

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLICUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة أبي بكر بلقايد – تلمسان
Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen
Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

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

En: Télécommunications

Spécialité: Systèmes des Télécommunications

Par: **MIRAOUI ISRAA MERYEM**

Sujet

Conception d'un réseau d'antennes pour les applications hautes fréquences

Soutenu publiquement, en 13 Juin 2024, devant le jury composé de :

Mme Y. BELHADEF	Maître de conférences A	Univ de Tlemcen	Présidente
Mme N. HASSAINE	Maître de conférences B	Univ de Tlemcen	Examinatrice
Mme H. BENOSMAN	Maître de conférences A	Univ de Tlemcen	Encadrante
M M.A. RABAH	Maître de recherche A	CDS/ASAL Oran	Co-Encadrant

Année Universitaire: 2023 / 2024

Remerciements

*Nos remerciements vont tout d'abord à **ALLAH** tous puissant pour nous avoir donné la volonté, la patience et le courage nécessaire pour mener ce modeste travail à bout.*

*Ce travail a été réalisé au Laboratoire de Télécommunication (LTT) du Département de télécommunications de la Faculté de Technologie de l'Université de Tlemcen, sous la direction de Mme **BENOSMAN Hayet**, Maitre de conférences à l'Université de Tlemcen.*

Qu'elle veuille bien trouver ici l'expression de ma profonde et respectueuse gratitude pour l'encadrement spécifique, les conseils judicieux et le soutien constant qu'il m'a prodigués au cours de l'élaboration de ce mémoire.

*Nos remerciements s'adressent aussi à notre Co-encadrant Mr **RABAH Mohammed Amine**, et les autres professeurs qui ont toujours fait preuve d'écoute tout au long de la réalisation de ce mémoire. Merci pour votre disponibilité, votre gentillesse et pour la confiance que vous nous avez témoignée.*

*Je remercie vivement Mme **BELHADEF Yamina**, Maitre de conférences à l'Université de Tlemcen, pour l'honneur qu'elle m'a fait en acceptant la présidence du jury.*

*Je remercie respectueusement Mme **HASSAINE Nawel**, Maitre de conférences à l'université de Tlemcen, pour avoir bien voulu examiner ce travail.*

Enfin, nous adressons nos remerciements les plus sincères à tous nos proches et amis, qui nous ont constamment encouragés tout au long de la réalisation de ce mémoire.

Dédicace

Je dédie ce travail à

Mes chers parents

Les mots ne suffiront jamais à exprimer toute ma gratitude pour l'amour, le soutien et pour tous les sacrifices de tout genre qu'ils ont fait pour mon présent et mon avenir afin de faire de moi ce que je suis. Vous m'avez montré la voie avec votre sagesse, votre générosité et votre compréhension infinie.

À ma chère maman,

tu m'as montré la patience et l'importance de la compassion. Ton amour et ta douceur m'ont toujours réconforté et encouragé.

À mon cher papa,

Grâce à toi, j'ai appris à ne jamais abandonner, même face aux défis les plus difficiles..

Je vous dédie ce mémoire avec un amour éternel. Aucun mot ne peut vraiment exprimer à quel point je vous suis reconnaissante. MERCI.

À mes chers jumeaux,

Mes doubles incroyables, qui ont transformé chaque moment de stress en éclats de rire

À ma chère grand-mère

A ma chère tante AMEL

À toute la famille MIRAOUI

Et la famille MEHDID

À ma chère tante NARIMANE et mes chères cousines

À mes chère amis MALIKA et SOHEIB

À vous deux, qui avez été mes sources infinies de soutien tout au long de ce parcours d'études. Votre présence et votre amitié sincère ont été mes plus grands trésors tout au long de ce voyage. Vous avez été, mes motivants et mes supporters les plus fervents.

À mes meilleurs RANIA, AMINE, ISMAIL

Et à tous ceux qui me sont chers Pour leurs amours, leurs soutiens et leurs encouragements constants tout au long de mes études. Leurs présences et leurs confiances ont été une source d'inspiration et de motivation pour moi

RESUME

Dans divers systèmes de communication, l'antenne joue un rôle essentiel permettant de faciliter la transmission et la réception des signaux électromagnétiques. Elle agit comme un intermédiaire crucial entre les appareils émetteurs et récepteurs, convertissant les signaux électriques en ondes électromagnétiques pour l'émission, et vice versa pour la réception. Parmi ces antennes, on trouve les antennes imprimées qui sont de plus en plus populaires en raison de leur taille compacte, de leur flexibilité de conception et de la disponibilité de logiciels de simulation avancés, facilitant leur conception et leur optimisation. Par ailleurs, les contraintes de taille imposées par les applications mobiles et les caractéristiques spécifiques du canal de transmission exigent des antennes capables de fournir un gain élevé pour une efficacité maximale, notamment dans des domaines tels que les radars. Les réseaux antennes semblent être des candidates idéales, pour garantir des performances optimales des antennes imprimées.

Notre objectif est de concevoir des structures de réseaux d'antennes imprimées destinées pour les radars anticollisions fonctionnant dans la bande de fréquence 22-26.625 GHz de fréquence centrale 24 GHz. Cette étude permettra de mettre en lumière l'application de la technique du diviseur de puissance en jonction T pour la mise en réseau des éléments rayonnants dans le but d'améliorer les performances de l'antenne, notamment en termes de gain. Les structures conçues seront modélisées et simulées dans l'environnement CST-Microwave Studio, basé sur la méthode intégrale (FIT).

Mots clés : Antennes microruban, Réseau d'antennes, Radar, CST MWS, Graphène.

ABSTRACT

In various communication systems, antennas play an essential role in facilitating the transmission and reception of electromagnetic signals. They serve as crucial intermediaries between transmitting and receiving devices, converting electrical signals into electromagnetic waves for transmission and vice versa for reception. Among these antennas, printed antennas are gaining popularity due to their compact size, design flexibility, and the availability of advanced simulation software, which facilitates their design and optimization. Additionally, size constraints imposed by mobile applications and the specific characteristics of the transmission channel necessitate antennas capable of providing high gain for maximum efficiency, particularly in areas such as radars. Array antennas appear to be ideal candidates to ensure optimal performance of printed antennas.

Our objective is to design printed antenna array structures intended for collision avoidance radars operating in the frequency band of 22-26.625 GHz, with a central frequency of 24 GHz. This study will highlight the application of the T-junction power divider technique for networking radiating elements with the aim of improving the antenna's performance, particularly in terms of gain. The designed structures will be modeled and simulated in the CST-Microwave Studio environment, utilizing the integral method (FIT).

Keywords: Microstrip antennas, Antenna array, radar, CST MWS, Graphene.

ملّخص

في أنظمة الاتصالات المختلفة، يلعب الهوائي دورًا أساسيًا في تسهيل إرسال واستقبال الإشارات الكهرومغناطيسية. وهو يعمل كوسيط حاسم بين أجهزة الإرسال والاستقبال، حيث يحول الإشارات الكهربائية إلى موجات كهرومغناطيسية للإرسال، والعكس للاستقبال. ومن بين هذه الهوائيات المطبوعة التي تحظى بشعبية متزايدة نظرًا لحجمها الصغير ومرونة تصميمها وتوافر برامج محاكاة متقدمة، مما يسهل تصميمها وتحسينها. علاوة على ذلك، تتطلب قيود الحجم التي تفرضها التطبيقات المتنقلة والخصائص المحددة لقناة الإرسال هوائيات قادرة على توفير كسب عالي لتحقيق أقصى قدر من الكفاءة، لا سيما في مجالات مثل الرادارات. يبدو أن مصفوفات الهوائي مرشحة مثالية لضمان الأداء الأمثل للهوائيات المطبوعة.

هدفنا هو تصميم هياكل صيف هوائيات مطبوعة مخصصة لرادارات تجنب الاصطدام العاملة في نطاق التردد 22-26,625 جيجا هرتز مع تردد مركزي قدره 24 جيجا هرتز. ستسلط هذه الدراسة الضوء على تطبيق تقنية مقسم القدرة T-junction لربط العناصر المشعة بهدف تحسين أداء الهوائي، خاصة من حيث الكسب سيتم تصميم و محاكاة الهياكل المصممة في بيئة CST – Microwave Studio بناء على الطريقة المتكاملة (FIT).

الكلمات الرئيسية: هوائيات مايكر و روبان، شبكة هوائيات، رادار، CST MWS، الجرافين

Table des Matières

Remerciements	II
Dédicaces	III
Résumé	IV
Abstract	V
ملخص.....	VI
Liste des Figures	X
Liste des Tableaux	XIII
Acronymes et Abréviations	XIV
Introduction Générale	15
Chapitre I : Généralités sur Les antennes Microrubans et les réseaux d'antennes.....	20
I.1 Introduction.....	21
I.2 Historique	21
I.3 Configuration d'une antenne micro-ruban.....	21
I.4 Les différentes formes des antennes microrubans	22
I.5 Mode de fonctionnement d'une antenne micro-ruban	22
I.6 Alimentation des antennes micro ruban	23
I.6.1.a Par ligne micro-ruban	24
I.6.1.b Par sonde coaxiale.....	24
I.6.2.a Alimentation couplée par fente	25
I.6.2.b Alimentation par couplage de proximité	25
I.7 Caractéristiques de rayonnement des antennes microrubans.....	26
I.7.1 Coefficient de réflexion	26
I.7.2 La directivité	27
I.7.3 Le gain	28
I.7.4 L'impédance d'entrée	28
I.7.5 Diagramme de rayonnement	28
I.8 Avantages et inconvénients [12]	29
I.9 Champ d'application des antennes microrubans	30
I.10 Réseaux d'antennes imprimées.....	30
I.10.1 Définition.....	31
I.10.2 Structures d'un réseau d'antennes microrubans	31
I.10.3 Alimentation du réseau d'antennes	33

I.10.3.a Alimentation en série	33
I.10.3.b Alimentation en parallèle.....	33
I.10.4 Dispositifs employés pour l'alimentation du réseau d'antennes	34
I.11 Conclusion	35
CHAPITRE II ANTENNES POUR APPLICATIONS RADAR.....	38
II.1 Introduction.....	39
II.2 Historique	39
II.3 Définition	40
II.4 Le principe de fonctionnement	40
II.4.1 Calcul de la distance	41
II.4.2 Calcul de la direction	42
II.5 Bandes de fréquence utilisées en radar :.....	42
II.5.1 Bandes A (radar HF et VHF).....	43
II.5.2 Bande C (radars UHF)	43
II.5.3 Bande D (radar de bande L)	43
II.5.4 Bandes E et F (radar de bande S)	43
II.5.5 Bande G (radar de bande C).....	43
II.5.6 Bandes I et J (radar de bandes X et Ku).....	43
II.5.7 Bande K (radars K et Ka)	44
II.5.8 Bande V	44
II.5.9 Bande W	44
II.6 Structure d'un système radar	44
II.6.1 Antenne.....	45
II.6.2 Émetteur.....	45
II.6.3 Récepteur	45
II.6.4 Duplexeur	46
II.7 Classification des systèmes radars.....	46
II.7.1 Radars imageurs et Radars non imageurs.....	46
II.7.1.a Radars primaires.....	47
II.7.1.b Radars secondaires.....	47
II.8 Antennes pour les radars.....	48
II.8.1 Antenne Cornet	48
II.8.2 Antenne Parabolique.....	49

II.8.3 Antenne Log-Périodique.....	50
II.8.4 Antenne à Fente.....	51
II.8.5 Antenne Patch.....	51
II.9 Les applications des radars.....	52
II.9.1 Surveillance aérienne et de la circulation aérienne.....	52
II.9.2 Détection de précipitations et de phénomènes météorologiques.....	53
II.9.4 Détection d'objets en mouvement sur la route (anticollision).....	53
II.10 Conclusion.....	53
Chapitre III Conception et simulation d'un Réseau d'Antennes microrubans.....	55
III.1 Introduction.....	56
III.2 Outils de simulation.....	56
III.3 Conception et simulation.....	57
III.3.1 Conception de la structure élémentaire.....	57
III.3.1.1 Paramètres géométriques de l'antenne.....	57
III.3.1.2 Géométrie.....	58
III.3.2 Résultats de simulation.....	59
III.3.2 Conception des réseaux d'antennes.....	62
III.3.2.1 Réseau d'antennes à deux éléments.....	62
III.3.2.2 Réseau d'antennes à quatre éléments.....	66
III.3.2.3 Réseau d'antennes à huit éléments (2*4).....	70
III.3.3 Réseau d'antennes imprimées en graphène.....	74
III.3.3.1 Introduction.....	74
III.3.3.2 Définition.....	75
III.3.3.2 Caractéristiques du graphène.....	75
III.3.3.3 Conception et simulation.....	77
III.3.3.3 a. Antenne conventionnelle à base de graphène.....	77
III.3.3.3 b. Réseaux d'antennes à base de graphène.....	80
III.4 Conclusion.....	87
Bibliographie.....	88
Conclusion Générale.....	89

Listes Des Figures

Chapitre I

Figure I.1: Structure d'une antenne patch [3].	22
Figure I.2: Différentes formes de l'antenne microruban [4].	22
Figure I.3 : Fonctionnement d'une antenne microruban.	23
Figure I.4: Alimentation par ligne micro-ruban [6].	24
Figure I.5: Alimentation par sonde coaxiale [7].	24
Figure I.6: Alimentation couplée par fente [8].	25
Figure I.7: Alimentation par proximité [8].	26
Figure I.8: Représentation du diagramme de rayonnement d'une antenne [11].	29
Figure. I.9: Réseau d'antennes linéaire [14].	31
Figure I.10: Réseau d'antennes circulaire [14].	32
Figure. I.11: Réseau d'antennes planaire [14].	32
Figure I.12: Alimentation du réseau d'antennes en série [15].	33
Figure I.13: Alimentation du réseau d'antennes en parallèle [15].	33
Figure I.14: Diviseur De Wilkinson	34
Figure I.15: Diviseur de puissance en Jonction T.	35

Chapitre II

Figure II.1: antenne radar longue portée [4].	40
Figure II.2: principe de fonctionnement du radar [1].	41
Figure II.3: Calcul de la direction [1].	42
Figure II.4: bandes de fréquence du radar [1].	42
Figure II.5: structure d'un radar [4].	45
Figure II.6: classification des systèmes radars [1].	46
Figure II.7: Radar primaire [4].	47
Figure II.8: Radar secondaire [4].	47
Figure II.9: Antenne cornet [5].	48
Figure II.10: réflecteur parabolique [6].	49
Figure II.11: Antenne Log-Périodique [5].	50
Figure II.12: Antenne à Fente [6].	51
Figure II.13: Antenne patch [7].	52
Figure II.14: Surveillance aérienne et de la circulation aérienne [9].	52

Chapitre III

Figure III.1 : Antenne patch circulaire (a) : initiale (b) : modifiée.	58
Figure III.2 : Coefficient de réflexion de l'antenne patch circulaire.....	59
Figure III.3 : représentation de la bande passante à -10 dB de l'antenne circulaire modifiée.	60
Figure III. 4 : VSWR de l'antenne patch circulaire.	60
Figure III.5 : Diagramme de rayonnement en 3D de l'antenne initiale à la fréquence 24 GHz.	61
Figure III.6 : Diagramme de rayonnement de l'antenne initiale en 2D sur les deux plans : (a) plan xoz et (b) plan yoz.....	62
Figure III.7 : Structure du réseau d'antennes à deux éléments.	63
Figure III.8 : Coefficient de réflexion S_{11} en fonction de la fréquence du réseau d'antennes à deux éléments	Err
eur ! Signet non défini.	
Figure III.9 : Gain en fonction de la fréquence du réseau d'antennes à deux éléments à la fréquence 24 GHz.....	64
Figure III.10 : Diagramme de rayonnement du réseau d'antennes à deux éléments en 2D sur les deux plans : (a) plan xoz et (b) plan yoz.	65
Figure III.11 : Structure du réseau d'antennes à quatre éléments.	66
Figure III.12 : Coefficient de réflexion en fonction de la fréquence du réseau d'antennes à quatre éléments. (a) : pour les différentes valeurs de S, (b) : pour l'antenne optimisée.	67
Figure III.13 : Variation de l'impédance d'entrée du réseau d'antennes à quatre éléments en fonction de la fréquence.	68
Figure III.14 : Diagramme de rayonnement du réseau d'antennes à quatre éléments en 2D sur le plan $\varnothing=90^\circ$	Err
eur ! Signet non défini.	
Figure III.15 : Gain du réseau d'antennes à quatre éléments en fonction de la fréquence.	Err
eur ! Signet non défini.	
Figure III.16 : Diagramme de rayonnement en 3D à la fréquence 24 GHz.	70
Figure III.17 : réseau d'antennes microruban constitué de huit éléments.	70
Figure III.18 : Coefficient de réflexion en fonction de la fréquence du réseau d'antennes à huit éléments.....	71
Figure III.19 : TOS du réseau d'antennes à huit éléments.	72

Figure III.20 : Diagramme de rayonnement du réseau d'antennes à quatre éléments en 2D sur le plan $\varnothing=90^\circ$ (a) à la fréquence 24 GHz et (b) à la fréquence 26.4 GHz.	73
Figure III.21 : Diagramme de rayonnement 3D du réseau d'antennes à huit éléments à la fréquence 24 GHz.	74
Figure III. 22 : Structure chimique du Graphène.....	75
Figure III.23 : Antenne initiale à base de graphène.	77
Figure III.24 : Coefficient de réflexion de l'antenne patch à base de graphène.....	78
Figure III.25 : coefficient de réflexion S_{11} en fonction de la fréquence de l'antenne à base de graphène pour les différentes valeurs μc du potentiel chimique.	78
Figure III.27 : Le rayonnement 3D de l'antenne patch en graphène.....	80
Figure III.28 : Coefficient de réflexion S_{11} en fonction de la fréquence du réseau d'antennes (2*1) en graphène pour les différentes valeurs du potentiel chimique.	81
Figure III.29 (a) : Coefficient de réflexion S_{11} en fonction de la fréquence pour le réseau d'antennes (2*1) en graphène. (b) Diagramme de rayonnement au plan E.....	82
Figure III.30 : Rayonnement en 3D du réseau d'antennes patch (2*1) à base de graphène	82
Figure III.31 : Coefficient de réflexion S_{11} en fonction de la fréquence du réseau d'antennes (2*2) à base de graphène.	83
Figure III.32 : coefficient de réflexion S_{11} en fonction de la fréquence du réseau d'antennes (2*2) optimisé à base de graphène.	84
Figure III.33 : Coefficient de réflexion S_{11} en fonction de la fréquence pour le réseau d'antennes (2*2) en graphène.	84
Figure III.34 : Diagramme de rayonnement pour le réseau d'antennes (2*2) à base de graphène (a) : au plan E, (b) en 3D.....	85

Listes des Tableaux

Tableau III-1 : Dimensions de l'antenne initiale modifiée.	58
Tableau III-2 : Paramètres de la jonction T du réseau en parallèle à deux éléments.	62
Tableau III-3 : Performances du réseau d'antennes à huit éléments pour les deux fréquences.	72
Tableau III-4 : Comparaison des performances des réseaux d'antennes conventionnels et à base de graphène.	84

Acronymes et abréviations

VSWR : Voltage Standing Wave Ratio

BW : Bandwith

ABW : Absolute bandwidth

FBW : Fractional bandwidth

UWB : Ultra-wide broadband

WPD : Wilkinson Power Divider

RF : Radiofréquence

TEM : Transverse ElectroMagnétique

RADAR : Radio Detection And Ranging

BMD : ballistic missile defense

ICBM : intercontinental ballistic missiles

dB: décibel

INTRODUCTION GENERALE

Introduction Générale

Dans le domaine de la surveillance et de la détection, les systèmes radars jouent un rôle vital en fournissant des informations cruciales sur les objets en mouvement dans leur environnement. Les antennes radar constituent le cœur de ces systèmes, étant responsables de la transmission et de la réception des signaux électromagnétiques [1].

Le contexte actuel de développement des systèmes radar est marqué par une demande croissante en matière de performances et de polyvalence. Les applications radar couvrent un large éventail de domaines, allant de la surveillance aérienne et maritime à la météorologie, en passant par la sécurité nationale et la défense. Dans chaque domaine, les exigences spécifiques en termes de portée, de résolution, de sensibilité et de fiabilité imposent des défis considérables dans la conception des systèmes radar. Parmi ces derniers, on trouve **le radar anticollision** qui est un dispositif crucial dans les systèmes de navigation tactique ainsi que les dispositifs de sécurité anticollision des véhicules, assurant leur protection lorsqu'ils se déplacent à proximité. Deux bandes de fréquences sont habituellement utilisées pour le régulateur de vitesse adaptatif (RVA) à savoir la bande 22-26,625 GHz et la bande 76-77 GHz. Une résolution d'environ un mètre et une portée allant de 2 à 150 mètres ont été obtenues pour une fréquence comprise dans la deuxième bande [2]. Dans le contexte du radar, la dimension de l'antenne joue un rôle déterminant dans la précision des mesures angulaires, selon la fréquence utilisée. Une antenne plus large aura une directivité plus élevée et un faisceau plus étroit, ce qui peut améliorer la précision du radar pour la détection et la localisation des objets dans les coordonnées angulaires [2]. Ainsi, une meilleure résolution en distance est obtenue dans bande de fréquences de 22-26,625 GHz, ce qui stimule le développement d'antennes adaptées à diverses applications radar dans cette plage de fréquences.

En outre, dans le contexte des applications automobiles, l'intégration des antennes pose des défis particuliers en raison des contraintes imposées par la structure physique des véhicules. Ces contraintes incluent la nécessité pour les antennes d'être simples dans leur conception, afin de faciliter leur installation et leur intégration avec le véhicule sans nécessiter de modifications majeures. Ces antennes doivent être conçues de manière à ne pas compromettre l'aérodynamisme du véhicule, afin de maintenir ses performances en termes d'efficacité énergétique et de stabilité à grande vitesse. Elles doivent être capables de maintenir une qualité de signal optimale même lorsque le véhicule est en mouvement, en atténuant les effets de la dégradation du signal causée par les obstacles et les

interférences. Dans ce contexte, les antennes microrubans (imprimées) émergent comme une solution privilégiée, offrant une conception compacte et facile à intégrer tout en répondant aux exigences de performances nécessaires pour les applications automobiles. Le gain et la bande passante sont des aspects primordiaux de leur conception, influençant directement leurs performances de communication [3].

Cependant, ce type d'antennes présente certaines limites, notamment la bande passante étroite et le faible gain [4]. L'association en réseau de plusieurs antennes imprimées permet de compenser les limitations des caractéristiques d'une seule antenne tout en améliorant leurs performances en gain et rayonnement.

Dans le cadre de notre recherche, nous nous concentrons sur la conception des réseaux d'antennes microrubans à plusieurs éléments, adapté aux exigences spécifiques des systèmes radars anticollisions. Pour mener à bien cette tâche, nous avons choisi d'utiliser le logiciel de simulation électromagnétique CST Microwave Studio comme outil principal de conception. Notre approche consiste à exploiter les fonctionnalités de ce logiciel pour calculer divers paramètres cruciaux des antennes, notamment le coefficient de réflexion, qui définit leur mode de fonctionnement, la bande passante ainsi que le gain.

Ce document est structuré en trois chapitres :

Le premier chapitre sera consacré à une présentation sur les antennes microrubans et les réseaux d'antennes. Nous exposerons en premier lieu la structure, le fonctionnement et les différentes formes géométriques d'une antenne microrubans, ainsi que les techniques d'alimentation. Nous examinerons ensuite les caractéristiques de rayonnement de ce type d'antenne et les méthodes permettant d'assurer leur adaptation en impédance. Enfin, nous discuterons des avantages et des inconvénients qui leurs sont associés, ainsi que des divers domaines d'application dans lesquels elles sont largement utilisées. En second lieu, nous aborderons la définition du réseau d'antennes imprimées ainsi que l'intérêt que porte ce type de réseau. Nous exposerons par la suite les différentes techniques d'alimentation utilisées, en mettant l'accent sur les dispositifs employés pour leur alimentation à savoir les diviseurs de Wilkinson et les diviseurs de puissances en jonction T. Et pour finir, nous parlerons des avantages et des inconvénients de ce types de réseau et les différents domaines d'application dans lesquels elles se sont imposées.

