I.3)$$

$$d\Omega = \sin \theta d\theta d\varphi \quad (I.4)$$

Dans la direction de rayonnement maximal (θ_0, φ_0) la directivité est exprimée :

$$D(\theta_0, \varphi_0) = 4\pi \frac{p(\theta_0, \varphi_0)}{p_r} \quad (I.5)$$

6.3. Gain

Le gain $G(\theta, \varphi)$ d'une antenne dans une direction (θ, φ) est le rapport entre la puissance rayonnée dans une direction donnée $P(\theta, \varphi)$ sur la puissance que rayonnerait une antenne isotrope sans pertes. En général, le gain G correspond au gain dans la direction de rayonnement maximal (θ_0, φ_0) . Cette propriété caractérise la capacité d'une antenne à focaliser la puissance rayonnée dans une direction.

Si G est le gain alors [9] :

$$G(\theta, \varphi) = \eta \times D(\theta, \varphi) \quad (I.6)$$

6.4. Rendement

Le rendement η d'une antenne traduit sa capacité à transmettre la puissance électrique en entrée P_A sous forme de puissance rayonnée P_R . On le définit comme le rapport entre la puissance totale rayonnée par une antenne et la puissance qui lui est fournie. Le rendement est lié aux pertes dans le réseau de polarisation et dans les éléments rayonnants. Rendement relie le gain et la directivité [10].

$$P_R = \eta \cdot P_A \Rightarrow D = \eta \cdot G \quad (I.7)$$

6.5. Ouverture

Si G_m est le gain maximal d'une antenne donnée dans un plan bien déterminé, alors son ouverture dans ce plan est l'angle qui se trouve entre deux directions de ce plan ayant la moitié du gain maximal (gain à -3 dB), soit $G_m / 2$ [11] .

6.6. L'impédance d'entrée

L'impédance d'entrée de l'antenne est l'impédance vue de la part de la ligne d'alimentation au niveau de l'antenne. Cette impédance est donnée par la formule:

$$Z_{in} = Z_0 \frac{(1 + S_{11})}{(1 - s_{11})} \quad (I.8)$$

Z_0 = Impédance caractéristique de la ligne d'alimentation.

N.B : comme S_{11} est fonction de la fréquence, alors Z_{in} varie aussi avec la fréquence.

6.7. Diagramme de rayonnement

Les antennes sont rarement omnidirectionnelles et émettent ou reçoivent dans des directions privilégiées. Le diagramme de rayonnement représente les variations de la puissance rayonnée par l'antenne dans les différentes directions de l'espace. Il indique les directions de l'espace (θ_0, φ_0) dans lesquelles la puissance rayonnée est maximale. Il est important de noter que le diagramme de rayonnement n'a de sens que si l'onde est sphérique.

On trace dans le diagramme de rayonnement la fonction caractéristique de rayonnement $r(\theta, \varphi)$, qui varie entre 0 et 1 selon la direction [12].

En général, le diagramme de rayonnement d'une antenne est représenté dans les plans horizontaux ($\theta = 90^\circ$) et verticaux ($\varphi = \text{constante}$), ou bien dans les plans E et H.

$$r(\theta, \varphi) = \frac{p(\theta, \varphi)}{p_0(\theta_0, \varphi_0)} \quad (I.9)$$

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

$p_0(\theta_0, \varphi_0)$: Puissance rayonnée max

Ces caractéristiques jouent un rôle crucial dans la conception, la sélection et l'utilisation des antennes en fonction des besoins spécifiques d'une application donnée.

I.7. Techniques d'alimentations :

Ces techniques d'alimentation offrent différentes approches pour fournir le signal d'alimentation aux antennes imprimées, en fonction des exigences de conception, des performances souhaitées et du contexte d'application spécifique. Il existe plusieurs techniques d'alimentation pour les antennes imprimées. Voici quelques-unes des techniques couramment utilisées :

I.7.1. Alimentation avec contact :

I.7.1.1. Alimentation par ligne microstrip :

Cette technique consiste à utiliser une ligne de transmission microstrip pour fournir le signal d'alimentation à l'antenne imprimée. La ligne microstrip est généralement placée sur le même substrat diélectrique que l'antenne et est connectée à la partie rayonnante de l'antenne. Cette méthode offre une intégration facile de l'alimentation et de l'antenne sur un même substrat comme indiqué sur la figure (I.3).

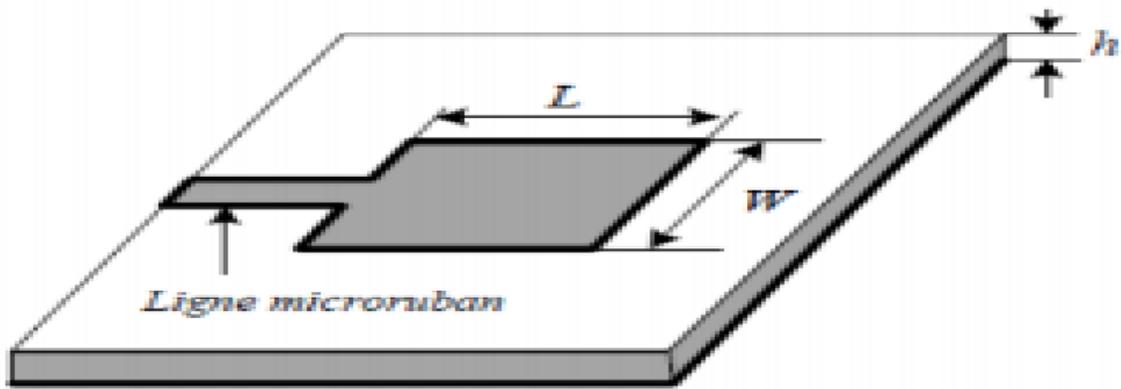


Figure I.3: Alimentation par ligne micro ruban [13]

Ce type d'alimentation est facile à mettre en œuvre et à modéliser, mais peut engendrer un rayonnement parasite qui peut devenir considérable et une bande passante typiquement entre 2 et 5 %.

I.7.1.2. Alimentation par sonde coaxiale :

L'alimentation par sonde coaxiale consiste à connecter directement l'élément rayonnant de l'antenne au conducteur central d'un câble coaxial, tandis que le conducteur externe est relié au plan de masse, comme illustré dans la Figure (I.4). L'ajustement d'impédance peut être réalisé en déplaçant le point d'alimentation sur le patch. L'inconvénient de ce type d'alimentation réside dans la bande passante étroite et la difficulté de modélisation surtout pour des substrats électriquement épais [14].

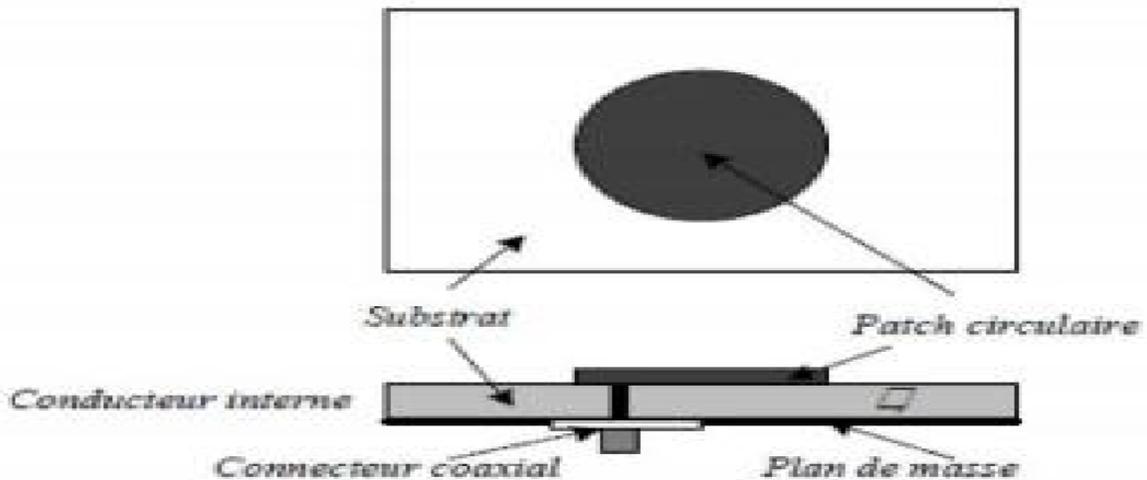


Figure I.4: Alimentation par sonde coaxiale [13]

I.7.2. Alimentation sans contact :

I.7.2.1. Alimentation par couplage par fente :

L'alimentation par ligne microstrip ou par ligne coaxiale présente une asymétrie qui peut entraîner des modes d'ordre supérieur et générer un rayonnement à polarisation croisée. Pour remédier à ce problème, l'alimentation par fente a été introduite. Cette technique implique l'introduction d'un couplage électromagnétique à travers une petite fente réalisée dans le plan de masse, séparant ainsi deux substrats : l'un portant l'élément rayonnant et l'autre la ligne microstrip, comme illustré dans la Figure (I.5). Cette configuration permet une optimisation indépendante de la ligne d'alimentation et du patch, elle est facile à modéliser et présente un rayonnement parasite modéré. Cependant, elle est plus difficile à mettre en œuvre et offre une bande passante plus étroite.

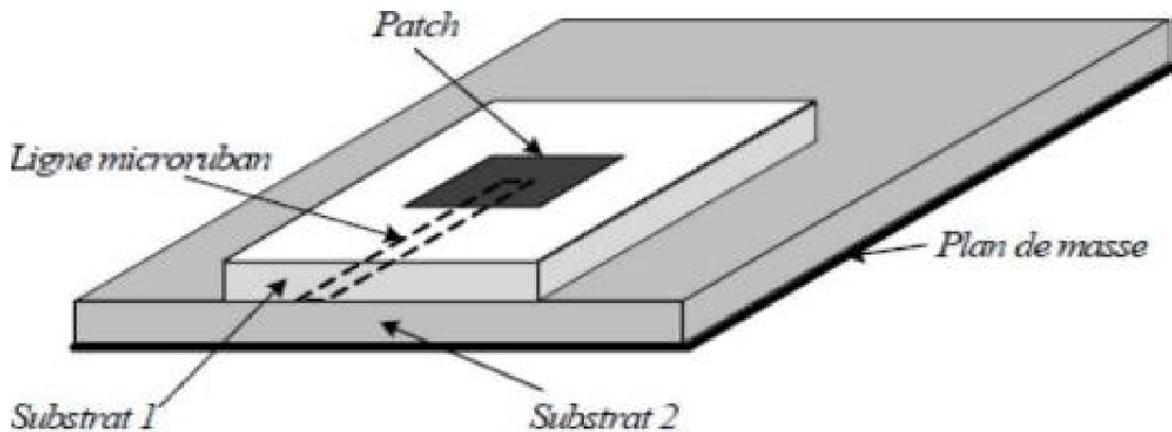


Figure I.5: Alimentation par couplage par fente [13]

I.7.2.2. Alimentation par couplage de proximité :

En utilisant la technique d'alimentation par couplage de proximité, représentée dans la Figure(I.6), il est possible d'obtenir une bande passante maximale de 13%.L'avantage de cette technique d'alimentation réside dans l'affaiblissement du rayonnement parasite et la facilité du couplage, ce dernier peut être optimisé par l'ajustement des dimensions de la ligne. Cependant elle est très difficile à mettre en œuvre [15].

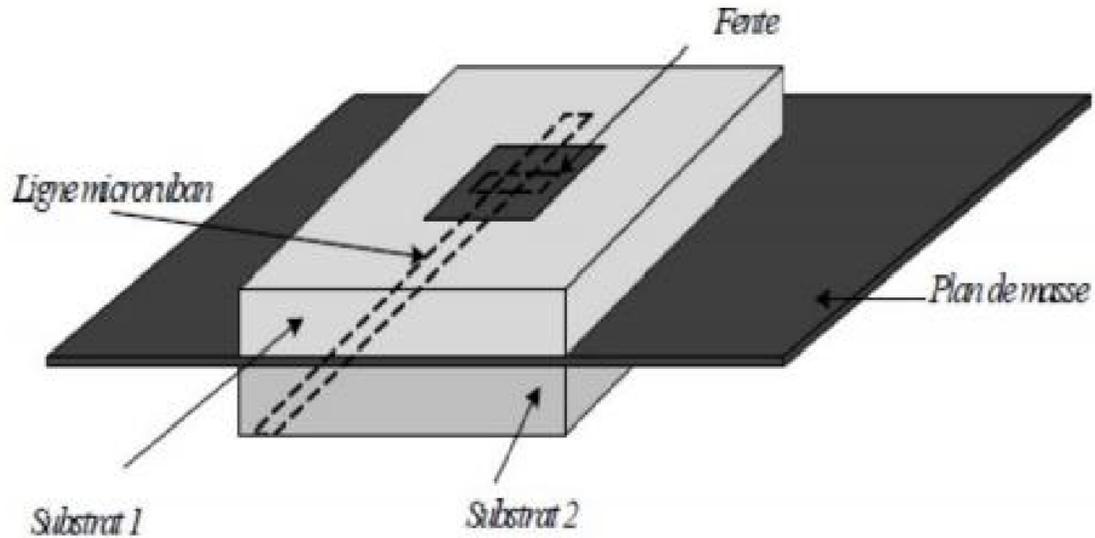


Figure I.6: Alimentation par couplage par fente [15]

I.7.3. Comparaison entre les différentes techniques d'alimentation :

Caractéristiques	Alimentation avec contact		Alimentation sans contact	
	Alimentation par ligne micro ruban	Alimentation Coaxiale	Alimentation couplée par proximité	Alimentation couplée par ouverture
Rayonnement de parasite d'alimentation	plus	plus	Minimum	Moins
Fiabilité	Meilleur	Pauvre à cause de soudure	Bon	Bon
Facilité de fabrication	Facile	Soudure et forage requis	Alignement requis	Alignement requis
Adaptation d'impédance	Facile	Facile	Facile	Facile
Bande passante (réalisé avec adaptation d'impédance)	2-5%	2-5%	13%	2-5%

Tableau I.1: Comparaison entre les différentes techniques d'alimentation

I.8. Techniques d'adaptations:

Ces techniques d'adaptation sont utilisées pour ajuster l'impédance entre l'antenne imprimée et la source d'alimentation, ce qui permet d'optimiser les performances de l'antenne en termes de bande passante, de gain et de directivité. Le choix de la technique d'adaptation dépendra des spécifications de conception de l'antenne et des exigences de l'application.

8.1. Adaptation par ligne quart d'onde :

pour ajuster l'impédance entre la ligne d'alimentation et l'antenne patch. Cette méthode consiste à insérer une ligne quart d'onde entre la ligne d'alimentation et l'antenne patch.

