

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE
L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA**

**FACULTE : TECHNOLOGIE
DOMAINE : SCIENCES ET TECHNOLOGIES
DEPARTEMENT : ELECTRONIQUE
FILIERE : TELECOMMUNICATIONS
OPTION : SYSTEMES DES TELECOMMUNICATIONS**



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

Par : HADJI Abdallah & HABACI Imadeddine

Intitulé

**Etude et conception d'une antenne MIMO avec des
structures EBG pour les applications mobiles
modernes**

Soutenu devant le jury composé de :

Dr. KHALFA Ali	Université de Msila	Président
Dr. KENANE El-Hadi	Université de Msila	Rapporteur
Dr. SAHED Mohamed	Université de Msila	Co-rapporteur
Dr. GARAH Messaoud	Université de Msila	Examineur

Année universitaire : 2022 /2023

Remerciements

Nous remercions الله العلي الكريم le Tout-puissant de nous avoir donné le courage, la Volonté et la patience de mener à terminer ce présent mémoire.

Nous voudrions tout d'abord adresser toute nos reconnaissances à notre encadreur de ce mémoire, **Dr. KENANE El-hadi** pour son accueil, le temps passé ensemble et le partage de ses connaissances. Grâce aussi à sa confiance, nous avons pu mener à bien notre mission, surtout ses conseils avisés qui ont nourri notre réflexion. C'était une aide très précieuse dans le moment le plus délicat.

Dr. SAHED Mohamed, que nous honoré d'accepter d'aide le travail effectué.

Monsieur **Dr. KHALFA Ali**, Professeur à l'université de M'sila, qui nous a honoré par sa présence en qualité de président de jury.

Monsieur **Dr. GARAH Messaoud**, Professeur à l'université de M'sila, pour l'honneur qu'il m'a accordé en acceptant de participer à ce jury.

Nous remercions également toute l'équipe pédagogique de l'université de M'sila, pour avoir assuré la partie théorique de celle-ci.



Abdallah & Imad

A decorative border with intricate floral and scrollwork patterns in a reddish-brown color, framing the central text.

Dédicace

A Mes Très chers Parents

Je dédie ce mémoire à mes parents Kamel et Ardjouna, pour l'amour qu'ils m'ont toujours donné, leurs encouragements et toute l'aide qu'ils m'ont apportée durant mes études. Aucun mot, aucune dédicace ne pourrait exprimer mon respect, ma considération, et mon amour pour les sacrifices qu'ils ont consentis pour mon instruction et mon bien-être. Trouvez ici, chère mère et cher père, dans ce modeste travail, le fruit de tant de dévouements et de sacrifices ainsi que l'expression de ma gratitude et de mon profond amour. Puisse Dieu leur accorder santé, bonheur, prospérité et longue vie afin que je puisse un jour combler de joie leurs vieux jours.

A Mes chers frère salim bado hamza

A ma chère tante Rahima

Mes petites belles-sœurs .

A Mes deux grandes pères et mères et mes cousins et cousines Et tout ma famille En témoignage de l'attachement, de l'amour et de l'affection que je porte pour vous.

Mon encadreur : Monsieur Kenane qui a travaillé pour nous guider et nous soutenir avec des informations et des expériences et n'a pas été avare de nous, car il était l'enseignant et le père en même temps. Je vous dédie ce travail avec tous mes vœux de bonheur, de santé et de réussite.

A tous mes amis Abir source d'amour, Thameur Abdallah Ahmed nous n'étions Jamais considérés comme étant des amis, ont formé une personne très spéciale avec une très forte personnalité et solidité. Je vous remercie infiniment pour votre aide ainsi que vos encouragements et votre fidélité.

Imad



Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

*A mes très chers parents qui ont toujours été à mes côtés
pour me soutenir et m'aider à faire des choix importants,
que Allah les bénissent et que leurs vies soit longue.*

À mon professeur kenane el hadi

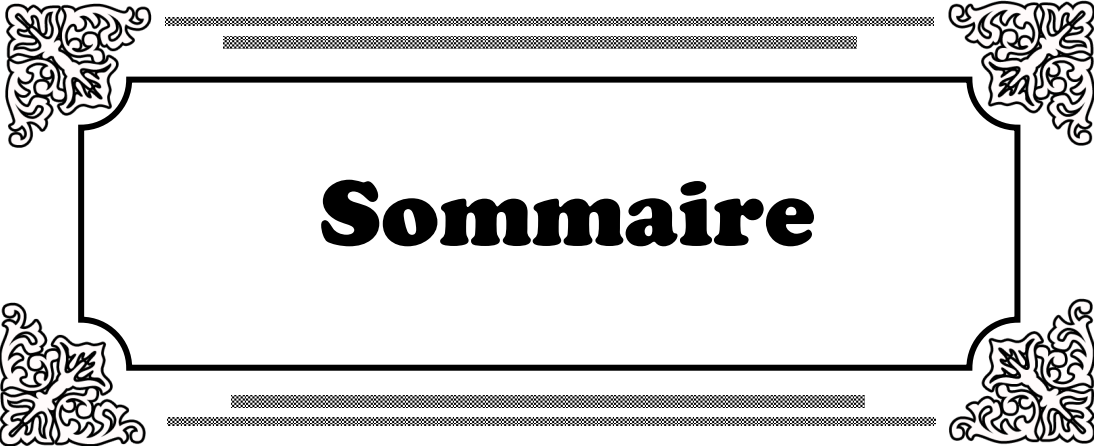
*A mes chers frères : Imed, Hassan, Aziz, Messaoud,
Zinedine.*

À ma grand-mère que j'aime beaucoup.

Tous mes oncles & tantes et leurs enfants.

A mes amis.

Abdallah



Sommaire

Sommaire

<i>Remerciements</i>	<i>II</i>
<i>Dédicace</i>	<i>III</i>
<i>Introduction générale</i>	<i>2</i>

Chapitre I : Notions générales sur les antennes MIMO

<i>I.1 Introduction</i>	<i>5</i>
<i>I.2 technologie MIMO</i>	<i>5</i>
<i>I.3 Antennes MIMO</i>	<i>6</i>
<i>I.4 importance des antennes MIMO dans la télécommunication</i>	<i>7</i>
<i>I.5 paramètres d'une antennes MIMO</i>	<i>7</i>
<i>I.5.1 coefficient de corrélation d'enveloppe (ECC)</i>	<i>7</i>
<i>I.5.2 gain de diversité (DG)</i>	<i>8</i>
<i>I.5.3 la réflexion active totale le coefficient (TARC)</i>	<i>8</i>
<i>I.5.4 cross polar discrimination (XPD)</i>	<i>9</i>
<i>I.5.5 couplage mutuel</i>	<i>10</i>
<i>I.5.6 efficacité totale</i>	<i>10</i>
<i>I.5.7 la perte de capacité du canal (CCL)</i>	<i>10</i>
<i>I.5.8 gain effectif moyen (MEG)</i>	<i>10</i>
<i>I.6 Avantages et inconvénients de la technologie MIMO</i>	<i>11</i>
<i>I.7 conclusion</i>	<i>11</i>

Chapitre II : Etat de l'art sur les antennes MIMO

<i>II.1 Introduction</i>	<i>13</i>
<i>II.2 Aperçu sur les antennes MIMO</i>	<i>13</i>
<i>II.2.1 systèmes MIMO</i>	<i>13</i>
<i>II.2.2 Principes de conception des antennes MIMO</i>	<i>14</i>
<i>II.2.3 Caractéristiques principales des antennes MIMO</i>	<i>15</i>
<i>II.2.4 Domaines d'application des systèmes MIMO</i>	<i>16</i>
<i>II.3. Une vue historique</i>	<i>16</i>
<i>II.4 Etat de l'art sur les antennes MIMO</i>	<i>17</i>
<i>II.4.1 Antennes MIMO pour les appareils 5G</i>	<i>17</i>
<i>II.4.2 Antenne MIMO pour basée sur méta-surface pour les applications des ondes millimétrique</i>	<i>19</i>

<i>II.4.3 Antenne MIMO à large bande avec forte isolation.</i>	21
<i>II.4.4 Antenne MIMO à 10 éléments avec structure DGS</i>	23
<i>II.4.5 Antenne MIMO à double bande avec paires d'antennes compactes auto-découplées.</i>	25
<i>II.5 Conclusion</i>	26

Chapitre III : Etude paramétrique d'une antenne MIMO

<i>III.1 Introduction</i>	28
<i>III.2 Conception d'une antenne patch rectangulaire.</i>	28
<i>III.3 Etude paramétriques d'une antenne patch rectangulaire.</i>	30
<i>III.3.1 Optimisation de la géométrie du plan de masse</i>	30
<i>III.3.2 Effet de la longueur du patch (LP)</i>	32
<i>III.3.3 Effet de largeurs du patch rectangulaire (WP)</i>	33
<i>III.3.4 Effet de la position de la ligne d'alimentation.</i>	34
<i>III.3.5 Effet de la variation du matériau du substrat</i>	35
<i>III.3.6 Insertion des fentes en forme rectangulaire</i>	37
<i>III.3.6.1 Effet de la variation de la longueur du slot patch(L1_1)</i>	38
<i>III.3.6.2 Effet de la variation de la longueur du slot de patch(L1_2).</i>	39
<i>III.4 Conclusion</i>	41

Chapitre IV : Optimisation d'une antenne MIMO

<i>IV.1 Introduction</i>	43
<i>IV.2 Choix de l'outil de simulation</i>	43
<i>IV.3 Outil de simulation CST</i>	43
<i>IV.4 Calcul de l'impédance de la ligne d'alimentation.</i>	44
<i>IV.5 Conception d'une antenne UWB</i>	45
<i>IV.5.1 La forme de l'antenne proposée</i>	46
<i>IV.5.2 La forme de l'antenne MIMO proposée sans structure EBG</i>	48
<i>IV.5.3 La forme de l'antenne MIMO proposée avec des structures EBG</i>	52
<i>IV.6 Conclusion</i>	55
<i>Conclusion générale</i>	57
<i>Références bibliographiques</i>	60



**Introduction
générale**

Introduction générale

Les différentes applications cellulaires, y compris les réseaux sociaux, le streaming vidéo à haute définition, les services bancaires mobiles et la navigation Web complète, offrent des opportunités intéressantes aux utilisateurs et aux opérateurs de réseau mobile. Ces applications gourmandes en données ont créé de nouveaux défis concernant la bande passante pour les opérateurs mobiles et ont également conduit à une forte demande de débit de données dans les communications sans fil [1].

Actuellement, les antennes MIMO jouent un rôle important dans tous les domaines de télécommunications sans fil modernes tels que le Wi-Fi, les réseaux cellulaires et d'autres réseaux sans fil. Avec le développement technologique rapide dans le domaine des réseaux mobiles, des exigences de plus en plus strictes sont imposées aux Antennes MIMO. Parmi ces exigences, on peut citer la miniaturisation des antennes, le faible coût et des performances liés aux taux de transferts des données qui demande l'utilisation des antennes multi-bandes, larges bandes ou encore ultra larges bandes, ce qui permet de résoudre le problème de capacité dans différents systèmes de communications sans fil [2-5].

L'objectif principal des antennes MIMO est d'améliorer les performances du réseau en exploitant la diversité spatiale et le multiplexage spatial. La diversité spatiale fait référence à la capacité des antennes MIMO à recevoir et à transmettre plusieurs signaux simultanément grâce à des antennes multiples. En utilisant plusieurs antennes d'émission et de réception, les antennes MIMO peuvent réduire les effets de fading (affaiblissement du signal) causés par des obstacles ou des interférences, ce qui améliore la qualité du signal et la fiabilité de la communication.

Les antennes MIMO peuvent être mises en œuvre avec différentes configurations, telles que MIMO 2x2 (deux antennes d'émission et de réception) [6], MIMO 4x4 (quatre antennes d'émission et de réception) [7] ou même des configurations plus complexes [8]. Plus le nombre d'antennes est élevé, plus les avantages en termes de diversité spatiale et de multiplexage spatial sont importants. En résumé, les antennes MIMO exploitent la diversité spatiale et le multiplexage spatial pour améliorer les performances du réseau, augmenter la capacité de transmission et améliorer la qualité du signal.

Notre objectif principal durant la conception d'une antenne MIMO est mentionné dans les trois points suivants :

- Apprendre la théorie fondamentale des antennes MIMO.

- Une étude paramétrique approfondie d'une antenne patch UWB ce qui permet de voir l'effet de différents paramètres physique sur les caractéristiques et les performances de cette antenne.

- Conception d'une antenne MIMO en utilisant le simulateur micro-onde CST studio.

Ce mémoire est organisé comme suit

Dans le premier chapitre, on va voir une généralité sur les antennes MIMO, ses paramètres fondamentaux ainsi que ses performances.

Le deuxième chapitre est consacré à un état de l'art sur les antennes MIMO d'une manière générale.

Dans le troisième chapitre, une étude paramétrique d'une antenne patch rectangulaire, en utilisant le simulateur CST studio, sera faite.

Le quatrième chapitre est consacré pour l'optimisation d'une antenne MIMO UWB à deux éléments pour les applications mobiles à l'aide du simulateur CST.

À la fin, nous terminons notre mémoire par une conclusion générale et quelques perspectives pour les travaux au futur.

Chapitre I



*Notions générales
sur les antennes
MIMO*

I.1 Introduction

Actuellement, les antennes MIMO jouent aujourd'hui un rôle important dans tous les systèmes de télécommunications. Les réseaux sans fil se développent de plus en plus en termes du nombre de connexions et du nombre d'applications couvertes aussi bien qu'en qualité de liaisons. La transmission par ondes électromagnétiques est considérée comme un support principal de cette génération de télécommunications au lieu des câbles et des liaisons filaires. L'efficacité de ces réseaux est totalement dépendante des performances des éléments qui les composent, en particulier les antennes. Pour l'établissement d'une liaison entre deux ou plusieurs points, l'antenne est un élément important, là où les supports de communication habituels (câbles, fibres optiques...) sont difficiles, voire impossibles à mettre en œuvre. Elle assure ainsi les fonctions d'émission et de réception des ondes électromagnétiques qui véhiculent le signal dans l'espace libre. La technologie MIMO [9] présente une solution prometteuse pour augmenter l'efficacité spectrale et en transmettant les données à travers un réseau multi-antennes en émission et en réception. Dans ce chapitre on va présenter la technologie MIMO. Ensuite, on va faire une description générale sur les Paramètres des antennes MIMO et leurs avantages et inconvénients.

I.2 Technologie MIMO

Le terme MIMO acronyme de "Multiple Input Multiple Output", est une technologie sans fil qui utilise plusieurs émetteurs et récepteurs pour augmenter le transfert de données et améliorer la qualité de transmission [10]. Il permet de minimiser les erreurs et est capable de résoudre la probabilité d'évanouissement et d'atténuation du signal., c'est-à-dire d'améliorer la vitesse de transmission, la capacité du canal et le débit binaire [9]. Un schéma d'un système MIMO est illustrée dans la Figure I.1.

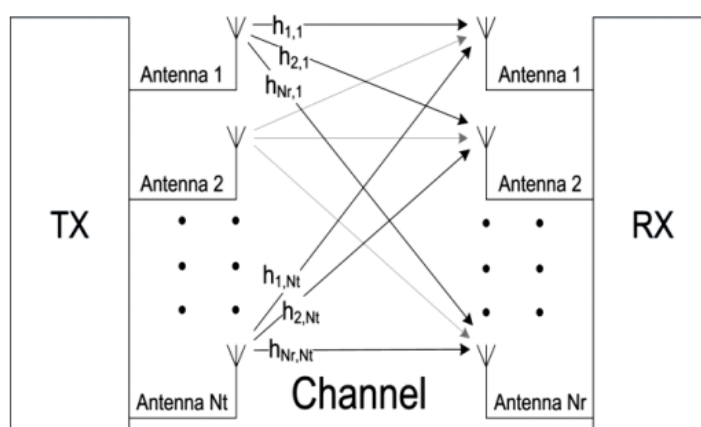


Figure I.1 : Schéma d'un système MIMO [10]

La technologie MIMO tire profit de la dimension spatiale du canal et d'exploiter les trajets multiples plutôt que de les supprimer [10]. L'idée de ce système est simple : dans une bande de fréquence donnée, on

transmet l'information en utilisant simultanément plusieurs antennes à l'émission et à la réception. En première approximation, le débit transmis dans cette bande de fréquence se trouve multiplié par le nombre d'antennes émettrices. En effet, tous les signaux transmis se mélangent, et il faut être capable de séparer les éléments du mélange. On doit alors faire appel, du côté du récepteur, à des méthodes sophistiquées de traitement du signal [10].

Lorsqu'un système MIMO comprend seulement, une seule antenne à l'émission et plusieurs antennes à la réception, il est nommé SIMO (Single Input Multiple Output). De même, lorsqu'il comprend plusieurs antennes à la réception et une seule antenne à l'émission, il est nommé MISO (Multiple Input Single Output).

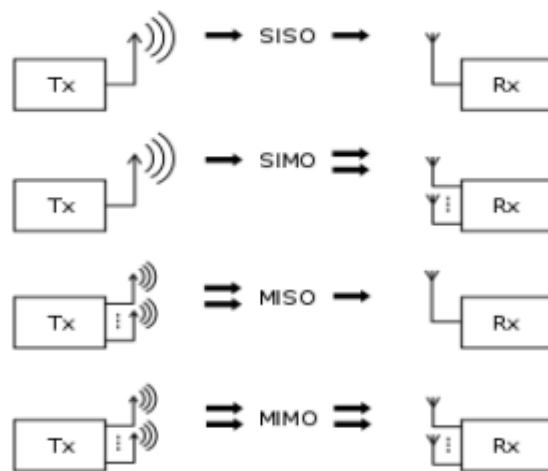


Figure I.2 : Différentes configurations d'antennes. [11]

I.3 Antennes MIMO

On prend le cas d'une antenne imprimée. C'est une structure résonnante en surface constituée d'un rectangle conducteur monté sur un plan de masse séparé d'un diélectrique (substrat avec une permittivité relative ϵ_r). Le diagramme de rayonnement de ce type d'antennes est presque hémisphérique au-dessus de la surface du patch. L'antenne imprimée ou planaire (*printed antenna*) est une antenne dont l'élément rayonnant est une surface conductrice généralement carrée, séparée d'un plan réflecteur conducteur par une lame diélectrique. Sa réalisation ressemble à un circuit imprimé double face, substrat, et est donc favorable à une production industrielle.

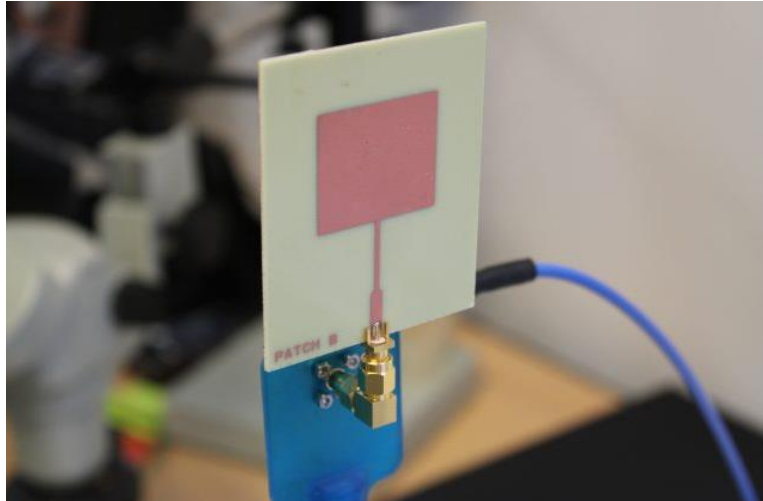


Figure I.3 : Une antenne patch rectangulaire. [12]

I.4 Importance des antennes MIMO dans la télécommunication

Les besoins des hauts débits pour les communications mobiles de dernières générations ont augmenté, la meilleure solution pour atteindre ce but est d'augmenter le nombre d'antennes pour l'émission et la réception. Donc on applique technique MIMO. L'importance de ces antennes réside dans assurer la plus vaste couverture géographique possible ; et maintenir une densité suffisante .et aussi Elles permettent de véhiculer un grand nombre de communications simultanées, et permettent l'accès à de larges bandes de fréquence pour de très hauts débits de connexion. Et aussi l'intégration de plusieurs antennes sur le plan de masse d'un téléphone mobile est un grand défi pour les chercheurs, à cause du volume limité des terminaux mobiles, une forte isolation entre les antennes doit être réalisée afin de maximiser le gain de diversité et aussi augmenter la capacité de transmission de l'ensemble du système total [13].

I.5 Paramètres d'une Antennes MIMO [14]

I.5.1 Coefficient de corrélation d'enveloppe (ECC)

Le coefficient de corrélation d'enveloppe (ECC) est considéré comme un indicateur clé de la performance. Ce coefficient est un paramètre de diversité qui indique la corrélation entre les éléments d'antenne MIMO adjacents. On peut le calculer par deux méthodes différentes. La première méthode à partir des diagrammes de rayonnement et la deuxième à partir des paramètres S. Toutefois, la valeur ECC évaluée à l'aide du diagramme de rayonnement en champ lointain est fortement préférée car l'ECC indique comment les éléments rayonnants multiples dans les systèmes MIMO sont indépendants dans leur diagramme de rayonnement. En outre, on constate que la plupart des antennes planaires souffrent de pertes ; par conséquent, la méthode de détermination de l'ECC à l'aide des paramètres S devrait être évitée. L'expression

mathématique de l'ECC utilisant les données du diagramme de rayonnement de la conception MIMO est donnée par l'équation (I.1) [14].

$$ECC_{qp} = \frac{\left| \int_0^{2\pi} \int_0^\pi (E_{\theta p}^* E_{\theta q} P_\theta X P R + E_{\varphi p}^* E_{\varphi q} P_\varphi) d\Omega \right|^2}{\alpha \times \beta} \quad (\text{I.1})$$

Où :

$$\alpha = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi (E_{\theta q}^* E_{\theta q} P_\theta X P R + E_{\varphi q}^* E_{\varphi q} P_\varphi) d\Omega \quad (\text{I.2})$$

$$\beta = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi (E_{\theta p}^* E_{\theta p} P_\theta X P R + E_{\varphi p}^* E_{\varphi p} P_\varphi) d\Omega \quad (\text{I.3})$$

Où XPR est le niveau de polarisation croisée défini comme le rapport de la puissance moyenne le long des directions phi et theta. Dans un environnement pratique, la limite acceptable de l'ECC doit être <0,5.