Dans le deuxième chapitre, nous allons présenter l'environnement des systèmes radar. Nous allons aborder en premier lieu, leur historique, leur structure ainsi que leur

mode de fonctionnement. Nous allons examiner ensuite les différents types d'antennes radar les plus couramment utilisées, en mettant en évidence leurs caractéristiques spécifiques ainsi que les domaines d'application. Enfin, nous présenterons des exemples concrets d'applications radar où les antennes jouent un rôle central, soulignant ainsi leur importance dans des secteurs tels que la surveillance aérienne, la détection des objets, la météorologie, la sécurité et la défense.

Le troisième chapitre sera consacré à la conception et la simulation des réseaux d'antennes imprimées. En premier lieu, nous aborderons la phase initiale de conception de l'élément d'antenne, qui constitue l'élément essentiel pour la mise en place du réseau d'antennes. La deuxième section détaillera les différentes étapes suivies pour concevoir des réseaux d'antennes avec des configurations variées, allant de deux à huit éléments. Nous présenterons en détail les méthodologies de conception employées, ainsi que les résultats de simulation obtenus à chaque étape. Enfin, la dernière section se concentrera sur une étude comparative entre les réseaux d'antennes conventionnels et ceux basés sur le graphène, offrant des perspectives pour les choix de conception dans divers contextes d'applications.

Bibliographie

- [1] Alexandre Boyer. ANTENNES , INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUEES DE TOULOUSE. Octobre 2011
- [2] Slovic M, Jokanovic B, Kolundzija B. High efficiency patch antenna for 24 GHz anticollision radar. In: TELSIKS 2005–2005 uth International Conference on Telecommunication in ModernSatellite, Cable and Broadcasting Services, vol. 1; 2005. p. 20–3. doi: 10.1109/TELSKS.2005.1572055.
- [3] Gautam AK, Yadav S, Rambabu K. Design of ultra-compact UWB antenna with band-notched characteristics for MIMO applications. IET Microwaves Antennas Propag 2018;12(12):1895–900.
- [4] B. MEKIMAH," Etude du fonctionnement en mode bifréquence des patchs microbandes empilés et excentrés ", Mémoire de Magister, Université Kasdi Merbah Ouargla ,11/2013.

CHAPITRE I

**GENERALITES SUR LES ANTENNES
MICRORUBANS ET LES RESEAUX D'ANTENNES**

I.1 Introduction

Les antennes microrubans sont des dispositifs essentiels dans le domaine des télécommunications et de l'électronique, offrant une alternative compacte et efficace aux antennes traditionnelles. Leur conception simple et leur polyvalence en font des choix populaires pour une gamme variée d'applications, allant des communications sans fil aux systèmes radar en passant par les technologies spatiales. Ce genre d'antennes est né de la réflexion de certains chercheurs sur l'application de la technologie des circuits imprimés.

Cette technologie, qui a grandement influencé le développement de l'électronique dans les années 1960, a été envisagée pour concevoir des structures rayonnantes minces, connues sous le nom d'antennes microrubans ou antennes imprimées.

Ce chapitre a pour objectif de fournir un bref historique des antennes microrubans, leur configuration géométrique, leur mode de fonctionnement, ainsi que les différentes formes disponibles. Nous aborderons également les diverses méthodes d'alimentation, les avantages qui ont conduit à leur utilisation dans de multiples domaines d'application, ainsi que les limitations associées à ces antennes.

I.2 Historique

Les antennes micro-ruban, ou antennes patch, ont été développées pour la première fois en 1953 par Georges Deschamps aux États-Unis. Leur développement pratique a commencé dans les années 1970 avec Munson, qui a démontré leur faisabilité pour les applications aéronautiques. Au cours des années 1980, elles ont été largement adoptées dans les systèmes radar et de communication en raison de leur faible coût et de leur profil bas. Les années 1990 ont vu leur expansion dans les télécommunications mobiles et les systèmes de satellites, avec des recherches axées sur l'amélioration de la bande passante et de la directivité. Depuis les années 2000, les avancées en matériaux et technologies de fabrication ont permis des conceptions plus sophistiquées, rendant les antennes micro-ruban omniprésentes dans les technologies sans fil modernes, y compris les réseaux 4G, 5G et l'Internet des Objets [1] [2].

I.3 Configuration d'une antenne micro-ruban

Dans sa configuration la plus classique, une antenne microruban se compose d'un élément métallique (patch) imprimé sur une fine couche diélectrique isolante (substrat) placée au-dessus d'un plan de masse comme le montre la **Figure I.1**. Depuis leur introduction, les antennes imprimées sont devenues un sujet de recherche très populaire,

attirant l'attention à la fois des communautés industrielles et académiques. Des milliers d'articles ont été publiés sur ce sujet, introduisant de nombreuses améliorations et contribuant à une évolution rapide du concept initial et à une diffusion généralisée dans de nombreuses applications [3].

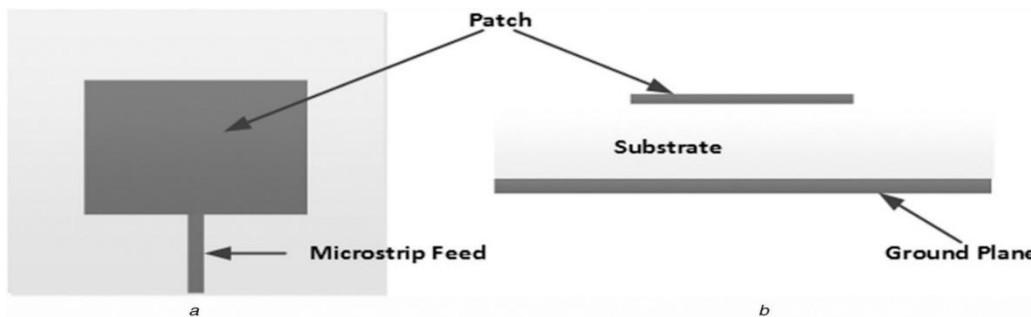


Figure I.1: Structure d'une antenne patch [3].

I.4 Les différentes formes des antennes microrubans

Les diverses configurations du patch offrent une analyse et une fabrication aisées, ainsi qu'un diagramme de rayonnement attrayant. Les dipôles microrubans, quant à eux, se distinguent par leur large bande passante et leur encombrement réduit, les rendant idéaux pour la construction de réseaux d'antennes. La **Figure I.2** présente les différentes formes qui peuvent être associées à une antenne imprimée.

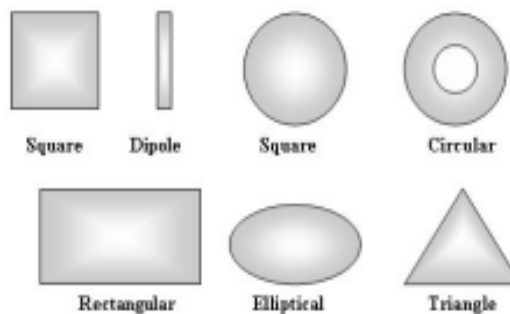


Figure I.2: Différentes formes de l'antenne microruban [4].

I.5 Mode de fonctionnement d'une antenne micro-ruban

Le mode de fonctionnement d'une antenne microruban peut être modélisé celui par une cavité résonante. Dans une cavité résonante, les ondes électromagnétiques sont confinées et réfléchies entre les parois de la cavité, créant ainsi des modes de résonance. De manière similaire, dans une antenne microruban, le patch métallique agit comme une

cavité résonante où les ondes électromagnétiques sont confinées et guidées le long de la surface du substrat diélectrique selon un ensemble de modes de type $T M m n$ [4].

Le rayonnement issu de cette configuration entraîne des pertes qui se produisent au niveau des parois magnétiques. Une partie du signal émis est renvoyée successivement par le plan de masse, puis par le conducteur supérieur, et ainsi de suite. Les configurations et orientations des lignes de champ entre les bords de la plaque rayonnante et le plan de masse déterminent les directions prédominantes du champ rayonné.

En général, le mode fondamental est reconnu comme le mode prédominant de fonctionnement pour ce type d'antennes. Il transporte la plus grande quantité d'énergie et se distingue par une répartition du champ électrique sous l'élément rayonnant, avec au moins une dimension égale à une demi-longueur d'onde comme le montre la **Figure I.3**.

Les courants de surface engendrés sur l'élément métallique sont alignés le long de l'axe de symétrie passant par le point d'excitation [5].

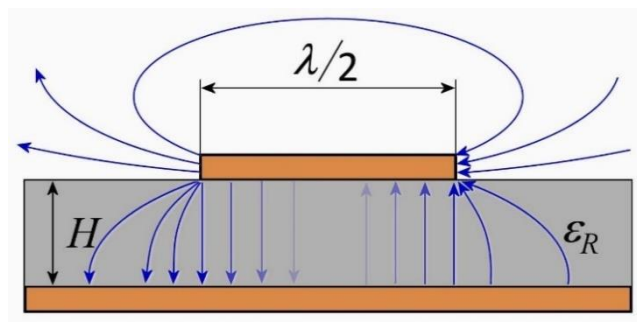


Figure I.3 : Fonctionnement d'une antenne micro-ruban.

I.6 Alimentation des antennes micro ruban

L'alimentation des antennes micro-rubans peut être effectuée de deux manières principales : par contact et par couplage.

I.6.1 Alimentation via un contact direct

Ici, l'alimentation est connectée directement à la couche métallique de l'antenne micro-ruban. Cela peut se faire via une sonde coaxiale ou une ligne micro-ruban qui est directement connectée à la structure radiante de l'antenne.

1.6.1.a Par ligne micro-ruban

C'est une approche qui implique à placer une ligne microruban (généralement de 50 Ω) en contact direct avec l'élément rayonnant comme le montre la **Figure I.4**. La longueur de la ligne est généralement inférieure aux dimensions du patch. Ce principe, relativement simple à mettre en œuvre, permet la création aisée d'une structure planaire sur un substrat diélectrique. Cet avantage a favorisé l'utilisation répandue de l'alimentation microruban dans diverses configurations de réseaux d'antennes imprimées [6].

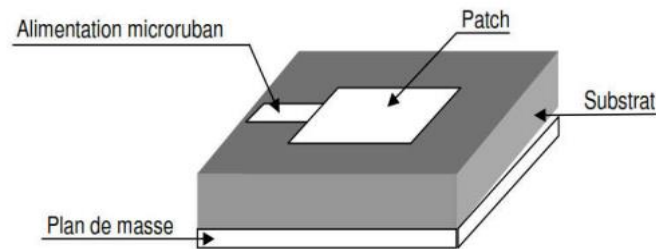


Figure I.4: Alimentation par ligne micro-ruban [6].

1.6.1.b Par sonde coaxiale

La technique d'alimentation basée sur la sonde coaxiale est mise en œuvre en soudant le connecteur externe d'un câble coaxial au plan de masse et en allongeant le conducteur interne pour s'ajuster parfaitement au patch (**Figure I.5**). Cette approche est simple à mettre en place et à ajuster. Elle présente un faible rayonnement parasite. Cependant, son principal inconvénient réside dans sa bande passante limitée [7].

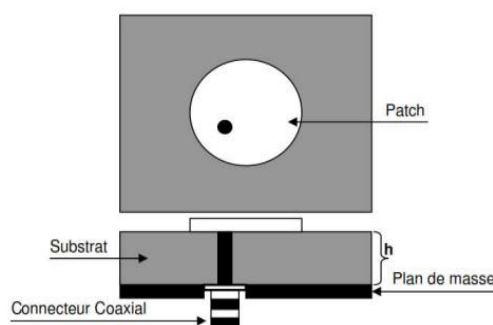


Figure I.5: Alimentation par sonde coaxiale [7].

I.6.2 Alimentation par couplage

Dans ce type d'alimentation, l'énergie est transférée à l'antenne sans avoir un contact direct avec la couche métallique. Les méthodes de couplage incluent l'alimentation par fente, et l'alimentation par ligne de proximité.

I.6.2.a Alimentation couplée par fente

Ce mode d'alimentation utilise une configuration où le patch de rayonnement et la ligne d'alimentation du micro-ruban sont séparés par le plan de masse, comme illustré dans la **Figure I.6**. La connexion entre le patch et la ligne d'alimentation est établie à travers une ouverture ou une fente dans le plan de masse. La mesure du couplage entre la ligne d'alimentation et le patch dépend de la forme, de la taille et de la localisation de l'ouverture. Comme le plan de masse sépare le patch et la ligne d'alimentation, cela réduit au minimum le rayonnement parasite. Généralement, les substrats inférieurs utilisent des matériaux à permittivité élevée, tandis que les substrats supérieurs sont appelés à des matériaux à faible constante diélectrique pour optimiser le rayonnement du patch [8].

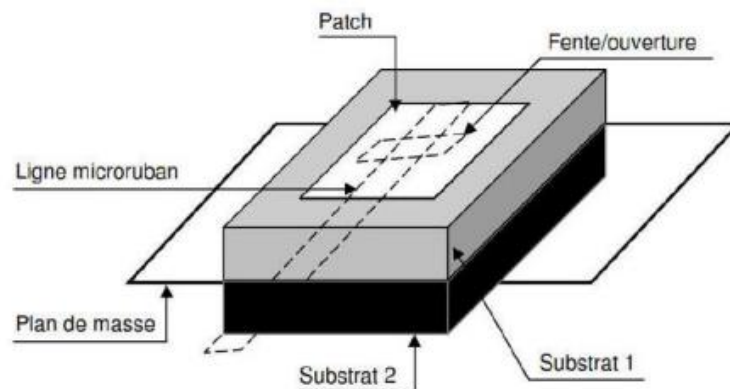


Figure I.6: Alimentation couplée par fente [8].

I.6.2.b Alimentation par couplage de proximité

Dans cette méthode, une ligne de transmission est placée très proche de l'élément rayonnant de l'antenne, sans contact direct (**Figure I.7**). Le couplage électromagnétique entre la ligne de transmission et l'élément rayonnant permet de transférer l'énergie de la ligne à l'antenne. Cette technique offre plusieurs avantages, notamment une large bande passante, (pouvant atteindre 13%), une réduction du rayonnement parasite et la facilité du couplage. Ce dernier peut être optimisé par l'ajustement des dimensions de la ligne. Cependant, sa mise en œuvre est complexe.

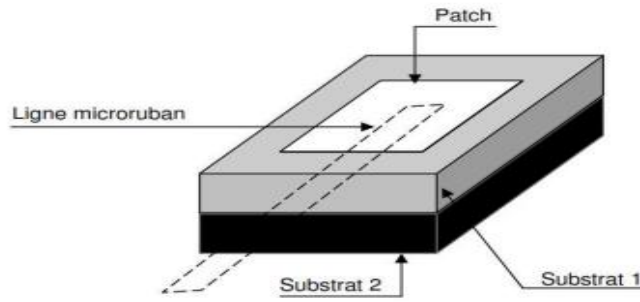


Figure I.7: Alimentation par proximité [8].

I.7 Caractéristiques de rayonnement des antennes microrubans

Les caractéristiques de rayonnement des antennes microrubans constituent un domaine essentiel de leur étude. Ces caractéristiques déterminent la manière dont les antennes émettent ou captent les ondes électromagnétiques dans l'espace environnant. Comprendre ces caractéristiques est crucial pour concevoir et optimiser leurs performances dans diverses applications de communication, de radar, de navigation et autres. On peut citer les caractéristiques suivantes :

I.7.1 Coefficient de réflexion

Le coefficient de réflexion d'une antenne, souvent noté Γ , est une mesure de la quantité d'énergie réfléchi par l'antenne par rapport à celle qui est incidente. Il est calculé à l'aide de la tension réfléchi (V_{ref}) et de la tension incidente (V_{inc}) à l'interface de l'antenne, en utilisant la formule suivante [5] :

$$\Gamma = \frac{V_{ref}}{V_{inc}} \quad (I.1)$$

Le coefficient de réflexion est un indicateur crucial de l'adaptation d'une antenne. Si une antenne est correctement adaptée à son environnement, le coefficient de réflexion est minimisé, ce qui permet un transfert efficace de l'énergie et une performance optimale du système global.

I.7.2 La directivité

La directivité évalue les caractéristiques directionnelles d'une antenne par rapport à celles d'une antenne isotrope. Toujours supérieure à 1, la directivité reflète le fait qu'une antenne isotrope n'est pas directive.

La directivité D d'une antenne est le rapport entre l'intensité du rayonnement en champ lointain dans une direction donnée et l'intensité moyenne du rayonnement sur toute la sphère de rayonnement. Cette intensité moyenne du rayonnement est égale à la puissance totale rayonnée par l'antenne divisée par 4π .

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

Avec

D : la directivité

$I(\theta, \varphi)$: est l'intensité rayonnée dans la direction (θ, φ)

P_{tot} : la puissance totale rayonnée.

I.7.3 Le gain

Le gain est défini comme le rapport entre l'intensité du rayonnement dans une certaine direction et l'intensité du rayonnement obtenue si la puissance d'entrée acceptée par l'antenne était rayonnée de manière isotrope. La relation est donnée par [7] :

$$G(\theta, \varphi) = 4\pi \left(\frac{P(\theta, \varphi)}{P_a} \right) \quad (I.3)$$

Avec

G(θ , φ): Le gain directionnel de l'antenne dans la direction spécifiée par les angles θ (élévation) et φ (azimut).

P(θ , φ): La densité de puissance rayonnée par l'antenne dans la direction

P_a : est la puissance totale acceptée par l'antenne (puissance d'entrée).

I.7.4 L'impédance d'entrée

L'impédance d'entrée de l'antenne se définit comme l'impédance perçue par la ligne d'alimentation lorsqu'elle est connectée à l'entrée de l'antenne. Cette impédance, complexe et fréquemment variable, se compose d'une partie réelle et d'une partie imaginaire, dépendant toutes deux de la fréquence. Elle est donnée par la relation :

$$Z_e = Z_c \frac{1+S_{11}}{1-S_{11}} \quad (I.4)$$

Z_c : Impédance caractéristique de la ligne d'alimentation.

S₁₁: Le coefficient de réflexion à l'entrée de l'antenne.

I.7.5 Diagramme de rayonnement

Le diagramme de rayonnement d'une antenne illustre comment la puissance rayonnée par l'antenne varie dans différentes directions de l'espace. Habituellement, une direction de rayonnement maximale est identifiable, autour de laquelle est concentrée la majeure partie de la puissance rayonnée.

Les diagrammes de rayonnement sont habituellement évalués dans les plans de symétrie, lorsqu'ils existent, ou dans les plans principaux désignés par les termes "plan E" et "plan H". Ces plans correspondent respectivement aux plans dans lesquels les champs électrique et magnétique atteignent leurs valeurs maximales [9], et ils sont toujours perpendiculaires l'un à l'autre.

Les différentes zones d'un diagramme de rayonnement sont désignées sous le terme de lobes, qui peuvent être classés en lobes principaux et lobes secondaires [10]. La représentation graphique peut être réalisée en 3D dans l'espace pour permettre une visualisation plus précise du rayonnement de l'antenne, ou en 2D à l'aide d'un système de coordonnées polaires ou cartésiennes (voir **Figure I.8**).

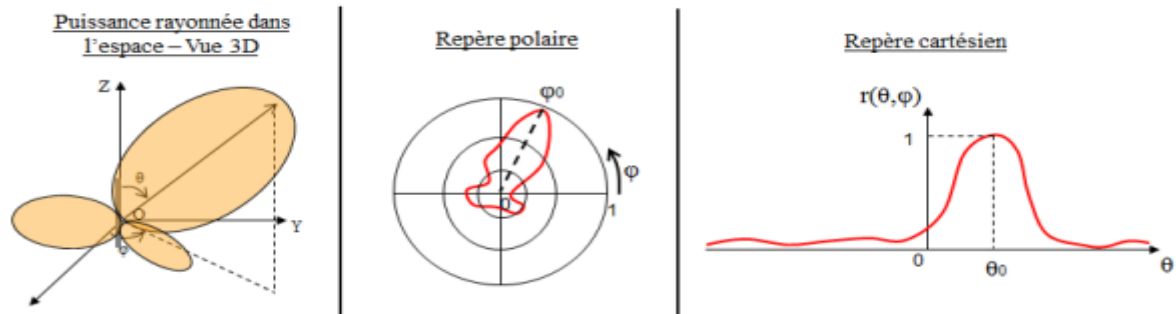


Figure I.8: Représentation du diagramme de rayonnement d'une antenne [11].

I.8 Avantages et inconvénients [12]

Les antennes patches sont largement utilisées dans de nombreuses applications en raison de leurs caractéristiques uniques. Elles offrent plusieurs avantages, notamment

- Leur faible profil, leur conception compacte, et leur facilité de fabrication.
- Leur capacité à être intégrées à des surfaces planes.
- Elles peuvent être adaptées pour fonctionner sur une large gamme de fréquences et offrir une bonne directivité.
- L'habitude de rassembler plusieurs patches identiques pour élaborer des antennes réseau.
- Possibilité d'avoir un fonctionnement multi-bandes et multi-polarisations.

Cependant, malgré leurs nombreux avantages, les antennes patches présentent également des inconvénients, tels que :

- Une bande passante limitée, ce qui restreint leur capacité à couvrir une large gamme de fréquences.
- Un gain faible. Cela limite leur portée et leur capacité à communiquer efficacement sur de longues distances.
- Sensibilité aux variations de l'environnement et leur faible efficacité de rayonnement à des fréquences élevées.

- Ne tolèrent que des puissances faibles, jusqu'à 100 W, ce qui peut être une contrainte dans certaines applications nécessitant des niveaux de puissance élevés.

I.9 Champ d'application des antennes microrubans

Les antennes microrubans sont largement utilisées dans divers domaines en raison de leurs caractéristiques uniques et de leur polyvalence. On trouve leurs applications dans les secteurs suivants :

- Les radars pour la détection et le suivi d'objets, la surveillance du trafic aérien et maritime, la météorologie, etc.
- Les systèmes de navigation par satellite (GNSS) pour recevoir les signaux des satellites et déterminer la position, la vitesse et le temps.
- Les antennes de réception TV et radio pour capter les signaux de diffusion.
- Les systèmes de communication militaires, les systèmes de brouillage, les systèmes de surveillance, etc.
- Les systèmes d'assistance au conducteur, les systèmes de détection d'obstacles, les systèmes de communication entre véhicules, etc.
- Les satellites pour la communication, l'imagerie, l'observation de la Terre, etc.
- Les dispositifs médicaux sans fil, tels que les implants médicaux, les moniteurs de santé portables, etc.
- Systèmes de commande et de contrôle.

I.10 Réseaux d'antennes imprimées

L'usage d'une seule antenne imprimée se révèle souvent limité pour répondre aux exigences de rayonnement spécifiques. Ainsi, pour obtenir des caractéristiques telles qu'un gain élevé ou un lobe principal conformé, il est fréquemment nécessaire de combiner plusieurs sources rayonnantes pour former un réseau d'antennes. Cette combinaison permet d'obtenir des rayonnements élevés, selon le nombre et le type d'éléments, ainsi que la configuration de leur alimentation électrique et leur disposition dans le réseau.

I.10.1 Définition

Un réseau d'antennes peut être défini comme un ensemble d'antennes interconnectées entre eux pour former un système cohérent capable de transmettre ou de recevoir des signaux électromagnétiques dans un domaine spécifique. Ces antennes peuvent être disposées de manière régulière ou irrégulière, et leur configuration peut varier en fonction des exigences de performance et des objectifs du système.

I.10.2 Structures d'un réseau d'antennes microrubans

Les réseaux d'antennes patches suscitent un intérêt croissant dans le domaine des communications sans fil en raison de leurs capacités uniques à améliorer les performances des systèmes de transmission. En combinant plusieurs antennes patches dans un réseau cohérent, ces systèmes offrent une solution efficace pour surmonter les défis rencontrés dans des environnements de communication variés. On peut définir les configurations suivantes :

- **Réseau d'antennes linéaire**

Le réseau linéaire est un agencement où les sources sont alignées dans une configuration rectiligne et sont séparées par une distance constante (**Figure I.9**). Dans ce contexte, les caractéristiques du réseau se manifestent dans un plan qui inclut à la fois la source normale et la source de référence.