Lorsque l'impédance de l'antenne patch ne correspond pas à celle de la ligne d'alimentation, des réflexions d'ondes peuvent se produire, ce qui entraîne une mauvaise adaptation et une perte de puissance. L'objectif de l'adaptation par ligne quart d'onde est de créer une impédance équivalente entre la ligne d'alimentation et l'antenne patch, minimisant ainsi les réflexions d'ondes et maximisant le transfert de puissance.

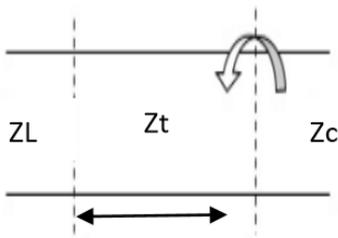


Figure I.7: Modélisation du l'antenne Quart d'onde [16]

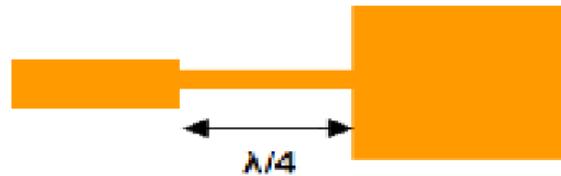


Figure I.8: adaptation par quart à adaptation d'onde

8.2. Adaptation par stub

Une approche alternative pour obtenir l'adaptation d'une charge consiste à utiliser un stub. Un stub peut être soit un circuit ouvert (open stub) soit un court-circuit (short stub). Le choix de la solution dépend généralement de la contrainte d'espace la plus limitée. Une approche pratique consiste à travailler dès le départ avec l'admittance pour faciliter la sommation des impédances parallèles équivalentes. Ainsi, en utilisant un stub, il est possible d'atteindre une adaptation efficace pour une charge donnée.

Un stub est un transcode ligne de longueur s que l'on branche en dérivation sur la ligne principale a une distance d de la charge [17].

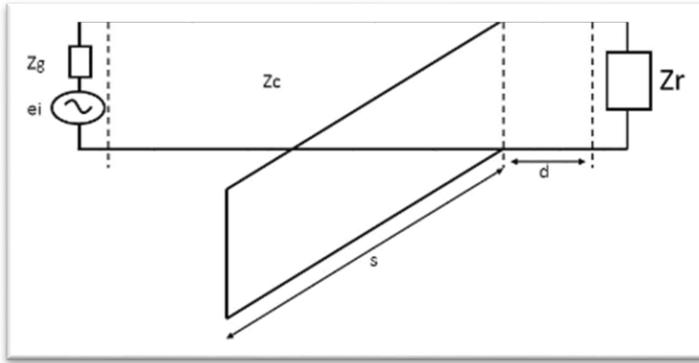


Figure I.9: Modélisation de l'antenne à stub

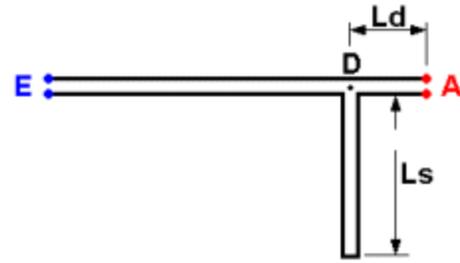


Figure I.10: stub en circuit ouvert Adaptation Simple [18]

8.3. Adaptation avec encoches :

Pour réaliser l'adaptation de l'antenne, on peut utiliser des encoches en modifiant la géométrie du patch. Les dimensions des encoches peuvent varier en fonction des besoins d'adaptation de l'antenne.

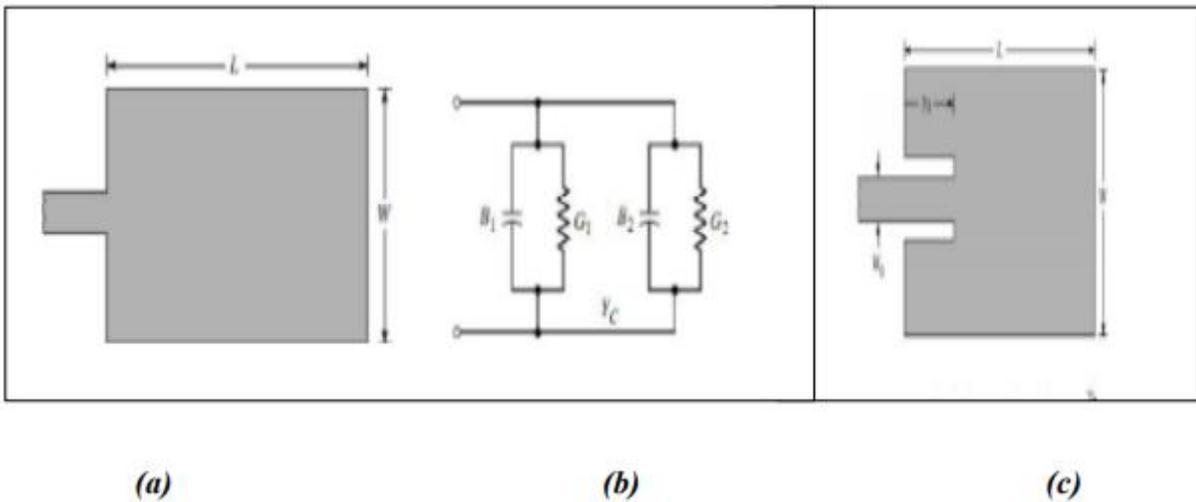


Figure I.11: Patch rectangulaire(a), L'équivalence en circuit(b) [17]

I.9. Applications des antennes imprimées :

Les antennes imprimées sont largement utilisées dans de nombreuses applications en raison de leurs avantages en termes de compacité, de coût abordable et de performances satisfaisantes. Voici quelques domaines d'application courants des antennes imprimées :

Télécommunications mobiles : Les antennes imprimées sont largement utilisées dans les téléphones mobiles, les tablettes et autres dispositifs sans fil pour permettre la communication sans fil avec les réseaux cellulaires.

Wi-Fi et Bluetooth : Les antennes imprimées sont utilisées dans les dispositifs Wi-Fi et Bluetooth tels que les routeurs sans fil, les ordinateurs portables, les casques sans fil et autres appareils pour permettre la communication sans fil à courte portée.

Systèmes de navigation : Les antennes imprimées sont utilisées dans les systèmes de navigation par satellite tels que le GPS (Global Positioning System) pour recevoir les signaux des satellites et déterminer la position géographique avec précision.

Radars : Les antennes imprimées sont utilisées dans les systèmes de radar pour émettre et recevoir des signaux radar utilisés dans des applications telles que la détection d'obstacles, la surveillance de la circulation aérienne, la météorologie et bien d'autres.

RFID (Radio Frequency Identification) : Les antennes imprimées sont utilisées dans les systèmes RFID pour la lecture et l'écriture d'informations sur des étiquettes ou des cartes RFID. Ces systèmes sont utilisés dans des domaines tels que la gestion des stocks, le contrôle d'accès, le suivi des actifs, etc.

Capteurs sans fil : Les antennes imprimées sont utilisées dans les réseaux de capteurs sans fil pour permettre la collecte et la transmission de données à partir de capteurs distribués. Ces systèmes sont utilisés dans des domaines tels que l'agriculture intelligente, la surveillance environnementale, les applications industrielles, etc.

Systèmes de communication par satellite : Les antennes imprimées sont utilisées dans les systèmes de communication par satellite pour transmettre et recevoir des signaux de communication à destination et en provenance des satellites.

Ces exemples ne sont qu'une partie des nombreuses applications des antennes imprimées. Leur polyvalence et leur adaptabilité en font un choix populaire pour une large gamme d'applications sans fil.

I.10. Les avantages et les inconvénients d'antenne patch :

I.10.1. Les avantages :

Les antennes patch présentent plusieurs avantages qui les rendent populaires dans de nombreuses applications. Voici quelques-uns de ces avantages :

Compacité : Les antennes patch sont relativement petites et plates, ce qui les rend idéales pour les dispositifs compacts tels que les téléphones mobiles, les ordinateurs portables et les appareils électroniques portables. Leur conception plate permet également une intégration facile dans les circuits imprimés [18].

Coût abordable : Les antennes patch sont généralement fabriquées à partir de matériaux peu coûteux tels que le cuivre ou l'aluminium, ce qui les rend économiques à produire en masse. Cela en fait un choix attrayant pour les applications grand public et industrielles.

Directivité contrôlée : Les antennes patch peuvent être conçues pour avoir une directivité élevée, ce qui signifie qu'elles peuvent concentrer le rayonnement dans une direction spécifique. Cela permet une meilleure couverture de la zone cible et une amélioration de la qualité du signal [7].

Faible profil en hauteur : Les antennes patch ont un profil en hauteur bas, ce qui les rend discrètes et faciles à intégrer dans des environnements où la visibilité de l'antenne est importante, tels que les appareils électroniques portables et les véhicules [16].

Facilité de fabrication : Les antennes patch sont relativement faciles à fabriquer grâce aux techniques de fabrication standard telles que la photolithographie et la gravure chimique. Cela permet une production rapide et efficace des antennes, ce qui est bénéfique pour les applications nécessitant une grande quantité d'antennes.

Bonne performance : Les antennes patch peuvent offrir de bonnes performances en termes de gain, de directivité, de bande passante et de rendement. Leur conception permet de réaliser des performances optimales pour des fréquences spécifiques, ce qui les rend adaptées à diverses applications sans fil [16].

Flexibilité de conception : Les antennes patch offrent une flexibilité de conception permettant de modifier la forme, la taille et les paramètres géométriques pour répondre aux exigences spécifiques de l'application. Cela permet d'optimiser les performances de l'antenne en fonction des besoins spécifiques.

les antennes patch sont appréciées pour leur compacité, leur coût abordable, leur directivité contrôlée, leur faible profil en hauteur, leur facilité de fabrication, leurs bonnes performances et leur flexibilité de conception. Ces avantages en font un choix attrayant pour de nombreuses applications sans fil.

I.10.2. Inconvénient:

Bien que les antennes patch présentent de nombreux avantages, elles ont également quelques inconvénients à prendre en compte. Voici quelques-uns de ces inconvénients :

Bande passante limitée : Les antennes patch ont souvent une bande passante limitée, ce qui signifie qu'elles peuvent fonctionner efficacement sur une plage de fréquences relativement étroite. Cela peut restreindre leur utilisation dans des applications nécessitant une large bande passante [16].

Sensibilité à l'environnement [19] : Les performances des antennes patch peuvent être sensibles à l'environnement dans lequel elles sont utilisées. Des facteurs tels que la présence d'obstacles métalliques, les variations de la permittivité du substrat et les interférences électromagnétiques peuvent affecter les performances de l'antenne.

Directivité fixe : Bien que la directivité élevée puisse être un avantage, elle peut également être un inconvénient dans certaines situations. Les antennes patch ont généralement une directivité fixe, ce qui signifie qu'elles sont plus efficaces dans une direction spécifique, mais moins efficaces dans d'autres directions. Cela peut poser des défis dans les applications nécessitant une couverture omnidirectionnelle.

Sensibilité à la polarisation : Les antennes patch sont souvent sensibles à la polarisation, ce qui signifie qu'elles doivent être alignées correctement avec la polarisation du signal pour obtenir des performances optimales. Cela peut être un inconvénient dans les situations où la polarisation du signal est variable ou mal alignée [18].

Limitations de puissance : Les antennes patch peuvent avoir des limitations de puissance en raison de la petite taille et des matériaux utilisés. Des niveaux de puissance élevés peuvent entraîner des problèmes de surchauffe ou de distorsion du signal.

Difficulté de modification après fabrication : Une fois qu'une antenne patch est fabriquée, il peut être difficile de la modifier ou de l'ajuster. Les modifications nécessitent souvent une nouvelle conception et une nouvelle fabrication de l'antenne.

Il est important de considérer ces inconvénients lors du choix et de l'utilisation des antennes patch, en tenant compte des exigences spécifiques de l'application. Dans certains cas, d'autres types d'antennes peuvent être plus adaptés pour répondre aux besoins particuliers.

I.11 Conclusion

Au cours de ce chapitre nous avons découvert la révolution des antennes imprimées dans le domaine de la communication sans fil depuis leurs créations jusqu'à présent, ces dernières offrent plusieurs avantages, notamment une taille compacte, un faible coût et une intégration facile avec d'autres composants électroniques.

Nous avons également découvert notamment que les patchs sont devenus un composant essentiel dans les systèmes en raison de leur fiabilités, de leurs performances élevées et de leur faible coût.

En conclusion, la poursuite de la recherche et du développement dans ce domaine conduira sans aucun doute à encore plus de progrès dans la technologie des patchs d'antennes, ce qui la rendra encore plus polyvalente et utile dans les années à venir.



Chapitre 02
La 5G
Millimétrique

II.1. Introduction :

La 5G est la cinquième génération de technologie de télécommunications mobiles qui a été conçue pour offrir des améliorations significatives en termes de vitesse, de latence, de capacité et de connectivité par rapport aux générations précédentes. La 5G est destinée à prendre en charge un large éventail d'applications, notamment les jeux en ligne en temps réel, la réalité augmentée et la vidéo en 4K.

Selon l'Union Internationale des Télécommunications (UIT), la 5G devrait être 100 fois plus rapide que la 4G et offrir une latence 10 fois plus faible. Cela permettra de prendre en charge des milliards de dispositifs connectés et de nouvelles technologies telles que la conduite autonome [20].

Le déploiement de la 5G a commencé en 2019 et s'est accéléré au cours de la dernière année, avec des réseaux 5G déployés dans le monde entier. Les premiers téléphones compatibles 5G sont apparus sur le marché en 2019 et de plus en plus de dispositifs compatibles 5G sont lancés sur le marché chaque année [21].

La 5G est considérée comme un élément clé de la transformation numérique et de la croissance économique, en permettant des innovations dans de nombreux secteurs, notamment la santé, la production, les transports et les services financiers, aussi une augmentation de la productivité et en créant de nouveaux emplois [22].

II.2. Objectif De La 5G :

L'objectif principal de la 5G est d'améliorer considérablement les performances des réseaux de télécommunications mobiles par rapport à la génération précédente (la 4G). Les objectifs spécifiques de la 5G incluent :

1-Des vitesses de transmission de données plus rapides : La 5G est conçue pour offrir des vitesses de téléchargement et de téléversement de données plus rapides que la 4G, ce qui permettrait aux utilisateurs de télécharger des fichiers plus rapidement et de diffuser des vidéos de haute qualité [23].

2-Une latence plus faible : La latence fait référence au temps qu'il faut pour qu'un appareil connecté envoie et reçoive une réponse du réseau. La 5G est conçue pour réduire considérablement la latence, ce qui est important pour les applications en temps réel telles que les jeux en ligne, la réalité virtuelle et augmentée, ainsi que pour les véhicules autonomes [24].