Une faible valeur de ECC entre deux ports signifie une diaphonie faible lors d'une opération simultanée. Cela signifie également une meilleure performance en termes de diversité dans le cas d'une utilisation en technologie MIMO.

I.5.2 Gain de diversité (DG)

Le gain de diversité indique la qualité et la fiabilité d'une antenne MIMO dans les systèmes sans fil. Par conséquent, le gain de diversité de l'antenne MIMO doit être élevé (≈ 10 dB) dans la bande de fréquences acceptable. Le gain de diversité est calculé à l'aide de la valeur ECC et peut être donné par l'équation :

$$G = 10 \times \sqrt{1 - |ECC_{qp}|^2} \quad (\text{I.4})$$

Ce gain de diversité n'est vraiment significatif que si toutes les antennes du système ont une efficacité totale égale à 100% ce qui est loin d'être évident en pratique. Ainsi le gain en diversité réaliste d'un système (DSG : Gain de Diversité du système) doit également prendre en compte l'efficacité totale de chaque antenne. En supposant que toutes les antennes du système sont identiques, le DSG sera alors :

$$DSG = \eta_{tot} * DG \quad (\text{I.5})$$

I.5.3 Coefficient de réflexion active totale (TARC)

Le TARC est principalement utilisé pour les systèmes d'antennes à entrées multiples et à sorties multiples (MIMO) et les antennes réseau. Le TARC est la racine carrée de la somme de toutes les puissances sortantes aux ports, divisée par la somme de toutes les puissances incidentes aux ports d'une antenne à N ports. Il est le paramètre qui indique le couplage entre les ports. Son minimum la valeur est 0, ce qui signifie

que toute la puissance incidente est rayonnée. Tandis que la valeur maximale est 1, ce qui Cela signifie que toute la force incidente est réfléchiée. Le TARC affecte grandement la bande passante opérationnelle de Système d'antenne MIMO. Le TARC pour un réseau d'antennes **MIMO** est donné en comparaison avec une seule antenne. Son expression est donnée par

$$\Gamma_a^{t \text{ dB}} = \frac{\sqrt{\left(|S_{11} + S_{12}e^{j\theta}|^2 + |S_{21} + S_{22}e^{j\theta}|^2 \right)}}{\sqrt{2}} \quad (\text{I.6})$$

où, θ est une phase aléatoire pour la fréquence d'excitation. Elle peut prendre des valeurs dans la gamme 0° à 180° .

I.5.4 Cross Polar Discrimination (XPD)

La discrimination polaire croisée est définie comme un rapport de la composante co-polaire de la polarisation spécifiée par rapport à la composante polaire croisée orthogonale sur le secteur ou l'angle de largeur de faisceau.

Ce coefficient est calculé par la mesure et la comparaison du diagramme de rayonnement co-polaire et cross polaire de l'antenne. Le diagramme de rayonnement co-polaire est mesuré en faisant tourner une antenne émettrice active à l'intérieur d'une chambre anéchoïque et en mesurant les niveaux de puissance à des intervalles définis à l'aide d'une antenne réceptrice de même polarité. Les diagrammes cross polaires sont mesurés de la même manière, mais en utilisant une antenne de réception de polarité orthogonale. Un chiffre minimum est alors obtenu à l'intérieur d'une limite sectorielle ou de largeur de faisceau définie. Il est important que cet angle limite soit divulgué sur la fiche technique de l'antenne.

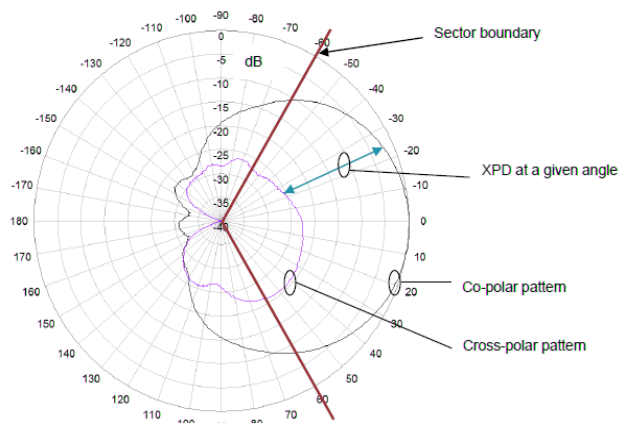


Figure I.4 : Diagramme de rayonnement d'une antenne MIMO avec son XPD extrait

I.5.5 Couplage mutuel

Le couplage mutuel est l'échange d'énergie quand deux antennes sont près l'une de l'autre et que l'une ou les deux sont excitées, une partie de l'énergie se dissipe dans l'autre antenne et plus particulièrement dans son impédance de charge. Il dépend des caractéristiques de rayonnement des antennes, de la distance entre les antennes, de leur orientation et de leur nature [3]. Il joue un rôle très important sur les performances des systèmes d'antennes car il est inclus dans le calcul de l'efficacité totale.

I.5.6 Efficacité totale

L'efficacité totale d'une antenne ou gain moyen (MG) de l'antenne c'est le paramètre le plus important et il est défini comme le rapport entre la puissance rayonnée et la puissance incidente sur son port d'alimentation. Elle prend en compte aussi bien les pertes de réflexion dues à la désadaptation entre le câble coaxial et le port d'alimentation de l'antenne que les pertes ohmiques et diélectriques de l'antenne. Elle peut être calculée à partir de deux équations la première à partir de l'intégration des diagrammes de rayonnement dans tout l'espace équation (I.6) ou bien à partir des paramètres S et de l'efficacité rayonnée η_{ray} de l'équation (I.7).

$$\eta_{tot} = MG = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} G(\theta, \varphi) \sin\theta d\theta d\varphi}{4\pi} \quad (I.7)$$

Où $G(\theta, \varphi)$ et $G\varphi(\theta, \varphi)$ sont les gains des antennes dans les directions θ et φ .

$$\eta_{tot} = \eta_{ray}(1 - |S_{11}|^2) \quad (I.8)$$

I.5.7 Perte de capacité du canal (CCL)

Le CCL indique la contrainte supérieure sur le débit de transmission de données et est étudié pour montrer son effet sur les performances MIMO, aussi il est la mesure de la perte subie à la suite de la corrélation entre les liens MIMO. Le CCL doit être $< 0,4$ bits/s/Hz. L'expression de CCL est donnée par l'équation suivante :

$$C(\text{loss}) = -\log_2 \det(ak) \quad (I.9)$$

Avec ak est la matrice de corrélation.

L'augmentation du nombre d'éléments rayonnants d'un système MIMO tend à augmenter la capacité du canal [8].

I.5.8 Gain effectif moyen (MEG)

Le MEG est un paramètre de diversité important pour les antennes MIMO et défini comme le rapport de la puissance reçue par l'antenne MIMO à la puissance reçue par l'antenne isotrope. Le MEG peut être évalué à l'aide des équations suivantes [14] :

$$\text{MEG}_1 = 0.5\eta_{1,rad} = 0.5[1 - |S_{11}|^2 - |S_{12}|^2] \quad (\text{I.10})$$

$$\text{MEG}_2 = 0.5\eta_{2,rad} = 0.5[1 - |S_{12}|^2 - |S_{22}|^2] \quad (\text{I.11})$$

I.6 Avantages et inconvénients de la technologie MIMO

La technique MIMO présente multiples avantages [13, 14], parmi ces avantages, on peut citer

- Augmenter le débit de données du système et aussi Augmenter la qualité de service et les revenus de manière significative.
- Cette technologie est la solution idéale pour la disponibilité limitée de la bande passante car elle permet très haute efficacité spectrale.
- Cette technologie augmente la capacité et la fiabilité du système sans consommer trop d'énergie.
- La capacité du système augmente de sorte qu'il peut prendre en charge un grand nombre d'utilisateurs.

De même que les autres dispositifs, les antennes MIMO présente quelques limitations et inconvénients telles que

- Les systèmes basés sur des antennes MIMO sont coûteux, plus complexe, consommer beaucoup d'énergie et nécessitent un espace physique très grand par rapport au systèmes basés sur une seule antenne en raison des d'installation et de maintenance des antennes.
- Les systèmes MIMO peuvent être affectés par des interférences provenant d'autres appareils émettant dans la même bande de fréquences. Ce qui peut réduire la qualité du signal et de la communication.
- Les antennes MIMO peuvent améliorer la qualité du signal dans des environnements à forte densité de trafic, mais elles peuvent avoir une portée limitée dans des environnements moins encombrés.
- Lorsque des antennes MIMO avec des éléments parasites fonctionnant comme des structures de découplage supplémentaires sont placées à proximité d'autres circuits électroniques imprimés fonctionnant à des gammes de fréquences comparables, les performances de ces circuits seront dégradées en raison du couplage électromagnétique.

I.7 Conclusion

Dans ce premier chapitre, on a introduit les notions théoriques d'une antenne MIMO avec un aperçu général sur la technologie MIMO et leurs importances dans le domaine de télécommunications. Nous avons montré aussi les paramètres des antennes MIMO tels que ECC, DG, TARC, XPD et CCL. A la fin du chapitre, on a présenté quelques avantages et inconvénients d'une antenne MIMO. Dans le chapitre suivant, on va voir un état de l'art sur les antennes MIMO.



Chapitre II



*Etat de l'art sur les
antennes MIMO*

II.1 Introduction

La technologie des entrées et sorties multiples (MIMO) est un élément clé des systèmes modernes de communication sans fil. Elle permet d'augmenter les débits de données et d'améliorer la qualité du service en exploitant la diversité spatiale des canaux sans fil. L'un des composants clés des systèmes MIMO est le réseau d'antennes, qui est responsable de la transmission et de la réception simultanées de plusieurs flux de données.

Des études analytiques des antennes MIMO ont été largement menées pour comprendre les caractéristiques fondamentales de ces antennes afin d'optimiser leurs performances. Ces études comprennent la modélisation électromagnétique des réseaux d'antennes, l'analyse des diagrammes de rayonnement, l'analyse de la capacité des canaux et les techniques d'optimisation des antennes.

Avec la demande croissante de débits de données plus élevés et l'émergence de nouvelles normes de communication, telles que la 5G et au-delà, les études analytiques des antennes MIMO deviennent encore plus importantes. Ces études peuvent fournir des indications sur la conception de systèmes MIMO plus efficaces et plus fiables, qui seront essentiels pour répondre aux demandes croissantes de communication sans fil à l'avenir.

Dans ce chapitre, on va explorer le développement récent de conceptions de antennes MIMO. En outre, les différentes antennes MIMO présentées avec leurs caractéristiques correspondantes telles que le coefficient de réflexion et le diagramme de rayonnement.

II.2 Aperçu sur les antennes MIMO

II.2.1 Systèmes MIMO (Multiple Input Multiple Output)

La technologie multi input multi output est d'origine de la technologie des communications sans fils divers et la technologie des antennes intelligentes. C'est une combinaison des antennes a plusieurs entrés une seule sortie (MISO) et les antennes d'une seule entré plusieurs sorties (SIMO) par conséquent elle a les avantages et les caractéristiques des deux technologies 1 et 2. Le système MIMO est équipé de plusieurs antennes en transmission et plusieurs antennes a la réception. Cela améliore la qualité de la communication sans fil et le taux de l'information exponentiellement sans augmenter la bande passante et l'énergie de la transmission le système multi antenne est la partie la plus importante de la technologie MIMO. Le système MIMO sans fil n'est pas juste affecté par les caractéristiques du trajet multiples du canal de communication sans fils mais aussi dépend du désigne et la disposition du système multi antennes.

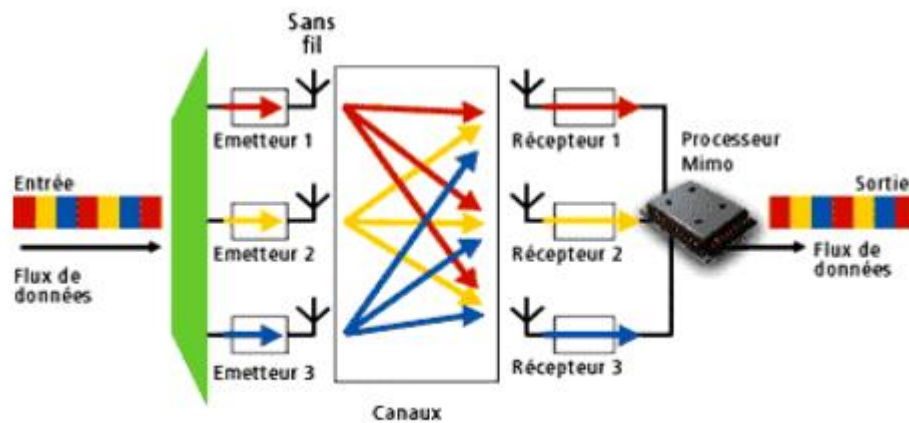


Figure II.1 : Système MIMO. [15]

Les systèmes de transmission MIMO utilisent plusieurs antennes en transmission et en réception. Il existe plusieurs configurations dépendamment de la catégorie choisie et du nombre d'antennes utilisées. Une catégorie de système MIMO est le codage spatio-temporel STC (*space time coding*). Connue aussi sous le nom de MIMO matrice A. Cette technique de diversité spatiale multiple consiste à envoyer le signal plusieurs fois par plusieurs antennes créant ainsi une redondance dans le temps et dans l'espace afin d'augmenter l'immunité du signal transmis aux phénomènes liés à la propagation comme les trajets multiples.

Dans un système MIMO, les antennes sont généralement disposées en réseau et les signaux de chaque antenne sont combinés à l'aide de techniques complexes de traitement des signaux pour créer plusieurs flux de données séparés dans l'espace. Ces flux de données peuvent ensuite être transmis simultanément sur la même bande de fréquences, ce qui permet d'augmenter le débit des données.

II. 2.2 Principes de conception des antennes MIMO

Dans les systèmes de communications traditionnels, il n'existe qu'une antenne à l'émission et une antenne à la réception (SISO). Or les futurs services de communications mobiles sans fils demandent plus de transmissions de données (augmentation de la capacité de transmission). Ainsi pour augmenter la capacité des systèmes SISO et satisfaire ces demandes, les bandes passantes de ces systèmes et les puissances à transmettre ont été largement augmentées. Mais les récents développements ont montré que l'utilisation de plusieurs antennes à l'émission et à la réception permettait d'augmenter le débit de transmission des données et cela sans augmenter ni la bande passante de l'antenne réceptrice du système SISO, ni la puissance du signal à l'émission. Cette

technique de transmission s'appelle MIMO (Multiple Input, Multiple Output), figure II-17. Un système MIMO tire profit de l'environnement multi-trajets en utilisant les différents canaux de propagation créés par réflexion et/ou par diffraction des ondes pour augmenter la capacité de transmission. D'où l'intérêt aussi d'obtenir des signaux indépendants sur les antennes.

La conception d'antennes MIMO repose sur plusieurs principes :

- La réduction du couplage mutuel entre les antennes, l'optimisation de la géométrie de l'antenne et l'amélioration de la largeur de bande et de l'efficacité.
- Le couplage mutuel se produit lorsque les champs électromagnétiques d'une antenne interfèrent avec ceux d'une autre, ce qui entraîne une dégradation des performances.
- La réduction du couplage mutuel peut être obtenue en utilisant des techniques telles que le découplage d'antennes, la formation de faisceaux et la combinaison de diversité.

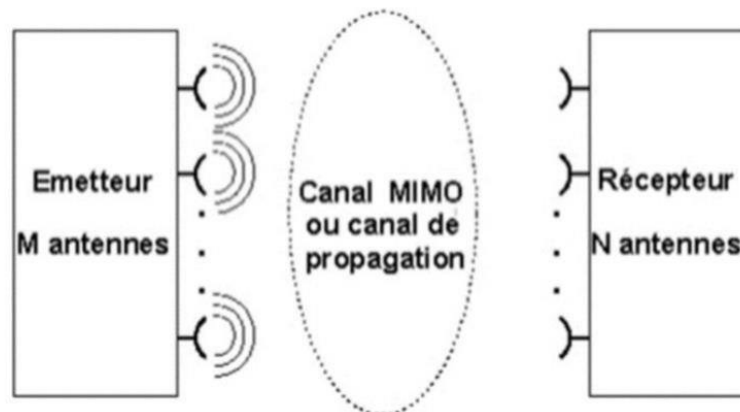


Figure II.2 : Schéma bloc général d'un système MIMO. [16]

II. 2.3 Caractéristiques principales des antennes MIMO

Les antennes MIMO ont plusieurs caractéristiques clés qui les rendent uniques par rapport à d'autres types d'antennes. Parmi ces caractéristiques, on peut citer

- La capacité de fonctionnement dans plusieurs bandes de fréquences.
- La capacité de prendre en charge plusieurs flux d'entrée et de sortie.
- La capacité de fournir une diversité de polarisation.

Les antennes MIMO peuvent fonctionner dans différentes bandes de fréquences, des bandes basses utilisées pour les communications à longue distance aux bandes hautes utilisées pour les communications à courte distance. La capacité de prendre en charge plusieurs flux d'entrée et de sortie permet la transmission et la réception efficaces de plusieurs signaux simultanément, ce qui augmente la capacité du système et améliore les débits de données. La capacité de fournir une diversité de

polarisation permet à l'antenne de recevoir des signaux provenant de plusieurs polarisations, ce qui améliore la qualité du signal et réduit l'impact de l'évanouissement du signal.

II. 2.4 Domaines d'application des systèmes MIMO

Les antennes MIMO ont diverses applications dans les systèmes de communication sans fil, notamment les réseaux cellulaires Wi-Fi, 4G LTE et 5G, les réseaux locaux sans fil (WLAN) et les réseaux personnels (PAN), ainsi que dans d'autres applications telles que les radars et les communications par satellite.

Dans les réseaux cellulaires, les antennes MIMO sont utilisées pour améliorer les performances des réseaux LTE (Long Term Evolution) et 5G, permettant des débits de données plus élevés, une meilleure couverture et une meilleure expérience utilisateur. Dans les réseaux locaux sans fil, les antennes MIMO sont utilisées pour fournir une connectivité sans fil fiable et à haut débit, en particulier dans les environnements encombrés. Dans les PAN, les antennes MIMO sont utilisées pour permettre une transmission et une réception efficaces des signaux dans les applications à faible puissance et à faible débit de données, telles que Bluetooth et Zigbee.

II.3 Une vue Historique

- En 1984 Jack Winters (laboratoire Bell) déposa un brevet pour les communications sans fil utilisant des antennes multiples.
- En 1985 Jack Salz publia un article sur le MIMO basé sur les travaux de Winters.
- Par la suite de 1986 à 1994, plusieurs publications sur le sujet se sont succédées.
- En 1994 l'introduction de la notion de Multiplexage spatiale par A. Paulraj (université de Stanford).
- En 1996, Greg Rayleigh et Gerard J Foschini ont inventé des nouvelles approches permettant d'accroître l'efficacité du MIMO. Aussi, il a été démontré que la capacité du canal MIMO augmente avec le nombre d'antennes utilisées de façon proportionnelle. Ainsi que les travaux de l'équipe de Foschini la même année sur le récepteur BLAST (Bell Laboratoire).
- En 1998, les travaux de l'équipe du Dr Vahid Tarokh toujours du laboratoire Bell sur le codage spatio-temporel ont généralisé les concepts introduits précédemment par M. Alamouti (AT&T Wireless service 1998).
- En 1999 les travaux de Emre Telatar (Laboratoire Bell) sur le calcul de la capacité du canal MIMO.

- En 2001 La progression des études du système MIMO a abouti à l'apparition du premier système MIMO commercial développé par Iospan Wireless Incorporation.
- A partir de 2006 plusieurs sociétés telle que Broadcom et Intel ont adopté de nouvelle technique de communication utilisant la technologie MIMO.

II.4 Etat de l'art sur les antennes MIMO

II.4.1 Antenne MIMO pour les appareils 5G

Dans [17], les auteurs présentent la conception d'un système d'antennes MIMO (8×8) pour la technologie 5G, tels que les montres intelligentes et les dangles. Chaque antenne de la configuration MIMO occupe une surface de $3 \times 4 \text{ mm}^2$. Cette structure est imprimée sur un substrat sous une forme de H tourné. Le substrat utilisé pour la conception est le Rogers RT-5880 de $31.2 \times 31.2 \times 1.57 \text{ mm}^3$, avec une permittivité diélectrique ϵ_r de 2,2. La couche supérieure du substrat comporte huit antennes MIMO, tandis que la couche inférieure est composée d'un plan de masse. Le plan de masse est une structure basée sur une bande interdite électromagnétique conçue pour améliorer le gain et l'efficacité. Chaque antenne est alimentée à partir de la couche inférieure du substrat par des Vias afin d'éviter tout rayonnement parasite. Les antennes MIMO résonnent à 25.2 GHz avec une largeur de bande de 6 dB de 15,6 %. Le gain atteint par les antennes dans toute la largeur de bande est supérieur à 7,2 dB avec une valeur maximale de 8,732 dB à la fréquence de résonance. De même, la valeur de l'efficacité atteinte par les antennes dans l'ensemble de la largeur de bande est supérieure à 65 %, avec une valeur maximale de 92,7 % à la fréquence de résonance. Les résultats de la simulation et de la mesure ont démontré la bonne performance des antennes MIMO, ce qui les rend appropriées pour les appareils compacts de la 5G [17].