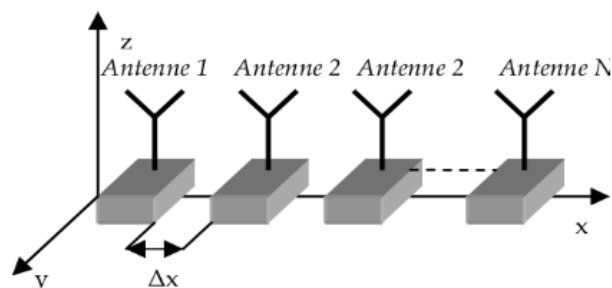


Figure. I.9: Réseau d'antennes linéaire [14].

- **Réseau d'antennes circulaire**

Dans ce type de réseau, les antennes sont disposées en cercle ou sur une structure circulaire (**Figure I.10**). Ces éléments peuvent être orientées dans différentes directions ou avoir des caractéristiques de rayonnement spécifiques selon leur configuration et leur placement sur le cercle. L'objectif principal d'un réseau d'antennes circulaire est souvent de former des diagrammes de rayonnement ou des modèles de faisceaux qui ont des

caractéristiques spécifiques, comme une directivité dans une direction particulière ou une couverture omnidirectionnelle.

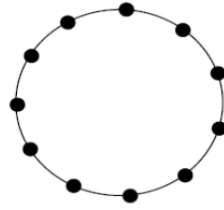


Figure I.10: Réseau d'antennes circulaire [14].

- ***réseau d'antennes plan***

C'est un système dans lequel plusieurs antennes sont arrangées dans un plan bidimensionnel (**Figure I.11**). Ces antennes peuvent être placées à des positions spécifiques et espacées de manière régulière ou irrégulière sur une surface plane. L'objectif principal d'un réseau d'antennes plan est généralement de former un diagramme de rayonnement ou un modèle de faisceau souhaité en combinant les contributions de plusieurs antennes.

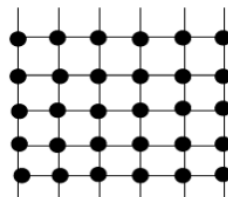


Figure. I.11: Réseau d'antennes planaire [14].

I.10.3 Alimentation du réseau d'antennes

L'alimentation du réseau d'antennes revêt une importance cruciale dans toute infrastructure de communication. Elle assure la distribution efficace de l'énergie nécessaire à chaque élément du réseau pour garantir des performances optimales. L'approche la plus simple implique de fournir de l'énergie à l'élément rayonnant en utilisant une ligne de transmission microruban. Différents types d'alimentation sont utilisés en fonction des besoins spécifiques de l'application et des caractéristiques du réseau d'antennes. On peut citer les plus importants [15] :

I.10.3.a Alimentation en série

Cette configuration permet d'alimenter toutes les antennes avec un seul câble d'alimentation (**Figure I.12**). Cependant, cela peut entraîner une réduction du gain total du réseau d'antennes en raison des pertes de câble et de la répartition inégale du courant entre les antennes [14].



Figure I.12: Alimentation du réseau d'antennes en série [15].

I.10.3.b Alimentation en parallèle

L'alimentation en parallèle d'un réseau d'antennes est un mode d'alimentation où plusieurs antennes sont connectées en parallèle à une source d'alimentation unique (**Figure I.13**). Dans ce schéma, chaque antenne reçoit la même puissance de la source et fonctionne de manière indépendante des autres antennes du réseau. Cela signifie que chaque antenne reçoit son propre signal d'alimentation, ce qui peut permettre un contrôle plus précis des performances de chaque antenne [14]. Ce mode d'alimentation comporte l'inconvénient de subir des pertes dues au rayonnement multiple en raison de la configuration parallèle discontinue.



Figure I.13: Alimentation du réseau d'antennes en parallèle [15].

I.10.4 Dispositifs employés pour l'alimentation du réseau d'antennes

Parmi les composants utilisés, on peut citer :

1.10.4.a Les diviseurs de puissance

C'est des dispositifs conçus pour répartir équitablement la puissance d'un signal d'entrée entre plusieurs antennes. Ils sont utilisés dans les réseaux d'antennes où plusieurs éléments doivent être alimentés par un seul signal. Un chemin doit être connecté en utilisant un ou plusieurs diviseurs de puissance, permettant de relier une entrée unique à plusieurs sorties [12]. Parmi les diviseurs utiliser, on distingue :

Diviseur de Wilkinson (WPD : Wilkinson Power Divider)

Le diviseur de Wilkinson est construit à l'aide de deux segments de ligne TEM connectés en parallèle à l'entrée et reliés à la sortie par une impédance d'équilibrage (Figure I.14). Ce diviseur, comportant trois ports, est généralement conçu pour maintenir la même impédance caractéristique sur chacun des ports [16].

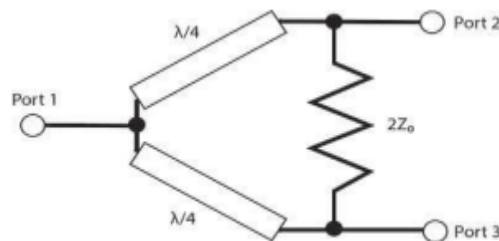


Figure I.14: Diviseur De Wilkinson

Diviseur de puissance en Jonction T

C'est un dispositif utilisé en électronique des micro-ondes et en télécommunications pour diviser un signal d'entrée en deux signaux de sortie avec une puissance égale ou proportionnelle. Il est appelé ainsi en raison de sa configuration en forme de T, où un signal d'entrée est appliqué à l'entrée de la jonction, puis divisé en deux à travers les branches du T pour produire deux signaux de sortie. Par ailleurs, le manque d'isolation entre les deux ports de sortie peut entraîner un couplage entre les éléments adjacents, ce qui influence le diagramme de rayonnement du réseau. Pour compenser ce couplage, une section triangulaire de la ligne peut être supprimée, comme illustré sur la Figure I.15.

L'exemple illustré dans la figure ci-dessous est le plus basique. L'impédance d'entrée du diviseur est adaptée à 50 ohms, tandis que les impédances de sortie sont terminées avec une valeur double de celle de l'impédance d'entrée, soit 100 ohms. Ce diviseur présente l'avantage d'augmenter le flux du courant dans ses coudes, permettant ainsi une division symétrique de la puissance d'entrée à l'extrémité des coudes.

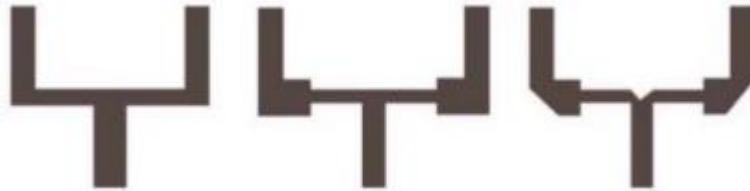


Figure I.15: Diviseur de puissance en Jonction T.

I.11 Conclusion

Les antennes microruban et les réseaux d'antennes offrent des solutions prometteuses dans le domaine des télécommunications. Leur faible encombrement et leur adaptabilité les rendent idéales pour une intégration dans une variété d'applications spatiales et terrestres. Bien que les performances des antennes microruban puissent être limitées, des recherches actives visent à améliorer leurs capacités. Quant aux réseaux d'antennes, ils permettent de former des faisceaux directionnels et de répondre à des exigences spécifiques en matière de couverture spatiale. Ensemble, ces technologies continuent d'évoluer pour répondre aux besoins croissants de connectivité et de communication dans notre monde moderne.

Comme évoqué dans ce chapitre, les antennes imprimées sont employées dans une multitude de secteurs, y compris celui des radars, Ces derniers offrent divers avantages significatifs. Ceux-ci seront explorés dans le chapitre suivant.

Bibliographie

- [1] James, J. R., & Hall, P. S. (Eds.). *Handbook of microstrip antennas* (Vol. 1). IET. (1989).
- [2] C. A. *Antenna theory: analysis and design*. John Wiley & Sons. (2016).
- [3]. Khan, A. Q., Riaz, M., & Bilal, A. Various types of antenna with respect to their applications: a review. *International journal of multidisciplinary sciences and engineering*, 7(3), 1-8. (2016).
- [4] Garg, R. *Microstrip antenna design handbook*. Artech House. (2001).
- [5] Paul F. Combes, "Micro-ondes, circuits passifs, propagation, antennes", pp 299-323, Série Dunod, Paris 1997.
- [6] Haoued Mouissa, N., & Madoui, S. L'effet d'une cellule AMC sur la bande passante d'une antenne patch.
- [7]. L. I. Basilio, M. A. Khayat, J. Williams, S. A. Long, "The dependence of the input impedance on feed] position of probe and microstrip line fed patch antennas", *IEEE transactions Antennas Propagat*, Vol. 49, pp. 45-47, Janvier 2001.
- [8] A Boyer, "Antennes support de cours énoncé de travaux dirigés", Institut Informatique et Réseau, Université Toulouse, Octobre 2011.
- [9] Ghosh, C. K., & Parui, S. K. Design, analysis and optimization of a slotted microstrip patch antenna array at frequency 5.25 GHz for WLAN-SDMA system. *International Journal on Electrical Engineering and Informatics*, 2(2), 106-110. (2010).
- [10] Kaplan, E. D., & Hegarty, C. J. *Understanding GPS: Principles and Applications* (2nd ed.). Artech House. (2012).
- [11]. Barkat, O., & Benghalia, A. "Etude et synthèse des caractéristiques de réseaux d'antennes imprimées supraconductrices dans la bande millimétrique". Thèse de Doctorat, Université Mentouri, Constantine (2009).

[12] Rumay G, Ray kp. [Broadband microstrip antennas](#), 3rd ed. New York, USA ; Wiley 2005.

[13] Kraus, J. D., Marhefka, R. J., & Khan, A. S. Antennas for All Applications (3rd ed.). McGraw-Hill. (2003).

[14] LARBI, A., MEHTAR, T., DEBBAL, M., & KOURDI, Z. *Conception et simulation des techniques d'alimentation d'un réseau d'antennes microrubans* (Doctoral dissertation). (2022).

[15] Panaia, P., Staraj, R., Kossiavas, G., & Jacquemod, G. Reconfiguration dynamique d'une antenne. *JNM 2003*. (2002).

[16] Balanis, C. A. Antenna theory: analysis and design. John wiley & sons (2016).

CHAPITRE II
ANTENNES POUR APPLICATIONS RADAR

II.1 Introduction

Les antennes jouent un rôle essentiel dans les applications à haute fréquence, où la transmission et la réception des ondes électromagnétiques sont au cœur des systèmes de communication, de détection et d'imagerie. Les antennes sont les composants qui permettent de rayonner ou de capter les signaux électromagnétiques dans l'air, et leur conception revêt une importance cruciale pour garantir des performances optimales dans des environnements à haute fréquence.

Dans le domaine des radars, Les antennes à haute fréquence sont conçues pour émettre et capter des signaux sur des bandes de fréquences allant de quelques centaines de mégahertz à plusieurs gigahertz. Ces antennes sont conçues pour répondre à des exigences spécifiques en termes de directivité, de gain, de bande passante et de résistance aux interférences, afin d'assurer une communication fiable et une détection précise des signaux.

Dans ce chapitre, nous débutons par fournir une définition des systèmes radar, suivi de la présentation de leur structure ainsi que de leur principe de fonctionnement. Nous explorerons ensuite quelques-uns des types d'antennes radar les plus couramment utilisés, en mettant en évidence leurs caractéristiques distinctives et leurs domaines d'application privilégiés. Enfin, nous illustrerons quelques exemples d'applications radar où les antennes à haute fréquence jouent un rôle déterminant, soulignant leur importance dans des domaines tels que la surveillance aérienne, la météorologie, la sécurité et la défense.

II.2 Historique

Le radar, ou Radio Detection and Ranging, a une histoire riche remontant à la fin du XIXe siècle. En 1886, Heinrich Hertz démontre l'existence des ondes électromagnétiques, posant les bases théoriques de la technologie radar. En 1904, Christian Hülsmeyer, un inventeur allemand, développe le "Telemobiloscope", capable de détecter des objets métalliques à distance. Dans les années 1920, les chercheurs de la Marine américaine expérimentent la réflexion des ondes radio sur des navires. En 1935, Robert Watson-Watt en Grande-Bretagne développe un radar capable de détecter des avions, crucial pour la défense aérienne. La Seconde Guerre mondiale voit une accélération des développements radar pour la détection d'avions, de navires et de sous-marins [1].

Après la guerre, les avancées technologiques continuent avec le développement du radar Doppler pour mesurer la vitesse des objets et des radars météorologiques dans les années 1960. Aujourd'hui, les radars sont utilisés dans des domaines variés, de l'aviation et

l'automobile à la météorologie et la défense militaire, et continuent d'évoluer avec des technologies comme le radar à ondes millimétriques et le radar quantique.

II.3 Définition

Le mot "radar" est une abréviation de "Radio Detection And Ranging". C'est un dispositif technologique qui utilise des ondes radio pour détecter, localiser et mesurer la vitesse des objets à distance. Il fonctionne en émettant des impulsions d'ondes radio vers une cible et en analysant les ondes réfléchies par cette cible pour déterminer sa position, sa distance, son altitude, sa direction et sa vitesse.

Les composants clés d'un radar incluent un émetteur pour générer les ondes radio, une antenne pour transmettre et recevoir ces ondes, un récepteur pour capter les signaux réfléchis, et un système de traitement du signal pour interpréter les données reçues. Les radars sont utilisés dans une variété d'applications, allant de la surveillance aérienne et maritime à la météorologie, en passant par les systèmes de sécurité automobile et les opérations militaires. [2] [3].



Figure II.1: antenne radar longue portée [4].

II.4 Le principe de fonctionnement

Le principe utilisé par les radars est voisin de celui de la réflexion des ondes sonores. Lorsque vous criez dans la direction d'un objet qui peut réfléchir le son de votre voix. Vous en entendez l'écho. Si vous connaissez la vitesse dans, vous pouvez alors estimer la distance et la direction générale de l'objet. Le temps nécessaire à l'aller et au retour du son vers vous peut être converti en distance si vous connaissez sa vitesse.

Le radar utilise des impulsions d'énergie électromagnétique à peu près de la même manière, le signal hyperfréquence est émis en direction de la cible. Une petite partie de l'énergie transmise est réfléchiée par la cible dans la direction du radar. Cette énergie renvoyée par la cible jusqu'au radar est appelée ECHO, exactement comme lorsque l'on considère les ondes sonores. Un radar utilise l'écho afin de déterminer la direction et la distance de l'objet qui a réfléchi son signal [1]

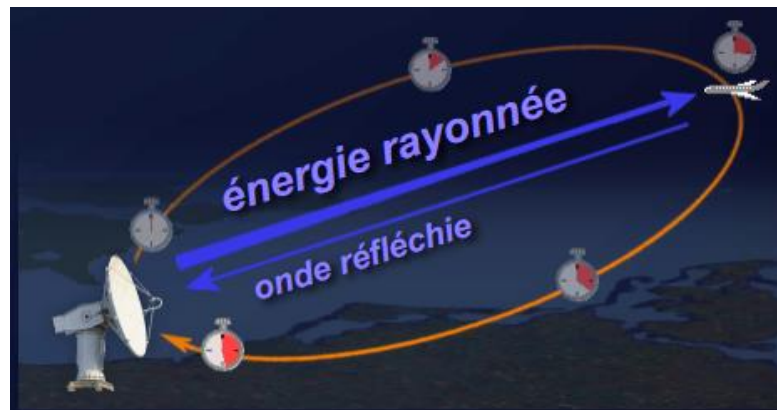


Figure II.2: principe de fonctionnement du radar [1].

II.4.1 Calcul de la distance

La distance est calculée à partir du temps de transit (aller et retour) d'une brève 'impulsion radioélectrique' émise et de sa vitesse de propagation C_0 . La distance de l'écho (calculée par le radar) est la distance en ligne droite entre l'antenne du radar et la cible. La 'distance-sol' est la distance 'horizontale' entre l'antenne du radar et la cible, elle ne peut être déterminée que si l'on calcule l'altitude de la cible, ou son angle de site. Le temps mesuré par le radar est le temps nécessaire à l'impulsion pour aller de l'antenne à la cible, puis de la cible vers l'antenne après réflexion. Chaque impulsion revenant au radar a parcouru deux fois la distance radar-cible. La formule permettant de calculer cette distance est donc la suivante [1] :

$$R = \frac{c \cdot t}{2} \quad (\text{II.1})$$

Avec

c = vitesse de la lumière = $3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$

t = temps mesuré [s]

R = distance [m]

II.4.2 Calcul de la direction

L'angle entre la direction du nord et celle de la cible (azimut) est déterminé grâce à la directivité de l'antenne. La directivité, parfois appelée « gain directif », est la capacité de l'antenne à concentrer l'énergie rayonnée dans une direction particulière. Une antenne à forte directivité est appelée « antenne directive ». En mesurant la direction dans laquelle est pointée l'antenne à l'instant où elle reçoit un écho, on peut déterminer non seulement l'azimut mais aussi le site de la cible (donc son altitude). La précision de la mesure de ces angles dépend de la directivité de l'antenne. Pour une fréquence émise donnée (ou une longueur d'onde définie), la directivité d'une antenne est fonction de ses dimensions propres.

Les radars émettent normalement de très hautes fréquences pour les raisons suivantes:

- haute résolution (plus la longueur d'onde est courte, plus le radar est capable de détecter un petit objet),
- encombrement réduit de l'antenne (plus on augmente la fréquence du signal rayonné, plus la directivité est grande pour une antenne de taille donnée).

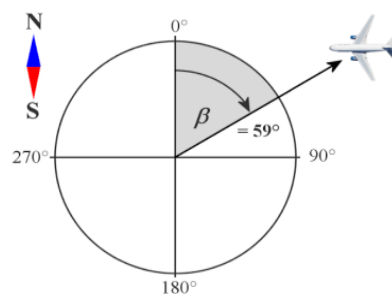


Figure II.3: Calcul de la direction [1].

II.5 Bandes de fréquence utilisées en radar :

Les radars utilisent une gamme variée de bandes de fréquences en fonction de leurs applications spécifiques. Les bandes de fréquences les plus couramment utilisées en radar sont représentées sur la **figure II.4** :

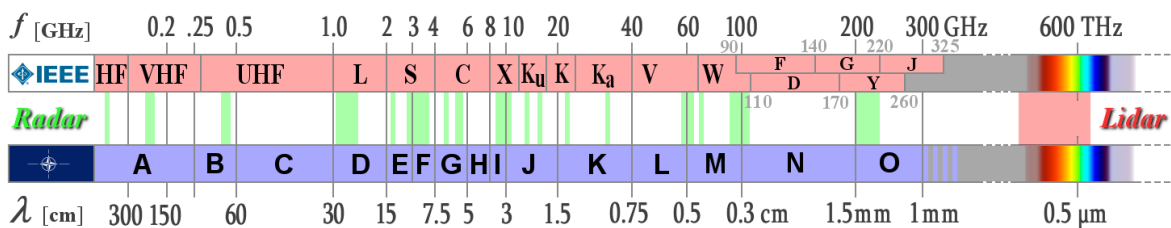


Figure II.4: bandes de fréquence du radar [1].

II.5.1 Bandes A (radar HF et VHF)

Ces fréquences se situent à moins de 300 MHz et sont utilisés depuis très longtemps. Elles étaient la fine pointe de la technologie radio à l'ouverture de la Seconde Guerre mondiale. Elles sont maintenant surtout utilisées dans les radars de surveillance très éloignées.

II.5.2 Bande C (radars UHF)

Les fréquences de 300 MHz à 1 GHz sont utilisées pour la détection et la poursuite des satellites, ainsi que les missiles balistiques sur de longues trajectoires. Ces radars agissent donc comme surveillance à longue portée et pour l'acquisition de données de tir.

II.5.3 Bande D (radar de bande L)

Ces fréquence de 1 à 2 GHz sont préférées pour les radars de portée jusqu'à 400 km (250 milles nautiques). Ils peuvent émettent des impulsions de haute puissance ayant une largeur de bande importante et compressés. À cause de la courbure de la Terre, la portée maximale de détection est limitée à basse altitude et les cibles près du sol disparaissent sous l'horizon radar relativement rapidement.

II.5.4 Bandes E et F (radar de bande S)

L'atténuation atmosphérique de l'onde des bandes E et F est plus grande que dans la bande précédente sans être excessive et les radars utilisant ces fréquences doivent avoir une plus grande puissance pour obtenir une portée équivalente de la bande D.

II.5.5 Bande G (radar de bande C)

Ces fréquences sont utilisées par plusieurs radars mobiles de champs de bataille pour la surveillance aérienne et le contrôle de tir des missiles de courte et moyenne portée.

II.5.6 Bandes I et J (radar de bandes X et Ku)

Ces bandes se situent entre 8 et 12 GHz et nécessitent une antenne encore plus petite, c'est pourquoi elles sont populaires pour les systèmes qui nécessitent légèreté de l'ensemble radars et une portée limités, car ces ondes sont fortement atténuées par les précipitations, même légères.

II.5.7 Bande K (radars K et Ka)

Plus la fréquence augmente, plus l'absorption atmosphérique est grande et cause une atténuation du faisceau radar ce qui limite la résolution en distance et la portée. Les radars de bande K sont donc limités à la très courte portée de très grande précision et à un taux très rapide de balayage. Les radars de surface utilisent de très courtes impulsions de quelques nanosecondes à ces fréquences. Ils peuvent ainsi suivre les mouvements des véhicules sur le tarmac et les pistes d'aéroports leur résolution permettant de visualiser la silhouette des véhicules.

II.5.8 Bande V

L'atténuation est de plus en plus grande. Même la vapeur d'eau contenue dans l'air cause une dispersion du signal. La portée des radars qui utilise la bande V n'est donc que de deux mètres et se limitent à la détection de mouvement.

II.5.9 Bande W

Nous arrivons maintenant dans une page de fréquences qui comportent deux modes dus à la forte atténuation par les molécules d'oxygène (O₂). Autour de 75 GHz, l'atténuation est maximale, alors qu'à 96 GHz elle est minimale. Les radars récents utilisés pour le stationnement, couvrir les angles morts et la régulation de vitesse dans certaines automobiles de luxe utilisent une fréquence de 75 à 76 GHz. L'atténuation de l'oxygène les immunise des interférences des autres fréquences.

II.6 Structure d'un système radar

La structure d'un système radar peut varier en fonction de son application spécifique, mais de manière générale, un système radar comprend plusieurs composants essentiels comme le montre la **figure II.5**:

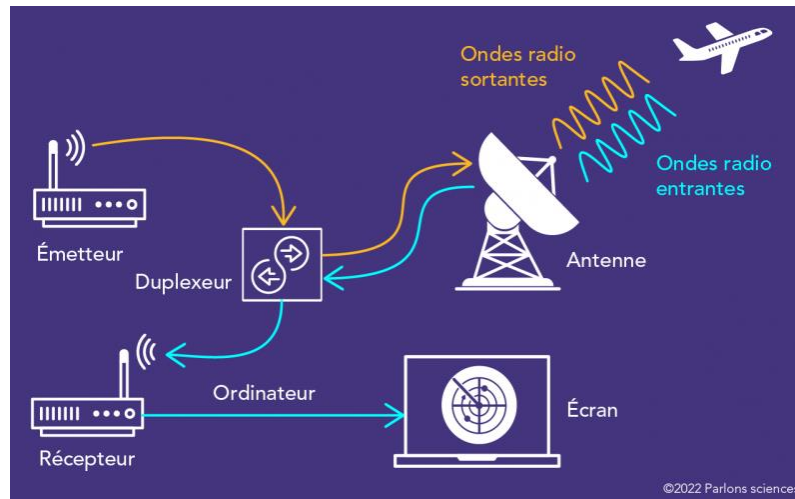


Figure II.5: structure d'un radar [4]

II.6.1 Antenne

L'antenne est la partie visible d'un système radioélectrique qui sert à la transmission et la réception du signal dans l'espace libre. Elle sert à concentrer le signal produit par l'émetteur vers l'espace libre et/ou à percevoir les faibles signaux venant de l'extérieur pour les diriger vers le récepteur. Les modules de cette section traitent des antennes utilisées dans les radars [4].