3- Une meilleure connectivité : La 5G est conçue pour améliorer la connectivité dans les zones urbaines et rurales, et fournir une meilleure couverture dans les bâtiments et les structures souterraines [25].

4- Une capacité réseau améliorée : La 5G est conçue pour offrir une capacité de réseau plus élevée pour prendre en charge le grand nombre d'appareils connectés à Internet, tels que les voitures, les appareils portables, les capteurs IoT et les machines industrielles.

5- Une consommation d'énergie plus efficace : La 5G est conçue pour être plus économe en énergie que les générations précédentes de réseaux de télécommunications mobiles, ce qui devrait réduire l'impact environnemental et prolonger la durée de vie de la batterie des appareils connectés.

II.3. Pourquoi la 5G

Les précédentes générations de réseaux mobiles avaient toujours pour ambition d'améliorer la vitesse des données afin de répondre à une demande de ressources toujours plus forte, à des services de plus en plus exigeants en termes de débits. Et chaque génération a pu développer de nouvelles technologies pour anticiper les besoins des utilisateurs.

La première génération (1G) est un système à fonctionnement analogique avec un multiplexage de type fréquentiel (FDMA). Elle était utilisée pour le service vocal public avec une capacité en termes d'abonnés et de trafic faible.

La deuxième génération (2G) repose sur une technologie entièrement numérique avec implémentation des techniques de multiplexage fréquentiel (FDMA), et découpage temporel des canaux disponibles (TDMA), pour une vitesse améliorée autour de 64Kbps. En plus des services de la première génération, la 2G permet de prendre en charge la messagerie texte.

Par la technologie de commutation de paquets, le système sans fil de la troisième génération (3G) fournit des débits jusqu'à 2Mbps.

Concernant la 4G, les technologies OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing) qui est un procédé de codage de signaux numériques par répartition en fréquences orthogonales sous forme de multiples sous-porteuses et CDMA (Code Division Multiple Access) qui est un système de codage des transmissions, utilisant la technique d'étalement de spectre ont été introduites pour offrir aux consommateurs des débits allant jusqu'à 100 Mbps.

Mais vu la demande croissante de données pour les smartphones avec l'essor de nouvelles applications, et surtout l'arrivée de la réalité virtuelle, seul le nouveau standard 5G pourra assurer ce nouveau type de connectivité entre les personnes et les objets dans un environnement placé sous le signe de l'intelligence et des connexions. L'UIT abonde dans le même sens par la voie de son secrétaire général Houlin Zhao [26]: « L'attention est maintenant

centrée sur la possibilité de créer une société connectée en continu à l’horizon 2020 et au-delà – une société dans laquelle les personnes aussi bien que les objets, les données, les applications, les systèmes de transport et les villes seraient regroupés au sein d’un environnement placé sous le signe des communications intelligentes en réseau ».

Ce développement sera suivi en parallèle d’une croissance exponentielle du volume des données mobiles échangées. Par exemple, des millions de voitures connectées seront en circulation et le moindre problème de réseau pourrait avoir des incidences très graves. C’est la raison pour laquelle l’objectif de la 5G n’est pas seulement de répondre aux besoins d’aujourd’hui mais à ceux de demain afin d’être un réseau qui ne craint ni la surcharge, ni l’évolution et qui s’adapte à de nouveaux usages.

La 5G permettra aussi d’être plus rapide pour garantir que des données seront correctement transmises dans un intervalle de temps extrêmement faible mais également sans failles. La combinaison des deux permettra de traiter des applications jugées jusqu’alors trop sensibles pour la mobilité : voitures connectées, équipements de santé, applications industrielles.

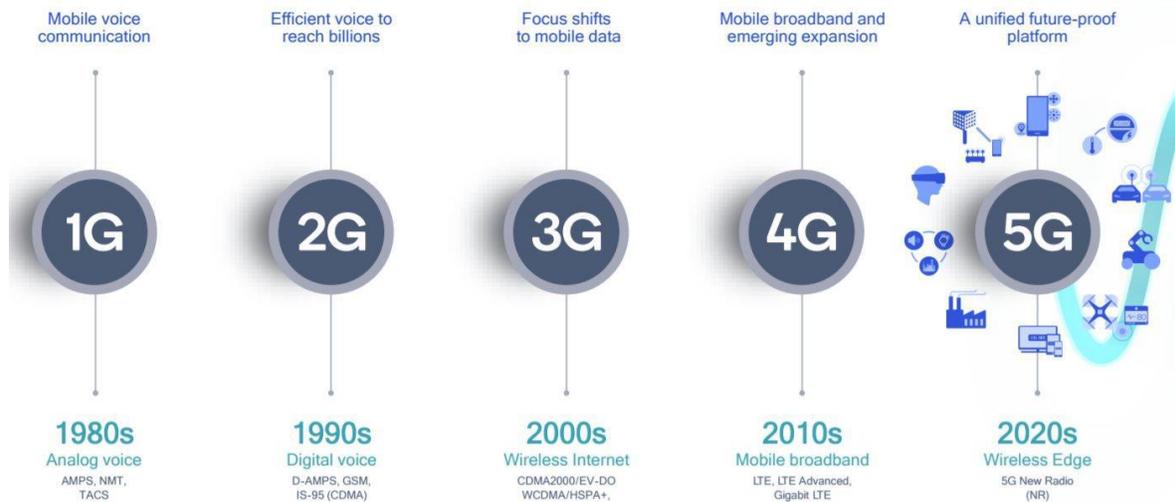


Figure II. 1: De la 1G à la 5G [27]

II.4. Les fréquences utilisées par la 5G

La 5G est conçue pour fonctionner sur des fréquences radio allant de moins de 1 GHz à des fréquences extrêmement élevées, appelées "ondes millimétriques" (ou mmWave). Plus la fréquence est basse, plus le signal peut voyager loin. Plus la fréquence est élevée, plus le signal peut transporter de données.

Trois bandes de fréquences sont au cœur des réseaux 5G comme représente La figure suivante:



Figure II. 2: Les bandes de fréquences 5G [28]

La 5G millimétrique utilise des fréquences plus élevées que les générations précédentes de réseaux mobiles, allant de 24 à 86 GHz. Ces fréquences plus élevées permettent une bande passante plus large et une vitesse de transmission de données plus rapide, mais ont une portée plus courte et sont plus sensibles aux obstacles tels que les bâtiments et les arbres. Pour surmonter ces limitations, la 5G utilise également des antennes directionnelles et des répéteurs pour améliorer la couverture et la qualité du signal. Cependant, certaines préoccupations ont été soulevées quant à l'impact potentiel de ces fréquences plus élevées sur la santé et l'environnement, et les recherches se poursuivent pour évaluer ces risques.

Les fréquences utilisées pour la 5G varient d'un pays à l'autre en fonction des réglementations et des normes nationales. Voici une liste non exhaustive des fréquences de la 5G utilisées dans certains pays:

- États-Unis : 28 GHz, 39 GHz, 47 GHz
- Chine : 3,3 GHz, 4,9 GHz, 26 GHz
- Corée du Sud : 3,5 GHz, 28 GHz
- Japon : 4,5 GHz, 28 GHz, 39 GHz
- Australie : 3,6 GHz
- Canada : 600 MHz, 3,5 GHz, 28 GHz, 38 GHz
- Royaume-Uni : 700 MHz, 3,4 GHz, 3,6 GHz, 26 GHz
- Allemagne : 700 MHz, 3,6 GHz, 26 GHz
- France : 700 MHz, 3,5 GHz, 26 GHz

Il est important de noter que les fréquences utilisées pour la 5G peuvent être différentes en fonction des opérateurs de télécommunications et des régions spécifiques dans un même pays. De plus, de nouvelles fréquences peuvent être ajoutées à mesure que la technologie évolue et que de nouvelles applications sont développées.

II.5. Les défis de la 5g millimétrique

La 5G millimétrique présente de nombreux défis à relever pour son déploiement et son utilisation efficace. Les principaux défis sont :

La portée limitée : les ondes millimétriques ont une portée plus courte que les ondes de fréquences inférieures, ce qui nécessite un plus grand nombre de points d'accès pour couvrir une zone donnée [29].

La propagation limitée : les ondes millimétriques sont facilement bloquées par les obstacles, tels que les murs et les arbres, ce qui peut entraîner une diminution de la qualité du signal [30].

L'interopérabilité : la 5G millimétrique utilise de nouvelles normes et technologies qui doivent être compatibles avec les réseaux existants [31].

La consommation énergétique : l'utilisation de fréquences plus élevées pour la 5G millimétrique nécessite des équipements plus complexes et une consommation d'énergie plus élevée [32].

La réglementation : les fréquences utilisées pour la 5G millimétrique sont limitées et doivent être partagées avec d'autres utilisateurs. Cela nécessite une réglementation appropriée pour garantir une utilisation équitable des fréquences [33].

II.6. Architecture de réseaux mobile 5g

Le réseau 5G, avec son architecture de réseau de nouvelle génération a le potentiel de prendre en charge des milliers de nouvelles applications grand public et industrielles. Les possibilités de la 5G semblent presque illimitées car la vitesse et la bande passante sont exponentiellement supérieures aux réseaux actuels.

Le déploiement complet du 5G prendra du temps et sera déployé dans les grandes villes bien avant qu'il n'atteigne les zones moins peuplées.

Les normes 3GPP qui sous-tendent l'architecture du réseau 5G ont été introduites par le projet de partenariat de troisième génération (3GPP), qui élabore des normes internationales pour toutes les communications mobiles. L'Union internationale des télécommunications (UIT) et ses partenaires définissent les exigences et le calendrier des systèmes de communication mobile, définissant une nouvelle génération environ tous les dix ans. 3GPP développe des spécifications pour ces exigences en plusieurs versions [34].

La 5G doit coexister avec les réseaux précédents pour deux raisons importantes :

1-Le développement et la mise en œuvre de nouvelles technologies de réseau nécessitent beaucoup de temps, d'investissement et de collaboration entre les grandes entreprises et les opérateurs [20].

2- L'architecture réseau de la technologie cellulaire 5g est bien meilleure que les architectures précédentes. Les réseaux cellulaires à haute densité permettent d'énormes sauts de performance. De plus, l'architecture du réseau 5G offre une meilleure sécurité que les réseaux 4G LTE actuels.

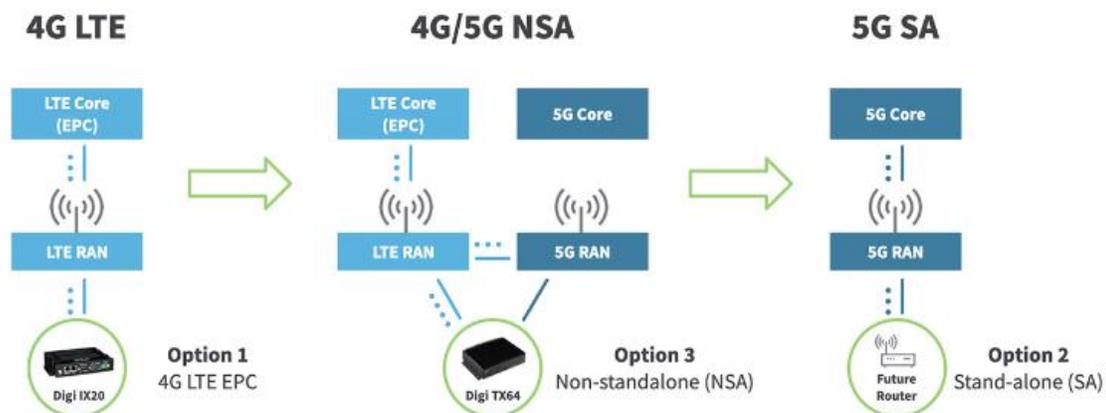


Figure II. 3: Architecture du réseau 5G [35]

II.7. Composants du réseau central de la 5G

La 5G a été conçue de A à Z, et les fonctions du réseau sont réparties par service. C'est pourquoi cette architecture est également appelée "cœur de la 5G". Architecture basée sur les services (SBA). Le schéma suivant de la topologie du réseau 5G montre les principaux composants d'un réseau central 5G [36]:

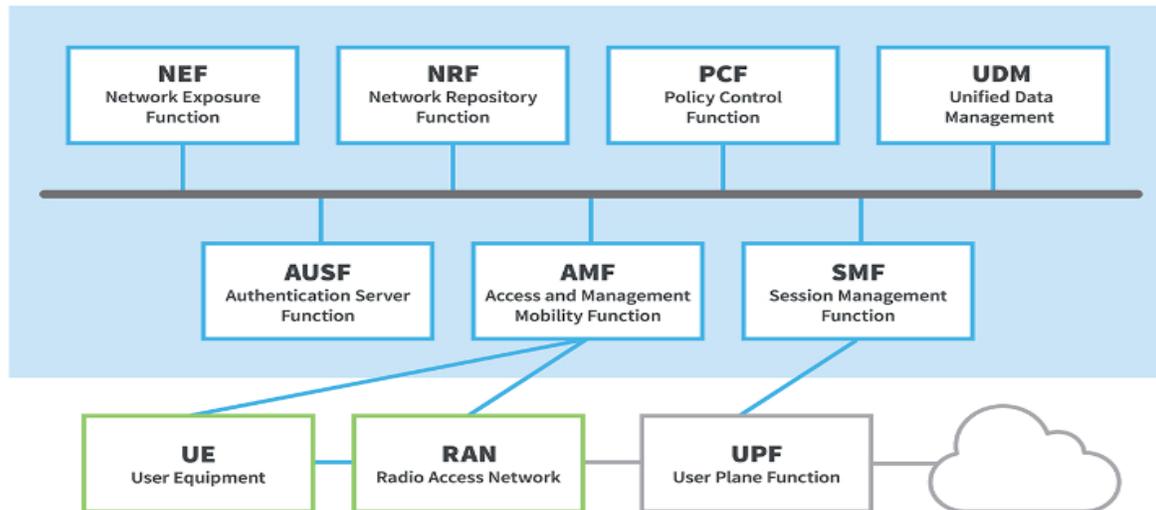


Figure II. 4: architecture de la 5G [29]

Voici comment cela fonctionne :

- Les appareils utilisateurs tels que les smartphones ou les appareils cellulaires 5G établissent une connexion avec le cœur du réseau 5G via le réseau d'accès radio 5G, avant de se connecter aux réseaux de données tels que l'Internet.
- La fonction de gestion de l'accès et de la mobilité (AMF) constitue le point d'entrée exclusif pour la connexion de l'UE.
- Selon le service demandé par l'utilisateur (UE), la fonction de gestion de l'accès et de la mobilité (AMF) choisit la fonction de gestion de session (SMF) appropriée pour gérer la session de l'utilisateur.
- La fonction de plan d'utilisateur (UPF) assure le transfert du trafic de données IP (plan d'utilisateur) entre les équipements utilisateurs (UE) et les réseaux externes.
- La fonction de serveur d'authentification (AUSF) autorise l'AMF à vérifier l'identité de l'équipement utilisateur (UE) et à accéder aux services du noyau 5G.
- D'autres fonctions, comme la fonction de gestion de session (SMF), la fonction de contrôle de politique (PCF), la fonction d'application (AF) et la fonction de gestion unifiée des données (UDM), sont également présentes pour assurer le contrôle de politique du réseau. Elles

appliquent les décisions de politique et accèdent aux informations d'abonnement pour régir le comportement du réseau.