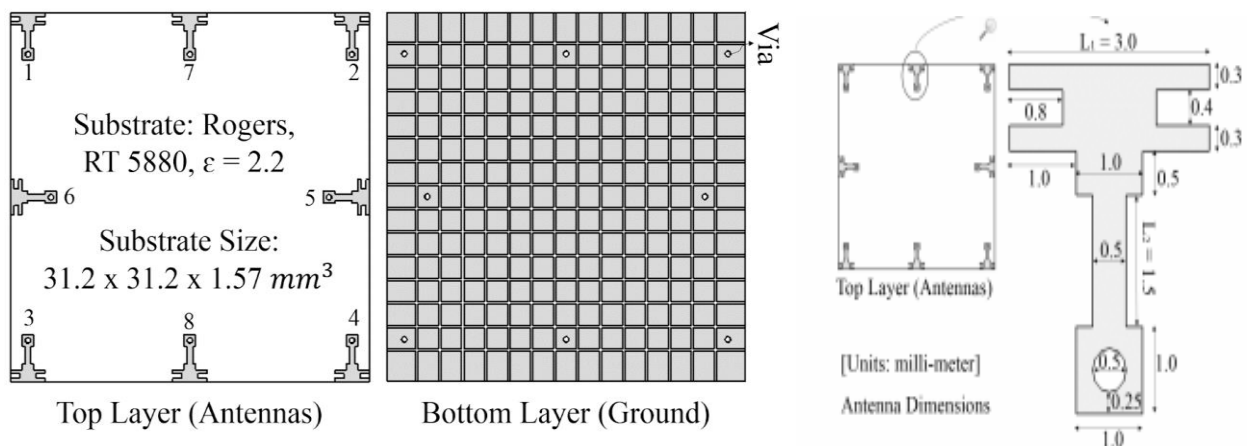


Figure II.3 : Modèle de simulation de l'antenne proposée en [17].

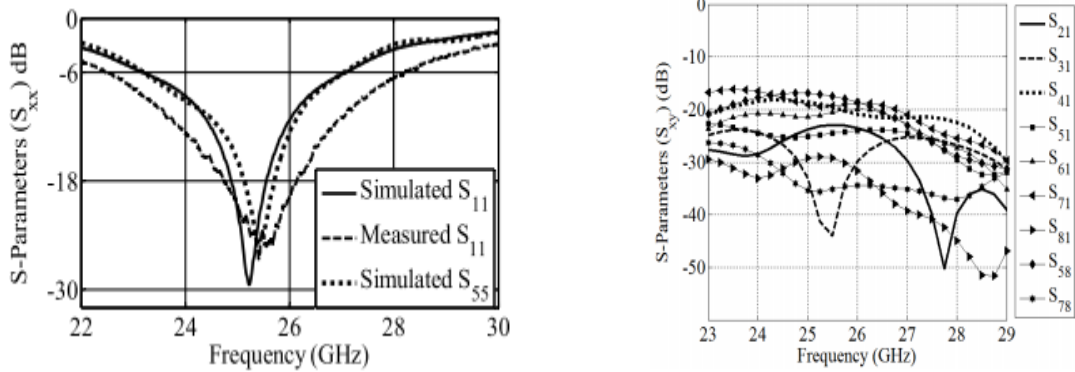


Figure II.4 : Coefficient S_{xx} et S_{xy} simulés et mesurés de l'antenne 5G MIMO proposée en [17].

Comme elle est illustrés dans la Figure suivante, la valeur maximale du coefficient de corrélation ECC est de 0.03, ce qui est beaucoup plus petite que la valeur pratiquement acceptable (0.5).

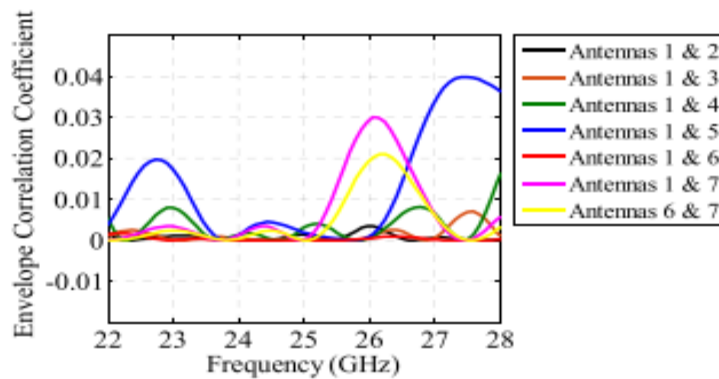


Figure II.5 : Coefficient ECC correspondant à l'antenne 5G MIMO proposée en [17].

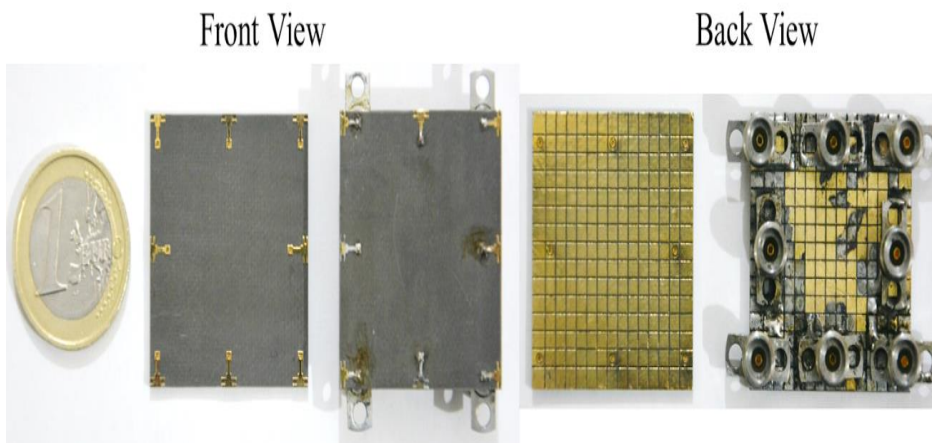


Figure II.6 : Prototype fabriqué du modèle d'antenne 5G MIMO proposée en [17].

II.4.2 Antenne MIMO pour basée sur méta-surface pour les applications des ondes millimétriques

Comme celle précédente, les auteurs de l'article [18] ont fait une conception d'une antenne MIMO en utilisant des structure méta matériaux à une seule couche. Cette structure est conçue pour les systèmes de communication à ondes millimétriques (mm-ondes) de la cinquième génération (5G). Chaque élément d'antenne MIMO est composé d'un réseau 1×2 avec un réseau d'alimentation commun (voir le modèle de conception présenté dans Figure II.7). En outre, la structure générale du réseau est composée de 9×6 cellules en forme d'anneau circulaire (CSR). La structure métamatériaux est employée pour améliorer le gain et l'isolation entre les éléments d'antenne MIMO. L'antenne MIMO proposée, qui se compose de 4 éléments, est réalisé sur un substrat de type Rogers RT Duroid 5880 avec une épaisseur de 0.787 mm.

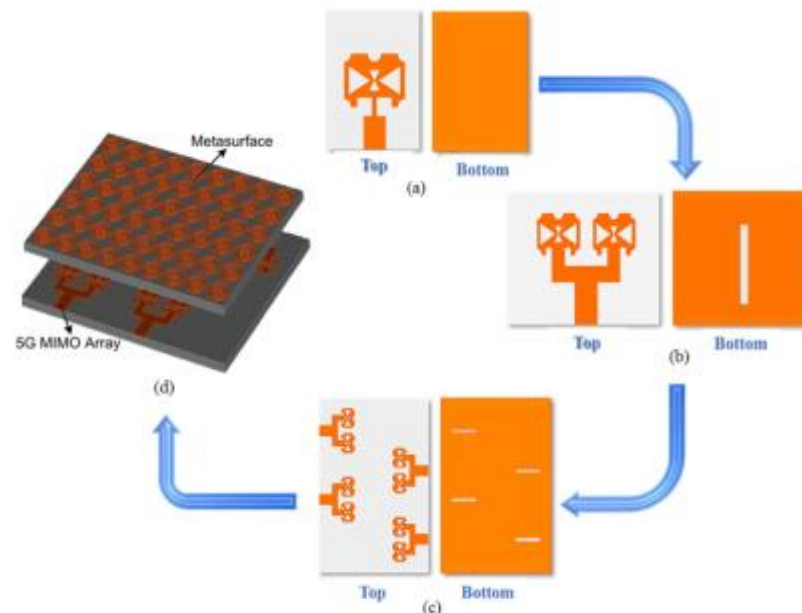


Figure II.7 : *Modèle de simulation de l'antenne proposés en [18].*

Les performances de l'antenne sont étudiées en termes de paramètres S, caractéristiques de rayonnement et de paramètres d'une antenne MIMO. L'antenne conçue fonctionne dans la bande de fréquence des ondes millimétriques qui allant de 24.55 à 26.5 GHz. L'utilisation de la technologie métamatériaux faite une grande amélioration dans le gain, ce qui permet d'atteindre un gain de 10.27 dBi. De même, l'isolation est également améliorée de 5 dB.

Les mesures de performance MIMO telles que le coefficient de corrélation d'enveloppe (ECC), le gain de diversité (DG), la perte de capacité du canal (CCL) et le gain effectif moyen (MEG) révèle de bonnes caractéristiques d'antenne.

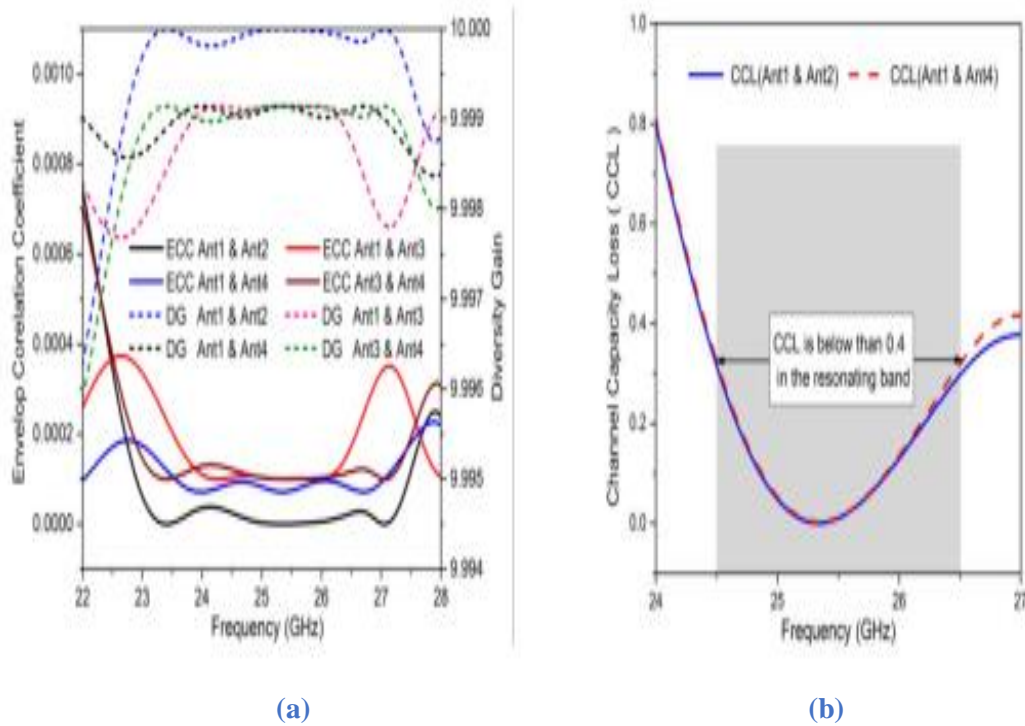


Figure II.8 : Coefficient ECC et DG en (a) CCL en (b) de l'antenne proposés en [18].

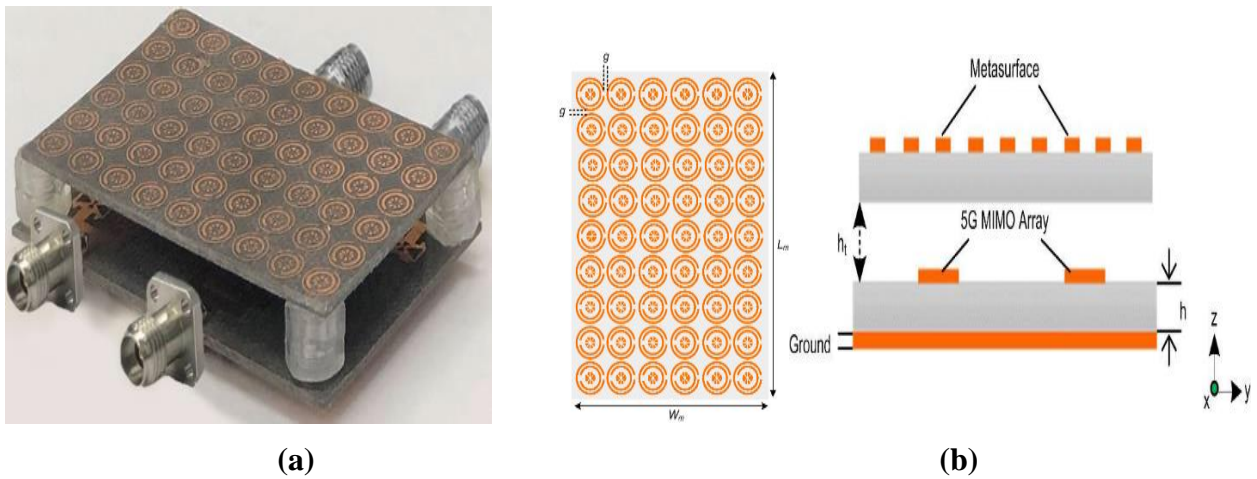


Figure II.9 : Prototype fabriqué en (a) et la structure métamatériau 9x6 utilisée en (b) [18].

L'antenne proposée en [18] présente des propriétés de rayonnement avec un gain maximal de 10.27 dBi (voir la figure II.10) ce qui confirme sa pertinence pour les systèmes de communications modernes [18].

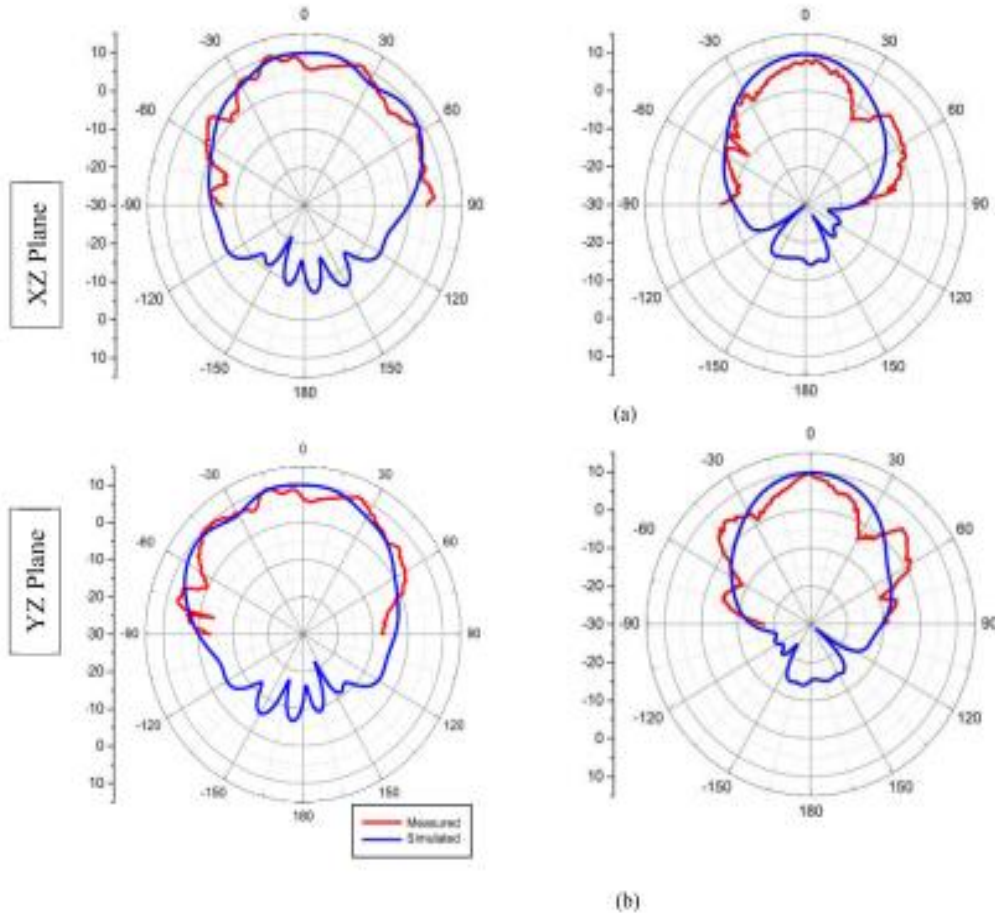


Figure II.10 : Diagramme de rayonnement simulé et mesuré de l'antenne proposée en [18].

II.4.3 Antenne MIMO à large bande avec forte isolation

Dans cette étude [19], les auteurs proposent un système d'antennes MIMO opérant dans une gamme de fréquences allant de 3.2 GHz à 5.75 GHz ce qui permet de servir la nouvelle radio 5G (NR) sub-6 GHz n77/n78/n79 et le WLAN 5 GHz avec une bonne adaptation d'impédance. Le concept de l'antenne proposée en [19] est basé sur l'utilisation d'une antenne patch rectangulaire avec des slots EL dans l'élément rayonnant avec deux stubs identiques couplés à la masse partielle. Chaque élément d'antenne MIMO a une dimension de 15x23x1.6 mm³. L'antenne est imprimée sur un substrat FR-4 de permittivité 4.3. Le couplage mutuel est le problème majeur dans la conception des antennes MIMO. Il peut modifier le diagramme de rayonnement du réseau. Il est inversement proportionnel à l'espacement inter-éléments. Pour réduire ce problème, diverses techniques ont été utilisées telles que l'utilisation des structures EBG et des structures DGS.

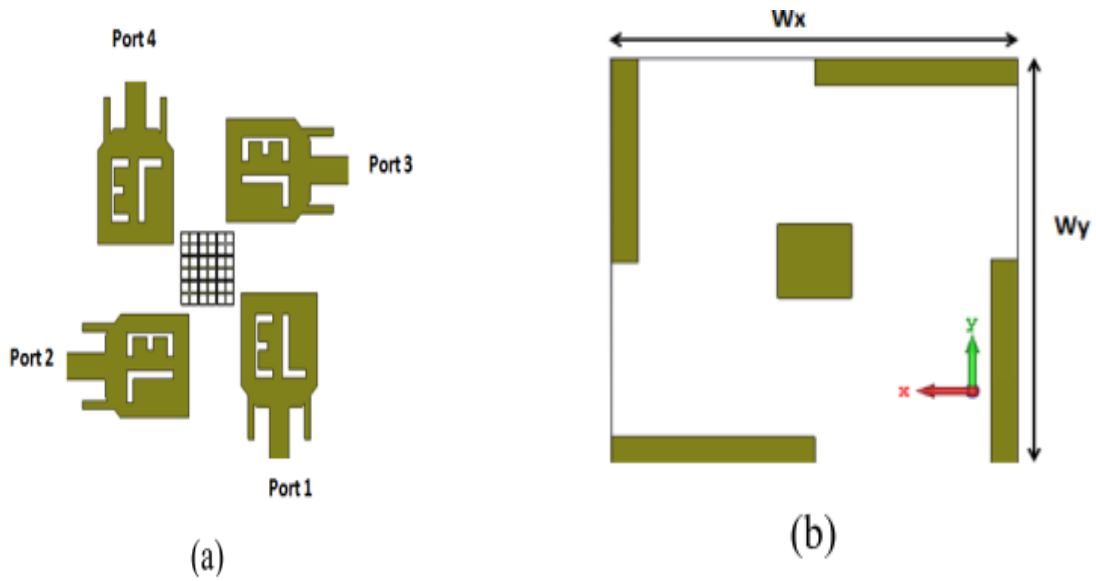


Figure II.11 : Géométrie d'une antenne MIMO à 4 ports proposée en [19]
 (a) vue au-dessus, (b) vue au-dessous

➤ *Performances de l'antenne MIMO*

Plusieurs paramètres sont utilisés pour étudier les performances d'Antenne MIMO en termes de paramètres S. L'un des principaux paramètres dynamiques de l'estimation des performances de l'antenne MIMO est ECC. L'utilisation des structures (EBG, DGS, CE et NL) de réduction du couplage mutuel et les comparons pour obtenir une forte isolation entre les ports, ce qui améliore fortement le gain.



Figure II.12 : Prototype de l'antenne proposée en [19] (a) vue au-dessus (b) vue au-dessous.

Tableau III.1 : Comparaison entre structure EBG, DGS, NL et EC dans l'antennes MIMO [19].

Parameter	Methods			
	EBG	DGS	NL	CE
Isolation improvement (dB)	<-20: -65	<-19: -60	<-20: -55	<-15:-40
DG	9.996	9.998	9.999	9.994
ECC	<0.002	<0.015	<0.002	< 0.
Average MEG for each port (dB)	-5.724	-5.638	-5.4971	-5.9766
TARC (dB)	<-26	<-24	<-25	<-30
Gain (dBi)	9	8.9	8.7	9
Efficiency	92%	90%	88%	91%

Le Tableau III.1 compare les résultats des quatre méthodes de réduction du couplage mutuel entre les éléments d'antenne. Toutes les méthodes de réduction du couplage mutuel permettent d'obtenir une isolation élevée entre les ports et donnent des MEG, CCL, TARC, DG et ECC satisfaisants. Les méthodes EBG et DGS sont les meilleures en matière de réduction de l'isolement. Cela est dû à la présence d'espaces entre chaque unité et les cellules unitaires adjacentes dans les cellules à neuf unités, en plus de la capacité obtenue à partir de l'espace diélectrique entre le patch métallique supérieur et le plan de masse (Figure II. 11).

II.4.4 Antenne MIMO à 10 éléments avec structure DGS

De même que celle précédente, les auteurs de l'article [20] ont fait une conception d'une antenne MIMO à dix éléments avec des structures DGS. L'utilisation de la structure DGS permet d'avoir une isolation améliorée et un rayonnement X-polaire (XPR) réduit. Ces antennes sont conçues pour les applications d'onde millimétrique (mm) de la 5G. L'antenne élémentaire se compose d'un guide d'ondes coplanaire (CPW) chargée par stub avec un résonateur de forme elliptique. La structure de masse défectueuse (DGS) a été incorporée par gravure. La structure défectueuse agit comme un réflecteur ce qui améliore les caractéristiques de rayonnement en abaissant le XPR et en augmentant l'isolation co-pol à crosspol. L'antenne MIMO proposée, est réalisé sur un substrat de type FR-4 avec une constante diélectrique 4.4 et une épaisseur de 1.6 mm.