II.6.2 Émetteur

L'émetteur radar génère l'impulsion hyperfréquence nécessaire à la détection des objets. Il se compose principalement d'un tube d'émission, tel qu'un magnétron ou une triode oscillatrice, utilisés dans des oscillateurs de puissance pour atteindre des niveaux de puissance élevés. Les magnétrons, par exemple, peuvent produire jusqu'à 2 MW avec un rendement de 50 %. En plus du tube d'émission, l'émetteur inclut des dispositifs auxiliaires comme des systèmes de refroidissement, d'alimentation, de mise en marche et de contrôle. Le rendement global de l'émetteur varie généralement entre 10 et 30% [4].

II.6.3 Récepteur

Le récepteur dans un radar sert à détecter les faibles échos captés par l'antenne, puis de les amplifier suffisamment pour en extraire l'information afin de l'afficher sur l'écran de l'opérateur. Cet appareil doit être capable d'extraire des signaux qui sont de plusieurs ordres de grandeur plus faibles que le signal émis par le radar et de les amplifier par un facteur de 20 à 30 millions de fois [4].

II.6.4 Duplexeur

Lorsque l'antenne est utilisée comme transmetteur et récepteur du signal, comme pour un radar monostatique, un commutateur doit être incorporé au système pour permettre les deux fonctions. C'est ce qu'on appelle un duplexeur [1].

II.7 Classification des systèmes radars

En fonction des informations qu'ils doivent fournir, les équipements radars utilisent diverses qualités et technologies Ceci se traduit par une première classification des systèmes radars qui sont représentés par la **figure II.6**:

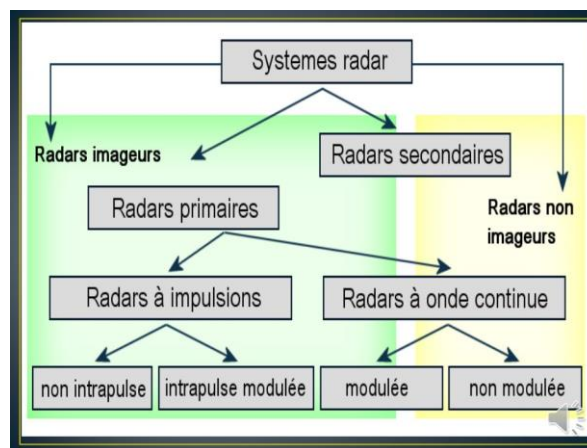


Figure II.6: classification des systèmes radars [1].

II.7.1 Radars imageurs et Radars non imageurs

Un radar imageur permet de présenter une image de l'objet ou de la zone observé. Les radars imageurs sont utilisés pour cartographier la Terre, les autres planètes, les astéroïdes et les autres objets célestes. Ils offrent aux systèmes militaires une capacité de classification des cibles.

Des exemples typiques de radar non imageur sont les cinémomètres radars (les petits, sur le bord de la route...) et les radio altimètres. Ce type de radar est également appelé diffusomètre puisqu'il mesure les propriétés de réflexion de la région ou de l'objet observé. Les applications des radars secondaires non imageurs sont par exemple les dispositifs d'immobilisation antivols installés sur certains véhicules privés récents [1].

II.7.1.a Radars primaires

Un radar primaire émet des signaux hyperfréquences qui sont réfléchis par les cibles. Les échos ainsi créés sont reçus et étudiés (**figure II.7**). Contrairement à un radar secondaire, un radar primaire reçoit la partie réfléchie de son propre signal [1].



Figure II.7: Radar primaire [4].

II.7.1.b Radars secondaires

Les radars secondaires sont des systèmes de détection et de surveillance utilisés dans le contrôle du trafic aérien. Contrairement aux radars primaires qui détectent les objets par la réflexion des ondes radio, les radars secondaires fonctionnent en interagissant avec des transpondeurs embarqués à bord des avions (**figure II.8**). Ces radars émettent des signaux interrogateurs vers les avions, qui répondent avec des informations telles que leur identité et leur altitude [1].

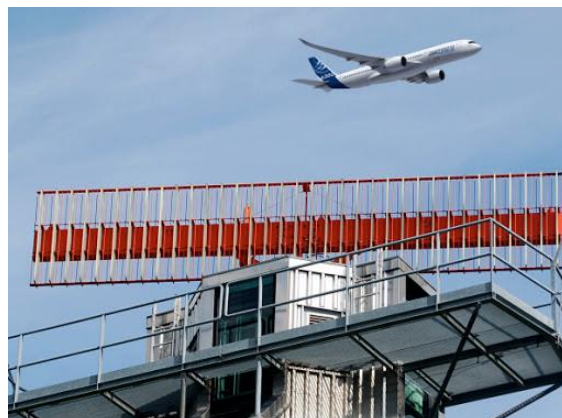


Figure II.8: Radar secondaire [4].

II.8 Antennes pour les radars

Il existe une grande variété de types d'antennes radar, chacun avec ses propres caractéristiques, avantages et applications spécifiques. Ces antennes varient en taille, forme, directivité, bande passante et autres paramètres de conception, ce qui les rend adaptées à différents scénarios opérationnels et exigences de performance.

II.8.1 Antenne Cornet

Une antenne cornet est un type d'antenne utilisé dans les systèmes radar et de télécommunication, caractérisée par sa forme conique ou tronconique qui s'ouvre progressivement à partir d'une ouverture plus petite à l'extrémité de l'émetteur/récepteur vers une ouverture plus grande à l'extrémité ouverte.

Les caractéristiques principales de l'antenne cornet comprennent son gain élevé, peut varier généralement entre quelques décibels (dB) jusqu'à plus de 20 dB, sa directivité, sa large bande passante et son faible taux de pertes. Elle est souvent utilisée dans les applications nécessitant une grande sensibilité et une bonne isolation des signaux entrants et sortants, telles que les radars à longue portée, les communications par satellite et les systèmes de télédétection. L'antenne cornet peut être conçue pour fonctionner dans une large gamme de fréquences, ce qui en fait un choix polyvalent pour diverses applications de communication et de détection. [5].

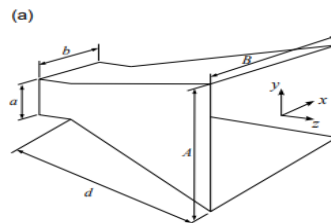


Figure II.9: Antenne cornet [5].

Avantages

- Grande directivité et sensibilité élevée, adaptées aux applications radar nécessitant une haute performance.
- Large bande passante, permettant une utilisation efficace sur une gamme étendue de fréquences.

Limitations :

- Taille physique importante, ce qui peut limiter leur utilisation dans des environnements restreints.
- Coût potentiellement élevé pour les antennes à cornet de haute performance.

II.8.2 Antenne Parabolique

L'antenne parabolique est l'émetteur le plus fréquemment utilisé en radar. Elle est constituée d'un réflecteur circulaire ayant la forme d'une parabole, d'un cône d'émission situé au foyer de la parabole et un guide d'onde qui amène le signal à ce cône depuis le transmetteur. Les antennes paraboliques possèdent un gain élevé, généralement entre 30 et 50 dB, dépendant du diamètre de la parabole et de la fréquence de fonctionnement. Elles sont hautement directives, ce qui permet de concentrer l'énergie dans une direction spécifique, minimisant les interférences et maximisant la portée et la précision des communications. La bande passante de ces antennes est large, couvrant environ 10 % à 20 % de la fréquence centrale pourrait s'étendre de 9 GHz à 11 GHz.

Elle est souvent utilisée dans les radars à longue portée, tels que les radars météorologiques et de surveillance aérienne [5].

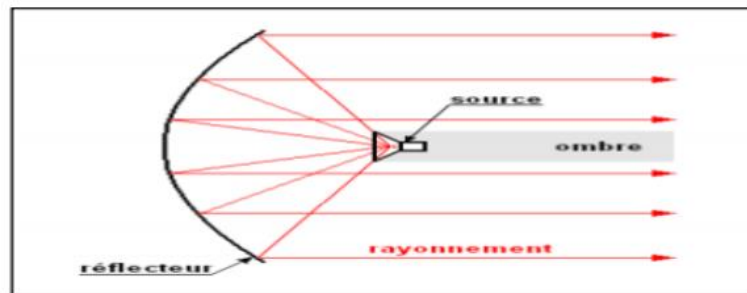


Figure II.10: réflecteur parabolique [6].

Avantages :

- Faisceau étroit et directif, adapté aux applications nécessitant une haute résolution et une portée étendue.
- Faible niveau de bruit pour les antennes paraboliques avec alimentation en phase.

Limitations :

- Taille physique importante, ce qui peut poser des défis d'installation dans certains environnements.
- Coût potentiellement élevé, en particulier pour les antennes paraboliques à grande taille

II.8.3 Antenne Log-Périodique

Une antenne log-périodique est un dispositif conçu pour une large bande de fréquences, utilisée principalement dans les domaines des télécommunications et de la détection. Elle se compose de multiples éléments, souvent des dipôles, disposés de manière logarithmique le long d'une structure. En général, le gain des antennes log-périodiques est relativement modéré par rapport à d'autres antennes plus spécialisées.



Figure II.11: Antenne Log-Périodique [5].

Il peut typiquement se situer entre 5 et 10 dBi elles sont utilisées dans des domaines scientifiques et militaires, elles sont employées dans des applications telles que la radioastronomie et les systèmes de guerre électronique [5].

Avantages :

- Large bande passante : Les antennes log-périodiques sont conçues pour fonctionner sur une large gamme de fréquences, ce qui les rend polyvalentes et adaptables à différentes applications.
- Directivité modérée : Elles offrent une directivité modérée, ce qui les rend appropriées pour les applications nécessitant une couverture omnidirectionnelle.

II.8.4 Antenne à Fente

Une antenne à fente est un type d'antenne qui utilise une ou plusieurs ouvertures rectangulaires ou fentes étroites dans une plaque conductrice pour rayonner ou capter des ondes électromagnétiques.

Cette conception permet une transmission ou une réception efficace des signaux sur une large bande de fréquences sans nécessiter de réglages fréquents. Les antennes à fente sont connues pour leur large bande passante. Le gain des antennes à fentes peut varier en fonction de la longueur de la fente, de la largeur de la fente, de la fréquence de fonctionnement et d'autres paramètres de conception, Pour les antennes à fentes utilisées dans les radars, le gain peut généralement varier de 5 à 15 dBi en fonction de la taille et de la conception de l'antenne. Elles sont Souvent utilisées dans les radars à ondes millimétriques, la télédétection et la surveillance [6].



Figure II.12: Antenne à Fente [6].

Avantages:

- Capacité à produire des faisceaux étroits avec une grande directivité.
- Faible poids et profil bas, adaptés aux applications où l'encombrement est un facteur critique.

Limitations:

- Bande passante limitée par rapport à d'autres types d'antennes.
- Sensibilité aux perturbations électromagnétiques environnementales

II.8.5 Antenne Patch

Ces antennes, constituées d'un patch métallique imprimé sur un substrat diélectrique, sont couramment utilisées dans les radars compacts et portables (figure II.13), ainsi que dans les applications nécessitant une intégration avec d'autres composants électroniques.

Le gain des antennes patch pour les applications radar à haute fréquence peut varier en fonction de la taille du patch, de la fréquence de fonctionnement et des propriétés diélectriques du substrat. Le gain des antennes patch peut généralement varier de 6 à 15

dBi, la directivité de l'antenne peut être de l'ordre de 8 à 20 dB, permettant une concentration du faisceau dans une direction spécifique.

Les antennes patch pour les applications radar à haute fréquence sont conçues pour offrir une bande passante étendue, couvrant les fréquences typiques utilisées dans les radars à ondes millimétriques et Téra hertz [7].

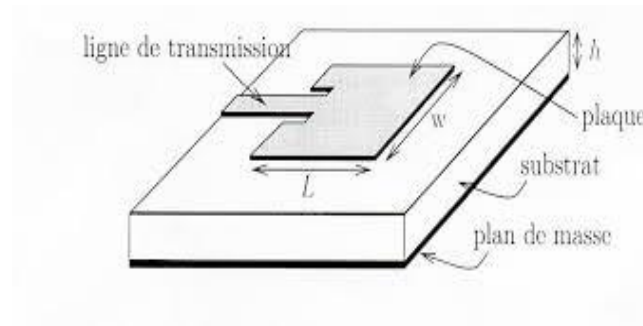


Figure II.13: Antenne patch [7].

Chaque type d'antenne présente des avantages et des inconvénients en termes de performances et de coûts, et le choix dépend souvent d'un compromis entre ces facteurs.

II.9 Les applications des radars

Étant donné que les fonctions fondamentales du radar sont la recherche/détection, le suivi et l'imagerie, diverses applications peuvent être utilisées dans cette technologie dans plusieurs domaines (militaire, et commerciale). Les plus importantes sont :

II.9.1 Surveillance aérienne et de la circulation aérienne

Le radar aéroporté désigne un système radar installé à bord d'un aéronef, tel qu'un avion, un hélicoptère ou un drone. Cette technologie est utilisée dans une gamme d'applications, incluant la surveillance aérienne des aéronefs militaires et civils, la détection d'objets sur terre ou en mer, ainsi que pour la gestion du trafic aérien [8].

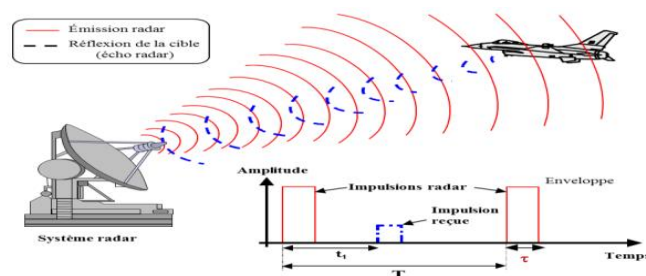


Figure II.14: Surveillance aérienne et de la circulation aérienne [9].

II.9.2 Détection de précipitations et de phénomènes météorologiques

Les radars météorologiques sont des instruments utilisés pour détecter et suivre les précipitations, les phénomènes météorologiques tels que les orages, les averses, les chutes de neige, etc., ainsi que d'autres objets en mouvement, comme les oiseaux ou les insectes, dans l'atmosphère [10].

II.9.3 Détection maritime et surveillance côtière

Les radars maritimes sont des systèmes radar utilisés pour la détection et le suivi des navires, des obstacles et d'autres objets en mouvement sur l'eau. Ces radars sont largement utilisés dans la navigation maritime pour assurer la sécurité des navires, éviter les collisions et surveiller les conditions environnementales [11].

II.9.4 Détection d'objets en mouvement sur la route (anticollision)

Les radars sont largement utilisés dans les systèmes de contrôle de la circulation pour détecter et surveiller les véhicules sur les routes. Ils émettent des ondes électromagnétiques et mesurent le temps qu'il faut pour que ces ondes rebondissent sur les véhicules et reviennent au radar. En analysant les changements dans le signal réfléchi, les radars peuvent détecter la présence, la vitesse et la taille des véhicules [12][13].

II.10 Conclusion

Dans le ce chapitre, nous avons explorer l'environnement des systèmes radar. Nous avons commencé par retracer leur évolution historique, leur architecture et leur principe de fonctionnement. Ensuite, nous Nous avons par la suite énumérer les différents types d'antennes radar les plus fréquemment utilisés, en soulignant leurs caractéristiques distinctives et leurs applications spécifiques. A la fin, nous avons donné des exemples d'applications radar où les antennes jouent un rôle central, démontrant ainsi leur importance dans des domaines tels que la surveillance aérienne, la détection d'objets, la météorologie, la sécurité et la défense.

Le prochain chapitre se centrera sur la conception des réseaux d'antennes microrubans destinés pour les applications radars anticollisions dont le but est d'augmenter le gain des structures.

Bibliographie

- [1] <https://www.radartutorial.eu/index.fr.html>
- [2] Mahafza, B. R. *Introduction to radar analysis*. Chapman and Hall/CRC. (2017).
- [3] Skolnik, M. An introduction and overview of radar. *Radar Handbook*, 3, 1-1(2008).
- [4] Hammoudi, Z. & Bouregaa, A. *Analyse Des Processeurs Ca-cfar Et Os-cfar Dans Un Environnement Non Homogène* [Mémoire de Master, Université Saad Dahleb - Blida]. (2020).
- [5] Khan, A. Q., Riaz, M., & Bilal, A. Various types of antenna with respect to their applications: a review. *International journal of multidisciplinary sciences and engineering*, 7(3), 1-8. (2016).
- [6] BENCHERIF, Y., & BOUGUENINA, F. Réseaux d'antenne patch pour application spatial. (2021).
- [7] Garg, R. *Microstrip antenna design handbook*. Artech house. (2001).
- [8] Stimson, G. W. *Introduction to airborne radar*. (1998).
- [9] Delprato, J. *Analyse de la stabilité d'impulsion à impulsion des amplificateurs de puissance HEMT GaN pour applications radar en bande S* (Doctoral dissertation, Université de Limoges). : 639.(2016).
- [10] Betz, H. D., Schumann, U., & Laroche, P. (Eds.). *Lightning: principles, instruments and applications: review of modern lightningresearch*. (2008).
- [11] Knott, E. F., Schaeffer, J. F., & Tulley, M. T. *Radar cross section*. SciTechPublishing. (2004).
- [12] Scheer, J., & Holm, W. A. *Principles of modern radar*. (2010).
- [13] Slovic, M., Jokanovic, B., & Kolundzija, B. High efficiency patch antenna for 24 GHz anticollision radar. In *TELSIKS 2005-2005 uth International Conference on Telecommunication in ModernSatellite, Cable and Broadcasting Services* (Vol. 1, pp. 20-23). IEEE. (2005, September).

CHAPITRE III
CONCEPTION ET SIMULATION
D'UN RESEAUX D'ANTENNES MICRORUBANS

III.1 Introduction

De nos jours, les systèmes radars sont largement utilisés dans divers domaines tels que la navigation automobile et les systèmes d'avertissement de collision. Les antennes, en tant que composants clés de ces dispositifs, sont soumises à des exigences de performances de plus en plus élevées. Un gain élevé est essentiel pour garantir une portée suffisante et une détection précise des cibles. Cela permet à l'antenne d'émettre ou de capter un signal sur une plus grande distance et avec une résolution accrue. Pour atteindre cet objectif, des réseaux d'alimentation en série de patches et /ou en parallèles sont utilisés, qui permettent d'avoir une meilleure réception ou transmission des signaux.

L'objectif de ce chapitre est de concevoir des configurations de réseaux d'antennes imprimées destinées pour **les radars anticollisions** qui utilise la bande de fréquence **22-26.625 GHz** de fréquence centrale 24 GHz [1]. Cette plage de fréquence est souvent utilisée dans les systèmes de communication sans fil, les radars et d'autres applications en raison de sa capacité à transporter des données à haut débit sur de courtes distances avec une résolution élevée.

La bande de fréquence opérationnelle des différentes structures d'antennes est déterminée lorsque le coefficient de réflexion S11 est inférieur à -10 dB. La conception des structures a été réalisée à l'aide du logiciel de simulation CST (Computer Simulation Technology). Les différentes sections de ce chapitre seront structurées comme suit :

- La première section portera sur la conception de l'élément d'antenne, qui servira de base pour définir le réseau d'antennes.
- La deuxième section détaillera les différentes étapes suivies pour concevoir des réseaux d'antennes à deux, quatre et huit éléments, avec présentation et discussion des résultats de simulation obtenus.
- Enfin, la dernière section se concentrera sur une étude comparative avec les structures de réseaux d'antennes à base d'un matériau émergent tel que le graphène.

III.2 Outils de simulation

Ils existent plusieurs outils de simulation et de conception d'antennes. Nous pouvons citer parmi eux : le HFSS, IE3D, FEKO et CST MICROWAVESTUDIO. Dans notre étude nous allons utiliser le logiciel CST MICROWAVESTUDIO qui est un outil spécialisé pour la conception, la simulation et l'optimisation de systèmes électromagnétique.

Le logiciel utilise la méthode des éléments finis pour résoudre les équations de Maxwell et permet ainsi de visualiser le comportement des champs électromagnétiques dans les structures étudiées. CST offre une interface graphique conviviale et une bibliothèque de modèles prédéfinis, ce qui facilite la conception des structures étudiées. Il est largement utilisé dans l'industrie des télécommunications et de l'électronique pour la conception de dispositifs RF tels que des antennes, des filtres, des amplificateurs et des circuits intégrés.

III.3 Conception et simulation

Notre processus de conception se déroulera en trois étapes. Dans un premier temps, nous calculons les dimensions d'une antenne patch circulaire en fonction de la fréquence de résonance choisie et les propriétés du substrat diélectrique utilisé. Nous opterons pour de bonnes caractéristiques en termes d'adaptation, de gain et de bande passante. Nous explorons ensuite la mise en réseau de plusieurs éléments à savoir deux, quatre et huit pour une amélioration le gain. Pour conclure, la dernière section se concentrera sur une étude comparative des performances des structures d'antennes conventionnelles et celles intégrant du graphène.

III.3.1 Conception de la structure élémentaire

III.3.1.1 Paramètres géométriques de l'antenne

Pour déterminer les paramètres géométriques d'une antenne circulaire imprimée à savoir son rayon, on utilise des formules simplifiées qui requièrent la connaissance de la constante diélectrique du substrat, son épaisseur et la fréquence de résonance de l'antenne. Le rayon du patch est donné par la formule suivante [3] :

$$R = \frac{F}{\sqrt{1 + \frac{2h}{\pi \epsilon_r F} \left[\ln\left(\frac{\pi F}{2h}\right) + 1.7726 \right]}} \quad (\text{III.1})$$

Avec
$$F = \frac{8.791 \times 10^9}{f_r \sqrt{\epsilon_r}}$$

Où

f_r : Fréquence du travail

ϵ_r : Permittivité du substrat

h : Epaisseur du substrat

III.3.1.2 Géométrie

Dans cette étude, nous avons opté pour l'analyse et la simulation d'une antenne patch en cuivre d'épaisseur 0.018 mm de forme circulaire qui doit satisfaire aux exigences spécifiées dans le cahier de charge suivant :

- La fréquence de résonance $f_r = 24$ GHz pour servir les applications radar anticollision.
- Bande passante de l'ordre de 500 MHz ou plus pour couvrir efficacement les fréquences radar pertinentes.
- Un gain important, atteignant jusqu'à 20 dB pour une directivité suffisante.

L'antenne est alimentée par une ligne micro-ruban et est placée sur un substrat diélectrique de type RO5880, caractérisé par une permittivité diélectrique $\epsilon_r = 2.2$, une tangente de pertes $\tan\delta = 0.009$ et une hauteur $h = 0.8$ mm. Un plan de masse total recouvre entièrement la face arrière du substrat comme le montre la **Figure III.1a**. Des fentes de dimensions $X \times y$ mm² sont insérées au niveau du patch d'une façon symétrique afin de créer des discontinuités dans le chemin de courant (**Figure III.1b**). Lorsque ce dernier rencontre ces discontinuités, il peut être réfléchi ou dévié, ce qui modifie sa distribution le long du patch. Cela contribue à un élargissement de la bande passante de l'antenne en permettant une meilleure adaptation d'impédance.