Bien que l'architecture en coulisse du réseau 5G soit plus complexe, cette complexité est justifiée car elle permet d'offrir un service de meilleure qualité, capable de s'adapter à une variété de cas d'utilisation de la 5G.

II.8. Impacts de la 5G millimétrique

II.8.1. Les impacts positifs de la 5G :

Parmi les avantages de la 5G on trouve les impacts économiques qui peuvent être significatifs, en particulier dans les domaines de l'industrie manufacturière, de la logistique et des transports, de la santé et de l'énergie. Voici quelques exemples:

- Utilisée pour améliorer la productivité et l'efficacité des usines, en permettant la communication en temps réel entre les machines, la surveillance de la production et la collecte de données en temps réel pour aider à l'analyse de la production. [37].
- Améliorer la gestion des flottes de véhicules, en permettant une communication en temps réel entre les véhicules et les centres de contrôle. Cela pourrait aider à améliorer l'efficacité du transport et à réduire les coûts de maintenance.
- Amélioration de la télémédecine, en permettant une transmission plus rapide de données médicales entre les patients et les médecins, en permettant des consultations à distance et en permettant des diagnostics plus précis grâce à des images médicales haute résolution. [38].

II.8.2. Les impacts négatifs de la 5G :

- La 5G millimétrique nécessite une infrastructure plus dense et plus proche des utilisateurs, ce qui peut créer des disparités géographiques dans l'accès aux services. Les zones rurales et éloignées pourraient être laissées pour compte si les opérateurs ne jugent pas rentable d'investir dans l'infrastructure nécessaire [39].
 - Les fréquences plus élevées de la 5G millimétrique peuvent susciter des préoccupations concernant les effets sur la santé. Bien que des études aient été menées pour évaluer les risques potentiels, les résultats sont mitigés et des recherches supplémentaires sont nécessaires [40].
 - Le déploiement de la 5G millimétrique nécessitera une infrastructure plus dense, y compris des antennes supplémentaires, ce qui pourrait avoir des impacts environnementaux négatifs. Cela pourrait inclure une augmentation de la consommation d'énergie et une perturbation de l'environnement naturel [35].

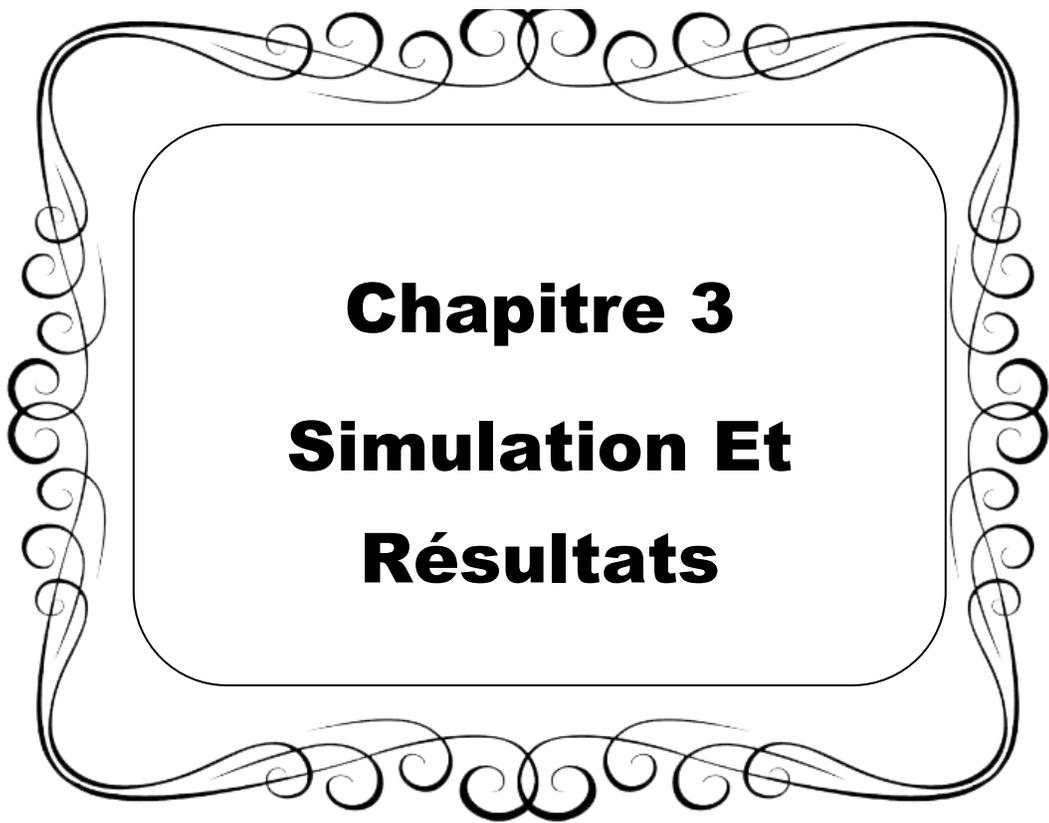
- La 5G millimétrique nécessite des équipements plus puissants que les générations précédentes de technologie de télécommunications. Cela peut augmenter la consommation d'énergie des infrastructures de télécommunications, entraînant des émissions de gaz à effet de serre supplémentaires [41].

II.9. Conclusion :

La technologie 5G millimétrique est une évolution majeure des réseaux de télécommunications sans fil, offrant des vitesses de transmission de données beaucoup plus rapides que celles des réseaux 4G. Les ondes millimétriques utilisées dans la technologie 5G sont capables de transporter de grandes quantités de données à une vitesse incroyablement élevée, offrant des avantages considérables pour les applications nécessitant une bande passante élevée et une faible latence.

Cependant, la technologie 5G millimétrique présente également des défis, tels que la sensibilité à l'obstruction des signaux par des objets tels que des bâtiments et des arbres, ce qui peut entraîner une dégradation de la qualité du signal. De plus, les ondes millimétriques ont une portée plus courte que les ondes radiofréquences utilisées dans les réseaux de télécommunications sans fil précédents, nécessitant un plus grand nombre de stations de base pour couvrir une zone donnée.

En conclusion, la technologie 5G millimétrique offre des performances impressionnantes pour les communications sans fil à haute vitesse, ouvrant la voie à de nouvelles applications dans des domaines tels que la réalité virtuelle, la télémédecine, les véhicules autonomes et les villes intelligentes. Cependant, pour que cette technologie atteigne son plein potentiel, il sera nécessaire de relever les défis techniques et de déploiement associés aux ondes millimétriques et de travailler à l'élaboration de nouvelles normes de réglementation pour garantir la sécurité et la fiabilité de la technologie 5G millimétrique.



Chapitre 3
Simulation Et
Résultats

III.1. Introduction :

Après avoir expliqué tous ce qui est théorique sur la notion d'antennes imprimées, nous allons concevoir une antenne patch simple circulaire à 28Ghz en appliquant ces informations en utilisant le logiciel de conception CST Microwave Studio.

Dans ce chapitre, nous allons présenter notre cahier de charge puis on calcule les dimensions de notre antenne qu'on travaille sur théoriquement. Après, nous essayons de simuler et adapter notre antenne.

Par la suite, nous allons travailler sur le couplage entre deux éléments de patchs après quatre éléments de patch pour voir l'effet de cette opération. Enfin, nous présentons les résultats que nous avons obtenus en feront la comparaison entre eux.

Le but de ce chapitre consiste à étudier le concept de réaliser une antenne imprimée avec hautes performances.

III.2. Présentation du logiciel CST :

CST Microwave studio est un logiciel de simulation électromagnétique en 3D spécialisé dans l'analyse des structures passive. Il utilise les équations de Maxwell et applique la méthode des équations intégrales finies pour résoudre ces équations. Cette approche numérique permet une discrétisation de l'espace, ce qui permet de décrire directement en 3D tous les composants des systèmes étudiés. Ainsi, le logiciel peut être utilisé pour résoudre une large gamme de problèmes électromagnétiques, allant de la statique aux hyperfréquences, en effectuant des analyses temporelles et fréquentielles.

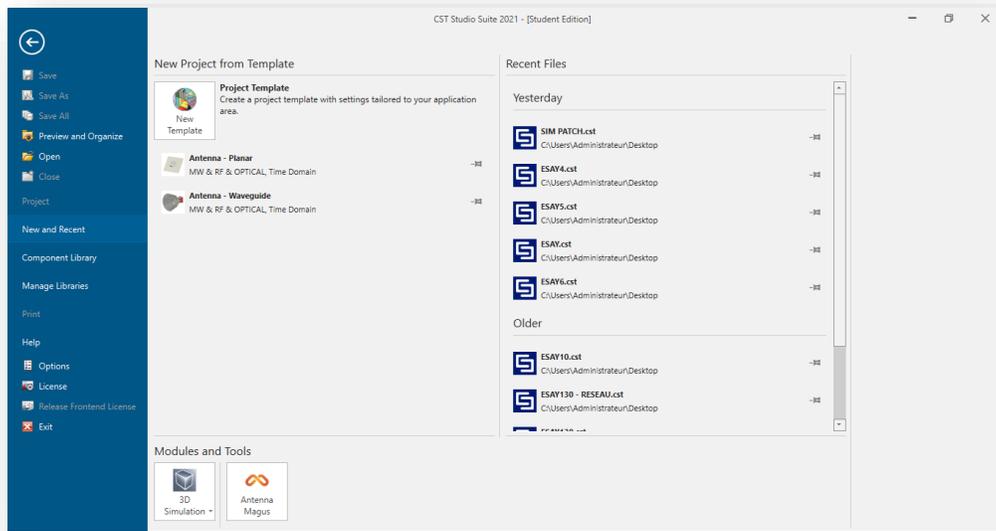


Figure III. 1:Le logiciel CST

III.3. Définition d’antenne patch circulaire :

L’antenne patch circulaire est une structure d’antenne largement utilisée dans les applications de communication sans fil. Elle se caractérise par sa forme circulaire et son design compact. Elle est généralement fabriquée à partir d’un substrat diélectrique, tel qu’un matériau polymère ou un matériau céramique, recouvert d’une plaque conductrice métallique sur une face. La plaque métallique est habituellement découpée pour former la forme circulaire désirée, tandis que la face opposée du substrat sert de plan de masse.

Son fonctionnement repose sur le principe de propagation des ondes électromagnétique dans le substrat diélectrique et sur la réflexion et la transmission à travers la plaque conductrice. La forme et les dimensions de l’antenne sont optimisées pour résonner à une fréquence spécifique, ce qui lui permet de rayonner et de recevoir des signaux radio à cette fréquence.

L’antenne patch circulaire peut être utilisée dans une variété d’applications, notamment les communications sans fil, les réseaux mobiles, les systèmes de positionnement global(GPS), les systèmes de radiocommunication par satellite, les radars, etc. Elle est appréciée pour sa compacité, sa facilité de fabrication et son bon rendement.

III.4. Les performances d’antenne patch circulaire :

Le travail dans ce projet concerne les antennes imprimées, et qu’elles doivent vérifier les caractéristiques résumé dans le tableau ci-dessous :

Performance	Spécification
Adaptation	-10> S11
Gain	élevé
VSWR	inférieur à 2

Tableau III. 1: Les caractéristiques d’antenne patch.

III.5. Calculs des dimensions d’antenne patch circulaire :

Nous présentons notre cahier de charge qu’on travaille avec pour concevoir une antenne imprimée circulaire :

Substrat	Rogers 5880 (lossy)
Permittivité (εr)	2.2
La hauteur	0.51mm
Tangente de perte	0.0009

Tableau III. 2: cahier de charge.

- Maintenant nous calculons les dimensions de cette antenne à partir des équations suivantes :

Largeur de l’antenne patch Microstrip :

$$W_p = \frac{c}{2f_r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (III.1)$$

La constante diélectrique effective:

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[1 + 12 \frac{h}{W_p} \right] \quad (III.2)$$

Longeur effective:

$$L_{eff} = \frac{c}{2f_r \sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (III.3)$$

L'augmentation de la longueur :

$$\Delta L = \frac{0.412(\epsilon_{\text{eff}} + 0.3) \left(\frac{W_p}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon_{\text{eff}} - 0.258) \left(\frac{W_p}{h} + 0.8 \right)} \epsilon_{\text{eff}} \quad (\text{III.4})$$

La longueur du patch

$$L = L_{\text{eff}} - 2\Delta L \quad (\text{III.5})$$

Diametre:

$$a = \frac{F}{\left[1 + \frac{2h}{\pi \epsilon_r F} \left(\ln \left(\frac{\pi F}{2h} \right) + 1.7729 \right) \right]^{\frac{1}{2}}} \quad (\text{III.6})$$

la constante diélectrique effective :

$$\Sigma f f = \frac{\pi + 1}{2} \cdot \frac{\sigma - 1}{2} \cdot \left(1 + 12 * \frac{h}{2 \cdot ae} \right)^{-0.5} \quad (\text{III.7})$$

$$\text{largeur du substrat : } wg = 2 * ae + 6 * h \quad (\text{III.8})$$

$$\text{longueur du substrat : } lg = ll + 2 * ae + 6 * h \quad (\text{III.9})$$

Nom	Valeurs (mm)	Appellations
Longueur de substrat	10.75	Lg
Largeur de substrat	7.26	wg
Rayon du patch	2.10	ae
Hauteur du substrat	0.51	h
Epaisseur du patch	0.035	t
Longueur de la ligne	3.49	Llig
Largeur de la ligne	1.39	Wlig

Tableau III. 3: les dimensions de l'antenne patch circulaire.

III.6. Simulation de l'antenne :

Après les calculs, nous essayons de travailler avec le logiciel CST pour entrer les paramètres géométriques afin de concevoir notre antenne patch.