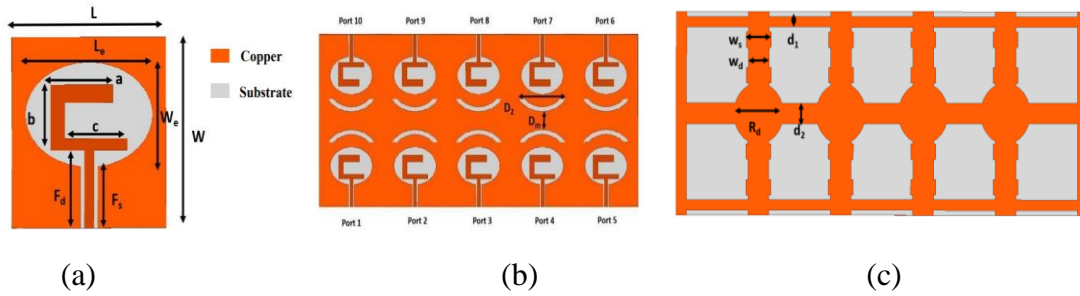


Figure II.13 : Schéma de principe de : (a) antenne unique, (b) vue de face avec DGS et (c) vue arrière avec DMS. [20]

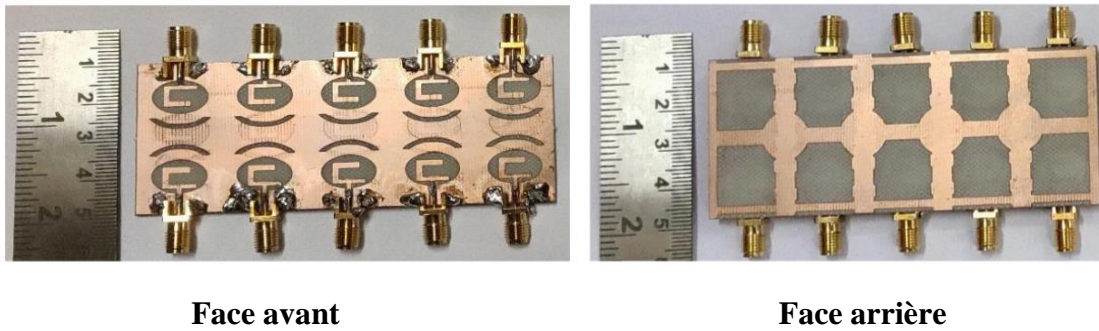


Figure II.14 : Prototype d'une antenne MIMO proposée en [20] avec des structures DGS et DMS

Les performances de diversité de l'antenne MIMO proposée sont évaluées à l'aide de plusieurs paramètres en termes d'ECC, CCL et MEG, qui sont calculés pour toutes les orientations adjacentes possibles des éléments. Le terme ECC montre une valeur maximale de 0.003, ce qui indique que les canaux MIMO seront presque non corrélés dans les systèmes de communication MIMO pratiques.

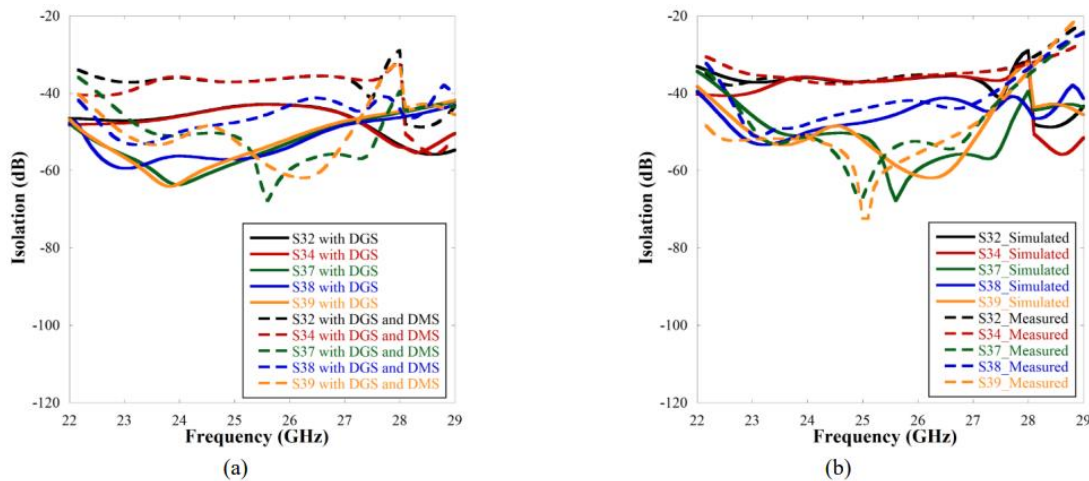


Figure II.15 : Caractéristiques d'isolation (a) structure avec DGS et structure proposée avec DGS et DMS, (b) comparaison des résultats simulés avec celles mesurés avec DGS et DMS. [20]

Les courbes d'isolation Co-pol à X-pol indiquent que la structure proposée avec structure Micro-ruban défectueuse (DMS) et structure de masse défectueuse (DGS) maintient une isolation supérieure à 20 dB sur la plage [22 GHz - 29 GHz].

II.4.5 Antenne MIMO à double band avec avec paires d'antennes compactes auto-découplées

Dans ce travail [21], un système d'antennes MIMO à deux bandes et quatre éléments, basé sur de paires d'antennes compactes auto-découplées, est proposé pour le fonctionnement de la cinquième génération (5G) dans les terminaux mobiles. En partageant une branche de mise à la terre commune pour les deux unités d'antennes adjacentes, il est possible d'obtenir des paires d'antennes à double bande avec une isolation élevée. En particulier, les deux paires d'antennes compactes sont placées perpendiculairement de part et d'autre du plan de masse du système. Le système d'antennes MIMO est optimisé pour fonctionner dans les bandes de 3,5 GHz (3,4-3,6 GHz) et de 4,9 GHz (4,8-5,0 GHz) avec une isolation meilleure que -17 :5 dB pour la bande basse et -20 dB pour la bande haute. Le système MIMO proposé est un système bi-bande à quatre antennes. Ce système est fabriqué et mesuré, et l'on obtient une bonne concordance entre la simulation et la mesure. En outre, les influences de la main fantôme et du panneau d'affichage sur les performances du système d'antenne MIMO sont également étudiées et discutées [21].

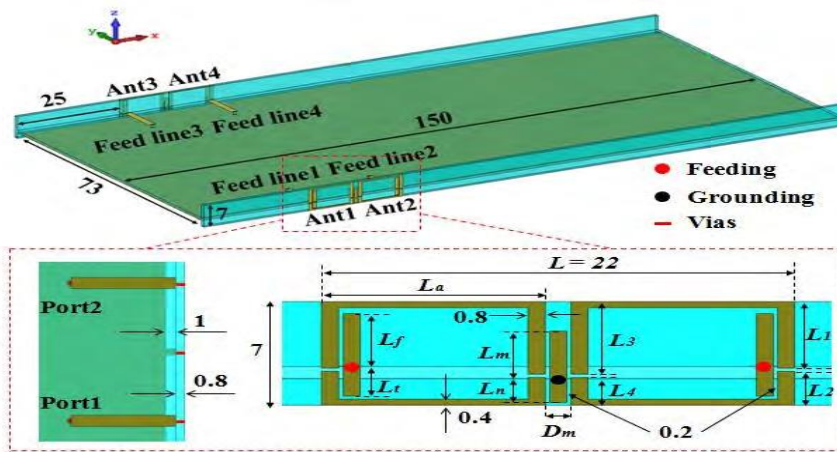


Figure II.16 : Géométrie de l'antenne MIMO proposée en [21]



Figure II.17 : Prototype de l'antenne MIMO proposé en [21]

II.5 Conclusion

Dans ce chapitre, on a montré un état de l'art sur les antennes MIMO. De même, les différentes techniques utilisées pour booster les performances d'une antenne MIMO sont présentées surtout pour les applications des réseaux mobiles. Parmi les techniques montrées, on peut citer l'utilisation des structures EBG, DMS et des autres structures. Dans le chapitre suivant, on va voir une étude paramétrique d'une antenne imprimée ce qui nous permet de proposer une antenne MIMO à large bande pour les applications des réseaux mobiles.



Chapitre III

*Etude paramétrique d'une
antenne patch*

III.1 Introduction

La phase de conception d'une antenne, à l'aide d'un logiciel adapté est une étape incontournable dans un souci d'optimisation de structure aux paramètres désirés. Dans ce chapitre, on va présenter une Etude paramétrique d'une antenne patch rectangulaire par CST (Computer Simulation Technologie) est une méthodologie qui permet d'analyser l'influence de différents paramètres sur les performances de l'antenne.

Le logiciel CST est simulateur électromagnétique en 3D qui permet de modéliser et d'analyser des circuits microondes et des structures tridimensionnelles. Il aide le concepteur à observer et analyser les diverses propriétés électromagnétiques de la structure telles que les caractéristiques de rayonnement et de dispersion. Il est important de comprendre chaque étape du processus de modélisation en détail afin d'obtenir des résultats fiables. Pour la simplicité et de réduire le coût de fabrication, on dispose le patch, la ligne d'alimentation et de même pour les autres circuits sur la même surface.

L'étude paramétrique consiste à varier certains paramètres de l'antenne patch rectangulaire tels que les dimensions du plan de masse, la position de la ligne d'alimentation, etc. Ensuite, la simulation est effectuée pour chacune des configurations paramétriques pour évaluer les performances de l'antenne correspondante.

III.2 Conception d'une antenne patch rectangulaire

L'antenne patch rectangulaire est généralement construite sur un substrat diélectrique (matériau isolant), tel que du PCB (Printed Circuit Board), où la forme rectangulaire de l'antenne est gravée sur la surface typiquement avec une couche de cuivre. Il est important que les dimensions de l'antenne, telles que la longueur, la largeur, et l'épaisseur, soient optimisées pour fonctionner à la fréquence désirée.

La conception de l'antenne patch rectangulaire peut être réalisée à l'aide de logiciels informatiques de simulation CST. Ces outils permettent d'obtenir des performances précises et optimales de l'antenne.

La structure de cette antenne est représentée sur la Figure III.1. Elle est constituée d'un patch rectangulaire gravé sur la face supérieure d'un substrat diélectrique de type FR-4, de permittivité relative 4.3, d'épaisseur 1.6 et de tangente de perte diélectrique $\tan \delta = 0.002$. Le plan de masse et le patch sont conçus avec du cuivre, PEC, d'épaisseur 0.035.

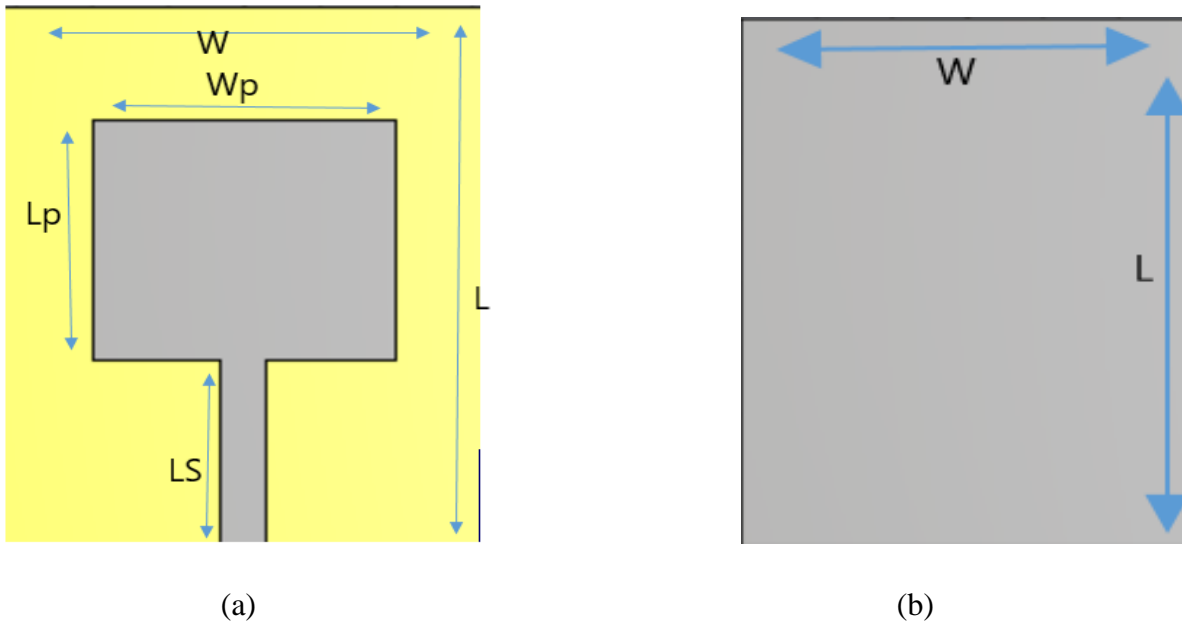


Figure III.1 : Antenne patch de forme rectangulaire, (a) : vue dessus (b) : vue dessous

Les dimensions adoptées lors de cette première simulation sont tabulées dans le Tableau II.1:

Tableau III.1: Les dimensions de l'antenne patch proposée en mm.

W	L	Ls	Lp	Wp
30	40	15	18	20

Cette première structure simulée avec les dimensions citées dans le tableau précédent avec une hauteur du substrat $h=1.6$ mm ne conduit pas à des performances intéressantes

Le résultat de simulation sont présentés en termes de coefficient de réflexion S_{11} en fonction de la fréquence dans Figure III.2.

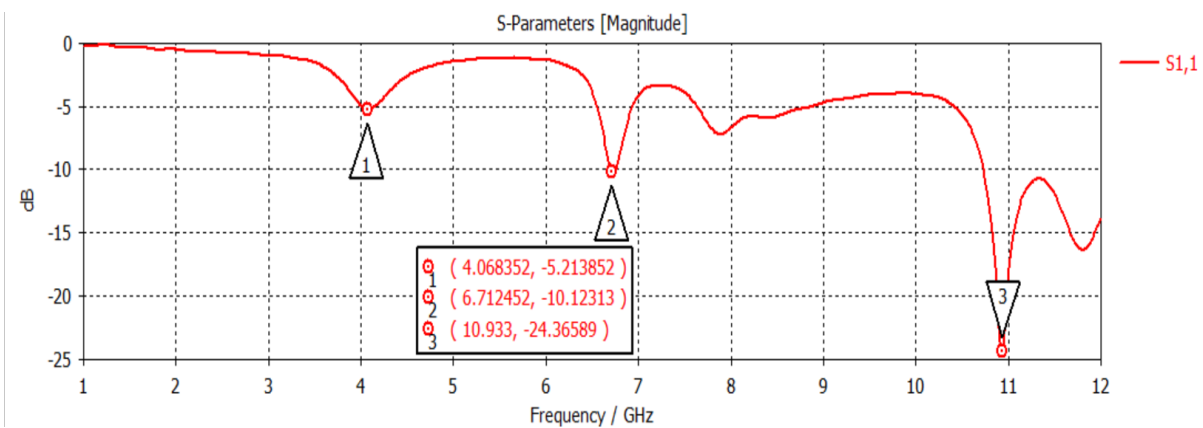


Figure III.2 : Coefficient de réflexion S_{11} pour les dimensions citées en Tableau III.1.

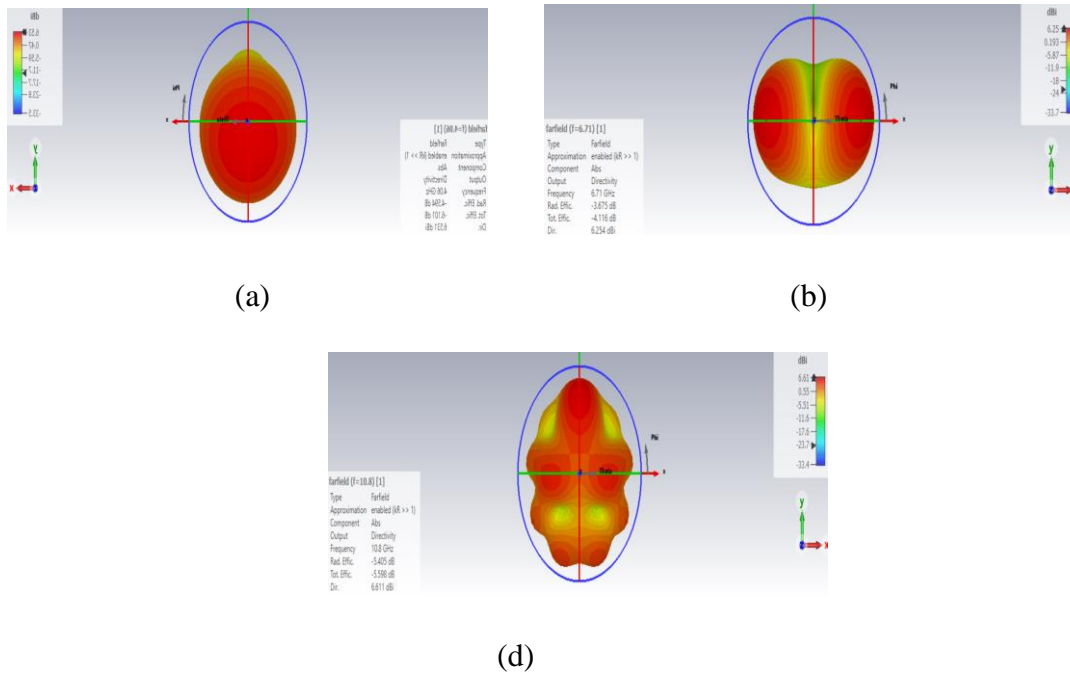


Figure III.3 : La directivité en 3D d'une antenne patch rectangulaire :

(a) $f=4.05\text{GHz}$, (b) $f=6.71\text{GHz}$ et (c) $f=10.8\text{GHz}$

III.3 Études paramétriques d'une antenne patch rectangulaire

L'étude paramétrique d'une antenne patch rectangulaire consiste à analyser les effets des différents paramètres sur les performances de l'antenne. Il est généralement utile de fixer certains paramètres ensuite, vous pouvez varier les autres paramètres un par un pour déterminer leur impact sur la réponse d'antenne. Puis on va observer l'influence de la variation de ce paramètre sur les caractéristiques de l'antenne conçue telles que la fréquence de résonance, le diagramme de rayonnement et le coefficient de réflexion.

III.3.1 Optimisation de la géométrie du plan de masse

Afin d'évaluer l'effet de la variation des dimensions du plan de masse sur les paramètres S des antennes. On va varier la longueur de plan de masse L de 33.75 à 40 mm. Les autres paramètres sont fixes. (Voir Tableau III.1)

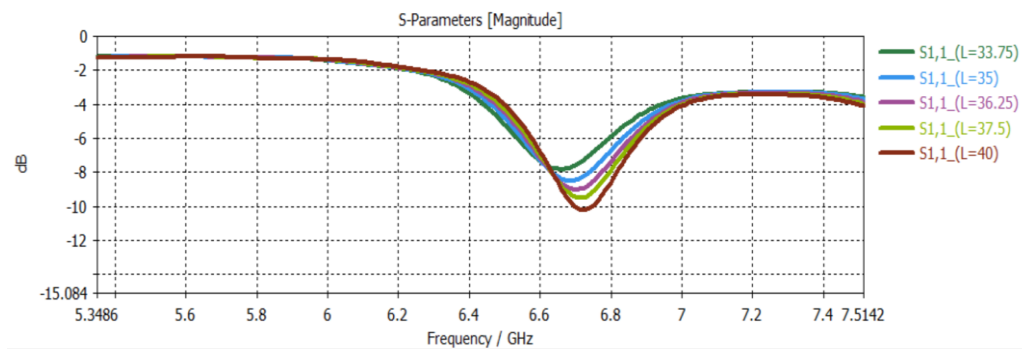


Figure III.4 : Coefficient S_{11} pour différentes longueurs du plan de masse

Les résultats de simulation montrés dans la Figure III.3 représentent l'évolution du coefficient de réflexion S11 pour différentes valeurs de L. une diminution de L de 40 à 33.75 mm réduira la fréquence de résonance et la bande passante sera plus étroite, avec un léger effet sur la directivité de l'antenne

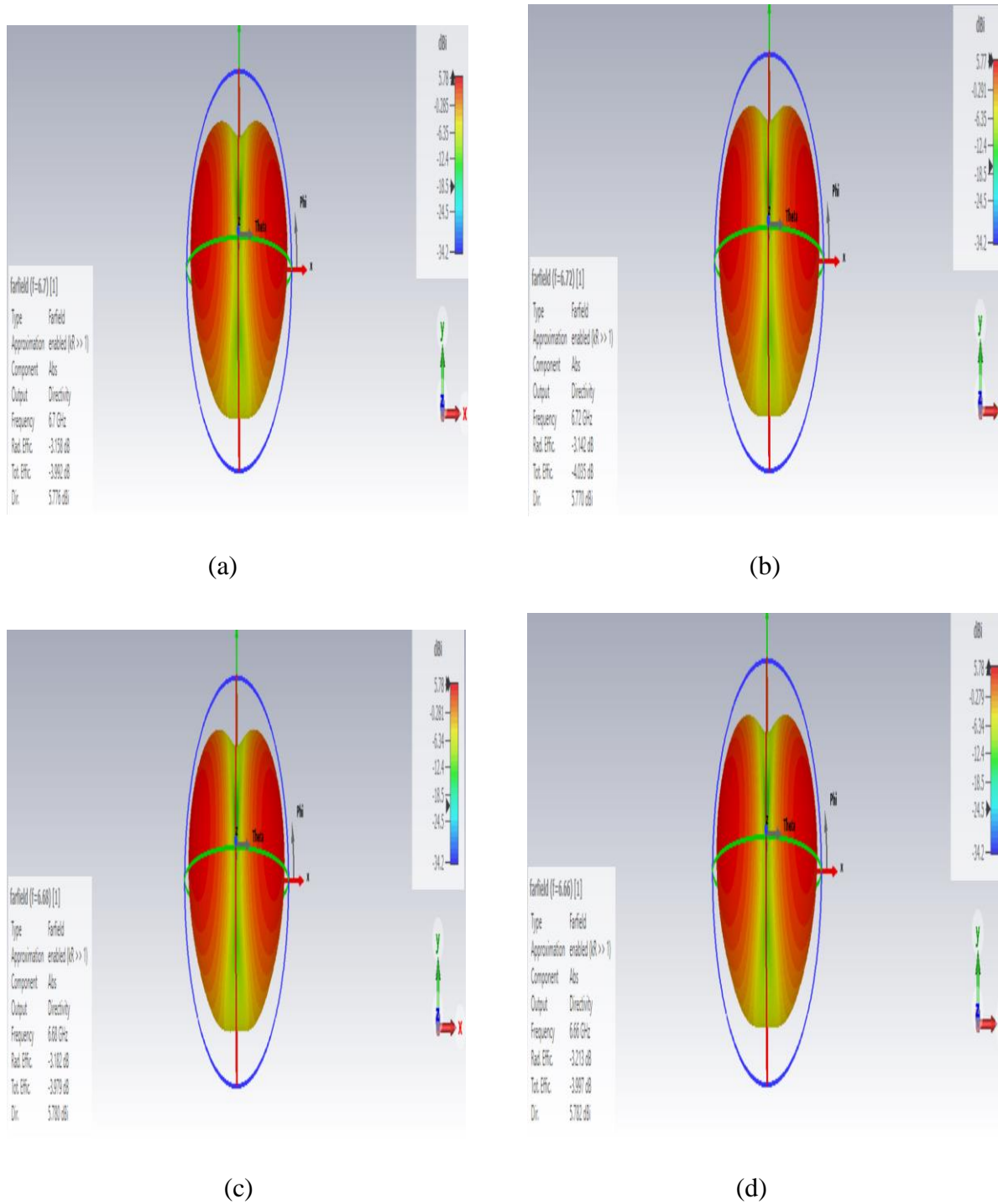


Figure III.5 : Directivité en 3D pour différentes valeurs des longueurs de plans de masse : (a) L=33.7mm, (b) L=35mm, (c) L=36.25mm et (d) L=37.5mm.