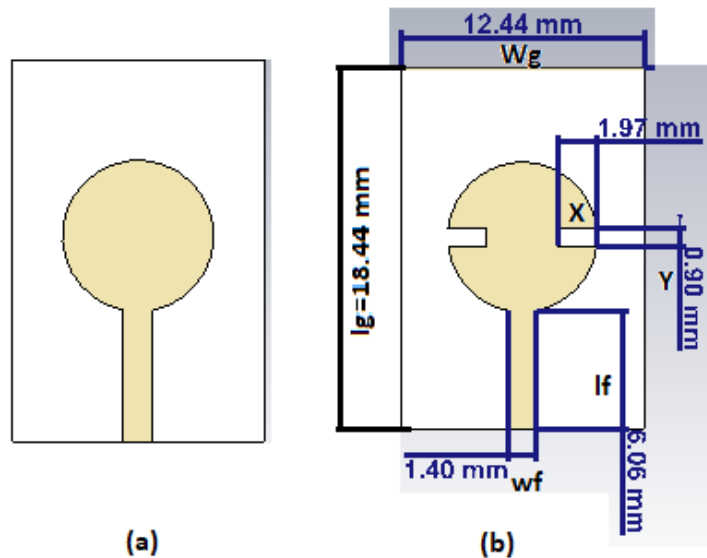


Figure III.1 : Antenne patch circulaire (a) : initiale (b) : modifiée.

Le tableau suivant résume les différents paramètres optimisés de l'antenne patch circulaire modifiée.

Les paramètres	wg	lg	R	lf	wf	x	y
Les dimensions (mm)	12.44	18.44	3.82	6	1.4	1.97	0.9

Tableau III-1 : Dimensions de l'antenne initiale modifiée.

III.3.2 Résultats de simulation

La simulation réalisée avec CST MWS nous permet de définir le coefficient de réflexion S_{11} sur une plage de fréquences allant de 22 à 27 GHz, des deux structures, à savoir l'antenne initiale et l'antenne modifiée, comme le montre la **Figure III.2**. D'après cette figure, on remarque qu'une meilleure adaptation est obtenue à la fréquence de travail pour l'antenne modifiée. Le coefficient de réflexion atteint un niveau de -49.6 dB à 24 GHz. La bande passante à -10 dB de cette antenne est de **1.62 GHz** allant de 23.52 GHz à 25.15 GHz comme indiquée sur la **Figure III.3**.

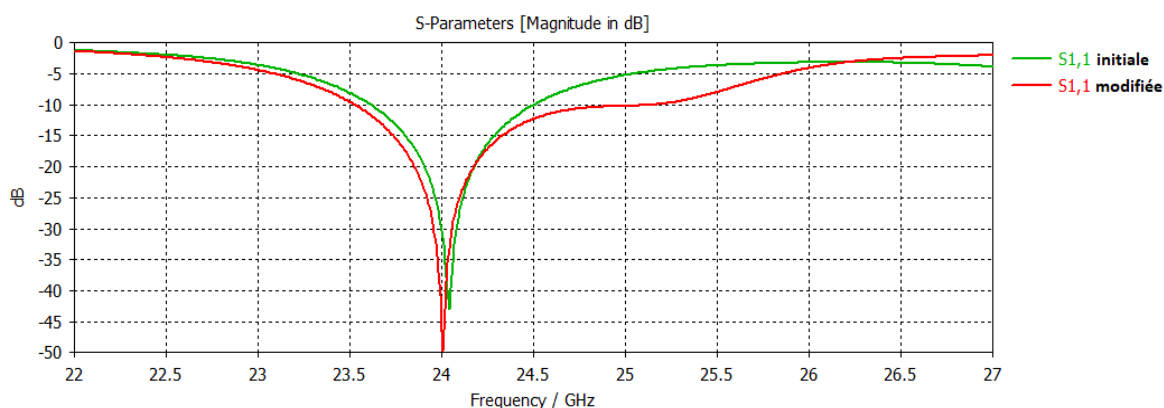


Figure III.2 : Coefficient de réflexion de l'antenne patch circulaire.

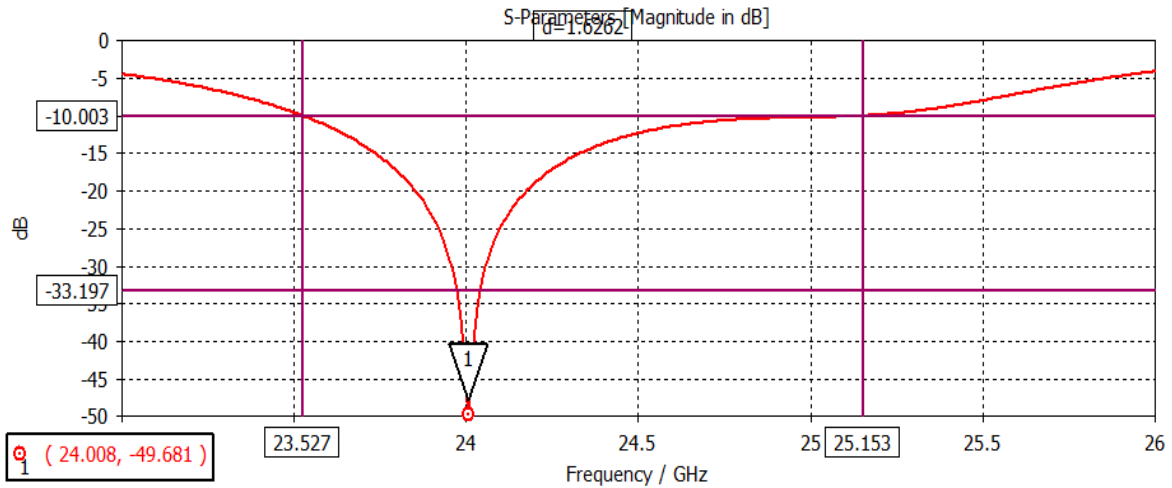


Figure III.3 : représentation de la bande passante à -10 dB de l'antenne circulaire modifiée.

Nous avons également analysé le rapport d'onde stationnaire (TOS) de l'antenne, qui est compris entre 1 et 2. Cette plage démontre une adaptation d'impédance efficace entre l'antenne et la ligne de transmission, comme illustré sur la **Figure III.4**.

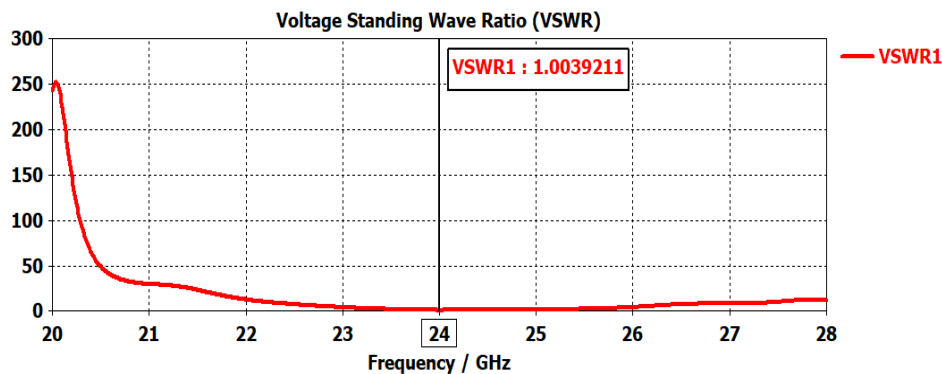


Figure III. 4 : VSWR de l'antenne patch circulaire.

La figure **III.5** montre une représentation tridimensionnelle du rayonnement de l'antenne modifiée conçue à la fréquence 24 GHz. Son gain maximal atteint une valeur de **7.6 dB**, indiquant une bonne capacité de l'antenne à concentrer l'énergie dans la direction souhaitée.

Les résultats des diagrammes de rayonnement en 2D de l'antenne conventionnelle sont illustrés dans les **Figures III.6.a et III.6.b**, représentant respectivement les deux plans principaux à $\phi=0^\circ$ et $\phi=90^\circ$.

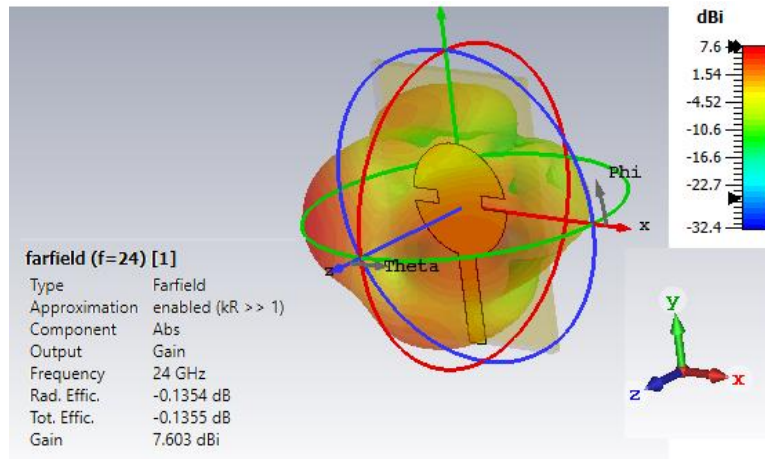
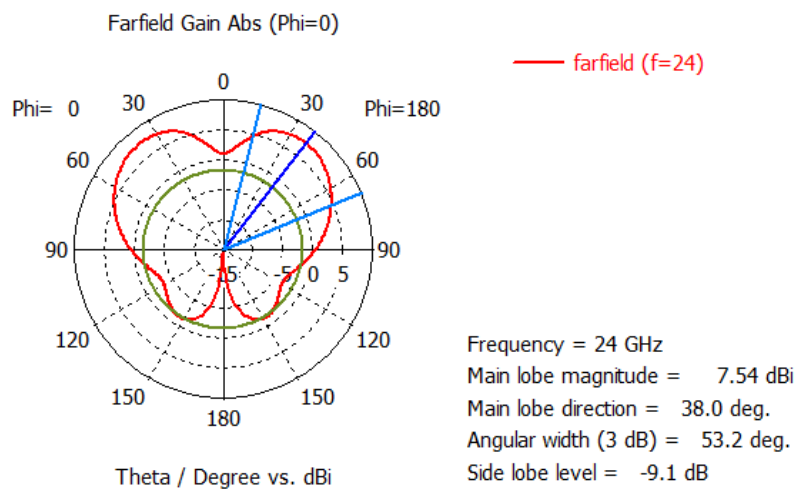


Figure III.5 : Diagramme de rayonnement en 3D de l'antenne initiale à la fréquence 24 GHz.

Les largeurs de faisceau mesurés à 3 dB dans les plans E/H sont respectivement de 53.1° et 43.1° . Il est à noter qu'un angle d'ouverture plus étroit indique une antenne plus directive, concentrant l'énergie dans une direction spécifique. À l'inverse, un angle d'ouverture plus large signifie que l'antenne rayonne ou reçoit de manière plus diffuse sur un plus grand angle.

D'après les résultats obtenus, on peut dire que l'antenne conçue génère un rayonnement avec une bande passante très intéressante, une largeur de faisceau modérée et un gain acceptable. Néanmoins, un gain plus élevé est crucial pour garantir les performances et la fiabilité de notre application, d'où l'utilisation du réseau d'antennes qui contribue significativement à l'amélioration du gain.



(a)

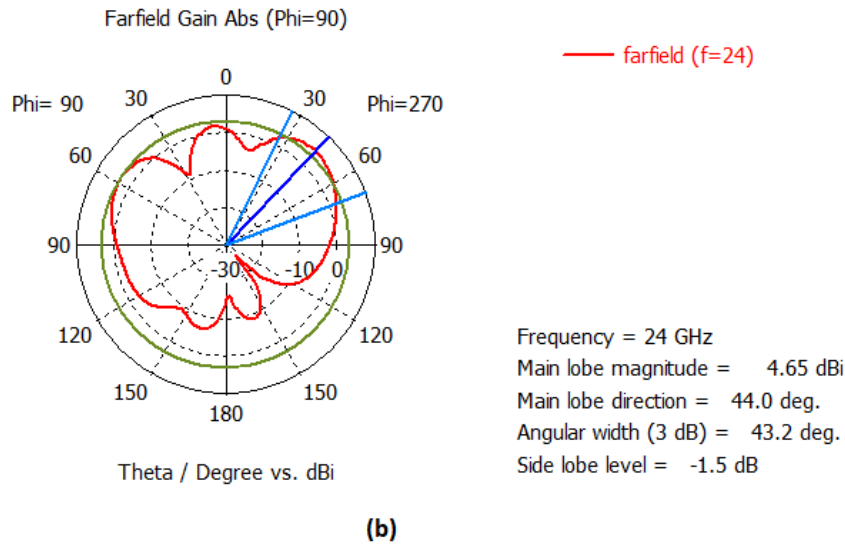


Figure III.6: Diagramme de rayonnement de l'antenne initiale en 2D sur les deux plans :
(a) plan xoz et (b) plan yoz.

III.3.2 Conception des réseaux d'antennes

Dans cette partie, nous examinons en premier lieu la configuration du réseau d'antennes à deux éléments, à partir de l'antenne étudiée précédemment. On utilise une alimentation parallèle via un diviseur de puissance sous forme d'une jonction T excitée par une impédance d'entrée de 50Ω . Cette jonction favorise un déplacement accru du courant dans ses coudes, induisant une absorption de ce courant dans le réseau. De plus, elle permet une répartition symétrique de la puissance d'entrée à l'extrémité des coudes pour la réflexion des ondes.

III.3.2.1 Réseau d'antennes à deux éléments

Pour la conception de ce réseau, nous allons appliquer la méthode d'alimentation en parallèle qui exploite le diviseur de puissance en jonction T. Pour cela, nous devons déterminer les valeurs de la jonction, notamment sa longueur et sa largeur.

- L'impédance d'entrée Z_0 est égale à 50Ω , correspondant à l'impédance d'entrée de la première alimentation.
- L'impédance de sortie Z_1 est égale à 100Ω , où Z_1 est égal à n fois Z_0 , avec n représentant le nombre d'éléments.

III.3.2.1.a Description de la géométrie

Le réseau d'antennes étudié se compose de deux patches identiques disposés sur le même substrat (RT5880) de dimensions $27 \times 25.36 \times 0.8 \text{ mm}^3$ (**Figure III.7**). Les éléments rayonnants de la structure réseau en parallèle sont espacés d'une distance (**d**) égale à 7.03 mm .

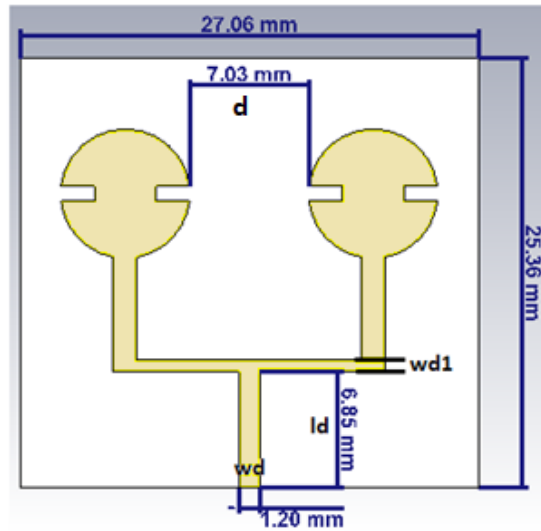


Figure III.7 : Structure du réseau d'antennes à deux éléments.

Les caractéristiques de la jonction T ainsi que ses valeurs optimisées sont récapitulées dans le tableau ci-dessous.

Les paramètres	w_{d1}	l_d	w_d
Les dimensions (mm)	0.71	6.85	1.2

Tableau III-2 : Paramètres de la jonction T du réseau en parallèle à deux éléments.

III.3.2.1.b Résultats de simulation

La structure en réseau à deux éléments a été simulée dans l'environnement CST-Microwave Studio. Les résultats de la simulation de la structure en termes de coefficient de réflexion et de gain sont illustrés par les **Figures III.8** et **III.9** respectivement.

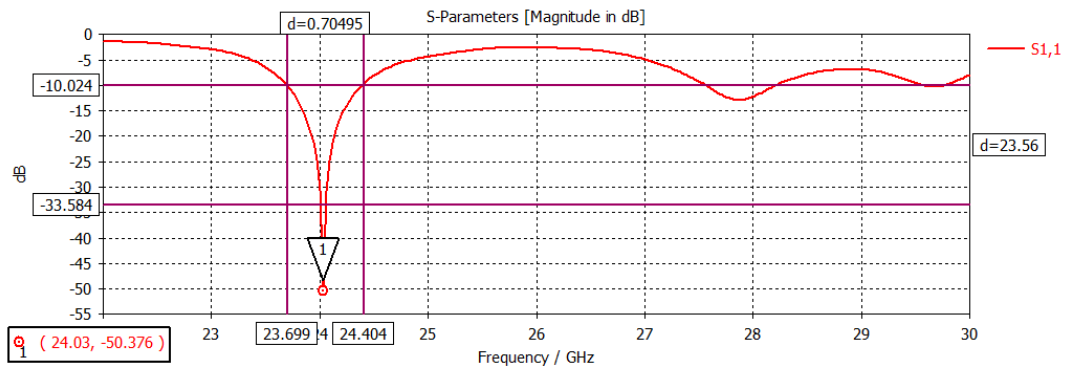


Figure III.8 : Coefficient de réflexion S_{11} en fonction de la fréquence du réseau d’antennes à deux éléments

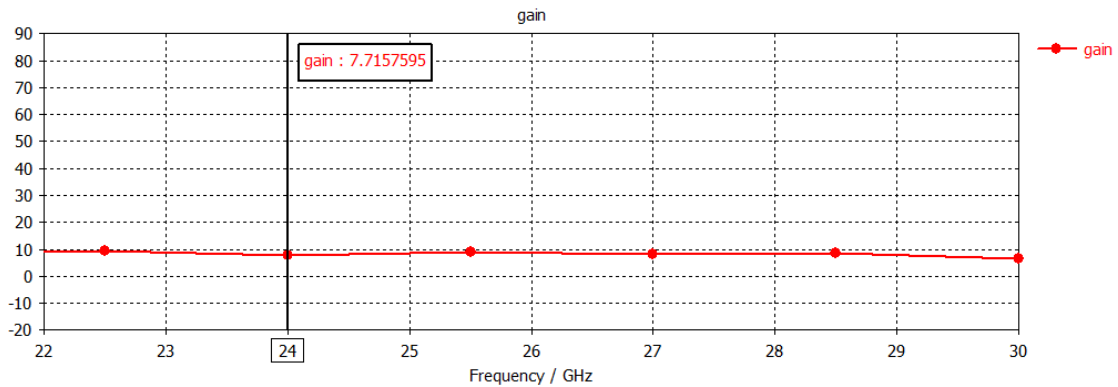
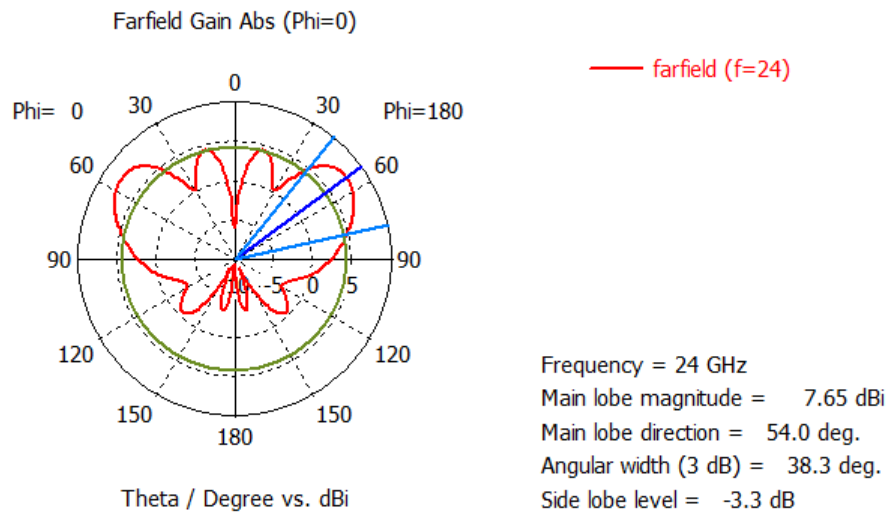


Figure III.9 : Gain en fonction de la fréquence du réseau d’antennes à deux éléments à la fréquence 24 GHz.

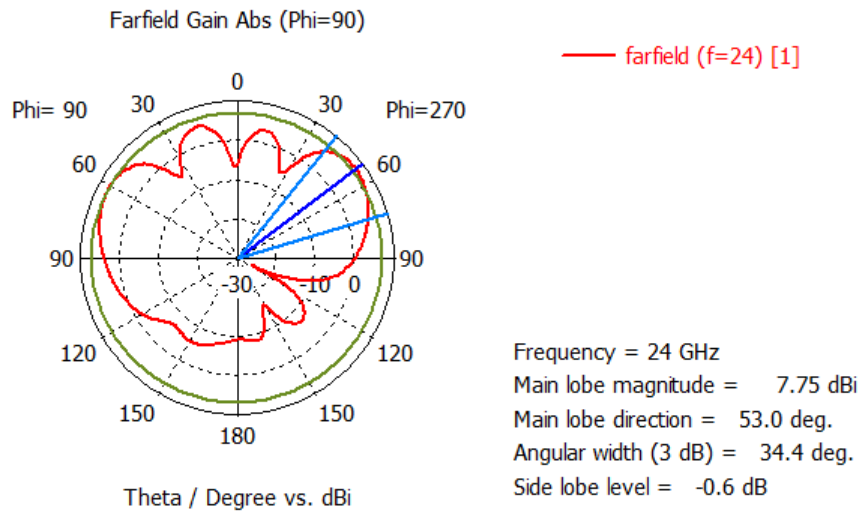
La structure en réseau à deux éléments présente plusieurs résonances. La plus intéressante en termes d’adaptation est 24 GHz qui correspond à la fréquence de notre travail, avec un niveau du coefficient de réflexion de -50.3 dB. La bande passante mesurée à -10 dB s’étale de 23.69 GHz à 24.4 GHz, soit une bande passante de 704,95 MHz.

Le gain de l’antenne à la fréquence de 24 GHz est de **7,71 dB**, comme illustré dans la **Figure III.9**. Une légère amélioration par rapport à la configuration initiale a été constatée, ce qui nous conduit à concevoir un réseau d’antennes patches à quatre éléments pour améliorer d’avantage le gain.

Les diagrammes de rayonnement en 2D sont présentés par les **Figures III.10.a** et **III.110.b**, illustrant chacun les deux plans principaux à des angles de $\varnothing=0^\circ$ et $\varnothing=90^\circ$, respectivement.



(a)



(b)

Figure III.10: Diagramme de rayonnement du réseau d'antennes à deux éléments en 2D sur les deux plans : (a) plan xoz et (b) plan yoz.

Les largeurs de faisceau mesurés à 3 dB dans les plans E/H sont respectivement de 38.3° et 34.4° . Cela signifie que les faisceaux du réseau d'antennes à deux éléments sont plus concentrés ou plus étroits que ceux de l'antenne initiale. En d'autres termes, ce réseau présente une directivité plus prononcée, ce qui peut être bénéfique dans notre application qui nécessite une concentration plus forte du signal.

III.3.2.2 Réseau d'antennes à quatre éléments

III.3.2.2.a Géométrie

Dans cette configuration, le réseau étudié dans la section précédente est doublé pour former un réseau de quatre éléments, comme illustré dans la **Figure III.11**. Les dimensions des paramètres utilisés pour la conception du réseau précédent sont conservées. Les dimensions du substrat supportant l'antenne sont $W_g=60.26$ mm et $L_g=32.92$ mm respectivement. La distance (S) entre les deux réseaux est maintenue à environ une longueur d'onde (λ).