III.6.1. Plan de masse :

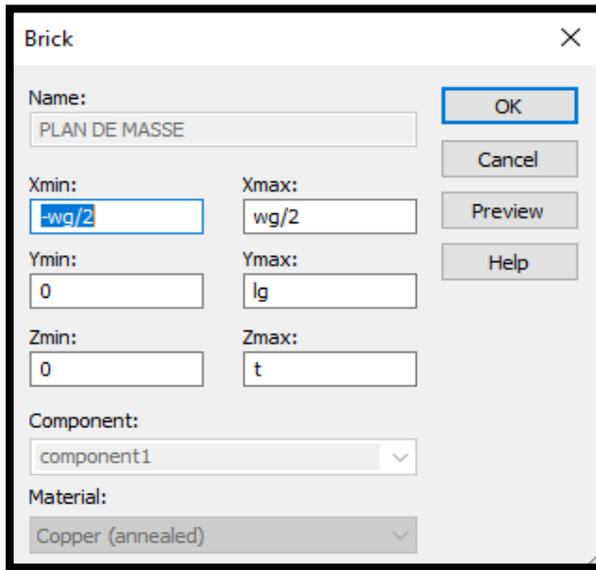


Figure III. 2:Création du plan de masse

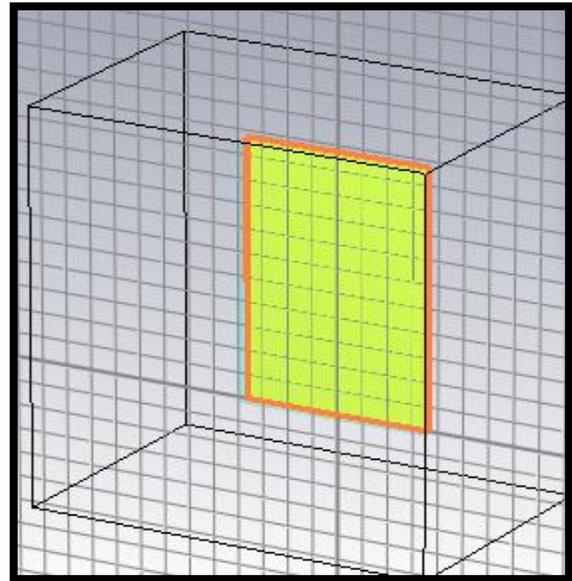


Figure III. 3: la structure obtenue

III.6.2. Lesubstrat:

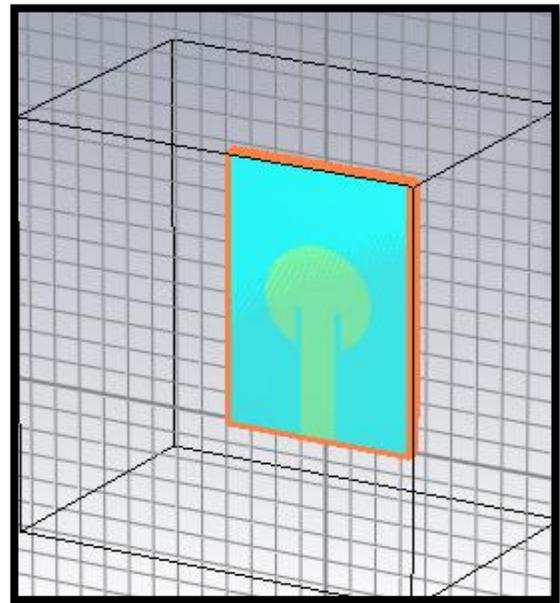
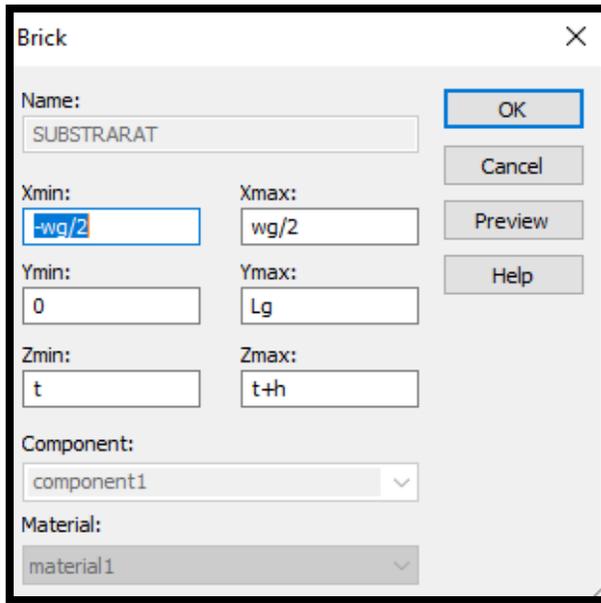


Figure III. 4 : Création du substrat.

Figure III. 5: Structure obtenue.

III.6.3. Patch :

Après qu'on a choisit la forme cylindre parmi ces formes



une fenêtre

des paramètres du patch s'affiche :

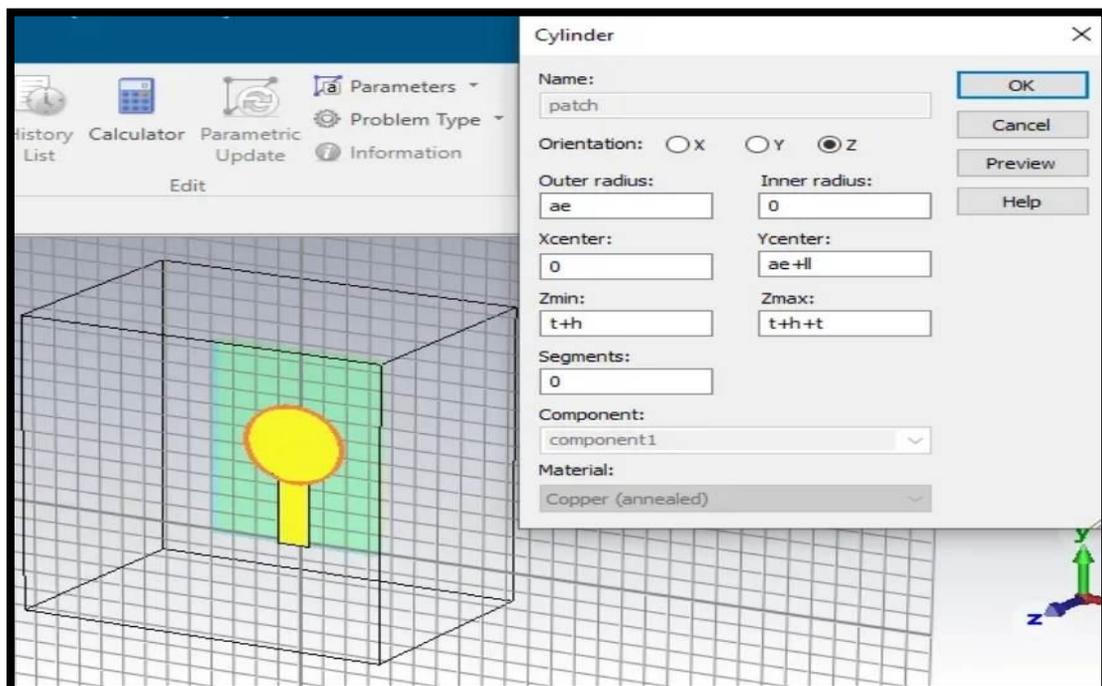


Figure III. 6:Structure du patch

III.6.4. La ligne micro ruban :

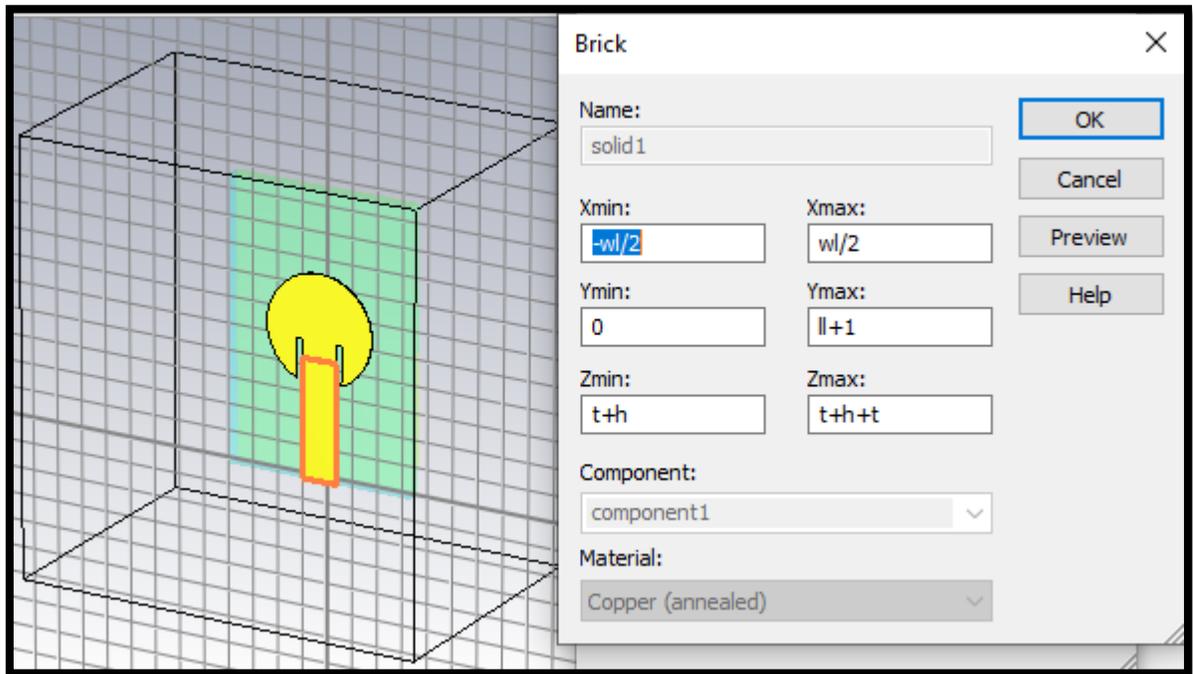


Figure III. 7: structure de la ligne

Remarque :

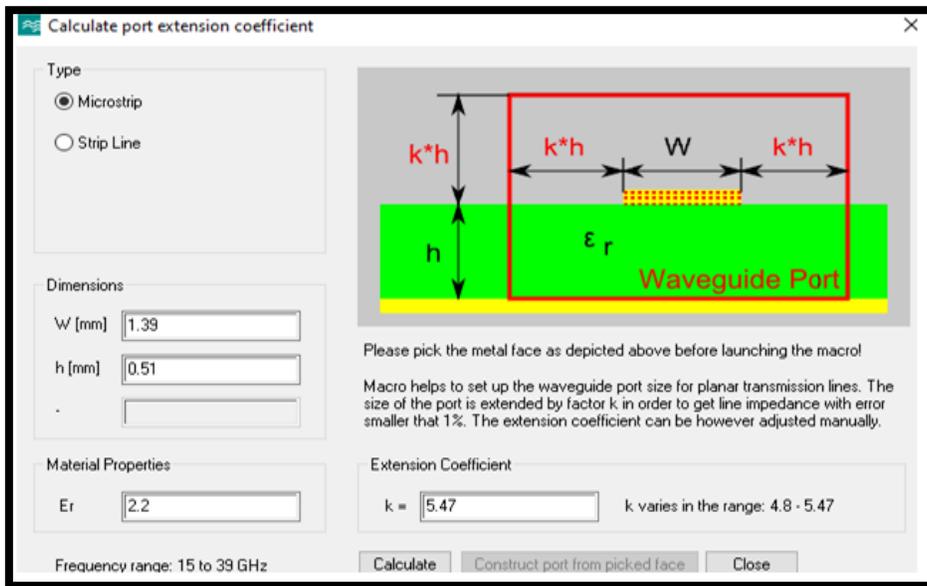
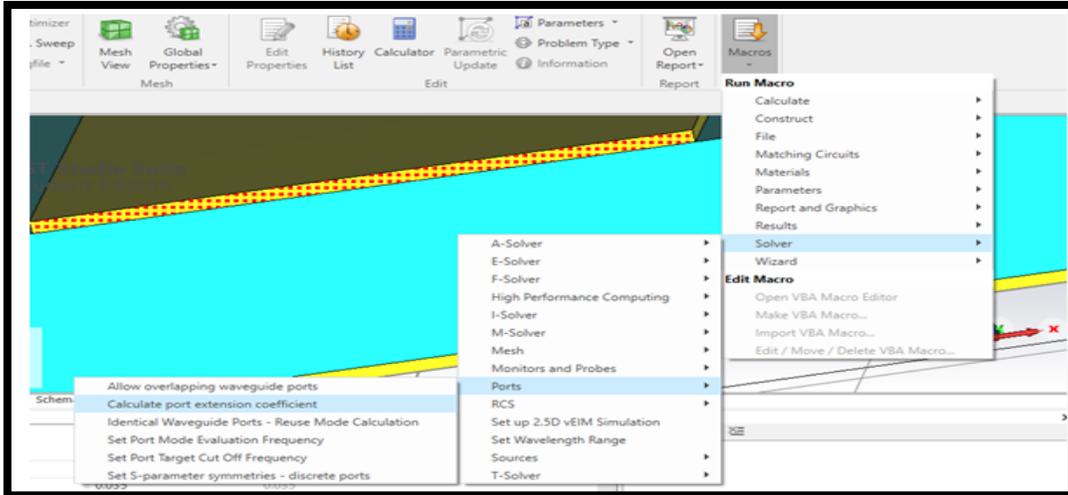
Après la modélisation du patch et la ligne on utilise l’outil booléen



pour

III.4. Alimentation d’antenne patch :

On ouvre la fenêtre « Modeling » puis on clique sur « Picks » après « Pick face » et nous cliquons deux fois sur la fin de la ligne. Ensuite nous suivons les étapes suivantes :



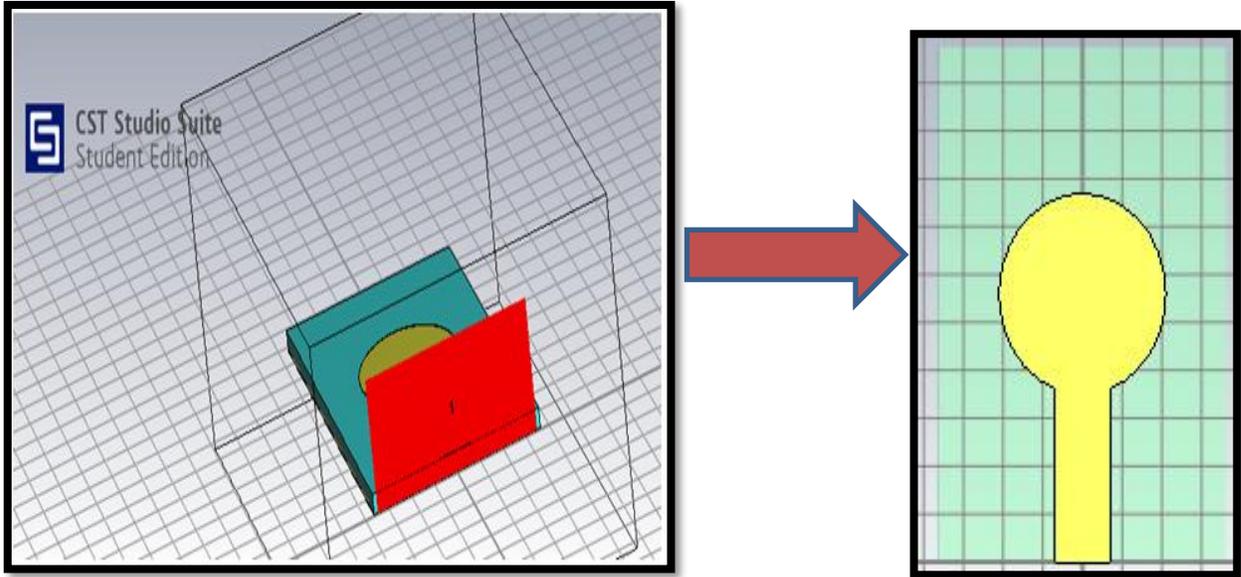


Figure III. 8: Résultat final de conception d’antenne patch circulaire.