III.3.2 Effet de la longueur du Patch (L_p)

Dans cette étude, la longueur du patch (L_p) sera variée de 20mm jusqu'à 15mm. Les autres paramètres sont fixes. (Voir Tableau III.1)

Les résultats de simulation sont présentés en termes de coefficient de réflexion S_{11} en fonction de la fréquence.

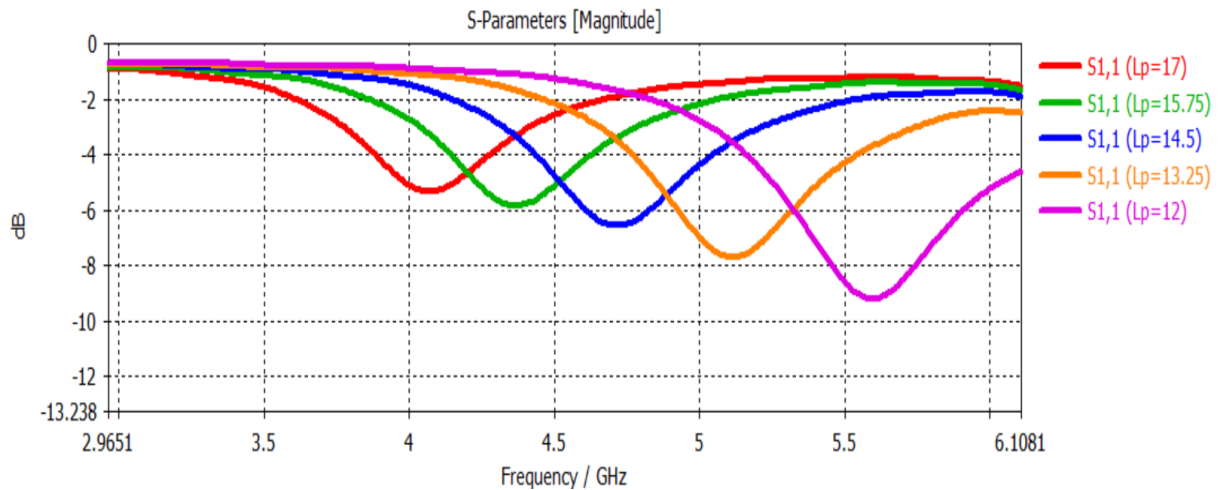


Figure III.6 : Coefficient S_{11} pour différentes longueurs du patch rectangulaire L_p .

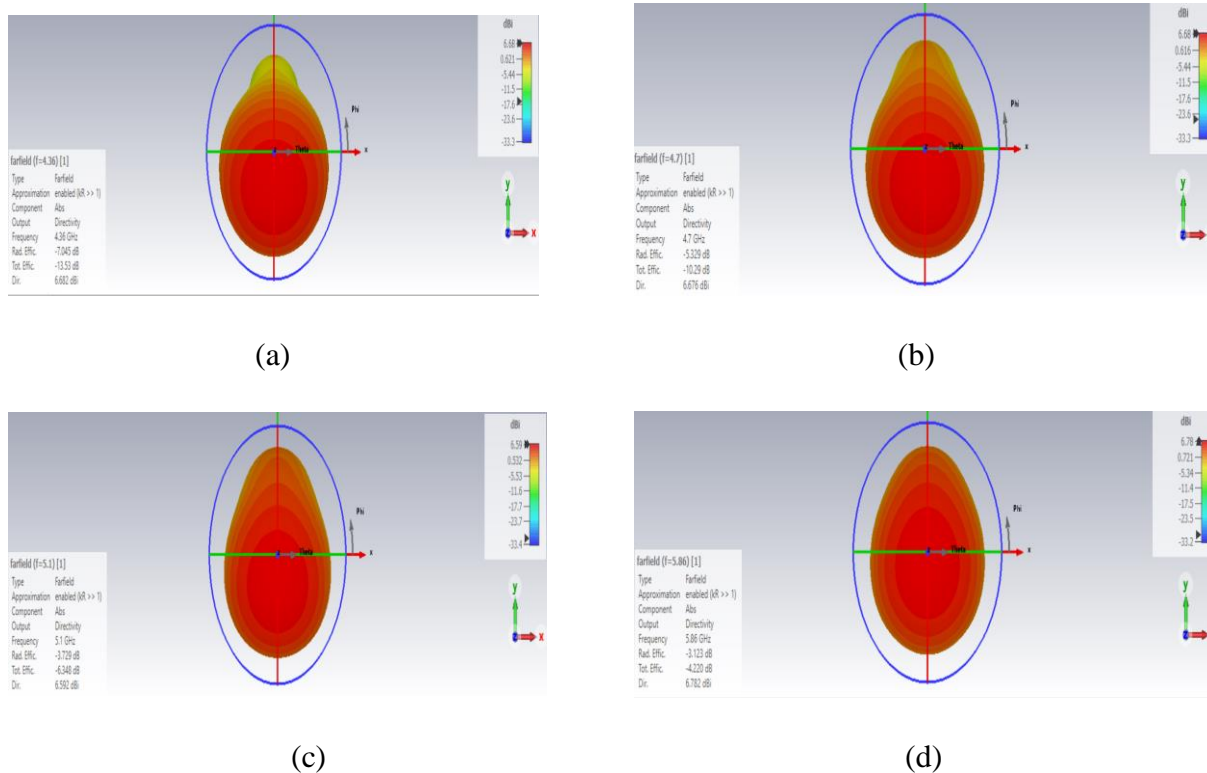


Figure III.7 : Directivité en 3D pour différentes valeurs des longueurs de plans de masse : (a) $L_p=15.75\text{mm}$, (b) $L_p=14.5\text{mm}$, (c) $L_p=13.25\text{mm}$ et (d) $L_p=12\text{mm}$.

Les résultats de simulation montrés dans la Figure III.6 et la Figure III.7 représentent l'évolution du coefficient de réflexion S_{11} pour différentes valeurs de L_p . À partir de ces courbes on remarque que : qu'il existe une relation inverse, chaque fois que L_p est diminué, la fréquence de résonance augmente (4.05 jusqu'à 5.8 GHz). La bande passante est plus large, mais elle affecte légèrement sur la valeur de la directivité.

III.3.3 Effet de largeurs du patch rectangulaire (W_p)

Dans ce cas, la longueur du patch L_p est fixée à 17mm, puis on va varier la largeur (W_p). Les autres paramètres sont fixes (voir Tableau III.1)

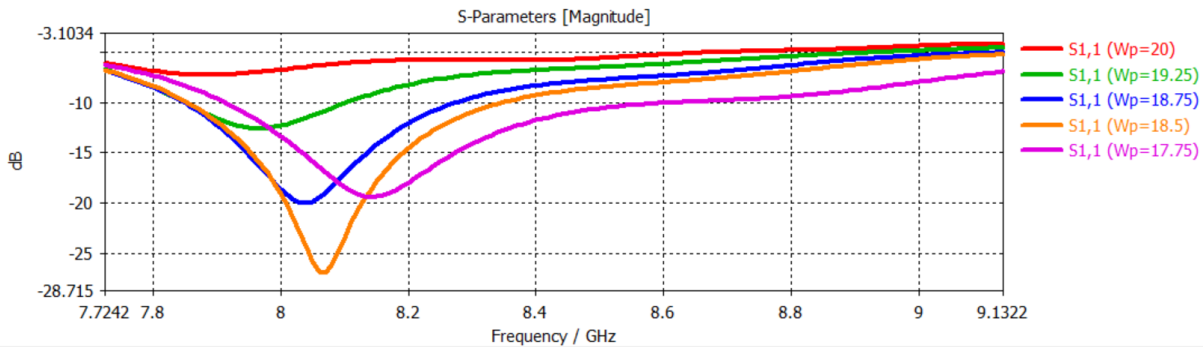
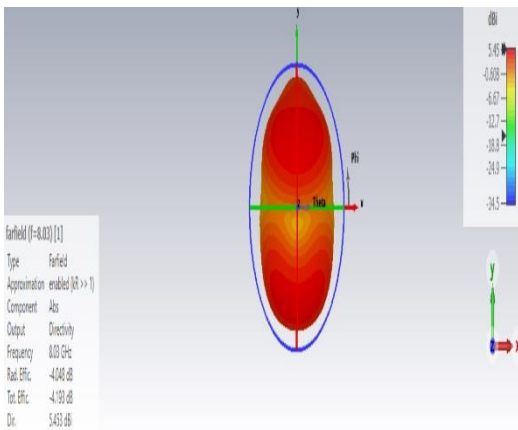
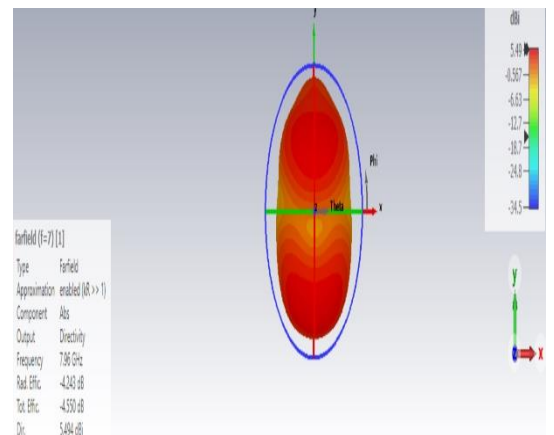


Figure III.8 : Coefficient S_{11} pour différentes largeurs du patch rectangulaire.

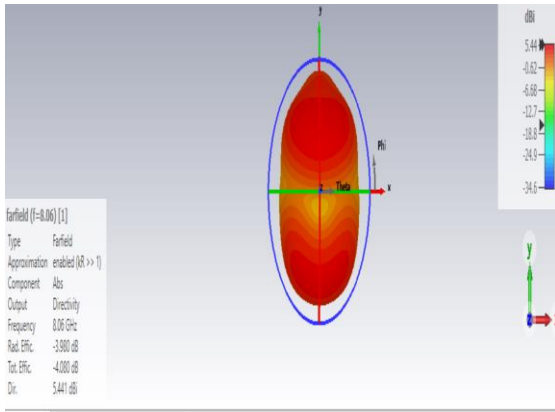
La largeur de l'antenne patch a un impact direct sur les caractéristiques de rayonnement de l'antenne. On voit que : une diminution de la valeur W_p entraîne une augmentation de la fréquence de résonance et une amélioration de la bande passante. On remarque également une légère diminution des valeurs de directivité.



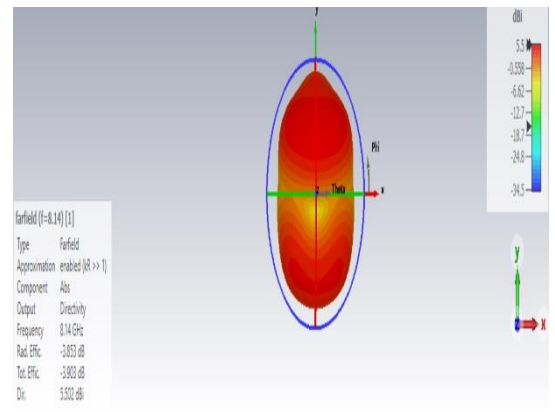
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure III.9 : Directivité en 3D pour différentes largeurs du patch rectangulaire. Pour

(a) $W_p=19.25\text{mm}$, (b) $W_p=18.75\text{mm}$, (c) $W_p=18.5\text{mm}$ et (d) $W_p=17.75\text{mm}$

III.3.4 Effet de la position de la ligne d'alimentation

Au contraire des cas précédents, on suppose que la ligne d'alimentation est variée le long de l'axe U comme nous l'indique dans la figure suivante, avec x représente la position de la ligne d'alimentation par rapport au point central O.

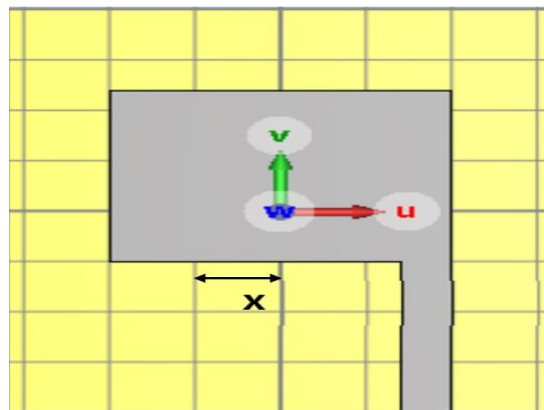


Figure III.10 : Variation de la position de la ligne d'alimentation.

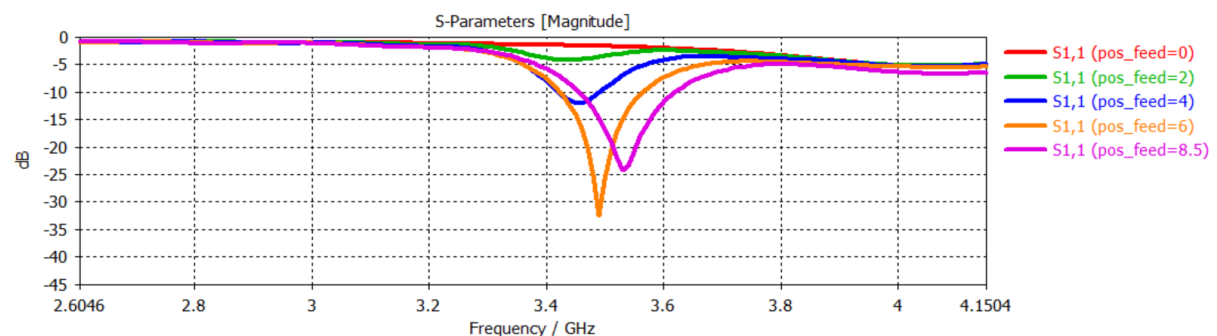


Figure III.11 : Coefficient S_{11} pour différentes position x en mm.

Les coefficients de réflexion, montrés dans la figure III.11 et la figure III .12, illustrent que la position de la ligne d'alimentation altère sur la bande passante et la fréquence de résonance.

On voit que : que on éloigne du centre, la bande passante plus large est obtenue (Bw=180MHZ de 3.44GHz à 3.62GHz) pour la position pos_feed=8.5 mm avec une augmentation de la fréquence de résonance, il affecte également sur la directivité de l'antenne.

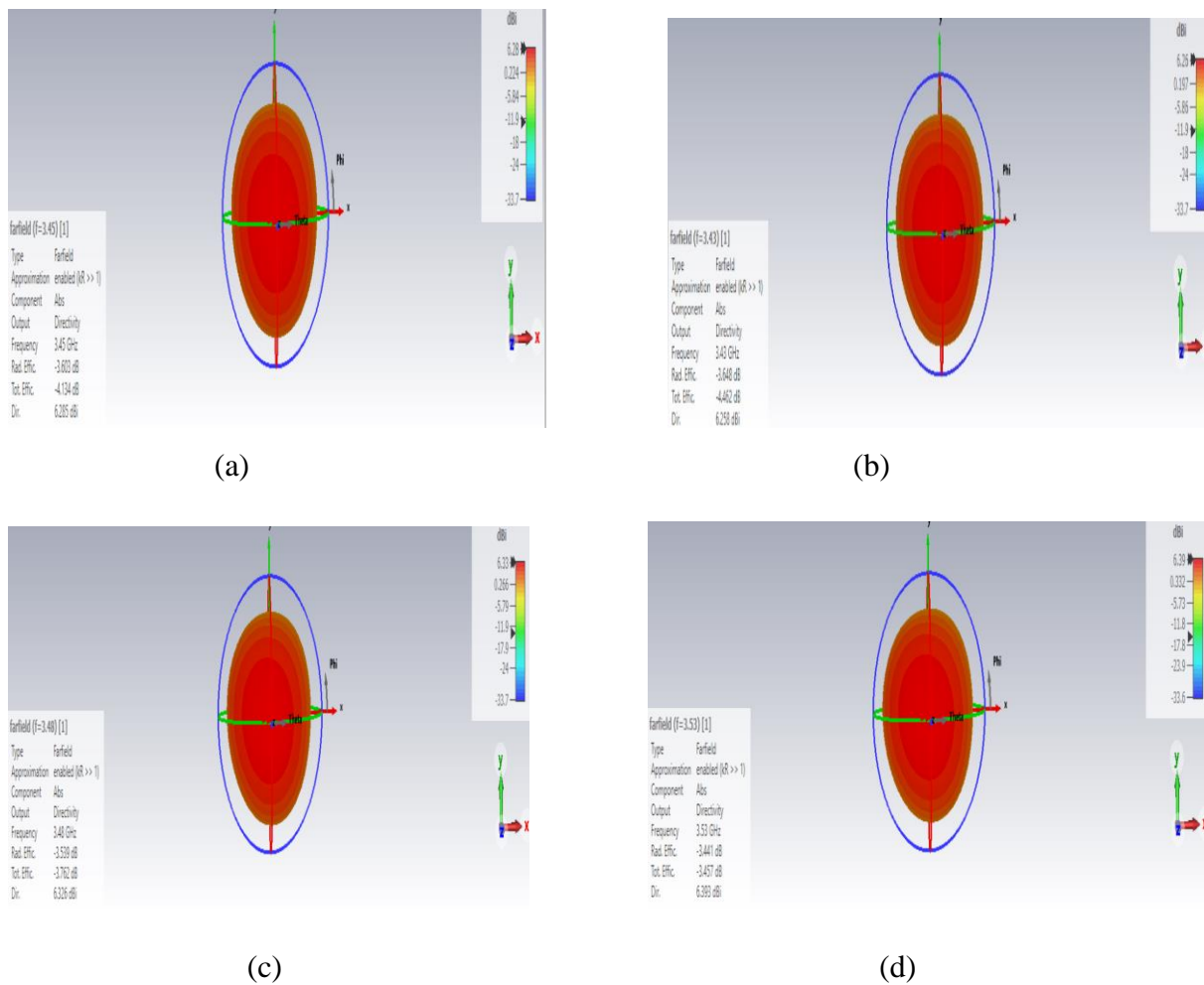


Figure III.12 : Directivité en 3D pour différentes position x en mm

III.3.5 Effet de la Variation du matériau du substrat

Afin de connaître l'effet du matériau du substrat sur la caractéristique de l'antenne patch rectangulaire on prends différentes valeurs de permittivité $\epsilon_r = 2.6, 3.5, 5.6, 6.15$

Les résultats de simulation sont présentés dans la Figure III.13.