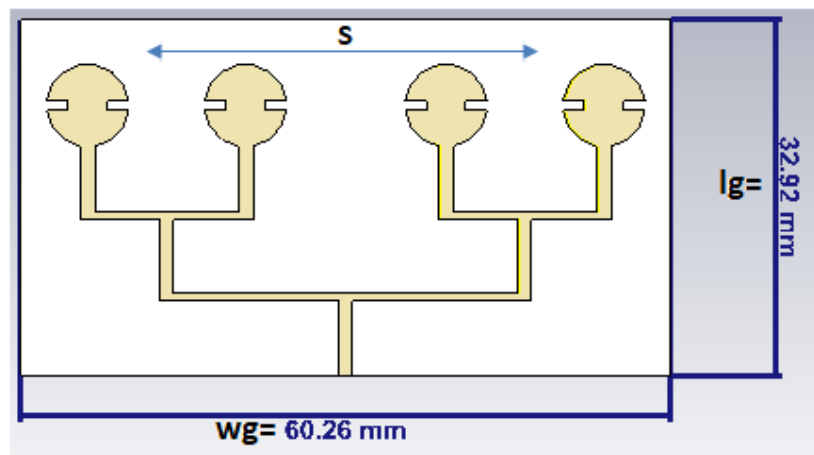
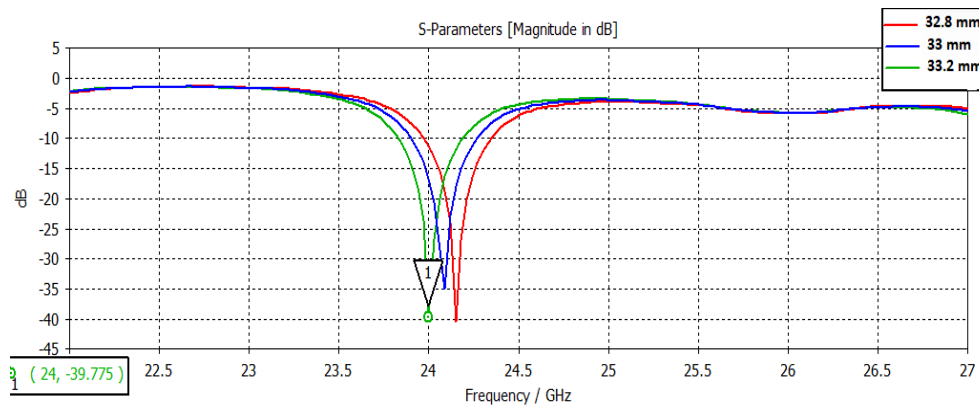


Figure III.11 : Structure du réseau d'antennes à quatre éléments.

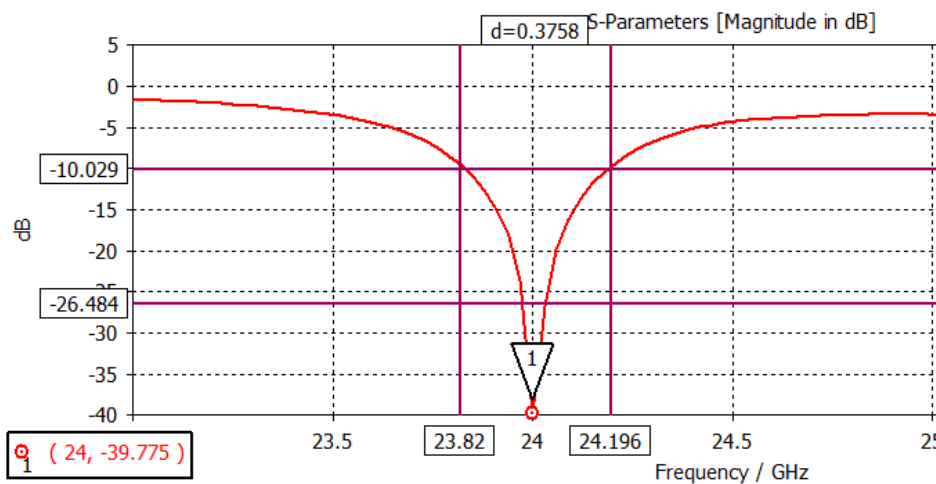
Une étude paramétrique a été réalisée sur la distance (S) qui représente l'espacement entre les deux réseaux, afin d'adapter l'antenne à la fréquence de fonctionnement. Cette étude a été menée pour des distances équivalentes à 32.8 mm, 33 mm, et 33.2 mm respectivement.

III.3.2.2.b Résultat de simulation

La **Figure III.12.a** présente le module du coefficient de réflexion pour les différentes distances S. Nous remarquons une adaptation d'impédance plus optimale pour une distance S égale à 33,2 mm avec un coefficient de réflexion de -39,7 dB à la fréquence 24 GHz. La bande passante en adaptation de cette antenne est de **375.8 MHz** allant de 23.83 à 24.2 GHz comme illustré sur la figure **Figure III.12.b**.



(a)



(b)

Figure III.12 : Coefficient de réflexion en fonction de la fréquence du réseau d'antennes à quatre éléments. (a) : pour les différentes valeurs de S, (b) : pour l'antenne optimisée.

Dans la **Figure III.13**, nous visualisons la variation de l'impédance d'entrée du réseau d'antennes en fonction de la fréquence. Nous constatons une adaptation d'impédance satisfaisante, se situant aux alentours de 50 ohms sur l'ensemble de la bande passante.

Nous présentons dans la **Figure III.14** le rayonnement du réseau d'antennes à quatre éléments sur le plan horizontal ($\theta=90^\circ$). Car, la plupart des surfaces terrestres sont relativement planes par rapport au plan horizontal. Cela facilite la détection des cibles dans ce plan.

D'après cette figure, une magnitude du lobe principal de 11.6 dB est observée. On peut dire que le réseau d'antennes présente une puissance rayonnée significative dans la

direction privilégiée, essentielle pour détecter avec précision les cibles. L'ouverture du lobe principal a -3 dB est de 35.7 degrés. Cette valeur indique que le lobe principal couvre une zone considérable, permettant à l'antenne de balayer efficacement une large gamme d'angles dans le plan horizontal. Cette capacité est particulièrement avantageuse pour la détection et le suivi précis des cibles en mouvement.

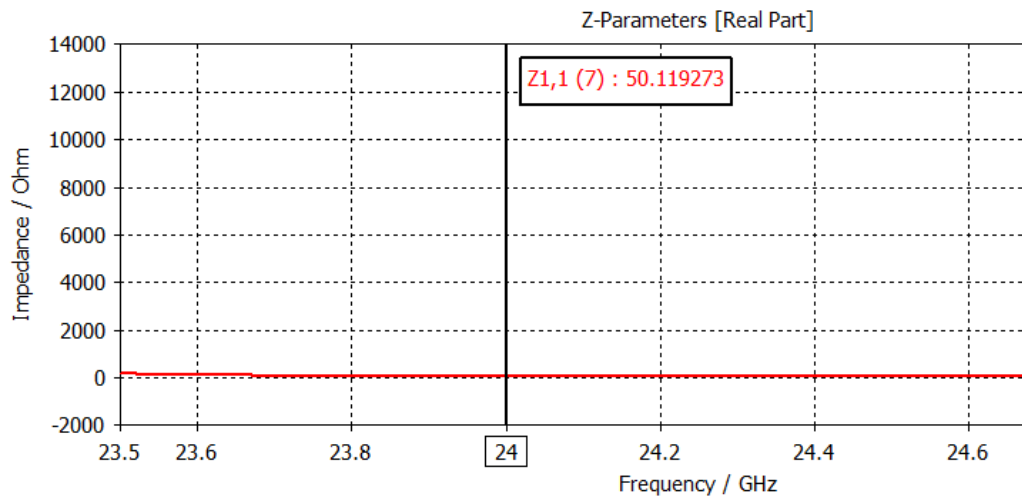


Figure III.13 : Variation de l'impédance d'entrée du réseau d'antennes à quatre éléments en fonction de la fréquence.

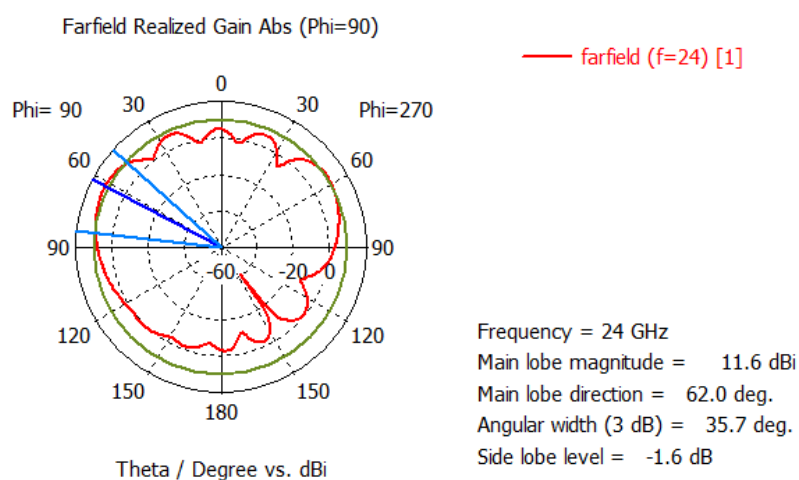


Figure III.14 : Diagramme de rayonnement du réseau d'antennes à quatre éléments en 2D sur le plan $\phi=90^\circ$.

La **Figure III.15** nous donne la variation du gain de notre réseau en fonction de la fréquence. D'après la figure, on remarque que le gain a été amélioré significativement par rapport à la configuration précédente : il est passé de 7.5 pour le réseau à deux éléments à 11.5 pour celui à quatre éléments à la fréquence 24 GHz indiquant une capacité accrue du réseau d'antennes à concentrer et à diriger l'énergie électromagnétique dans une direction bien spécifique.

Le diagramme de rayonnement en 3D est représenté dans la **Figure III.16**. On peut constater que la distribution spatiale du rayonnement est concentrée sur plusieurs côtés. Il serait avantageux de pouvoir diriger le rayonnement vers un seul côté, ce qui entraînerait une amélioration du gain et une couverture plus étendue de la cible.

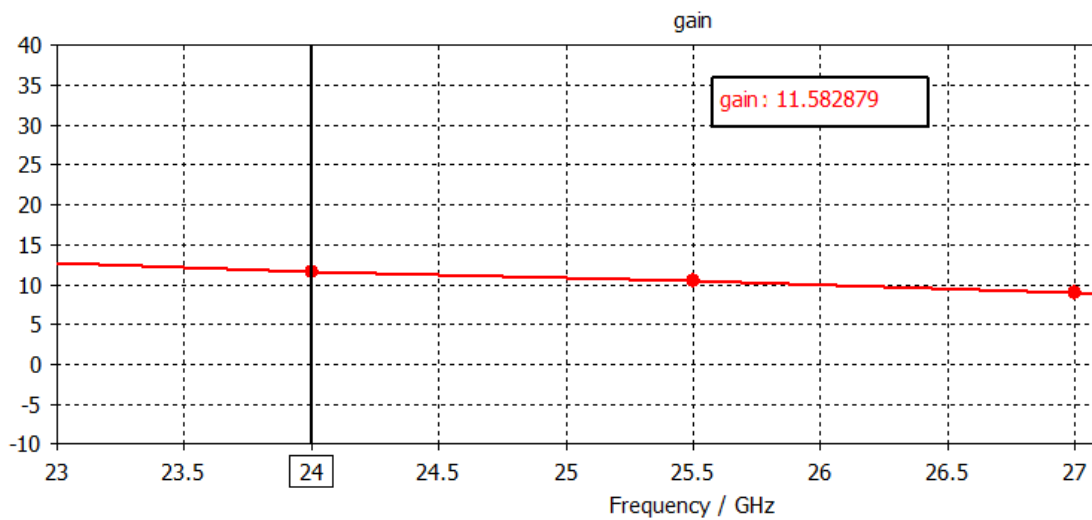


Figure III.15 : Gain du réseau d'antennes à quatre éléments en fonction de la fréquence.

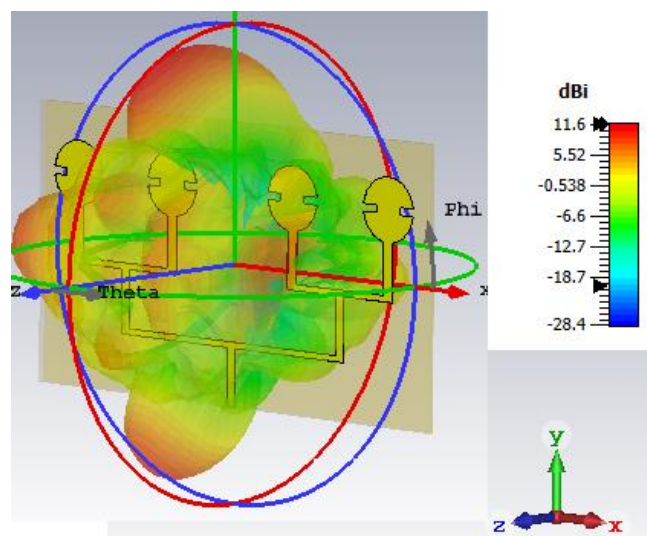


Figure III.16 : Diagramme de rayonnement en 3D à la fréquence 24 GHz.

Compte tenu de l'amélioration significative du gain observée entre les configurations des réseaux à deux et quatre éléments, il serait intéressant d'envisager une transition vers la conception d'un réseau d'antennes comportant huit éléments, afin de continuer à optimiser les performances de l'antenne.

III.3.2.3 Réseau d'antennes à huit éléments (2*4)

Dans cette configuration, le réseau d'antenne exploré dans la section précédente (§ III.3.2.3.a) est étendu pour créer un réseau de huit éléments, comme démontré dans la **Figure III.17**. Les dimensions du substrat supportant l'antenne sont $W_g=130\text{mm}$ et $L_g=47\text{mm}$ respectivement.

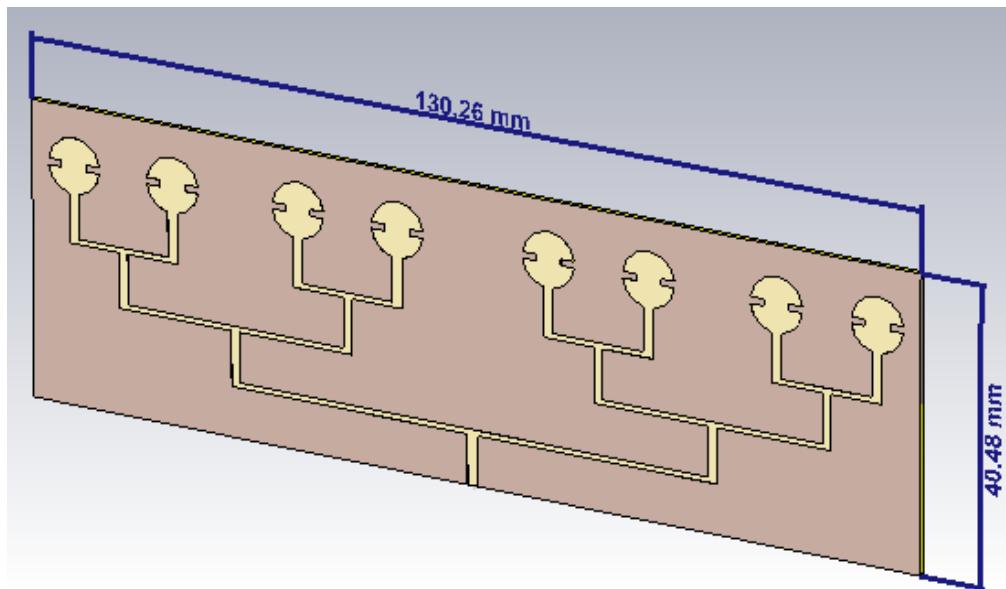


Figure III.17 : réseau d'antennes microruban constitué de huit éléments.

Le coefficient de réflexion de cette structure est illustré par la figure **III.18**.

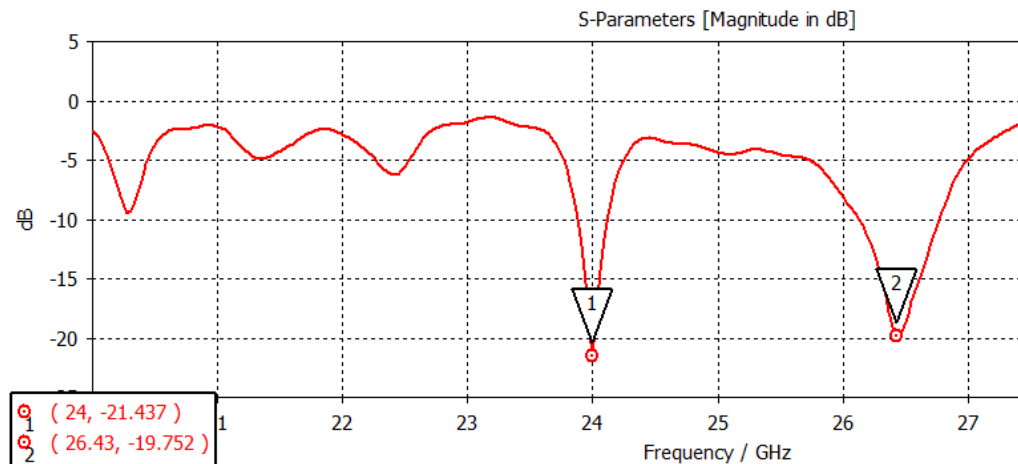


Figure III.18 : Coefficient de réflexion en fonction de la fréquence du réseau d’antennes à huit éléments.

La structure est à caractère multi bandes, où nous observons la présence de plusieurs résonances à des fréquences différentes. Les plus intéressantes en termes d’adaptation sont 24 GHz et 26.45 GHz avec des niveaux d’adaptation de -21.43 et -19.75 respectivement. Ces deux résonances permettent à l’antenne de fonctionner efficacement sur une gamme de fréquences plus large, offrant une flexibilité accrue dans le choix de la fréquence de fonctionnement pour répondre aux besoins spécifiques de notre application radar qui utilise la bande de fréquence **22-26.625 GHz**.

Par ailleurs, nous constatons une diminution de la bande passante en comparaison avec la structure du réseau à quatre éléments. Elle s’étale sur 228.84 MHz autour de la fréquence 24 GHz, elle est plus importante autour de la fréquence 26.4, soit de 643 MHz.

La **Figure III.19** montre le taux d’ondes stationnaires (TOS) du réseau d’antennes à huit éléments qui est égale à 1.18 à la fréquence 24 GHz. Cela signifie qu’il n’y a pas de réflexion d’onde, ce qui correspond à une efficacité maximale de la transmission de l’énergie.

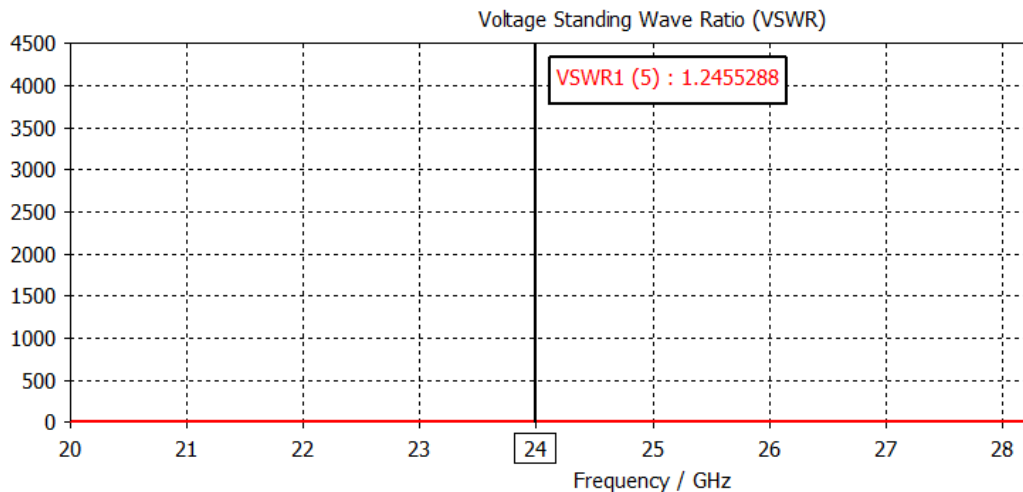


Figure III.19 : TOS du réseau d'antennes à huit éléments.

Les diagrammes de rayonnement en 2D du réseau d'antennes pour ces deux fréquences de résonances sont représentés par la **Figure III.20**. La direction du lobe principal est de 62° et 19° avec des gains de 14.6 dB et 8.89 dB respectivement pour les deux fréquences de résonance correspondantes. Les largeurs du faisceau sont de 31.8° et 13° respectivement.

A ces deux fréquences, la configuration en réseau 4×2 présente des caractéristiques essentielles pour détecter efficacement les objets en mouvement.

La magnitude élevée des lobes principaux indique une concentration significative de l'énergie rayonnée latéralement, favorisant ainsi une détection précise des cibles. La largeur angulaire de chaque lobe principal assure une couverture étendue autour de la direction principale du lobe, permettant une surveillance efficace de la zone environnante.

Enfin, la direction principale des deux lobes indique l'orientation optimale de l'antenne pour la détection des objets dans la zone spécifiée.

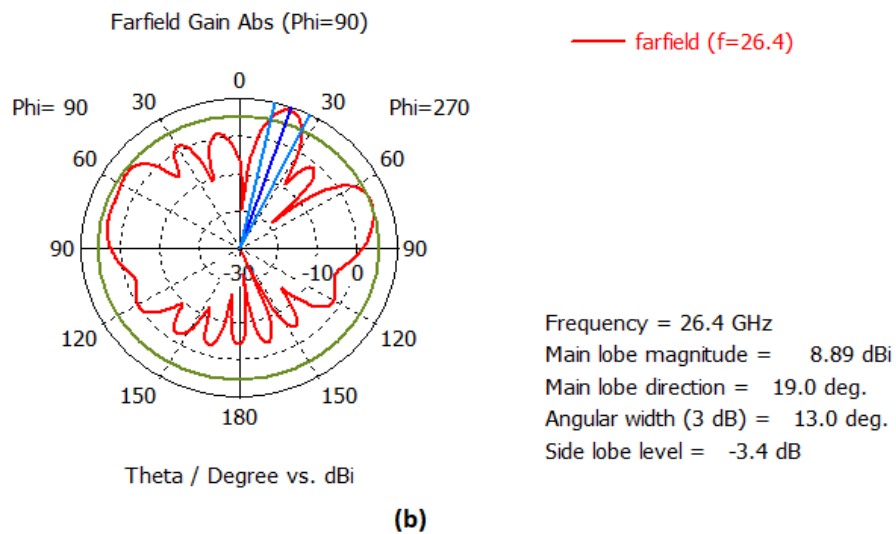
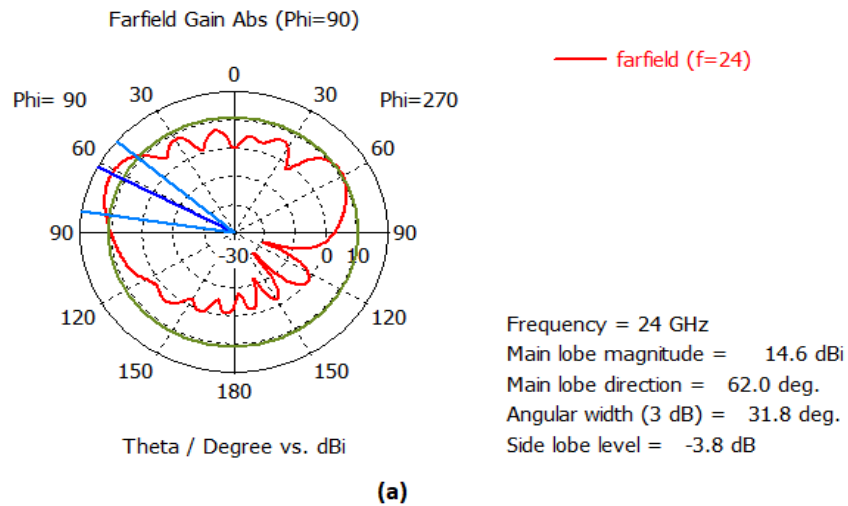


Figure III.20 : Diagramme de rayonnement du réseau d'antennes à quatre éléments en 2D sur le plan $\phi=90^\circ$ (a) à la fréquence 24 GHz et (b) à la fréquence 26.4 GHz.