III.7. Adaptation d’antenne patch :

Pour cela notre antenne n’est pas adaptée comme nous observons (lafigure III.10) ,alors maintenant on essaye de l’adapter en créant des fentes sur le patch afin d’obtenir une meilleure adaptation au final.

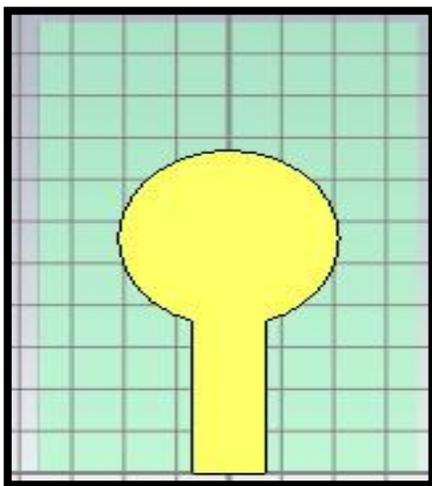


Figure III. 9: antenne patch initiale

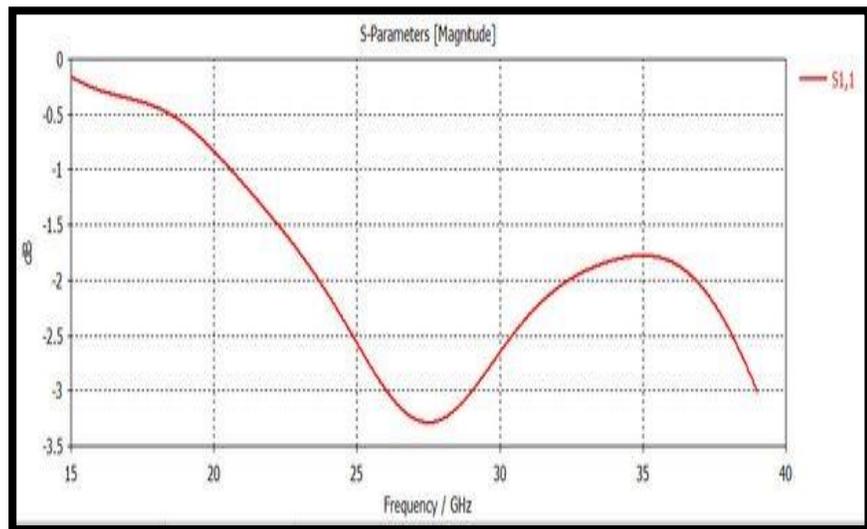


Figure III. 10: Le Paremetre S11

III.8. Simulation finale de notre antenne patch circulaire :

Après plusieurs essais afin d’atteindre les résultats souhaités pour une antenne imprimées circulaire bien adaptée, nous présentons notre structure finale :

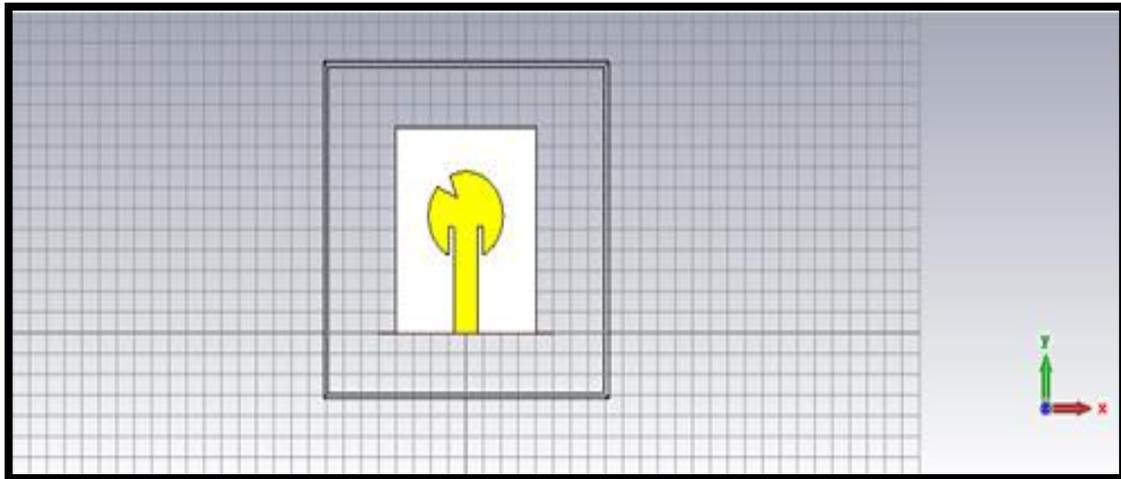


Figure III. 11: La structure finale de l’antenne patch circulaire

II.8.1. Analyse des résultats :

- Voici les résultats obtenus pendant la simulation de cet élément :

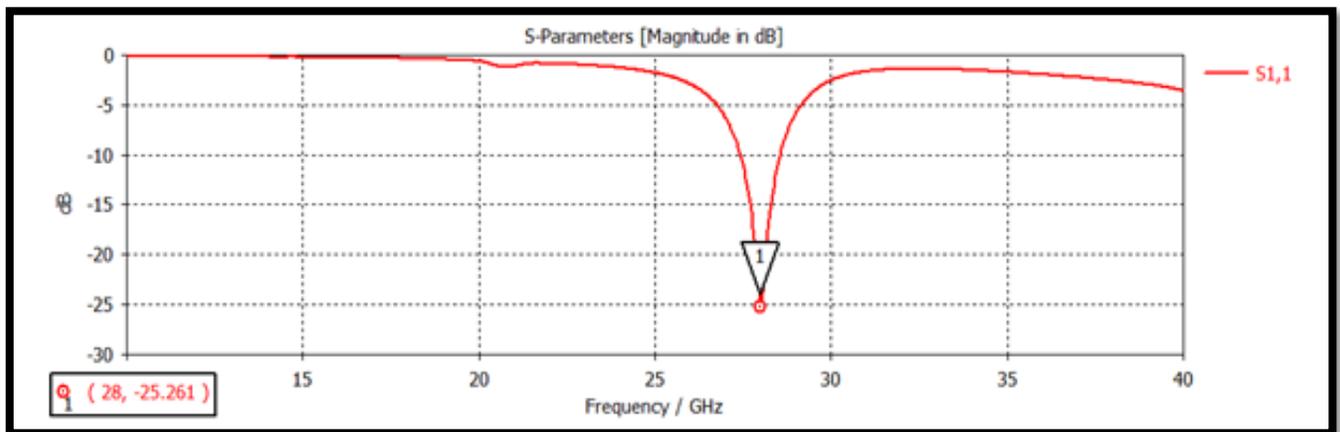


Figure III. 12:Le paramètre S11 en dB.

La figure (III.12) : après plusieurs décalages de la fréquence, on se retrouve finalement dans la fréquence désirée 28Ghz avec un S11=-25.261 dB < -10dB.

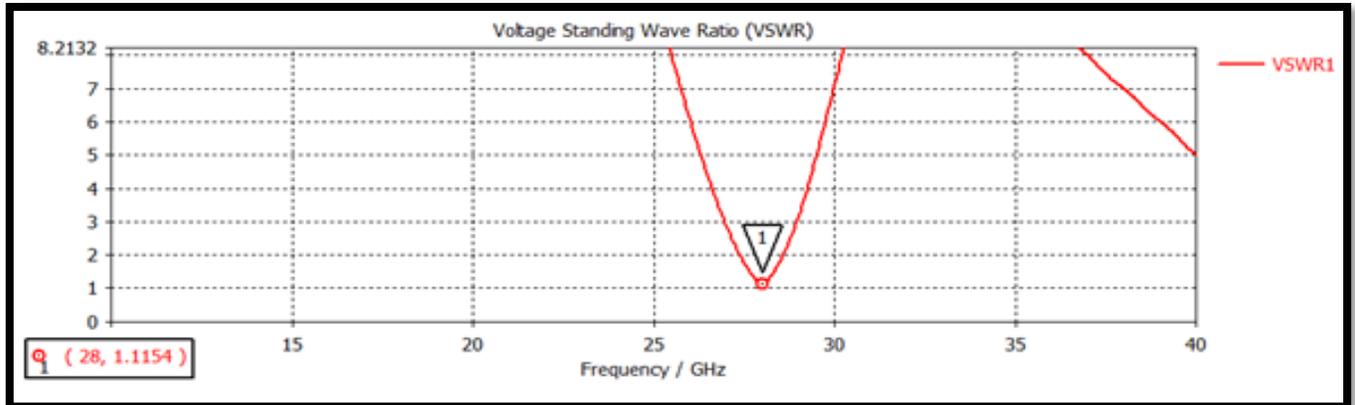


Figure III. 13: Taux d'ondes stationnaires en fonction de fréquence.

- ✓ Le VSWR est bien inférieur à 2, donc l'antenne est bien adaptée à la ligne d'alimentation.

Le Gain:

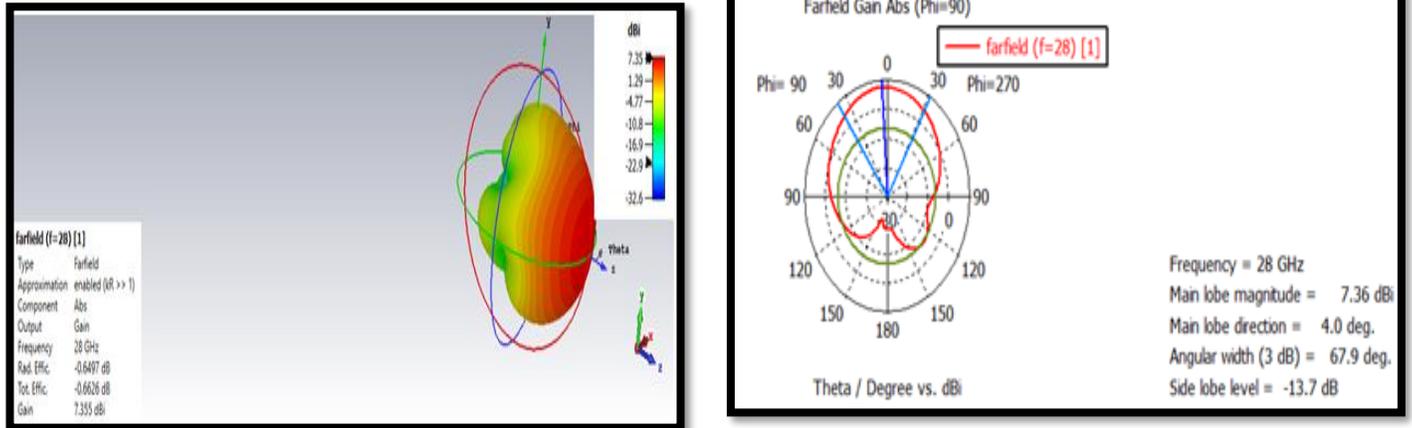


Figure III. 14: Le Gain représenté en 3D et en polaire.

La Directivité :

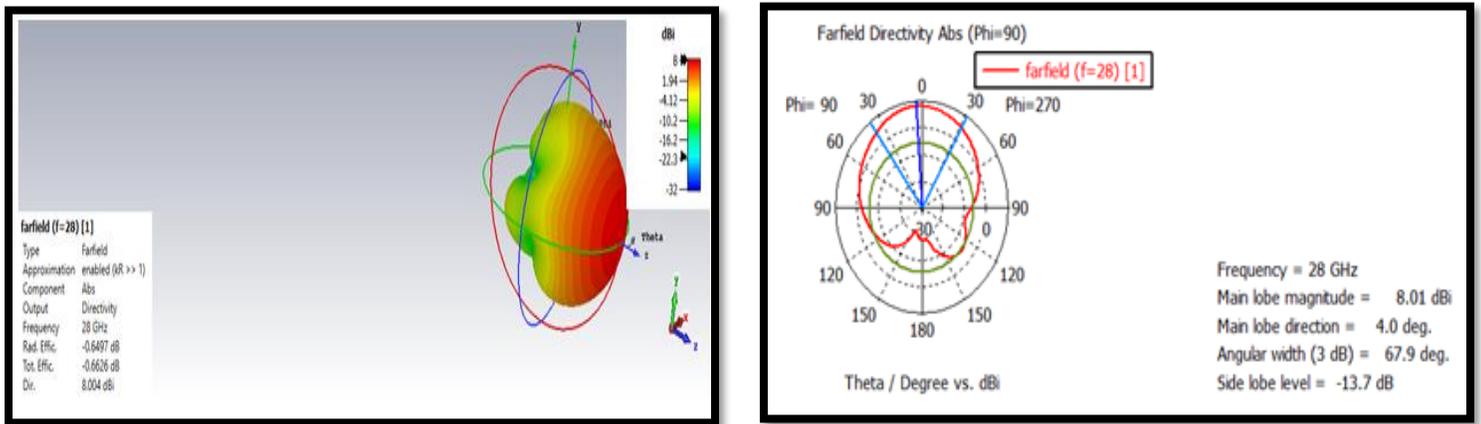


Figure III. 15: La directivité 3D et polaire.