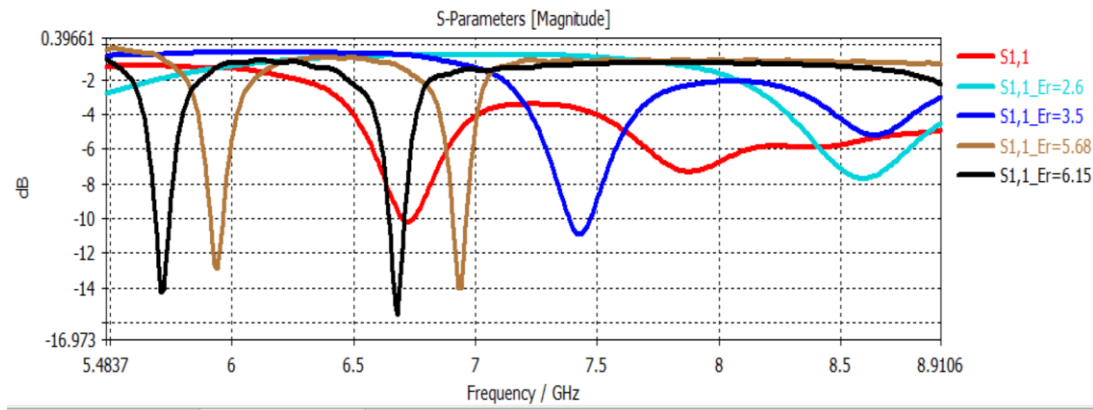
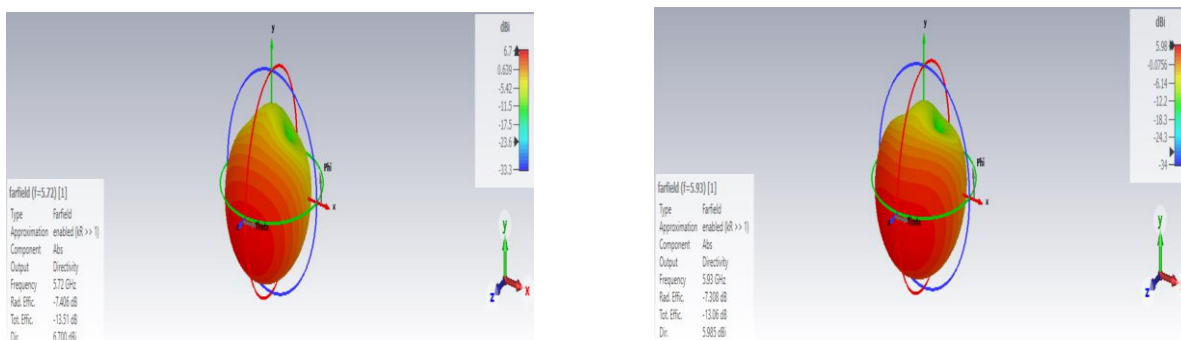


Figure III.13 : Coefficient S_{11} pour différents matériaux du substrat

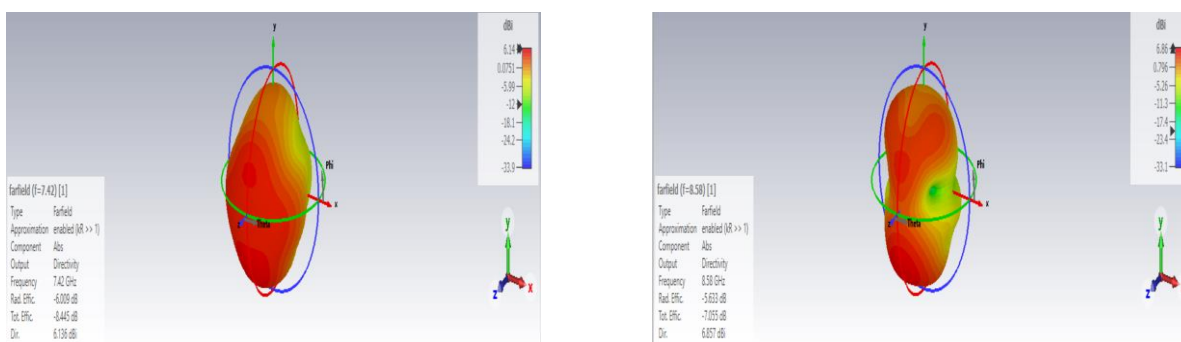


(a)

(b)

Figure III.14 : Directivité en 3D: (a) Diamond Epsilon = 5.68

et (b) Arlon AD 600 (lossy) Epsilon = 6.15



(c)

(d)

Figure III.15: Directivité en 3D pour : (c) Arlon AD 350A (lossy) Epsilon = 3.5 et (d) Arlon AD 260A (lossy) Epsilon = 2.6

A partir des résultats de simulation en Figures III.13, III.14 et III.15, on remarque que la diminution de la permittivité entraîne une augmentation de la fréquence de résonance et de la directivité avec une

amélioration de la bande passante. Au contraire, l'augmentation de la permittivité entraîne une diminution de la fréquence de résonance et de la directivité avec bande passante plus étroit.

III.3.6 Insertion des fentes en forme rectangulaire

On va ajouter des fentes sur l'antenne patch, afin de voir son effet sur les différentes caractéristiques de l'antenne patch. La taille de la fente, sa forme et ses dimensions sont illustrés dans le tableau suivant

Tableau III.2: Dimensions des fentes de l'antenne patch en mm

Ws1	Ws2	L1_1	L1_2
6	9	2	2.5

Pour comprendre au mieux et contrôler l'effet des dimensions des fentes sur les performances du système, on étudie la variation de la longueur L1_1 et L1_2 des fentes.

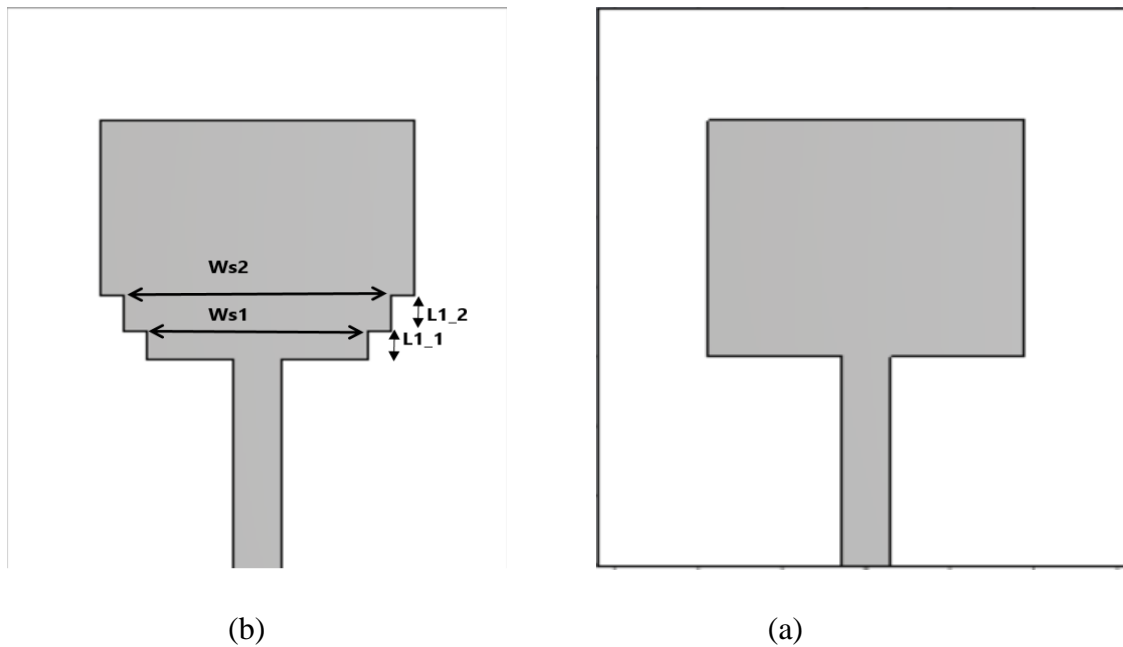


Figure III.16: Antenne patch de forme rectangulaire, (a) : sans fentes (b) : avec fentes

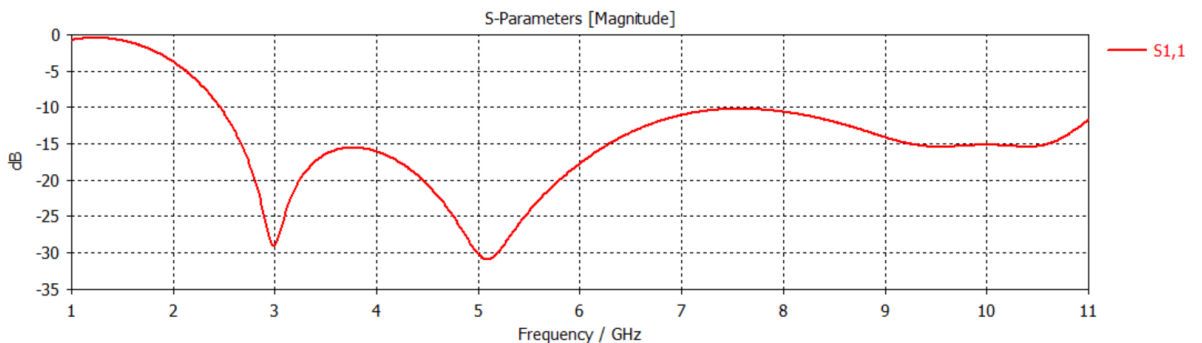


Figure III.17 : Coefficient S₁₁ pour Antenne patch de forme rectangulaire avec fentes

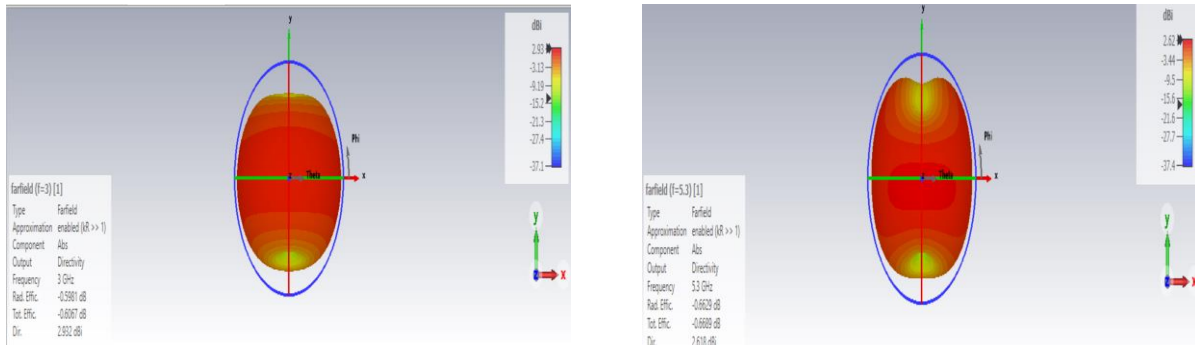


Figure III.18 : Directivité en 3D pour Antenne patch de forme rectangulaire avec slots

Il est évident des résultats de simulation du coefficient de réflexion que l’antenne est bien adaptée ($S_{11} \leq -10\text{dB}$) avec une bande passante plus large. On voit que les fentes affectent sur la bande passante et la fréquence de résonance.

III.3.6.1 Effet de la variation de de la longueur du slot de Patch ($L1_1$)

Initialement, on suppose que la fente de largeur fixe ($W_{s1}=6\text{ mm}$), la longueur sera variée de 2 mm jusqu’à 10 mm (5 cas possibles).

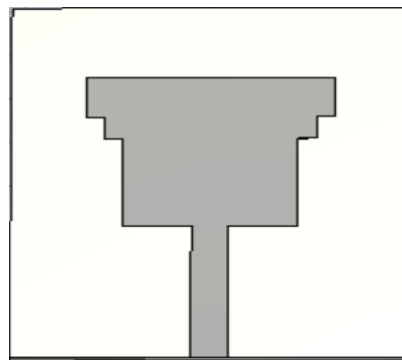


Figure III.19 : Antenne patch de forme rectangulaire pour différentes longueurs du fente ($L1_1$)

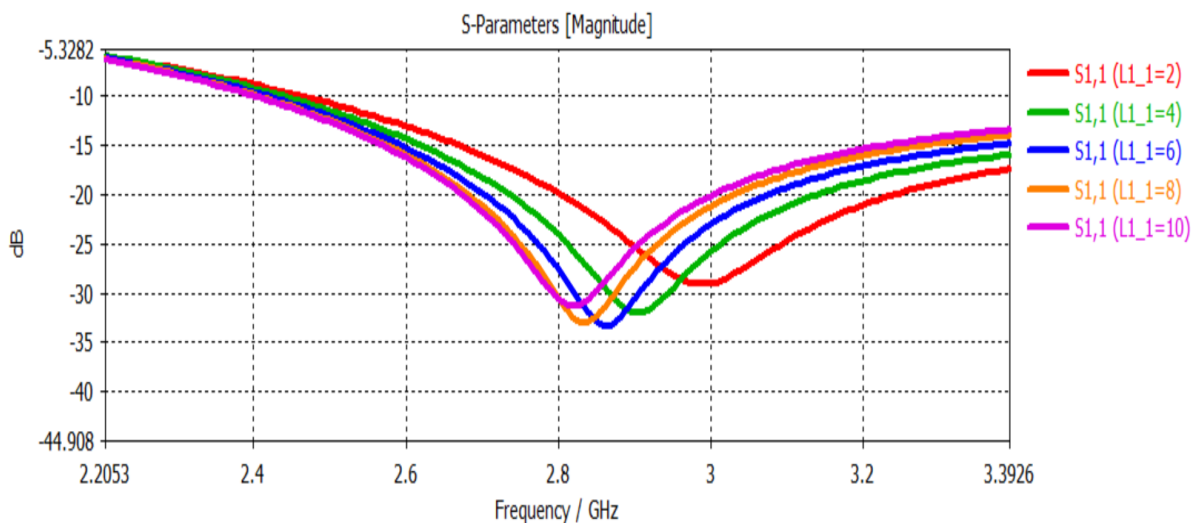


Figure III.20 : Coefficient $S11$ pour différentes longueurs de fente 1 ($L1_1$)

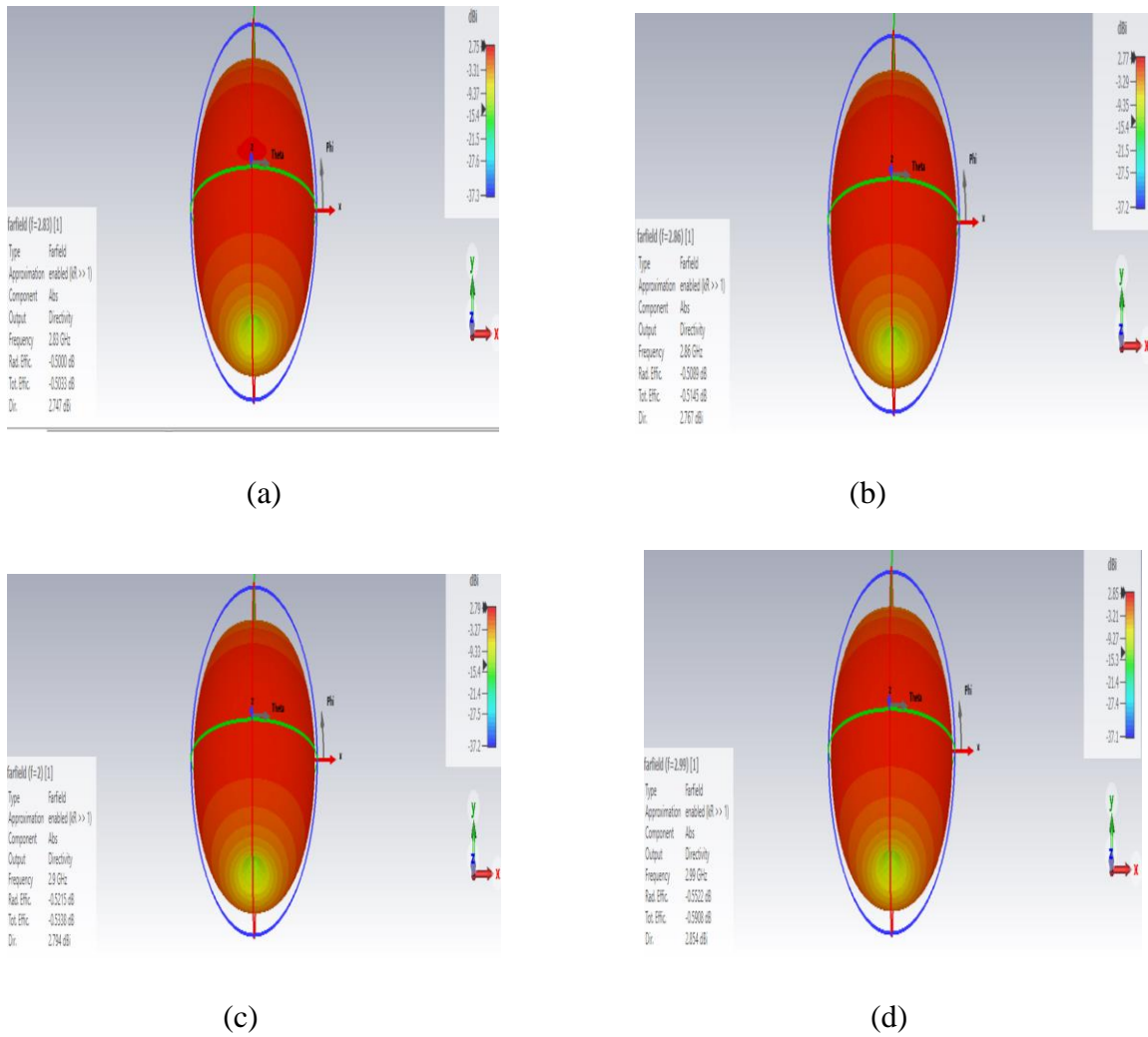


Figure III.21: Directivité en 3D pour différentes valeurs de longueur de fente $L1_2$

A partir des résultats de simulation on voit que le changement de la longueur de la fente $L1_1$ affecte les caractéristiques de l'antenne patch rectangulaire, car on remarque une diminution de la fréquence de résonance et un léger changement de la directivité de l'antenne avec une amélioration de la bande passante.

III.3.6.2 Effet de la variation de la longueur du slot de Patch ($L1_2$)

Initialement, on suppose que la fente de largeur fixe ($Ws2=9$ mm), la longueur sera variée de 2.5 mm jusqu'à 11 mm (5 cas possibles).

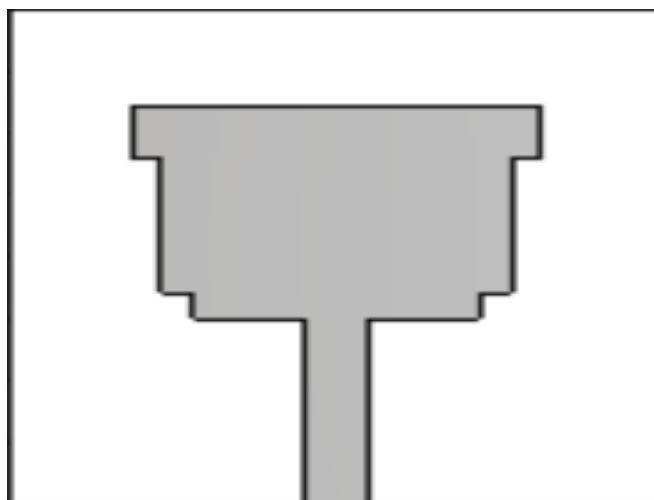


Figure III.22: de forme rectangulaire pour différentes longueurs du fente ($L1-2$)

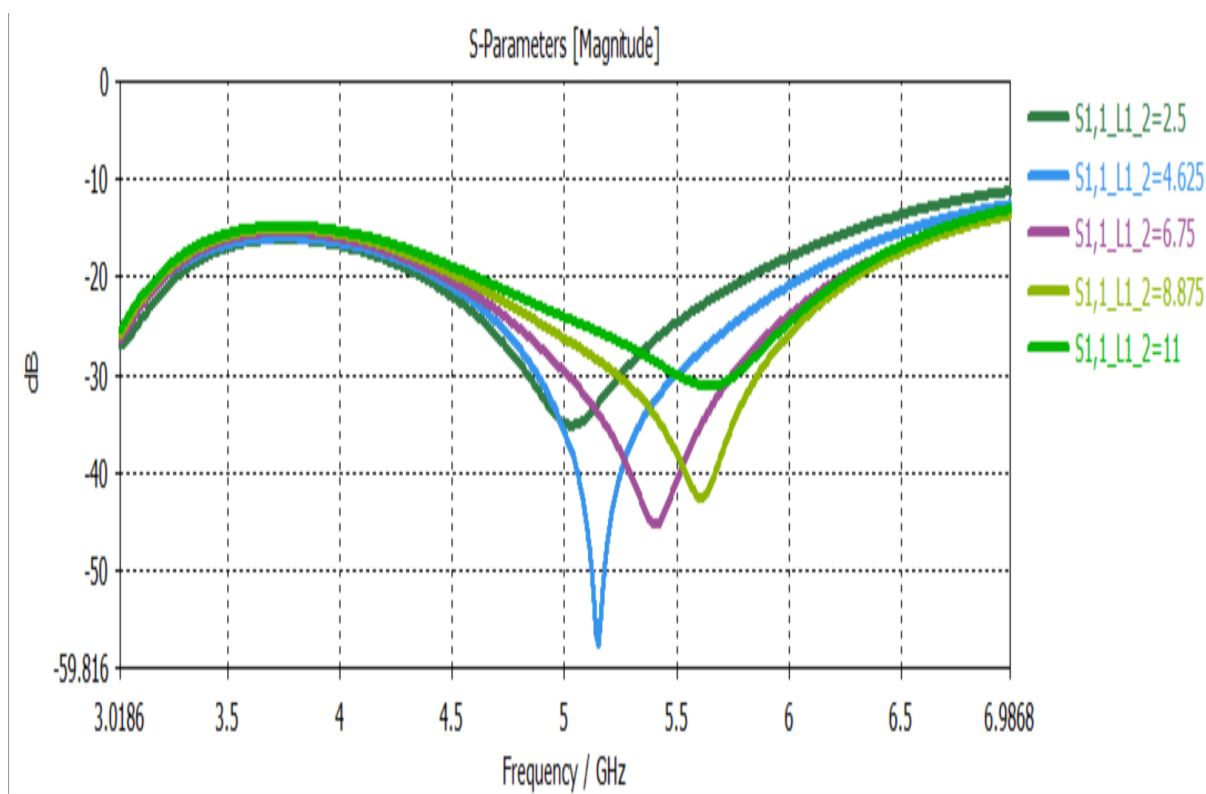


Figure III.23 : Coefficient S_{11} pour différentes longueurs du slot 2 ($L1_2$)

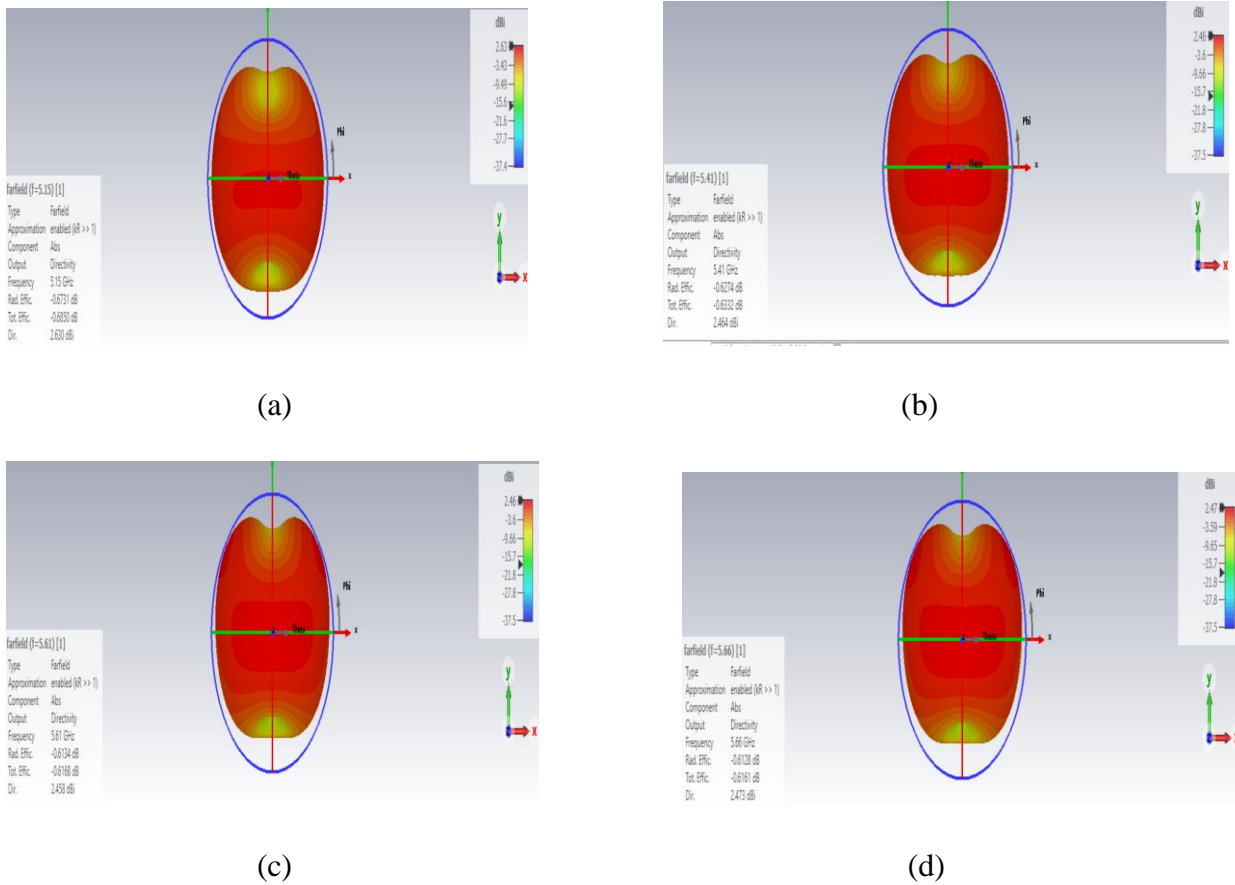


Figure III.24: Directivité en 3D pour différentes valeurs de longueur de fente $L1_2$

A partir des résultats de simulation on voit que : le changement de la longueur de la fente $L1_2$ donne une bande passante plus large et une meilleure adaptation $S11=-58.67$ dB pour $L1_2=4.62$ mm, avec un léger changement de la directivité de l'antenne.