Pour fournir une visualisation claire de la portée du rayonnement par rapport au réseau d'antenne, nous avons présenté dans la **Figure III.21** le diagramme en 3D illustrant le rayonnement à la fréquence de 24 GHz. Nous remarquons que le rayonnement est concentré des deux côtés du réseau d'antennes. Une future recherche consisterait à focaliser le rayonnement d'un seul côté, ce qui pourrait entraîner une amélioration du gain et une couverture plus large des objets.

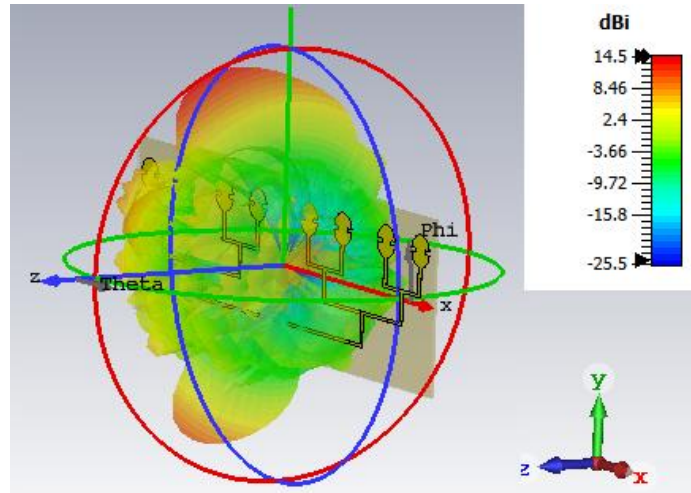


Figure III.21 : Diagramme de rayonnement 3D du réseau d’antennes à huit éléments à la fréquence 24 GHz.

Les caractéristiques du réseau d’antennes à huit éléments proposé en termes d’adaptation, de gain et de bande passantes aux deux fréquences sont résumées dans le tableau III.3. Ces caractéristiques du diagramme de rayonnement mettent en lumière la capacité du réseau d’antennes (2*4) conçus à fournir une couverture étendue et une détection précise, ce qui en fait un choix idéal pour ce type d’application.

Paramètres	Valeurs	
Fréquence (GHz)	24	26.4
S11 (dB)	-21.43	-19.75
Bande passante (MHZ)	244.52	638.25
Gain (dB)	14.5	9.52
Directivité (dBi)	15.2	9.82

Tableau III-3 : Performances du réseau d’antennes à huit éléments pour les deux fréquences.

A la lumière des résultats obtenus, on peut constater que la mise en réseau de huit éléments a considérablement amélioré les performances de l’antenne en termes d’adaptation, de gain, et de directivité, ce qui est crucial pour les applications radar nécessitant une haute précision et une sensibilité accrue.

III.3.3 Réseau d’antennes imprimées en graphène

III.3.3.1 Introduction

Au fil des années, de nombreux chercheurs ont exploré diverses réalisations des réseaux d'antennes dans le but d'améliorer les performances des systèmes de communication sans fil [4]. Traditionnellement, ces antennes ont été fabriquées en utilisant des matériaux conducteurs conventionnels tels que le cuivre ou l'argent, visant à accroître le gain et la bande passante [5][6]. Cependant, une tendance émergente se tourne désormais vers l'utilisation du graphène comme matériau conducteur pour la conception des réseaux d'antennes [7][8]. Cette approche ouvre des avancées significatives, où le graphène offre des propriétés uniques telles qu'une conductivité exceptionnelle et une flexibilité accrue.

III.3.3.2 Définition

Le graphène est un matériau bidimensionnel constitué d'une seule couche d'atomes de carbone disposés selon un réseau hexagonal [9]. Chaque atome de carbone est lié de manière covalente à trois autres atomes de carbone, formant ainsi une structure en nid d'abeilles (**Figure III.22**). Il présente les propriétés suivantes :

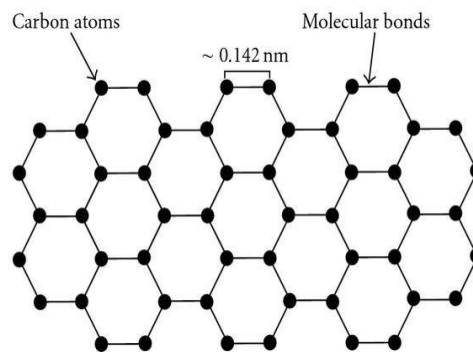


Figure III. 22 : Structure chimique du Graphène.

- * Une mobilité électronique élevée atteignant jusqu'à $8\,000 \text{ cm}^2/\text{V}$ [9] [10]. Le graphène offre des performances exceptionnelles en matière de conduction électrique.
- * Une conductivité thermique impressionnante, évaluée à $5\,000 \text{ W/m/K}$, en fait également un excellent conducteur de chaleur [9] [10].
- * Une résistance mécanique et une flexibilité remarquable ajoutent à sa polyvalence, le rendant adapté à une gamme variée d'applications, de l'électronique flexible aux dispositifs biomédicaux avancés [11]. En plus de ces propriétés, il possède les caractéristiques suivantes :

III.3.3.2 Caractéristiques du graphène

III.3.3.2.a Plasmons de polaritons de surface (SPP)

Les plasmons de surface sont des oscillations collectives des électrons dans un matériau, généralement un métal, qui sont couplées à des ondes électromagnétiques à la surface de ce matériau. Lorsque ces ondes électromagnétiques interfèrent avec la surface du métal, elles excitent les électrons libres, créant ainsi des oscillations cohérentes appelées **plasmons de polaritons surface (PPS)** [12].

Les plasmons de surface peuvent être générés par diverses sources d'excitation, telles que la lumière, des particules chargées ou des champs électromagnétiques externes. Ils sont caractérisés par une longueur d'onde plus courte que celle de la lumière incidente, ce qui leur permet de se concentrer et de se propager le long de la surface du matériau métallique.

III.3.3.2.b Temps de relaxation et potentiel chimique

Le graphène présente des conditions optimales pour la propagation des plasmons de polaritons de surface (PPS), qui sont des ondes électromagnétiques guidées le long de l'interface entre un métal et un diélectrique, généralement générées par un rayonnement incident à haute fréquence. En fait, une couche libre de graphène peut soutenir des modes magnétiques transversaux. En outre, au sein du graphène, les bords du patch de graphène agissent comme des réflecteurs, tandis que le graphène lui-même agit comme un résonateur pour les modes de plasmons de polaritons de surface.

Le temps de relaxation essentiel minimum se situe de manière cohérente dans une plage de quelques centaines de femtosecondes. Il diminue au fur et à mesure que le potentiel chimique (symbolisé par μ_c) augmente. Cette diminution est attribuée à une augmentation de la disponibilité des porteurs de charge avec un potentiel chimique élevé, ce qui entraîne une augmentation de la conductivité.

Pour obtenir une réponse d'antenne discernable, il est impératif que le graphène possède à la fois des temps de relaxation suffisamment élevés et des potentiels chimiques appropriés. Les chercheurs ont également étudié la dépendance du temps de relaxation minimum par rapport au potentiel chimique et ont pu déterminer un coefficient de mérite γ pour l'efficacité des dispositifs d'antenne à base de graphène en utilisant l'expression suivante [13].

$$\gamma = u_c \times T_r^2 \quad (\text{III.2})$$

Avec

γ : le rapport des capacités thermiques

u_c : la vitesse caractéristique

T_r^2 : le temps de relaxation

III.3.3.3 Conception et simulation

III.3.3.3 a. Antenne conventionnelle à base de graphène

Afin d'évaluer l'impact du graphène sur les propriétés de l'antenne, nous allons considérer ce matériau comme étant l'élément rayonnant de l'antenne pour la conception de toutes les structures étudiées dans la section précédente. **La figure III.23** illustre la structure initiale de l'antenne dont les dimensions sont maintenues constantes. Le patch est supposé à base de graphène, présentant les caractéristiques suivantes : un potentiel chimique $\mu_c=0.1$ eV, une température ambiante $T=300$ K, un temps de relaxation $\tau=1$ ps et une épaisseur de 1nm.

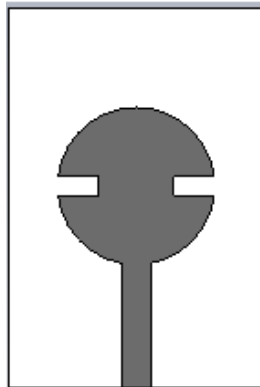


Figure III.23 : Antenne initiale à base de graphène.

Le coefficient de réflexion S11 en fonction de la fréquence sur une plage qui s'étale de 0 à 28 GHz est illustré par la **Figure III.24**, où nous pouvons constater la présence de plusieurs fréquences de résonances.

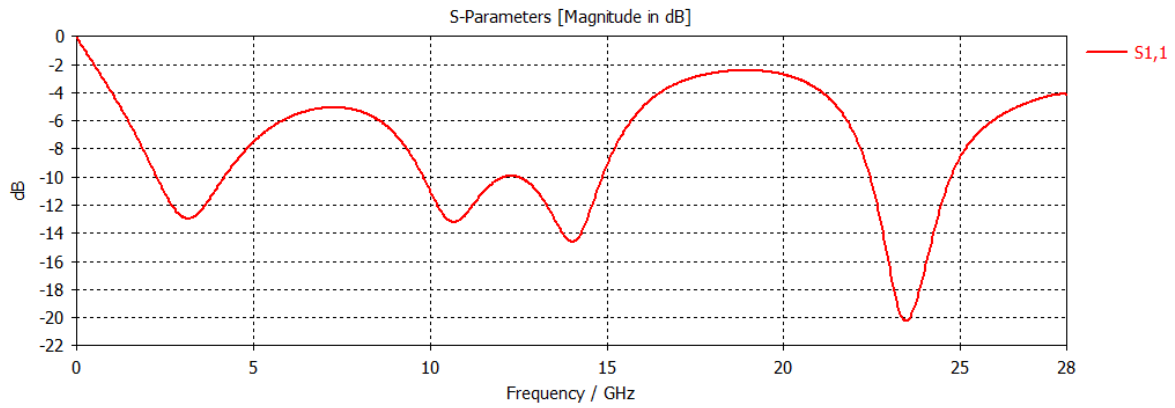


Figure III.24 : Coefficient de réflexion de l'antenne patch à base de graphène.

Ce phénomène peut être interprétée par les propriétés plasmoniques du graphène. Ces propriétés peuvent entraîner la formation de résonances plasmoniques résultant de l'interaction entre la lumière électromagnétique et les électrons de conduction du matériau.

Afin d'optimiser l'adaptation de l'antenne à notre fréquence de travail, nous avons procédé à une étude paramétrique par rapport à la valeur du potentiel chimique qui détermine la présence de porteurs (électrons ou trous) dans le graphène. Ces porteurs influencent à leur tour la conductivité électrique ainsi que les caractéristiques électromagnétiques de l'antenne.

La **Figure III.25** montre la variation du coefficient de réflexion S_{11} en fonction de la fréquence pour les différentes valeurs du potentiel chimiques μ_c .

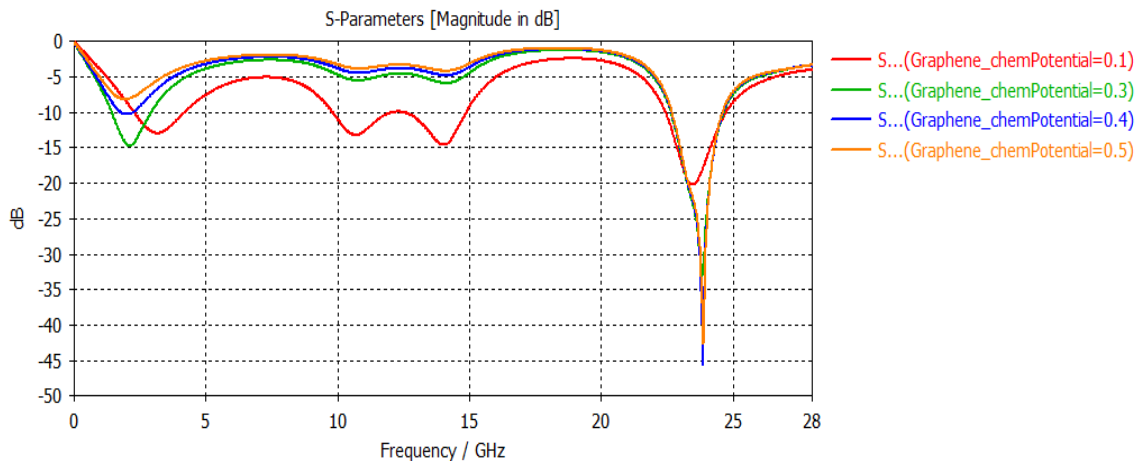


Figure III.25 : coefficient de réflexion S_{11} en fonction de la fréquence de l'antenne à base de graphène pour les différentes valeurs μ_c du potentiel chimique.

Nous constatons une meilleure adaptation d'impédance pour une valeur de 0.5 ev. A cette valeur, le coefficient de réflexion atteint un niveau de -42.7 dB à la fréquence 23.88 GHz.

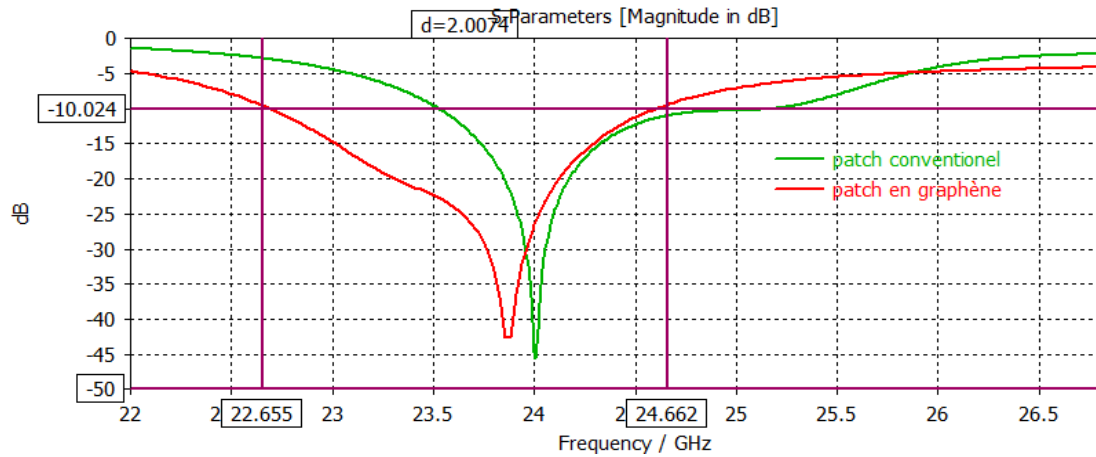


Figure III.26 : coefficient de réflexion S_{11} en fonction de la fréquence pour l'antenne optimisée à base de graphène.

La bande passante à -10 dB est de 2 GHz, qui s'étale de 22.65 GHz à 24.66 GHz. Une amélioration de 400 MHz a été obtenue par rapport à l'antenne conventionnelle comme le montre la **Figure III.26**.

En ajustant le potentiel chimique du graphène, on peut contrôler la densité de porteurs présents dans le graphène. Une densité de porteurs plus élevée peut augmenter la conductivité du graphène, ce qui peut contribuer à élargir la bande passante de l'antenne.

Le rayonnement à trois dimensions de cette antenne est représenté dans la **Figure III.27**. Un gain maximal de 6.69 dB à la fréquence de résonance est réalisé avec cette antenne.

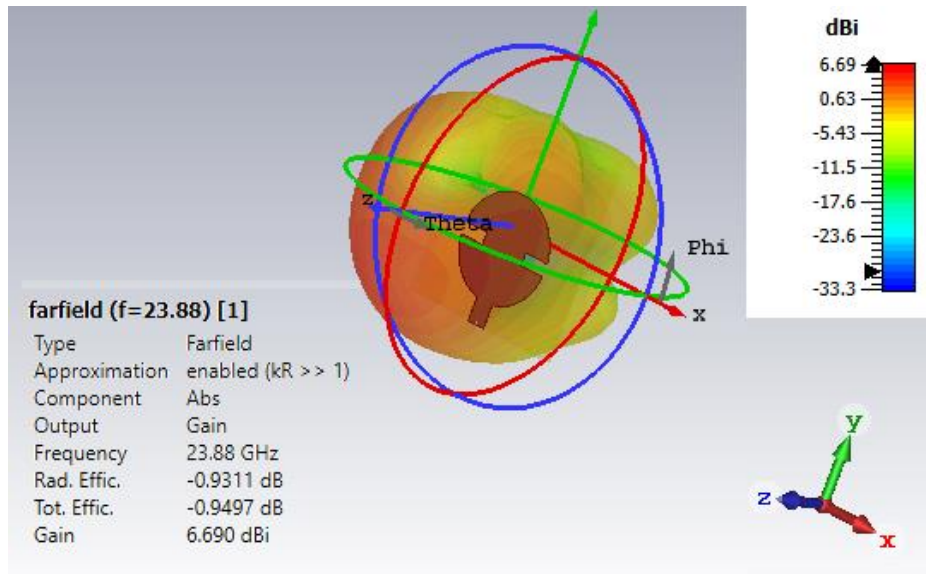


Figure III.27 : Le rayonnement 3D de l'antenne patch en graphène.

III.3.3.3 b. Réseaux d'antennes à base de graphène

Les structures en réseau d'antennes à deux, à quatre et huit éléments étudiés dans la section précédente seront réalisées en utilisant le graphène comme élément rayonnant, afin d'évaluer son influence sur les performances de l'antenne, et ce, en comparaison avec les matériaux traditionnels. Cette comparaison nous permettra d'identifier les avantages potentiels que le graphène pourrait offrir en termes de performances et de fonctionnalités de l'antenne.

Le coefficient de réflexion S11 en fonction de la fréquence du réseau d'antennes à deux éléments pour les différentes valeurs du potentiel chimiques est illustré sur la figure **III.28**.

Un comportement bi bandes est observé sur la plage de fréquence qui s'étale de 20 à 30 GHz. Une meilleure adaptation d'impédance est observée avec une valeur de $u_c=0,3$ eV. À cette valeur, le coefficient de réflexion atteint -38.61 dB à la fréquence 23,49 GHz, et -33.47 dB à la fréquence 28.17 GHz (**Figure III.29**). On constate aussi que pour des mêmes dimensions du réseau d'antennes, la résonance est décalée vers les basses fréquences pour le réseau d'antennes patch en graphène. Cela nous permet de réduire la taille du réseau pour revenir vers la fréquence convoitée au départ qui est de 24 GHz.

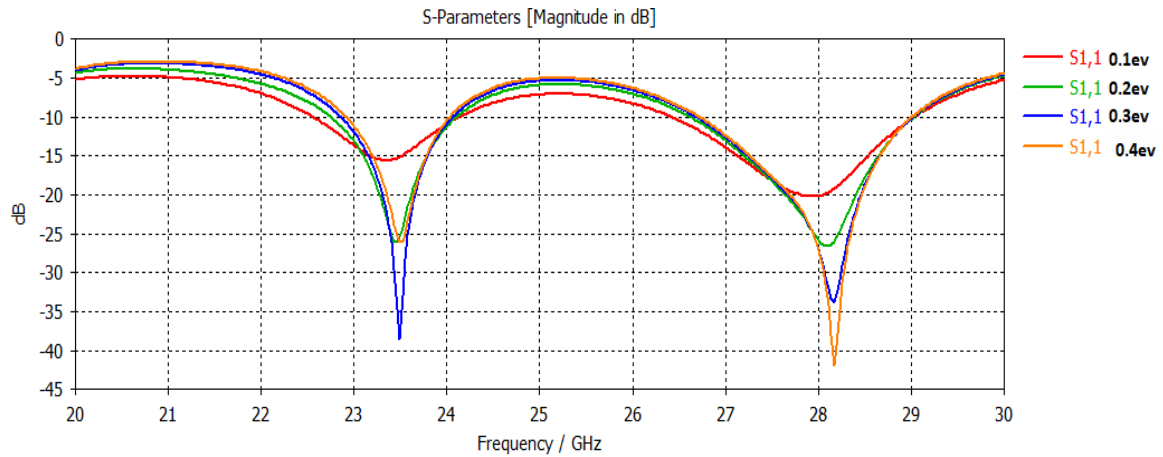
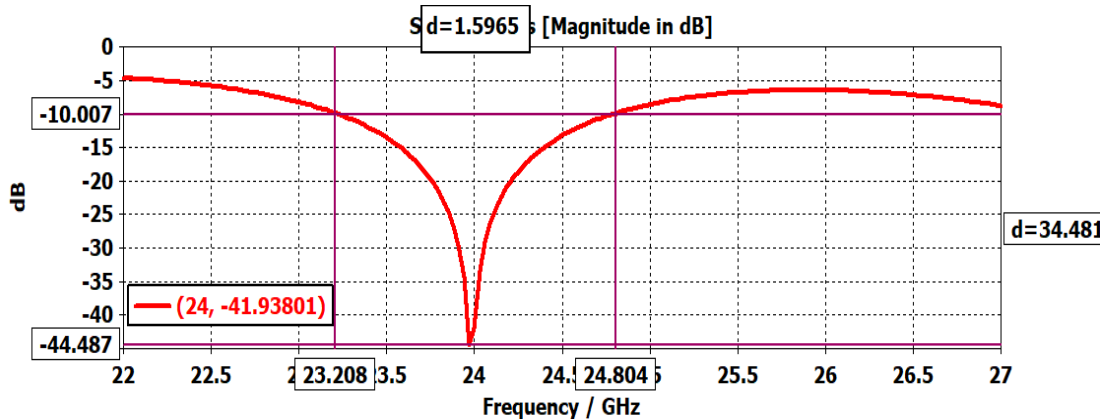


Figure III.28 : Coefficient de réflexion S_{11} en fonction de la fréquence du réseau d'antennes (1*2) en graphène pour les différentes valeurs du potentiel chimique.

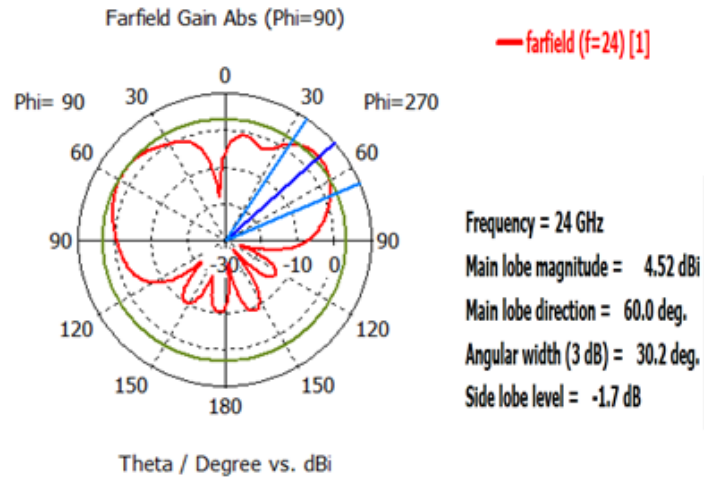
La **Figure III.29 a** présente le coefficient de réflexion du réseau d'antennes (1*2) optimisé, et simulé sous CST à la fréquence 24 GHz. Son diagramme de rayonnement au plan E est représenté par la **Figure III.29.b**.



(a)

La bande passante mesurée à -10 dB est de 1596.5 MHz autour de la fréquence 24 GHz (soit de 23.2 GHz à 24.8 GHz). En comparaison avec le réseau d'antennes conventionnel à deux éléments, une amélioration de **900 MHz** est observée en utilisant le graphène, comme le montre la **Figure III.29(a)**.

La largeur du faisceau mesurée à -3 dB dans le plan E est de 30.2°. Cette valeur indique que le faisceau du réseau d'antennes à deux éléments à base de graphène est légèrement resserré par rapport au réseau conventionnel qui présentait une valeur de 34.4°. En d'autres termes, ce réseau présente une directivité accrue, ce qui pourrait être avantageux dans notre application nécessitant une concentration plus intense du signal.