On résume les résultats dans le tableau suivant :

La fréquence	Gain (dBi)	Directivité (dBi)	VSWR
28Ghz	7.355	8.004	1.1154

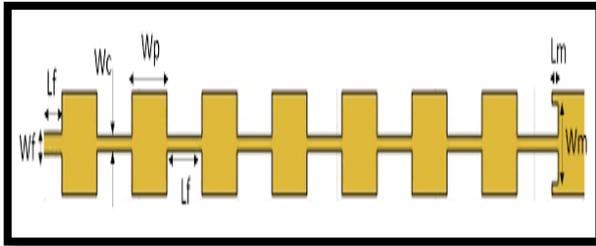
Tableau III. 4: Gain, directivité et le VSWR de l'antenne patch circulaire.

III.9. Réseaux d'antenne :

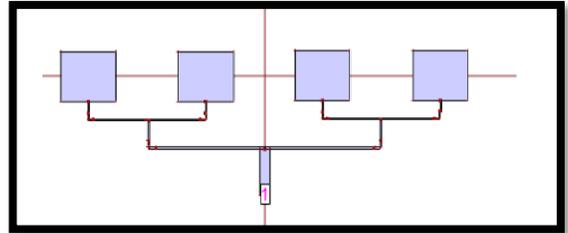
i. Définition :

Un réseau d'antenne est défini par le couplage des éléments Patch pour avoir des hautes performances tel que : Gian élevé et lobe principal conformé.

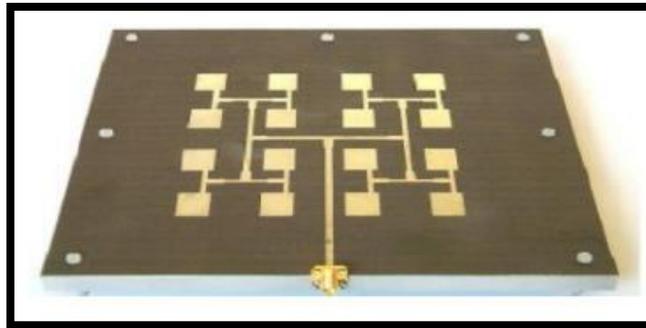
Il existe deux types de réseaux : en série ou en parallèle ou bien la combinaison série-parallèle comme illustre les figures suivantes :



(a)



(b)



(c)

Figure III. 16: réalisation de réseau à alimentation (a)linéaire en série, (b) linéaire en parallèle. (c) bidimensionnel en parallèle.

III.10. Simulation de réseau d'antenne patch circulaire

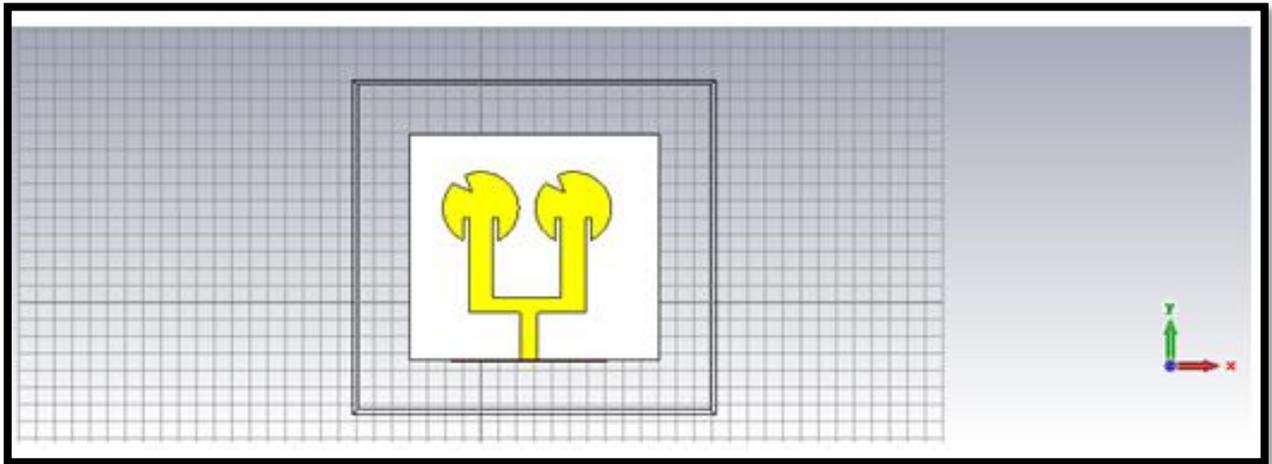


Figure III. 17: Antenne patch micro ruban avec une matrice d'élément 2×1.

10.1. Les résultats (S11, Gain, Directivité) obtenus :

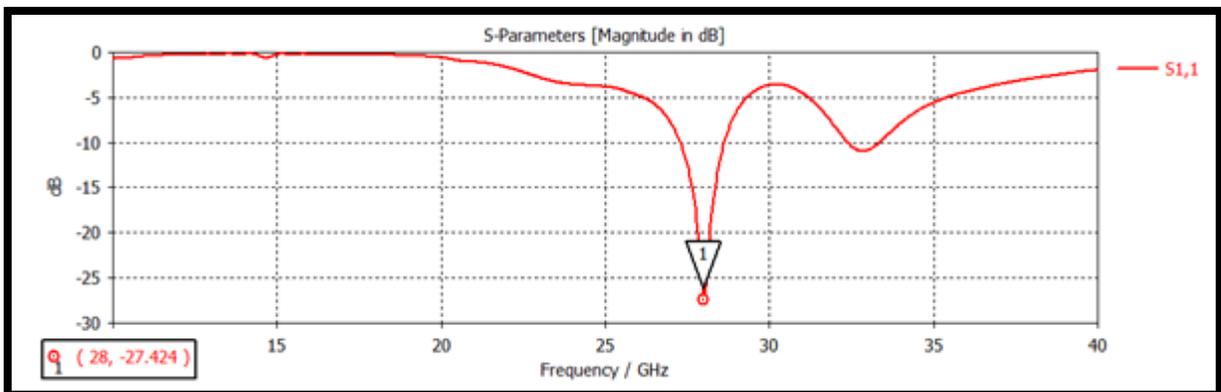


Figure III. 18: Coefficient de réflexion du réseau d'antenne patch.

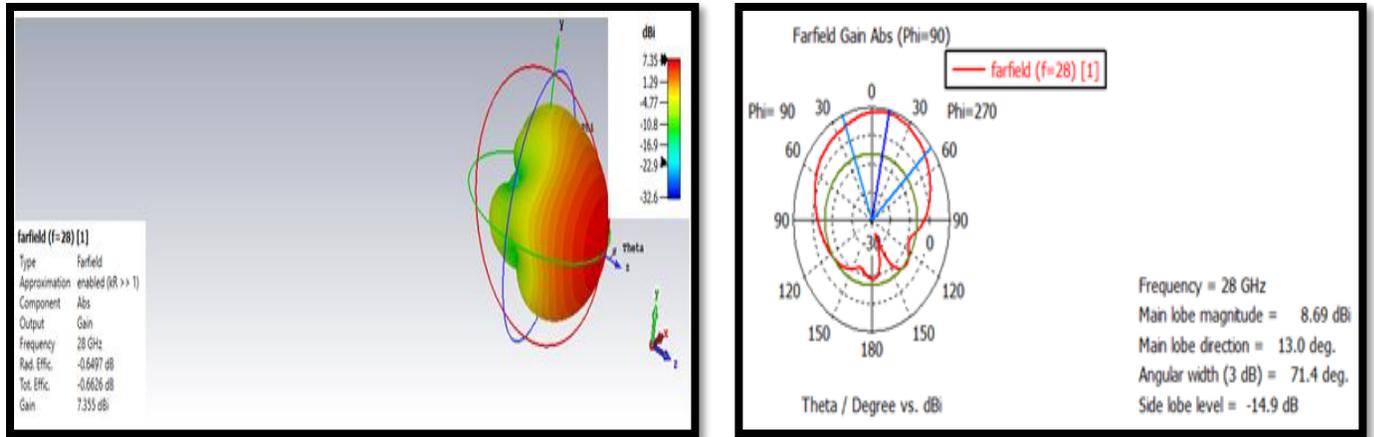


Figure III. 19: présentation du gain en 3D et polaire.

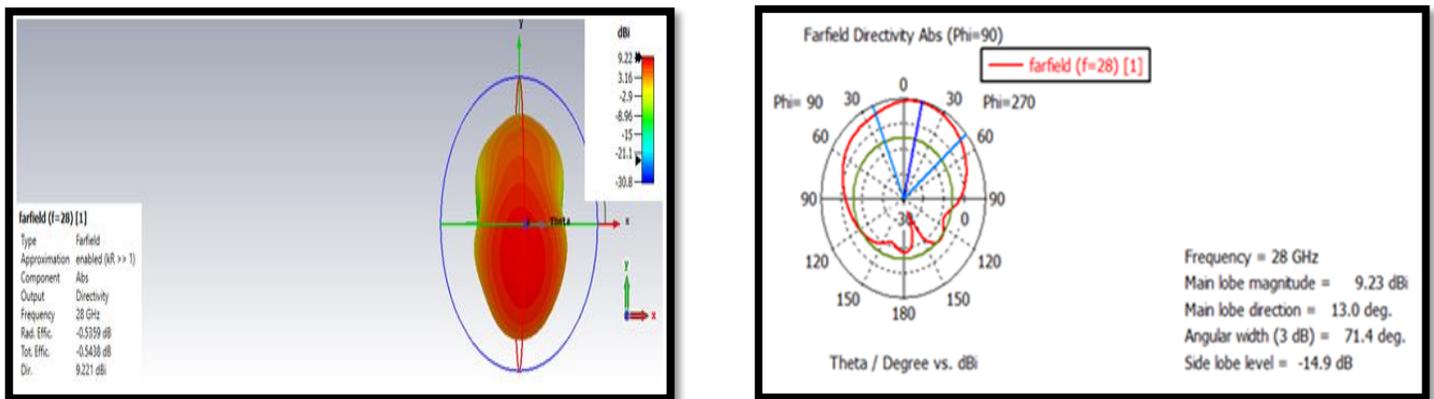


Figure III.20:présentation de la directivité de réseau d'antenne patch en 3D et polaire.

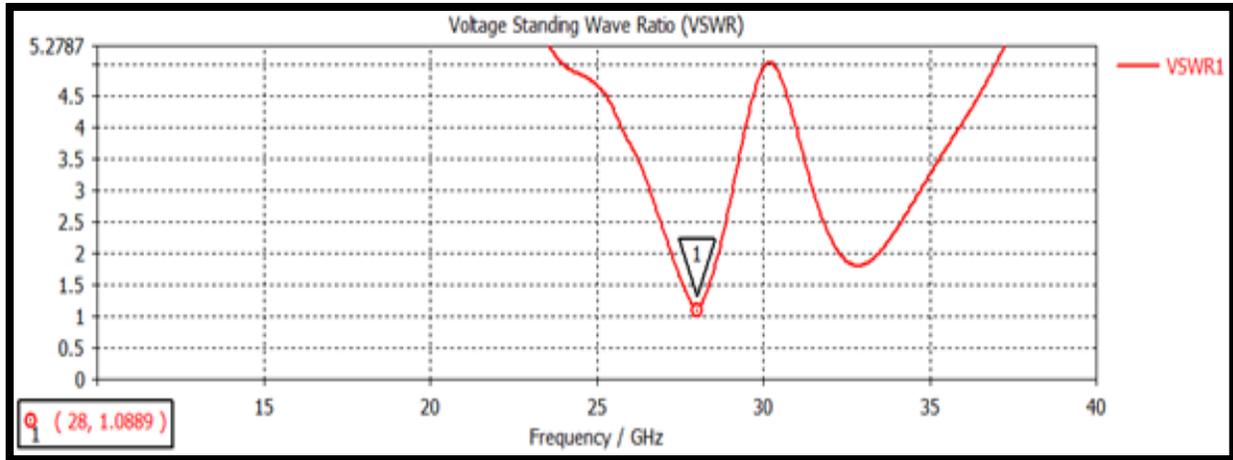


Figure III. 21: Taux d’onde stationnaire en fonction de fréquence d’un réseau d’antenne.

- Le Taux d’onde stationnaire (VSWR) est un paramètre important pour identifier les performances de l’antenne ça il décrit à quel point l’impédance de la ligne de transmission est adaptée. La bande passante pour le VSWR doit être proche de 1 pour obtenir meilleur performance. **La figure III.21** montre que la valeur de VSWR est **1.0889** et qu’elle est très proche de la valeur idéale qui vaut

III.11. Comparaison entre les résultats :

	S11 (dB)	Gain (dBi)	Directivité (dBi)	VSWR
Antenne patch circulaire	-25.261	7.355	8.004	1.1154
Réseau d’antenne de deux élément	-27.424	8.685	9.221	1.0889

Tableau III. 5: Les résultats pour les deux différentes structures.

Afin de discuter les résultats de nos réalisations, nous allons vérifier et comparer les performances d’une antenne imprimées circulaire d’un seul élément Patch et un réseau à deux éléments rayonnants. Pour cela, nous présentons les résultats dans le (**tableau III.5**) qui sont : S11, Gain, Directivité et le VSWR.

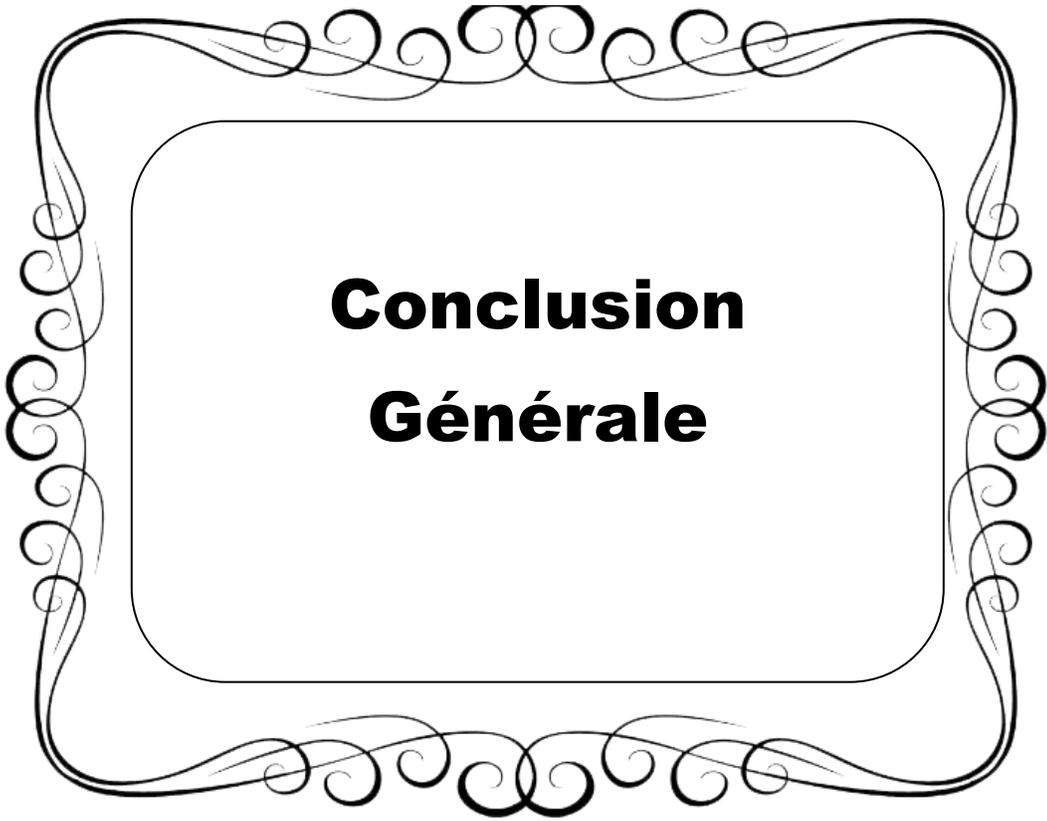
Observation:

- On observe que le gain pour un réseau de deux éléments rayonnants est plus élevé par rapport à une antenne d'un seul élément patch.
- La même chose pour la directivité.
- Le VSWR d'une antenne de deux éléments est petit par rapport à un seul élément.
- Le coefficient de réflexion d'un réseau d'antenne de deux éléments est meilleur par rapport d'une antenne d'un seul patch.