III.3 Conclusion

Dans ce chapitre, on a fait une étude paramétrique de l'antenne patch rectangulaire, par le logiciel CST a permis on voit que l'impact de différents paramètres sur les performances de l'antenne, tels que les dimensions du patch, la position du point d'alimentation et la permittivité du substrat. Les résultats de simulation ont montré que les dimensions du patch ont un effet sur la bande passante et le gain de l'antenne. Il a également été démontré que la permittivité du substrat peut avoir un impact majeur sur la fréquence de résonance de l'antenne et donc sur sa bande passante. En considérant tous ces paramètres, il est ainsi possible de concevoir une antenne patch rectangulaire optimisée pour des applications spécifiques



Chapitre IV



*Optimisation d'une
antenne MIMO UWB*

IV.1 Introduction

Après une étude paramétrique d'une antenne patch rectangulaire dans les chapitres précédents, on a une idée sur l'effet des différents paramètres physiques sur les caractéristiques d'une antenne patch rectangulaire

L'optimisation des systèmes d'antennes à entrées multiples et sorties multiples (MIMO) à bande ultra large (ULB) joue un rôle crucial dans la réalisation de communications sans fil de haute performance. La technologie MIMO implique l'utilisation de plusieurs antennes à la fois à l'émission et à la réception, ce qui permet au système de transmettre et de recevoir plusieurs flux de données simultanément. La technologie ULB, quant à elle, utilise un large spectre de fréquences pour transmettre des signaux avec des débits de données élevés et une faible consommation d'énergie.

Dans ce dernier chapitre, On va voir L'optimisation d'un système d'antennes MIMO UWB implique divers aspects, notamment la conception de l'antenne, la configuration spatiale, le diagramme de rayonnement et les algorithmes de traitement des signaux. L'objectif est d'améliorer la capacité, la fiabilité et les performances globales du système, tout en minimisant les interférences et en maximisant l'efficacité spectrale.

IV.2 Choix de l'outil de simulation

Il existe un grand nombre des simulateurs électromagnétique consacrés pour la conception des différents circuits microondes passifs et actifs tels que les antennes imprimées dans notre cas, les filtres, et des autres circuits. Parmi ces simulateurs, on peut citer le Comsol, le CST studio, ADS Momentum, le Remcom et le Ansoft HFSS.

Dans ce mémoire, on va concevoir une antenne MIMO à deux éléments ULB avec le CST studio version 2021. L'antenne MIMO conçue est dédiée aux applications mobiles. Une optimisation robuste sera faite pour aboutir une forme finale de cette antenne MIMO de structure DGS.

IV.3 Outil de simulation CST

Comme on a mentionné dans le paragraphe précédent que le CST studio était choisi pour une simple raison, présentée dans la robustesse de cet outil dans la conception des circuits micro-ondes (Antenne imprimée) en 3D au contraire à des autres outils tels que le ADS Momentum. Le simulateur CST est un outil spécialisé pour la simulation et la conception électromagnétique en trois dimensions (3D) des composantes hautes fréquences en basant sur

la résolution des équations de Maxwell en utilisant la méthode d'intégration finie. Ce logiciel de simulation est très utilisé pour les domaines académiques, industriels et gouvernementaux. L'interface de ce simulateur est illustrée dans la Figure IV.1.

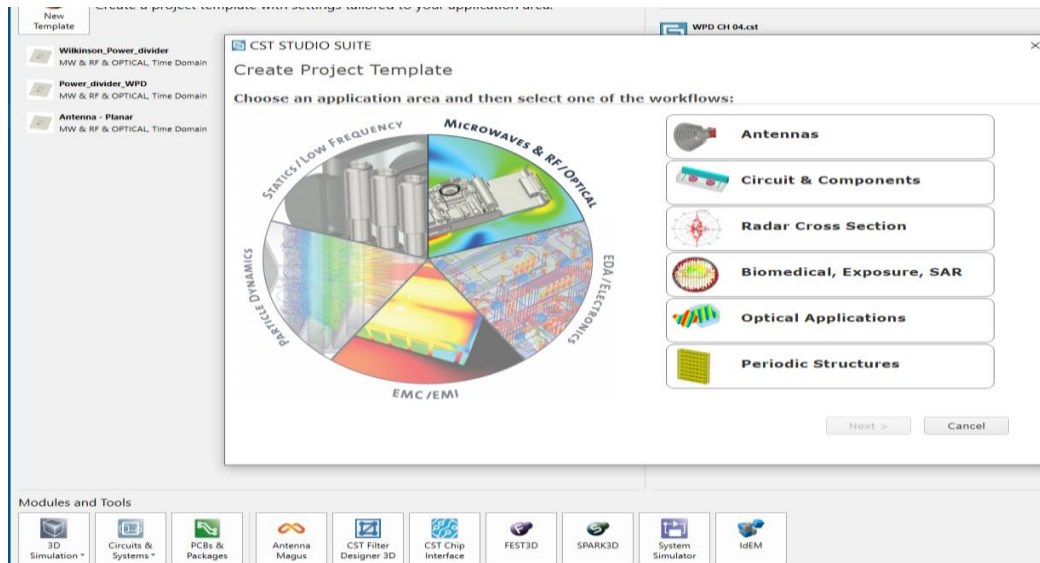


Figure IV.1 : Une interface graphique du simulateur CST studio

IV.4 Calcul de l'impédance de la ligne d'alimentation

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

Dans la modélisation d'une antenne, on va utiliser la constante diélectrique effective comme elle est exprimée par

$$\epsilon_{eff} = \left(\frac{\epsilon_r + 1}{2} \right) + \left(\frac{\epsilon_r - 1}{2} \right) \left(1 + 10 \frac{h}{W} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (IV.1)$$

Pour avoir une adaptation d'impédance, on doit utiliser le calculateur d'impédance du CST pour le modèle correspond aux antennes alimentées par une ligne d'alimentation. Ce calculateur est basé sur les équations de synthèse de Wheeler. Alors, pour avoir une impédance

d'entrée de 50Ω , on doit utiliser une largeur de feeder W_f de 3 mm pour un hauteur du substrat $h=1.6$ mm (voir Figure IV.2).

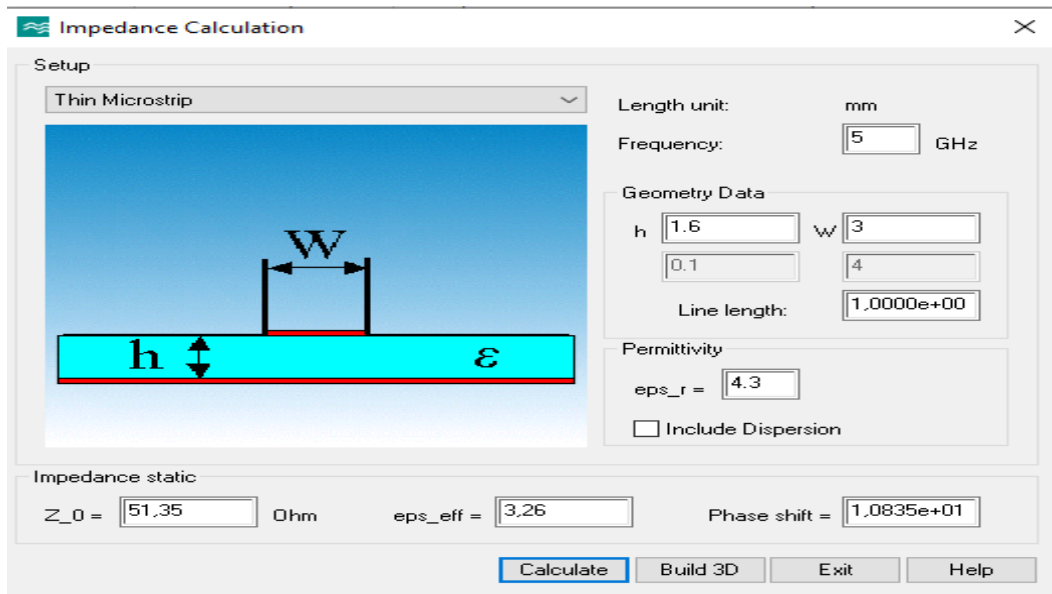


Figure IV.2 : Détermination de l'impédance caractéristique Z_0 pour w et ϵ_e donnée

Pour un substrat de type FR-4 Epoxy, où la permittivité $\epsilon_r = 4.3$, Comme le montre la figure ci-dessus, pour un port adapté ($Z_0 = 50\Omega$), les paramètres de la ligne électrique doit remplir les dimensions suivante : $h=1.6$ mm, $t=0.035$ mm, $W=3$ mm,

Notre objectif est de concevoir une antenne MIMO qui peut fonctionner sur une large bande allant de 2 GHz à 11 GHz (ce qui permet de couvrir plusieurs applications de réseaux mobiles modernes). Parmi les applications les plus recommandées, on peut mentionner WLAN avec ses deux bandes (une première bande à une fréquence 2.45 GHz et une autre bande à la fréquence 5.8 GHz). Pour aboutir à cet objectif, on doit optimiser les paramètres d'une seule antenne. Malgré que l'optimisation ne soit pas un sujet récent, mais elle est très utilisée dans de plusieurs domaines. Dans notre cas, on va utiliser une méthode d'optimisation intégré dans le CST studio. Cette méthode est présentée dans la méthode des essaims particulières ou PSO (*Particle Swarm Optimization*).

IV.5 Conception d'une antenne UWB

La conception (ou le design) d'une antenne ULB dans le CST consiste à réaliser nombreuses étapes nécessaires pour concevoir correctement et sans erreurs cette antenne dans sa forme finale.

Initialement, on choisit une antenne comme celle étudiée dans le chapitre précédent (une antenne patch rectangulaire avec un plan de masse réduit). L'antenne patch rectangulaire

proposé est conçue sur un substrat de faible cout (FR-4 avec pertes) d'une dimension de 40×40 mm² (longueur \times largeur). Ce substrat présente une permittivité relative $\epsilon_r = 4.3$, avec une perte $\tan \delta$ de 0.025 et une épaisseur h de 1.6 mm. L'épaisseur du cuivre t est approximativement 0.035 mm. Largeur du plan de masse est le même que celui du substrat, alors que le logueur est réduit comme celle tabulée dans le tableau suivant (Tableau IV.1). L'antenne est alimentée par une ligne d'alimentation d'une impédance caractéristique $Z_c = 50 \Omega$.

IV.5.1 La forme de l'antenne proposée

La forme proposée de notre antenne ULB, avec une structure Micro-ruban défectueuse (DMS) et structure de masse défectueuse (DGS), présente deux slots sur le patch comme illustré dans la figure suivante :

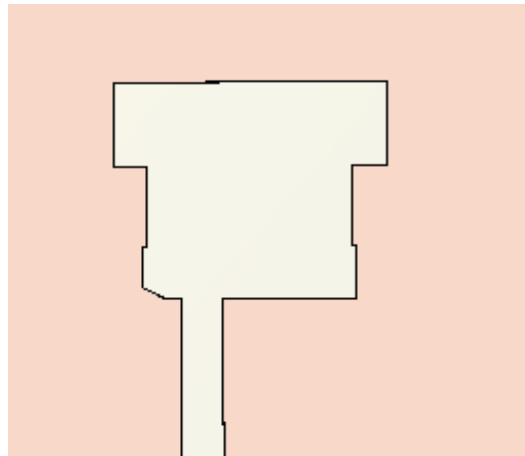


Figure IV.3 : *Forme de l'antenne proposée avec des structures DMS et DGS (plan de masse réduit)*

L'antenne ULB-MIMO proposée est illustrée dans la Figure IV.3 Composée d'un patch rayonnant de forme rectangulaire avec une structure DMS et une DGS pour la masse (le plan de masse est défectueux). L'antenne est alimentée par une ligne à micro-ruban de 50Ω . Le coefficient de réflexion S_{11} est représenté dans la Figure IV.4 qui va nous permettre de visualiser le niveau d'adaptation de l'antenne dans la bande passante qui allant de 2 à 11 GHz.

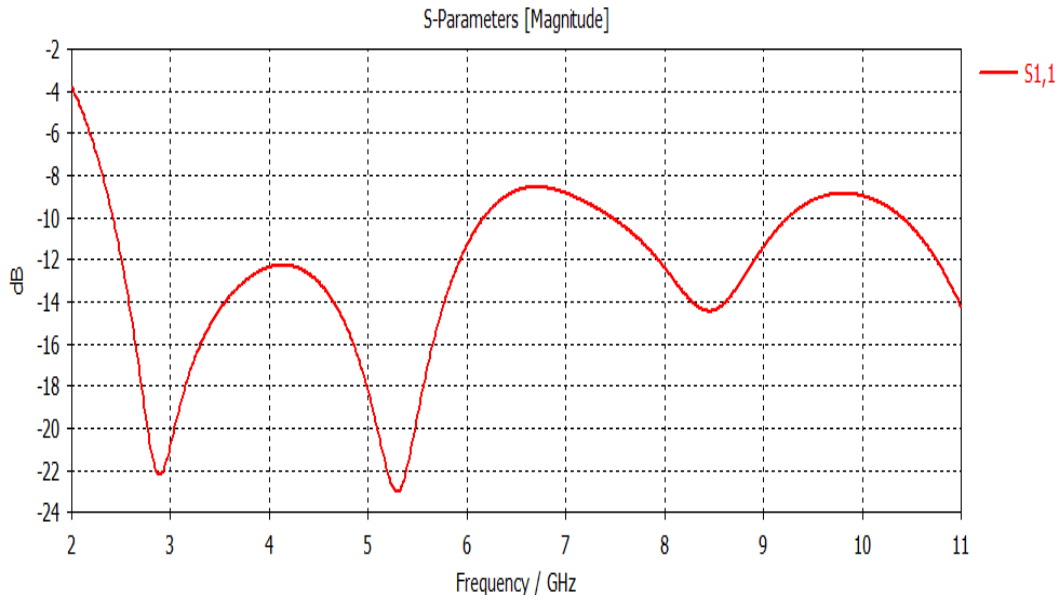


Figure IV.4 : Coefficients de réflexion pour l'antenne proposée en Figure IV.3

Les diagrammes de rayonnement sont donnés aux fréquences de résonance 2.45 GHz et 5.8 GHz.

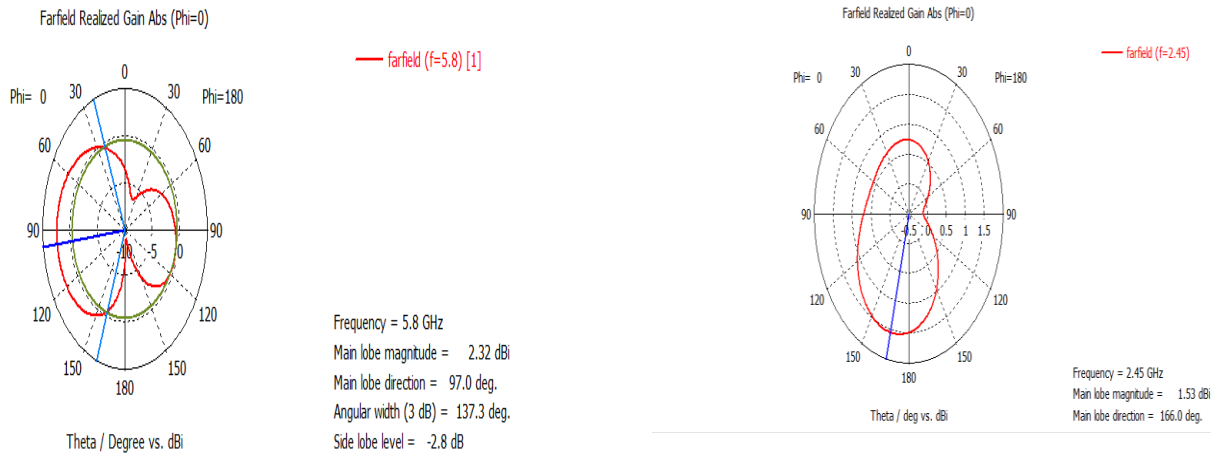
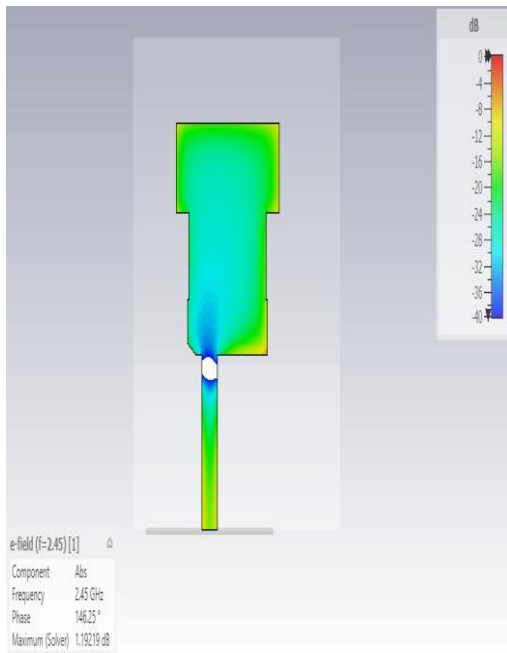
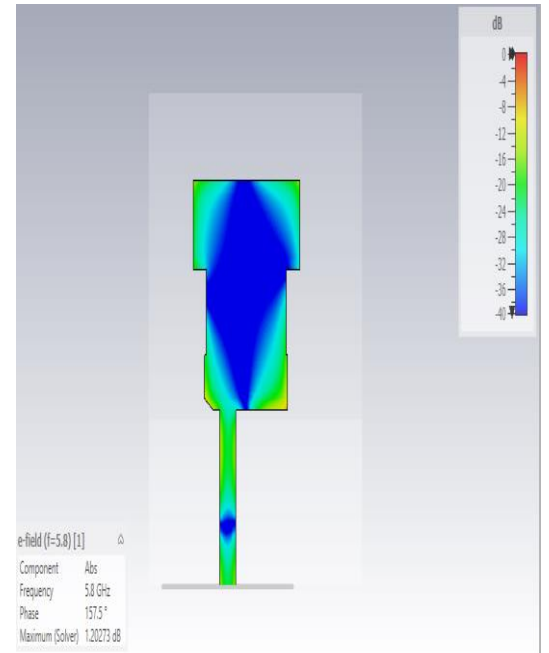


Figure IV.5 : Diagramme de rayonnement de l'antenne proposée en Figure IV.3 (aux fréquences 2.45 GHz et 5.8 GHz).



(a)



(b)

Figure IV.6 : *Distribution des courants surfacique pour l'antenne proposée en Figure IV.3 et à la fréquence 2.45 GHZ en (a) à la fréquence 5.8 GHZ en (b)*

IV.5.2 La forme de l'antenne MIMO proposée sans structure EBG

Dans cette partie, on va mettre l'antenne ULB précédente dans un réseau de deux antennes MIMO comme elle est illustrée dans la Figure IV.7.