(b)

Figure III.29 (a) : Coefficient de réflexion S_{11} en fonction de la fréquence pour le réseau d'antennes (1*2) en graphène. **(b)** Diagramme de rayonnement au plan E

Nous présentons dans la **Figure III.30** le rayonnement du réseau d'antennes patch (1*2) en graphène. D'après la figure ci-dessous, nous pouvons constater un gain de 6.01dBi autour la fréquence de 24 GHz.

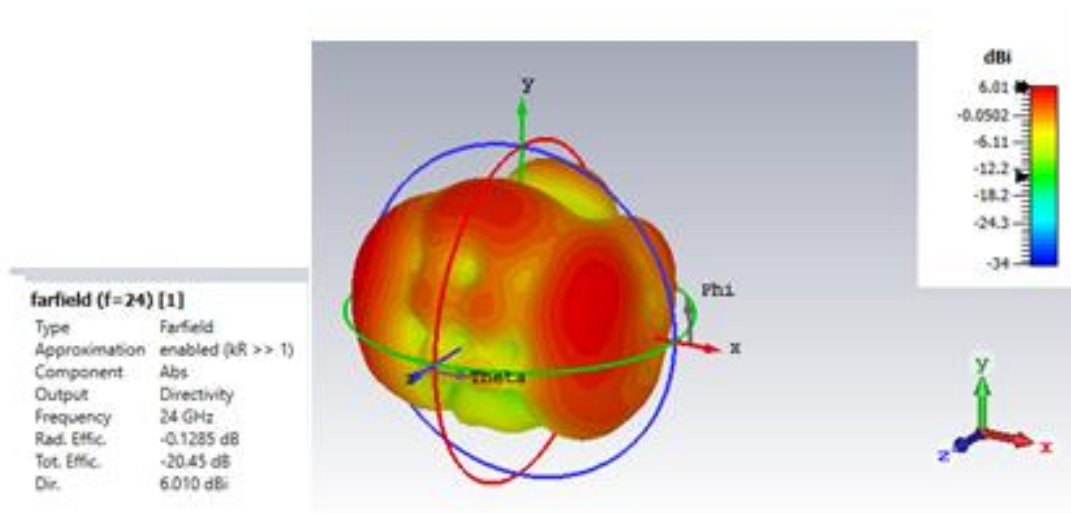


Figure III.30 : Rayonnement en 3D du réseau d'antennes patch (1*2) à base de graphène

Par la suite, on représente sur la **Figure III.31** le coefficient de réflexion S_{11} en fonction de la fréquence du réseau d'antennes constitué de **quatre éléments (2*2)** à base de graphène dont les caractéristiques sont les suivantes : un potentiel chimique $\mu_c=0.1$ eV, une température ambiante $T=300$ K, un temps de relaxation $\tau=0.1$ ps et une épaisseur de 1nm.

L'antenne conçue présente une résonance à la fréquence 23.71 GHz. Le niveau du paramètre S_{11} à cette fréquence est de -14.71 dB.

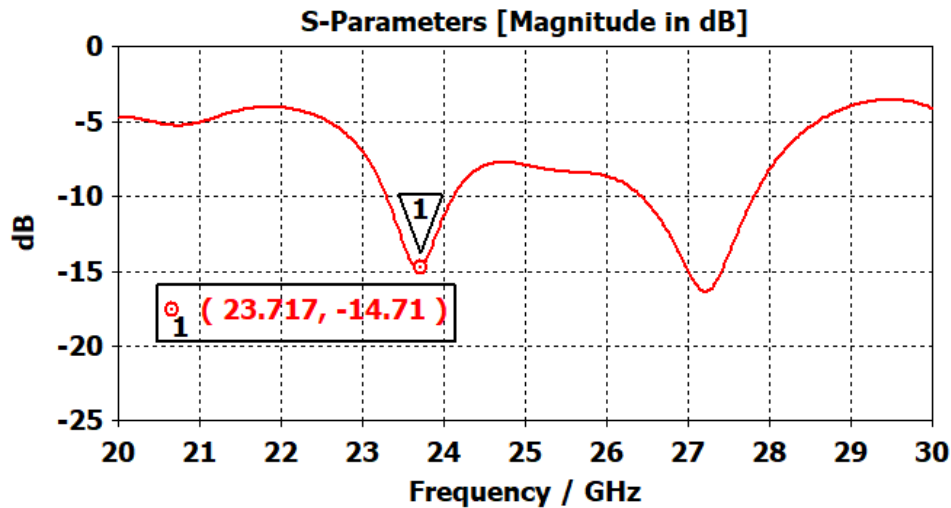


Figure III.31 : Coefficient de réflexion S_{11} en fonction de la fréquence du réseau d'antennes (2*2) à base de graphène.

Afin d'optimiser l'adaptation de l'antenne à notre fréquence de travail, nous avons réalisé une analyse paramétrique en ce qui concerne la valeur du temps de relaxation qui contribue à l'adaptation dynamique de l'antenne aux variations des signaux électromagnétiques. La **Figure III.32** illustre l'évolution du coefficient de réflexion S_{11} en fonction de la fréquence pour différentes valeurs du potentiel chimique μ_c .

À une valeur de 1ps, nous observons une meilleure adaptation d'impédance. À cette valeur, le coefficient de réflexion atteint un niveau de -35,2 dB à la fréquence de 24 GHz. La bande passante à -10 dB s'étend sur 831.52 GHz, couvrant la plage de 23,6 GHz à 24,43 GHz. Une amélioration de **456 MHz** par rapport au réseau d'antenne conventionnelle est constatée, comme le démontre la **Figure III.33**.

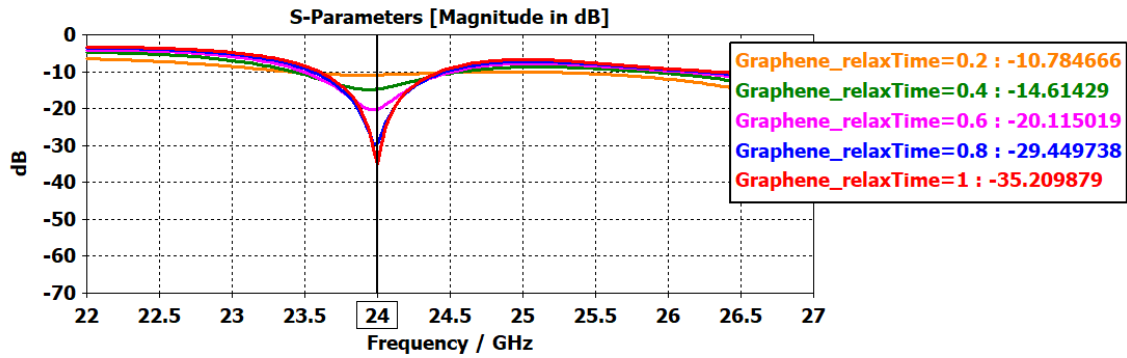


Figure III.32 : coefficient de réflexion S11 en fonction de la fréquence du réseau d'antennes (2*2) optimisé à base de graphène.

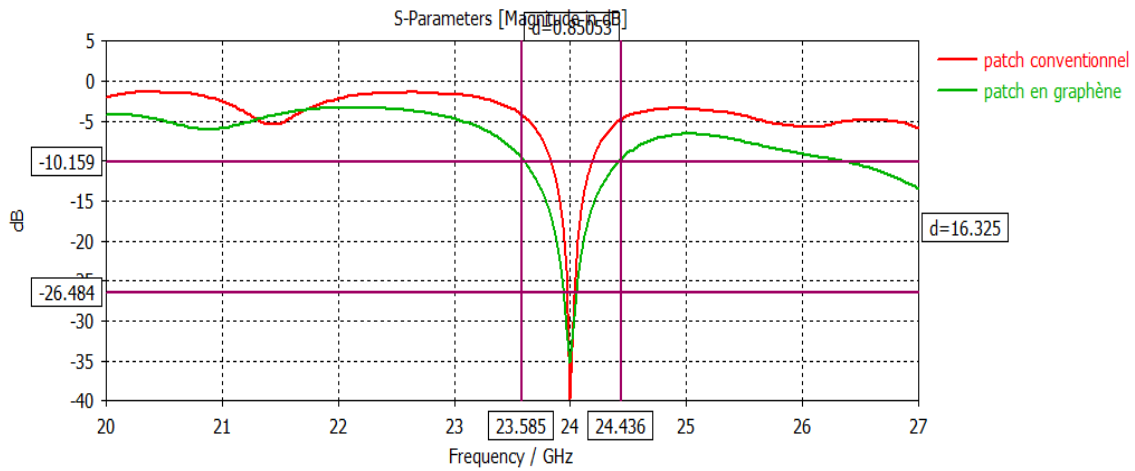


Figure III.33 : Coefficient de réflexion S11 en fonction de la fréquence pour le réseau d'antennes (2*2) en graphène.

La **Figure III.34 a** présente le diagramme de rayonnement au plan E du réseau d'antennes (2*2) optimisé, et simulé sous CST à la fréquence 24 GHz. Son rayonnement en 3 D est représenté par la **Figure III.34.b**.

La largeur du faisceau, mesurée à -3 dB dans le plan E, atteint 30° pour le réseau d'antennes à quatre éléments en graphène, légèrement plus étroite que celle du réseau conventionnel qui était de 35.7°. Cette différence suggère une amélioration de la directivité du réseau en Graphene, ce qui peut être avantageux dans des contextes nécessitant une concentration plus précise du signal. Un gain de 6.77 dBi est obtenu autour la fréquence 24 GHz pour cette configuration. On remarque une diminution du gain par rapport au réseau (2*2) conventionnel.

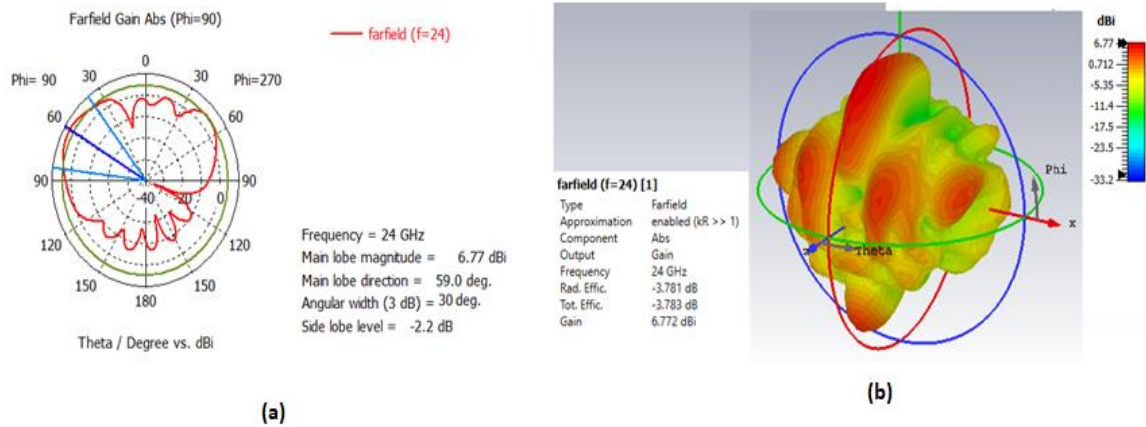


Figure III.34 : Diagramme de rayonnement pour le réseau d'antennes (2*2) à base de graphène **(a)** : au plan E, **(b)** en 3D

Enfin les caractéristiques du réseau d'antennes à huit éléments en termes de coefficient de réflexion, et de rayonnement à la fréquence 24 GHz sont représentés par la **Figure III.35.a, III.35 b,et III.35 c** respectivement.

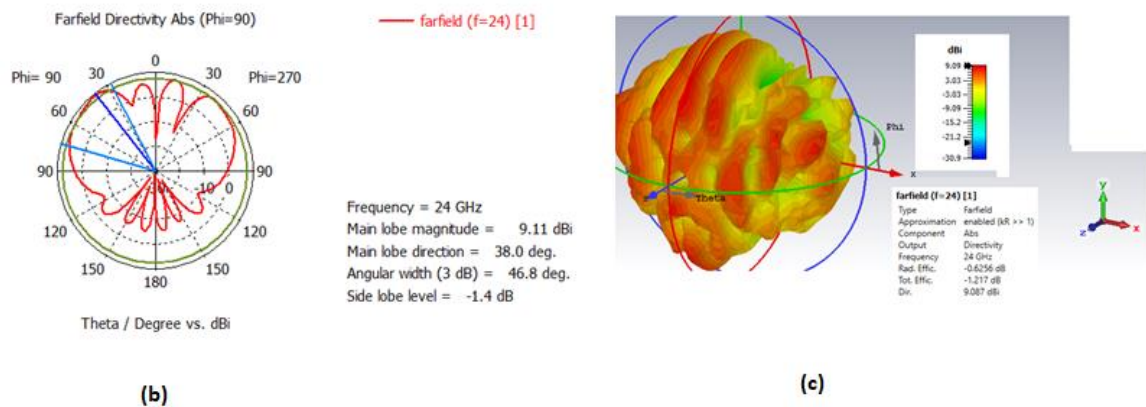
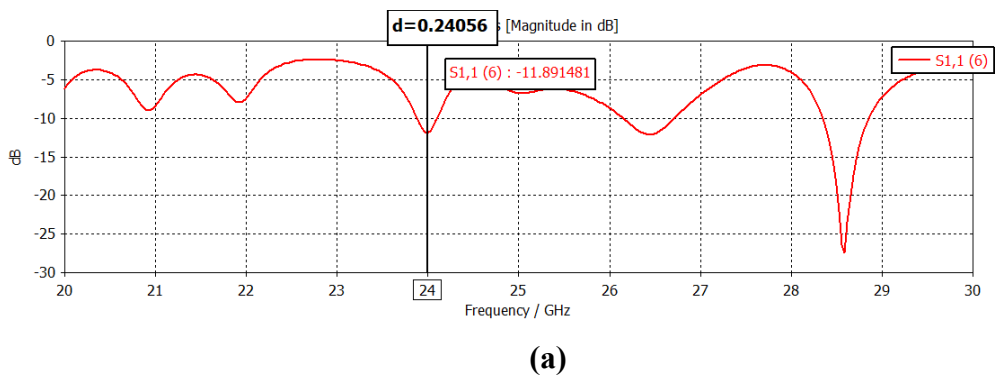


Figure III.35 : Caractéristiques du réseau d'antennes (2*4) à base de graphène (a) : Coefficient de réflexion, (b) rayonnement au plan E, (c) Rayonnement en 3D.

Une analyse comparative des performances des structures des réseaux d'antenne en cuivre et en graphène en termes de fréquence de résonance, VSWR, bande passante, directivité, gain et angle d'ouverture est présentée dans le tableau ci -dessous.

Bien que les patchs en graphène présentent un gain inférieur à ceux en cuivre, ils demeurent pertinents pour diverses applications d'antenne.

	Patch	Fréquence (GHz)	S ₁₁ (dB)	BP (MHz)	VSWR (dB)	Directivité (dB)	Gain (dB)	Angle d'ouverture (deg)
1*1	Cuivre	24	45.6	1626	1.01	7.71	7.58	53.2
	Graphene	23.88	-42.7	2000	1.01	7.53	6.64	47.7
1*2	Cuivre	24	-50.3	700	1.06	7.93	7.72	34.4
	Graphene	24	-41.9	1596	1.01	7.1	6.01	30.2
2*2	Cuivre	24	-39.7	350	1.02	12.1	11.7	35.2
	Graphene	24	-35.2	814.9	1.03	10.6	6.77	30
2*4	Cuivre	24	-21.4	228.84	1.2	15.2	14.6	31.8
	Graphene	24	-11.9	240.56	1.05	11.02	9.09	46.8

Tableau III-4 : Comparaison des performances des réseaux d'antennes conventionnels et à base de graphène

Ces résultats indiquent que le graphène présente des performances améliorées par rapport au cuivre, telles qu'une bande passante plus large et un angle d'ouverture plus étroit essentiellement pour les réseaux à deux et à quatre éléments.

Une bande passante plus large signifie que l'antenne peut fonctionner efficacement sur une gamme plus large de fréquences. Quant à l'angle d'ouverture plus étroit, cela indique que le faisceau émis par l'antenne est plus concentré dans une direction spécifique. Par conséquent, le choix entre le graphène et le cuivre dépend des exigences spécifiques de chaque application, ainsi que des compromis à évaluer entre les performances, le coût et la facilité de fabrication.

III.4 Conclusion

Dans ce chapitre, des structures en réseaux d'antennes microrubans ont été présentées. Nous avons commencé par la conception d'une antenne initiale en utilisant le logiciel CST Microwave Studio (MWS). Par la suite, nous avons élaboré un réseau d'antennes basé sur la configuration initiale, en variant le nombre d'éléments, passant par des configurations à deux, quatre et huit éléments. Cette mise en réseau a entraîné une amélioration significative des performances du réseau notamment en gain. Par la suite, nous avons élargi notre investigation en comparant ces configurations à des structures d'antennes similaires conçues en graphène. Cette comparaison nous a offert un aperçu des avantages potentiels offerts par ce matériau émergent dans le domaine des antennes, notamment en termes de miniaturisation et de bande passante.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] **Manoj Sharma, Anil Kumar Gautam, Niraj Agrawal, Neeta Singh**
« Design of MIMO planar antenna at 24 GHz band for radar, communication and sensors applications », International Journal of Electronics and Communications, Volume 136, **July 2021, 153747.**
- [2] Michael Grelier, « Miniaturisation des antennes large bande à l'aide de matériaux artificiels, » Thèse de doctorat en Electronique et communication, Télécom Paris Tech, 2011.
- [3] Constantine A. Balanis, « Antenna theory analysis and design ,fourth edition ».
- [4] G. Casu, C. Moraru, and A. Kovacs, “Design and implementation of microstrip patch antenna array,” 2014 10th International Conference on Communiccations (COMM), Bucharest, pp. 1-4, Doi: 10.1109/ ICCComm.2014.6866738, 2014.
- [5] N. Ghassemi and K. Wu, “High-efficient patch antenna array for E-band gigabyte point-to-point wireless services,” IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol. 11, pp. 1261-1264, Doi: 10.1109/LAWP.2012.2224087, 2012.
- [6] Y. J. Cheng, Y. X. Guo, and Z. Q. Liu, “W-Band large-scale high-gain planar integrated antenna array,” IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 62, pp. 3370-3373, Doi: 10.1109/ TAP.2014.2310483, 2014.
- [7] S. N. H. Sa'don, M. R. Kamarudin, F. Ahmad, M. Jusoh, and H. A. Majid, “Graphene array antenna for 5G applications,” Appl. Phys. Mater. Sci. Process, vol. 123, pp. 1-4, Doi: 10.1007/s00339- 016-0749-5, 2017.
- [8] M. Donelli and G. Oliveri, “Design of tunable graphene-based antenna arrays for microwave applications,” Proc. IEEE APSURSI, Memphis, TN, USA, pp. 6-12. Doi: 10.1109/aps.2014.6904782, 2014.
- [9] A. K. Geim and K. S. Novoselov, “The rise of graphene,” Nature Mater., vol. 6, pp. 183-191, Doi: 10.1038/nmat1849, 2007.
- [10] K. S. Novoselov, A. K. Geim, S. V. Morozov, D. Jiang, Y. Zhang, S. V. Dubonos, I. V. Grigorieva, and A. A. Firsov, “Electric field effect in atomaically thin carbon films,” Science, vol. 306, pp. 666-669, Doi: 10.1126/science.1102896, 2004.
- [11] R. Song, Q. Wang, B. Mao, Z. Wang, D. Tang, B. Zhang, J. Zhang, C. Liu, D. He, Z. Wu, and S. Mu, “Flexible radio films with high conductivity for radio frequency antennas,” Carbon, vol. 130, pp. 164-169, Doi: 10.1016/j.carbon.2018.01.019, 2018.
- [12] [91] Heinz Faether. Surface plasmons. Smooth and Rough Sur [aces and on Gratings (Springer Tracts in Modern Physics, 111:642–646, 1988.
- [13] G Jemima Nissiyah and M Ganesh Madhan. Graphene based microstrip antenna for triple and quad band operation at terahertz frequencies. Optik, 231:166360, 2021.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion Générale

Les radars sont des outils cruciaux dans divers domaines tels que la défense, la surveillance météorologique, ainsi que dans les applications industrielles et de sécurité. Ils permettent la détection, la localisation et le suivi d'objets à distance en mesurant les propriétés des ondes radioélectriques réfléchies ou diffusées par ces objets. Les antennes en tant qu'éléments essentiels jouent un rôle crucial dans ces systèmes assurant la transmission et la réception précise des signaux électromagnétiques.

Parmi les diverses catégories d'antennes largement utilisées actuellement, les antennes microrubans, également désignées sous le nom d'antennes imprimées. Leur conception compacte et légère les rend idéales pour les systèmes embarqués sur des plateformes mobiles telles que les véhicules, et les avions. Néanmoins, ces antennes sont confrontées à des limitations, telles qu'une bande passante étroite et un gain modéré. Pour surmonter ces défis, l'agrégation en réseau de plusieurs antennes imprimées s'avère bénéfique. Cette approche permet de pallier les limites propres à chaque antenne individuelle tout en augmentant le gain et l'efficacité de rayonnement globaux.

Dans le cadre de ce travail, nous nous sommes intéressés à la conception des structures des réseaux d'antennes permettant d'avoir un gain élevé et donc une meilleure focalisation de l'énergie dans la direction spécifique, ce qui est essentiel dans de nombreuses applications radar et de communication. Ces structures ont été conçues et simulées sous le logiciel électromagnétique CST.

Dans le premier chapitre, nous avons exposé un état de l'art des antennes microrubans, incluant leurs diverses configurations, structures et principes de fonctionnement. Plusieurs méthodes d'alimentation peuvent être employées pour ces antennes, chacune avec ses propres avantages et inconvénients. En raison de leurs propriétés de rayonnement uniques, les antennes microrubans sont largement utilisées dans divers domaines des télécommunications, démontrant ainsi leur importance croissante dans ces domaines.

Dans le deuxième chapitre, nous avons exploré l'environnement des systèmes radar. Nous avons commencé par retracer leur évolution historique, examiner leur architecture et leur mode de fonctionnement. Ensuite, nous avons présenté les types d'antennes radar les plus utilisées, en mettant en lumière leurs caractéristiques distinctives et leurs applications principales. Enfin, nous avons illustré l'importance des antennes radars dans divers

domaines, tels que la surveillance aérienne, la détection d'objets, la météorologie, la sécurité et la défense, à travers des exemples concrets d'applications radar.

Dans le dernier chapitre, nous avons exploré la conception des réseaux d'antennes microrubans conventionnels et à base de graphène. Cette étape nous a permis de nous familiariser avec le logiciel CST MWS. Nous avons débuté par des simulations d'une antenne à un seul élément, puis avons progressivement étendu nos études à des antennes comprenant deux, quatre et huit éléments afin d'améliorer le gain. Les performances et les caractéristiques de ces réseaux ont été illustrées et comparées. Les résultats de la simulation révèlent qu'une augmentation du nombre d'éléments rayonnants a entraîné une amélioration en gain et en directivité. Cela nous a permis de répondre aux exigences des applications radars fonctionnant à la fréquence 24 GHz. Une étude comparative avec des réseaux d'antennes conçus à base de graphène a été ensuite effectuée. Les résultats soulignent que l'utilisation du graphène dans la conception des structures présente des avantages significatifs, notamment une miniaturisation, une bande passante plus large et un angle d'ouverture plus étroit. Une bande passante élargie est cruciale dans les applications radar car elle permet la détection d'objets sur une gamme étendue de fréquences, ce qui peut inclure la détection d'objets de différentes tailles et matériaux. Quant à l'étroitesse de l'angle d'ouverture signifie que le faisceau radar est plus focalisé dans la direction spécifique, ce qui permet une détection plus précise des cibles et une réduction des interférences provenant de sources non désirées.

Ainsi, ces avantages du graphène dans les antennes radar offrent des perspectives prometteuses pour le développement de radars plus performants, avec une meilleure résolution et une capacité de détection améliorée, essentielles dans des applications telles que la surveillance aérienne, la détection d'objets en mouvement rapide et la sécurité.