III.12. Conclusion :

En conclusion, la simulation de l'antenne patch circulaire 2×1 à 28Ghz a permis d'obtenir des résultats prometteurs. Cette configuration, avec une matrice d'éléments 2×1 a montré une amélioration significative des performances par rapport à une antenne à un seul élément. Les caractéristiques telles que le gain, la directivité et la polarisation ont été optimisées pour répondre aux spécifications requises.

L'objectif de ce chapitre est de savoir comment maîtriser la théorie d'antenne patch puisqu'elle est très essentielle, et de comprendre le principe de fonctionnement des antennes basées sur des caractéristiques tel que : le gain, diagramme de rayonnement, S11 etc. Et nous essayons de simuler et adapter notre antenne pour obtenir des hautes performances et que notre antenne rayonne bien. Tout ça à l'aide du logiciel CST Microwave studio. A la suite, nous essayons de crée un réseau de deux éléments patch et voir leur effet sur les notions d'antenne et on fait la comparaison entre les résultats trouvés.



**Conclusion
Générale**

Conclusion Générale

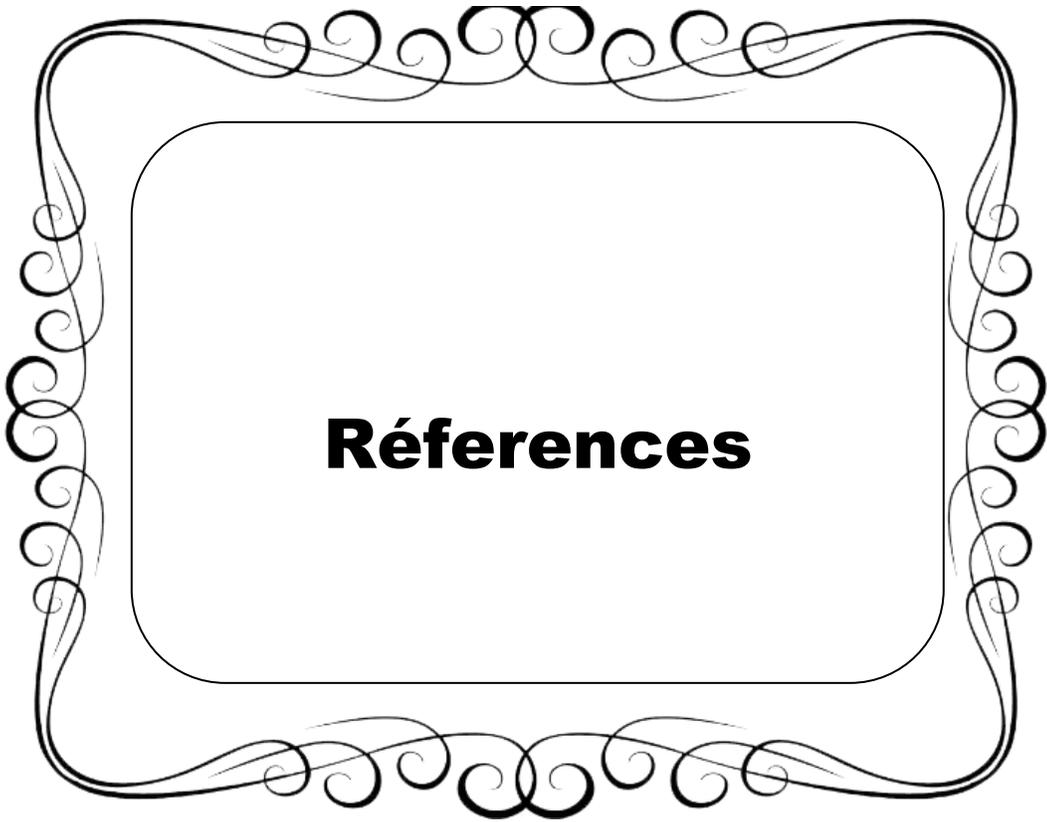
Les antennes patch ont une fonction très importante à remplir dans le monde de la communication réseau sans fil dans lesquels nous vivons aujourd'hui.

Dans le cadre de notre travail qui est organisé sur trois chapitres, nous étudions le concept des antennes patch pour l'utilisation de la 5G millimétrique.

Dans un premier temps, nous commençons par définir les antennes patch qui sont extrêmement simple à concevoir en utilisant le logiciel CST Microwave Studio, qui nous a aidé de réaliser et simuler une antenne imprimée, puis de l'adapter pour obtenir des hautes performances.

Une antenne patch micro-ruban peut être très utile pour les applications 5G. Elle peut fournir une plus grande bande passante, une faible consommation d'énergie et un gain élevé. Pour assurer un maximum d'énergie, le gain est obligatoire dans la technologie des antennes. Dans ce travail, Rogers est utilisé comme substrat car il a la capacité de travailler à une fréquence plus élevée. Ce travail conçoit et analyse une antenne patch pour la 5G résonnant à la fréquence 28GHz.

Ensuite, nous s'occupons de construire un réseau d'antenne de deux éléments afin d'obtenir une adaptation des caractéristiques d'antenne tels que le gain, S11, directivité, VSWR, et le diagramme de rayonnement. A la fin on a fait la comparaison entre l'antenne patch d'un seul élément et de deux éléments.



Bibliography

- [1] «Lélé, M., Nielson, R., Sorrell, K., & Goldstein, M. (2020). Environmental Impacts of the Fifth Generation (5G) of Wireless Communications. Environmental Research Letters, 15(8), 083001».
- [2] «Chaturvedi, S., & Chaturvedi, R. (2021). Environmental Impact Assessment of 5G Networks: A Review. Journal of Cleaner Production, 281, 125183.».
- [3] P. d. l. d. s. C. S. S. p. p. : M. M. S.M.
- [4] «Pierre-Yves Jézéquel, « Simulation d'antennes avec CST-MWS », Rapport de Stage,».
- [5] «M. Tarbouch, A. El Amri, H. Terchoune, et O. Barrou, « A compact microstrip patch».
- [6] «A. Chaabane, F. Djahli, H. Attia, L. M. abdelghani and T. A. Denidni. Wideband and highgain EBG resonator antenna based on dual layer PRS. s.l. : Microwave and Optical Technology Letters, , 2017. vol. 59, no. 1, 98–101.».
- [7] D. M. Pozar, "Microstrip antennas," IEEE, Vol. 80, N° .1, pp. 79-91, January 1992.
- [8] «A. Chaabane, F. Djahli, H. Attia, L. M. abdelghani and T. A. Denidni. Wideband and highgain EBG resonator antenna based on dual layer PRS. s.l. : Microwave and Optical Technology Letters, , 2017. vol. 59, no. 1, 98–101.».
- [9] «Narimanov, . G. Veselago and E. E.».
- [10] «Boyer., Alexandre. .« Antennes » Support De Cours Enonce De Travaux Diriges. s.l. : Institut National Des Sciences Appliquées De Toulouse. octobre 2011. .».
- [11] «Mr. Anes AROUDJ et Mr. Abdelkhalek HERIHIRI , Mémoire de Fin d'Étude ,Conception et réalisation d'une antenne patch rectangulaire 2.4GHz à base du Logiciel HFSS ,2020-2021,p12 .».
- [12] «BOUREZZANE Bisma. MANSOURI Ahmed Elamine , Présentée pour l'obtention du diplôme MASTER ACADEMIQUE ,Conception d'une antenne de tag RFID passif».
- [13] GANDOURA IBTISSEM et LAMER SOUMIA,CONCEPTION ET REALISATION DES ANTENNES FRACTALES IMPRIMEES ULTRA LARGE BANDE (ULB) A BANDE REJETEE,Mémoire de fin d'étude pour l'obtention du diplôme de Master Académique,2019..

- [14] «Yamina Tighilt. Identification des antennes micro rubans multicouches par la méthode spectrale les réseaux de neurones. s.l. : thèse de Doctorat, Institut d'électronique, Université de Sétif. Juin 2011.».
- [15] «Yamina Tighilt. Identification des antennes micro rubans multicouches par la méthode spectrale les réseaux de neurones. s.l. : thèse de Doctorat, Institut d'électronique, Université de Sétif. Juin 2011.».
- [16] I. J. Bahl and P. Bhartia, "Microstrip antennas," Dedham, Ma: Artech House 1980..
- [17] «fouedbenamrane, Par. Conception d'une antenne patch microstrip . s.l. : mémoire online, uneverstité sidi mohamed ben abedallah (Fès) maroc. 2011.».
- [18] J .R. James and P. S. Hall, "Broadband microstrip antennas," IEE Electromagnetic.
- [19] G. Kumar and K. P. Ray, "Broadband microstrip antennas," Artech House.
- [20] «Union Internationale des Télécommunications (UIT). (2021). "Rapport sur la technologie 5G».
- [21] «Le déploiement mondial de la 5G : état des lieux et perspectives,Revue des Technologies de Communication,2022 , page 45-59.».
- [22] «L'impact économique potentiel de la 5G en 2035, OCDE».
- [23] ««Heath Jr, R. W., & Gao, X. (2016). Millimeter wave communications for fifth-generation (5G) wireless networks. IEEE Communications Magazine, 54(7), 114-120.,»».
- [24] «Dupont, Marie et Martin, Pierre,L'impact de la 5G sur la latence et les applications en temps réel,Journal des Communications sans Fil, vol. 2022, no. 3, p. 45-52.».
- [25] «Smith, John,"La 5G et ses avantages", 2020,Revue des Télécommunications, Volume 25, Numéro 3, pages 45-57».
- [26] «A. N'Gom, Aliou Diallo, Jean-Marc Ribero, Aboubakar C. Beye, "Design of an Adaptive Subarray Antenna for Multi-Beams Wireless Small Cell Backhaul in mmWave" Conference on antenna measurement and applications (CAMA2018), 03/09/2018, Vasteras».
- [27] «W. H. Chin, Z. Fan, R. Haines, "Emerging technologies and research challenges for 5G wireless networks", IEEE Wireless Commun, vol. 21, n° 2, p: 106-112, Apr. 2014.».
- [28] «Heath Jr, R. W., & Gao, X. (2016). Millimeter wave communications for fifth-generation (5G) wireless networks. IEEE Communications Magazine, 54(7), 114-120.».

- [29] «J. G. Andrews, S. Buzzi, W. Choi, S. Hanly, A. Lozano, A. C. K. Soong, et J. C. Zhang. « What Will 5G Be? », IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 32, no 6, p. 1065-1082, 2014.».
- [30] «H. Haustein, G. Fettweis, et E. Zimmermann. « 5G: A Tutorial Overview of Standards, Trials, Challenges, Deployment, and Practice », IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 35, no 6, p. 1201-1221, 2017.».
- [31] «M. N. Asghar, M. Z. Shakir, J. Wang, et R. A. Abbasi. « Challenges and Solutions for Millimeter-Wave Communication Systems », IEEE Communications Magazine, vol. 56, no 6, p. 44-51, 2018.».
- [32] «Federal Communications Commission. « Spectrum Frontiers: A New Frontier in Wireless Communications », 2016. Disponible en ligne : <https://www.fcc.gov/document/spectrum-frontiers-new-frontier-wireless-communications> (consulté le 10 septembre 2021).».
- [33] «Federal Communications Commission. « Spectrum Frontiers: A New Frontier in Wireless Communications », 2016. Disponible en ligne : <https://www.fcc.gov/document/spectrum-frontiers-new-frontier-wireless-communications> (consulté le 10 septembre 2021).».
- [34] Union internationale des télécommunications (UIT), Projet de partenariat de troisième génération (3GPP), Introduction aux normes du réseau 5G.
- [35] «Chaturvedi, S., & Chaturvedi, R. (2021). Environmental Impact Assessment of 5G Networks: A Review. Journal of Cleaner Production, 281, 125183.».
- [36] «<https://www.techplayon.com/>».
- [37] «Qualcomm (2019). "How 5G will transform manufacturing and logistics".».
- [38] «MarketsandMarkets (2020). "Fleet Management Market by Solution (Operations Management, Vehicle Maintenance and Diagnostics, Performance Management, Fleet Analytics and Reporting), Service (Professional and Managed), Deployment Type, Fleet Type, and Region».
- [39] «Aoun, C., & Elhajj, I. (2021). 5G mmWave for Rural Broadband Access: Opportunities and Challenges. IEEE Communications Magazine, 59(2), 156-162.».
- [40] «International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP). (2020). Guidelines for limiting exposure to electromagnetic fields (100 kHz to 300 GHz). Health Physics, 118(5), 483-524.».

- [41] «EEA (European Environment Agency). (2020). Environmental considerations of 5G deployment.».
- [42] «Atzori, L., Iera, A., & Morabito, G. (2017). The Internet of Things: A survey. *Computer Networks*, 54, 2787-2805.».
- [43] «Gutiérrez, J., & Pérez, P. (2020). The Potential of 5G Networks for Augmented and Virtual Reality. *IEEE Access*, 8, 21550-21561.».
- [44] «EEA (European Environment Agency). (2020). Environmental considerations of 5G deployment.».
- [45] «Sreeja, S. R., & Jahanbin, S. (2021). Environmental Sustainability of 5G Millimeter-Wave Communication Networks. *IEEE Communications Magazine*, 59(3), 92-98.».
- [46] «Sreeja, S. R., & Jahanbin, S. (2021). Environmental Sustainability of 5G Millimeter-Wave Communication Networks. *IEEE Communications Magazine*, 59(3), 92-98.».