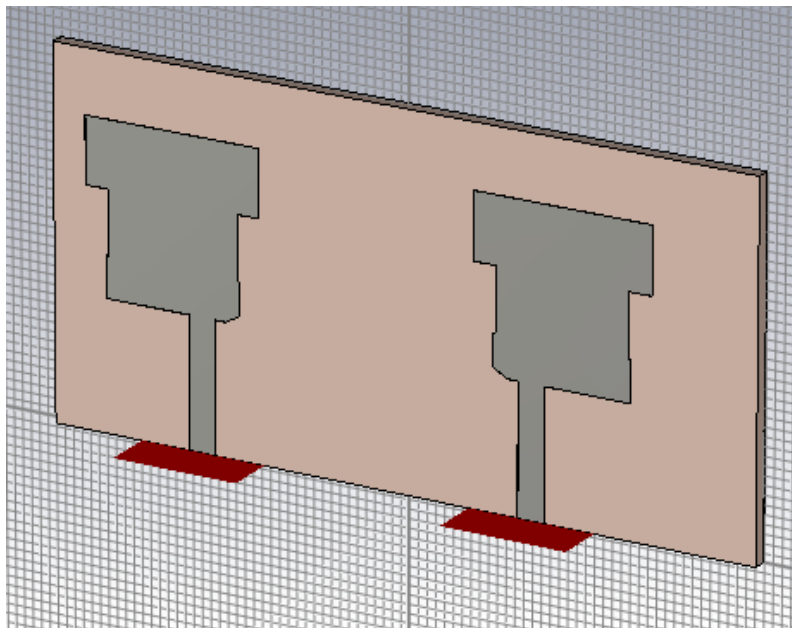


Figure IV.7 : *Forme de l'antenne MIMO proposée.*

Les paramètres S simulés de la structure proposée en Figure IV.7 sont présentés en Figure IV.8.

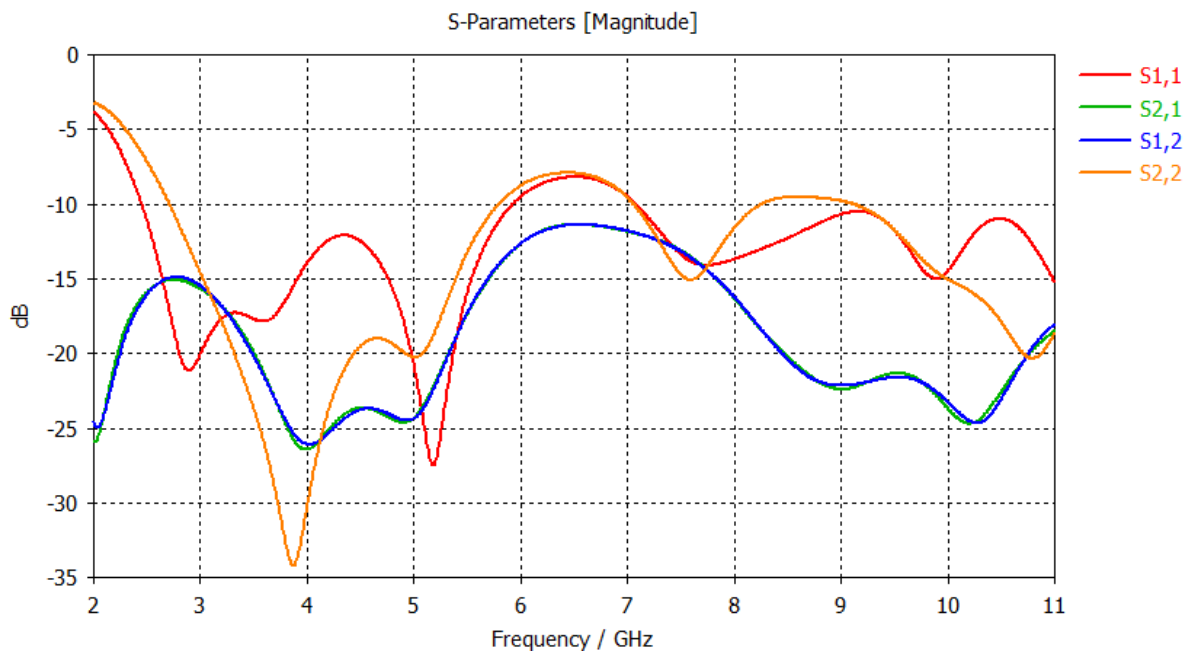


Figure IV.8 : Paramètres S pour l'antenne proposée en Figure IV.7

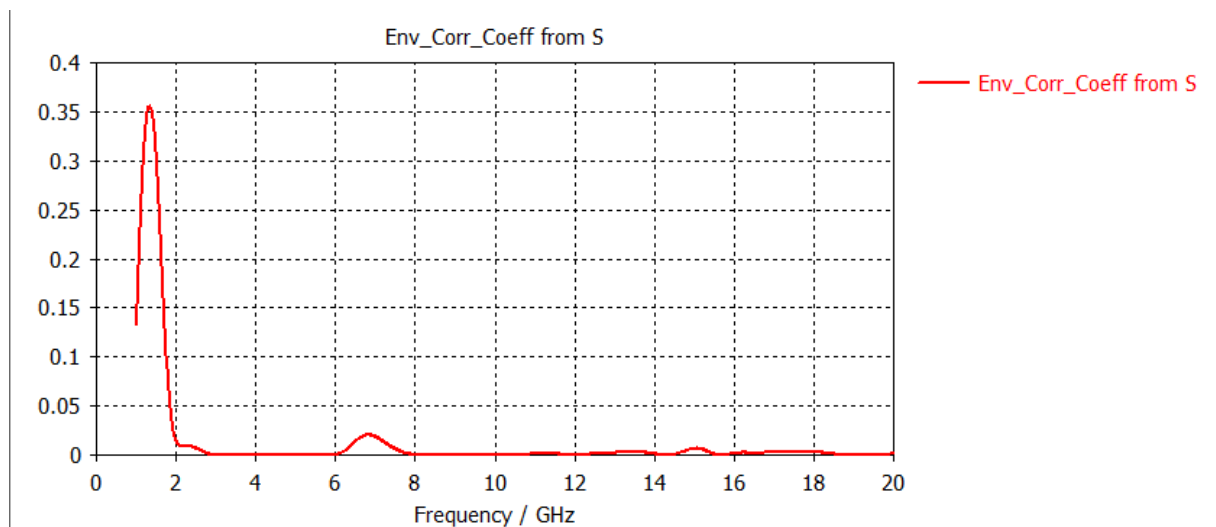


Figure IV.9 : Coefficient d'enveloppe de corrélation de l'antenne MIMO proposée en Figure IV.7 (à partir des paramètres S)

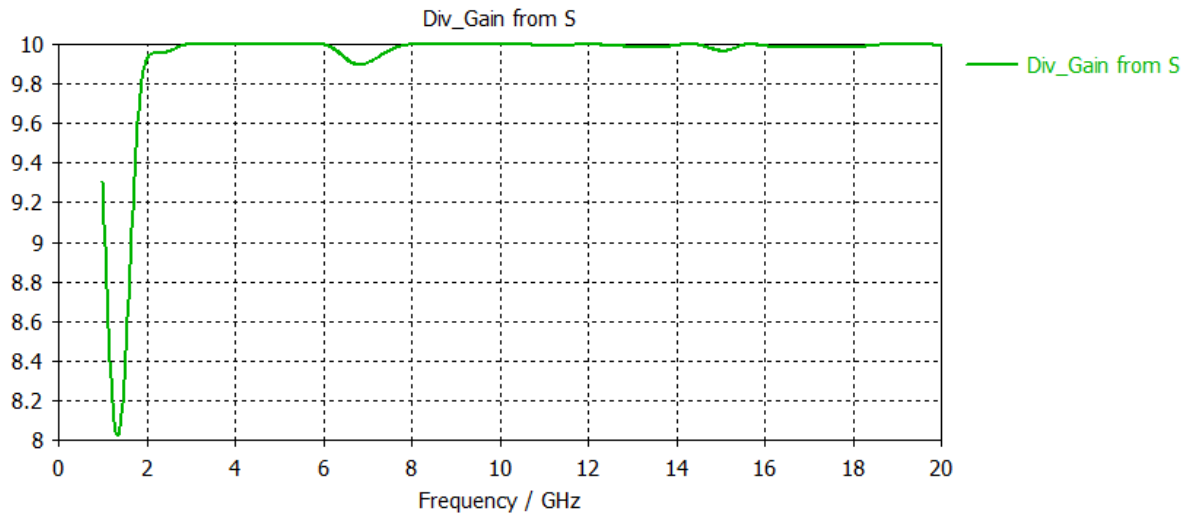


Figure IV.10 : Diversité de gain de l'antenne MIMO proposée en Figure IV.7 (à partir de la matrice S)

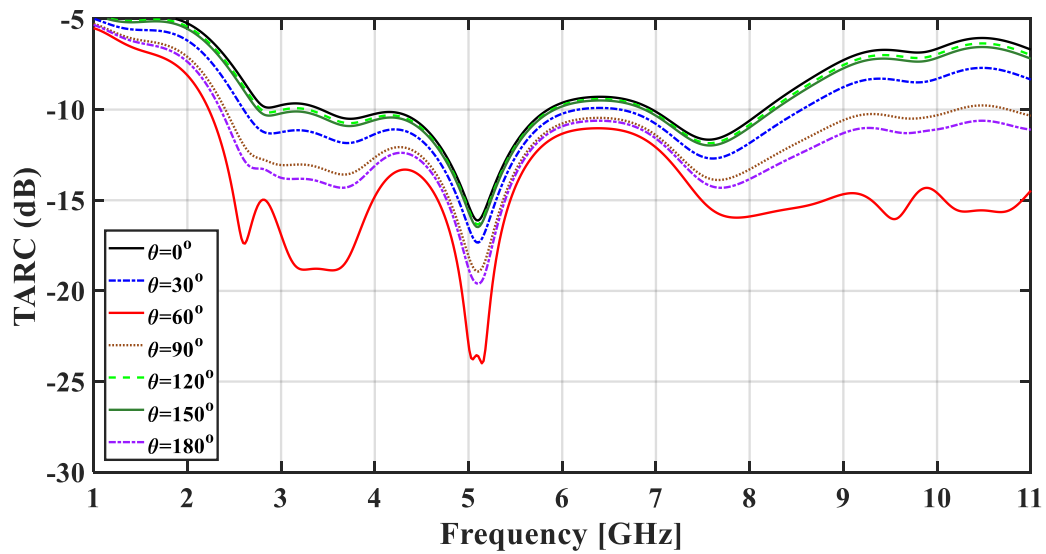


Figure IV.11 : performance de diversité (TARC) de l'antenne MIMO proposée en Figure IV.7

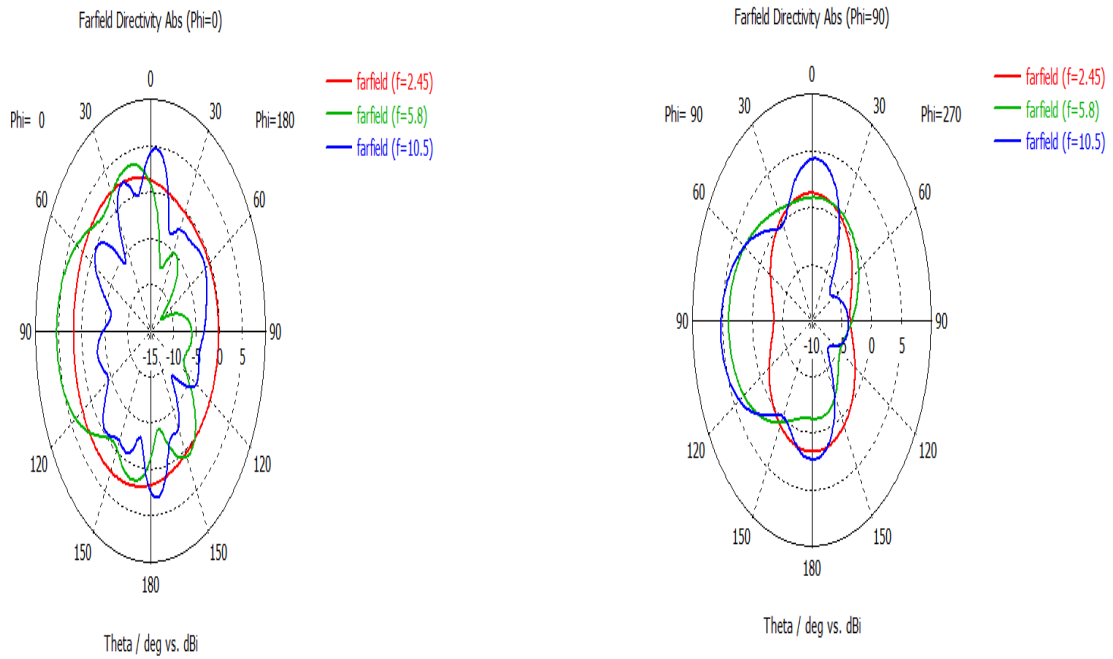


Figure IV.12 : Diagramme de rayonnement de l'antenne proposée en Figure IV.7 pour les fréquences 2.45 GHz et 5.8 GHz (port 1 est excité)

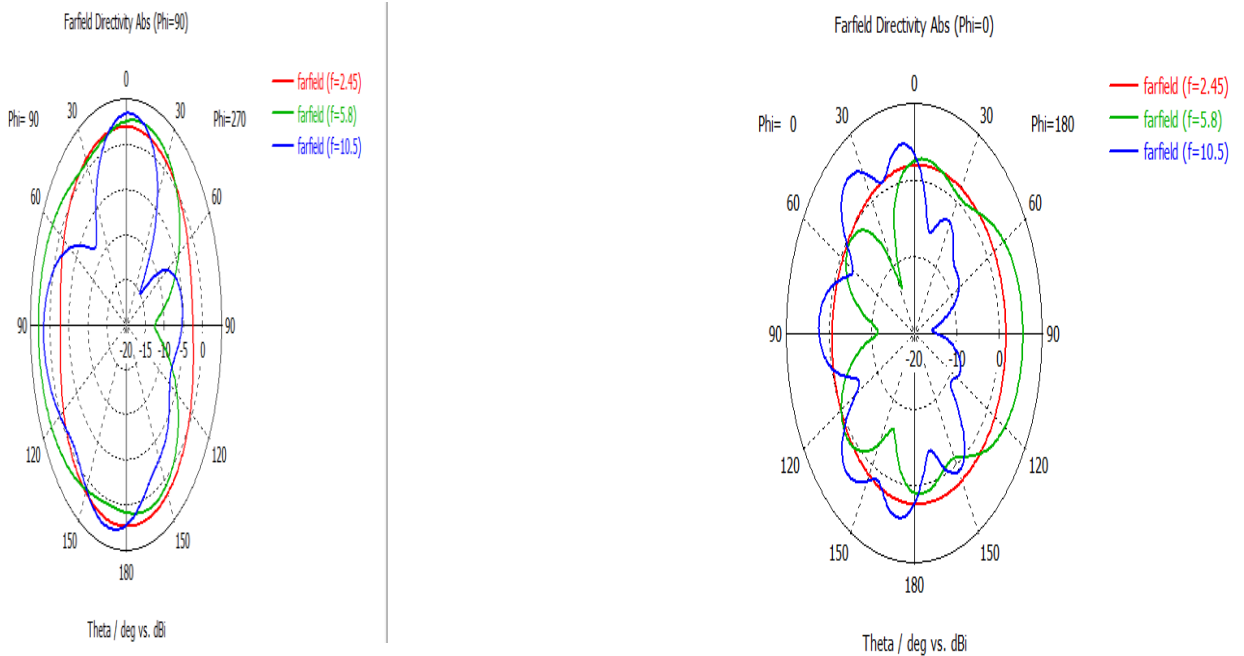


Figure IV.13 : Diagramme de rayonnement de l'antenne proposée en Figure IV.7 pour les fréquences 2.45 GHz et 5.8 GHz (port 2 est excité)

Les diagrammes de rayonnement sont donnés aux fréquences de résonance 2,45 GHz et 5,8 GHz, une fois avec le port 1 est excité et l'autre dans le cas où le port 2 est excité, ce qui donne quatre courbes.

IV.5.3 La forme de l'antenne MIMO proposée avec des structures EBG

On suppose que les deux antennes sont séparées par des cellules de forme carré avec longueur L_c . Dans cette partie, on va présenter les différents paramètres de performance d'une antenne MIMO en termes de ECC, DG et TARC.

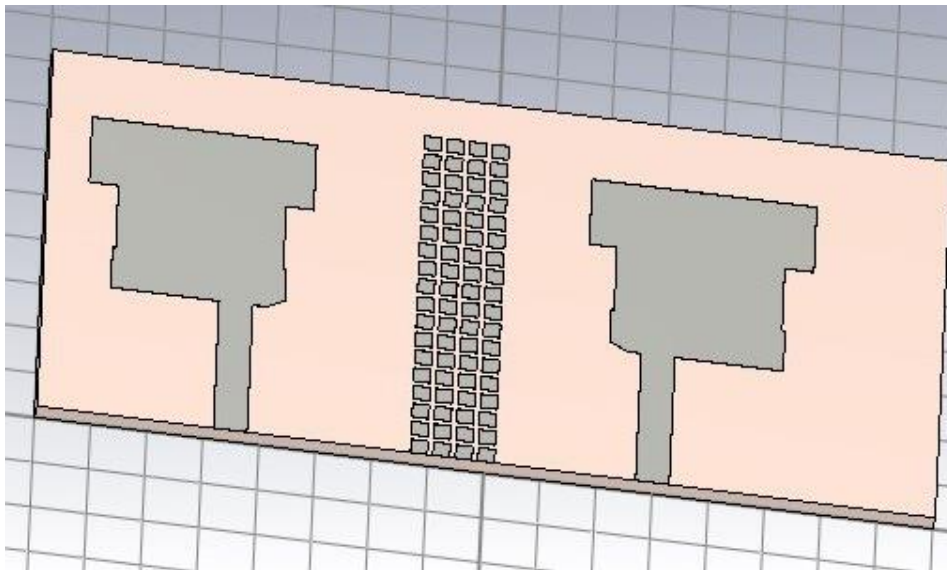


Figure IV.14 : *Forme de l'antenne MIMO après l'ajout des cellule EBG*

La Figure suivante (Figure IV.15) présente les différents paramètres S de l'antenne MIMO (Figure IV.14).

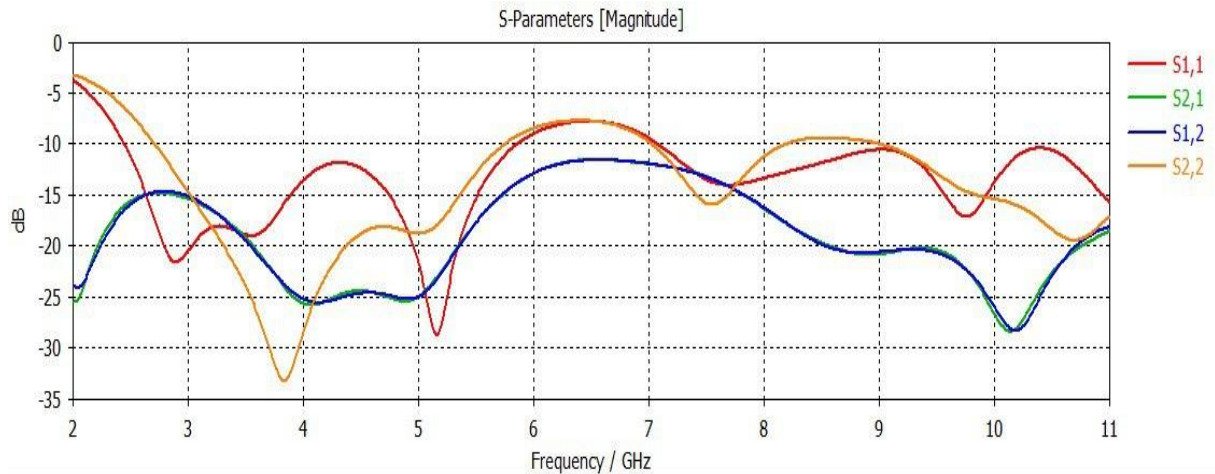


Figure IV.4 : Paramètres *S* pour l'antenne MIMO proposée en Figure IV.14

Pour voir la performance de notre antenne MIMO, on va présenter les deux paramètres de performance MIMO les plus utilisés (ECC et diversité de gain).

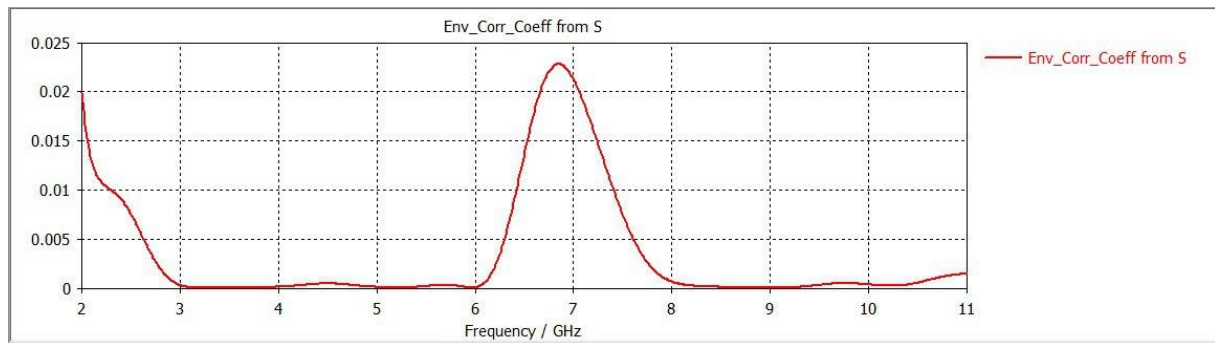


Figure IV.15 : Coefficient d'enveloppe de corrélation de l'antenne MIMO proposée en Figure IV.3 (à partir de diagramme de rayonnement)

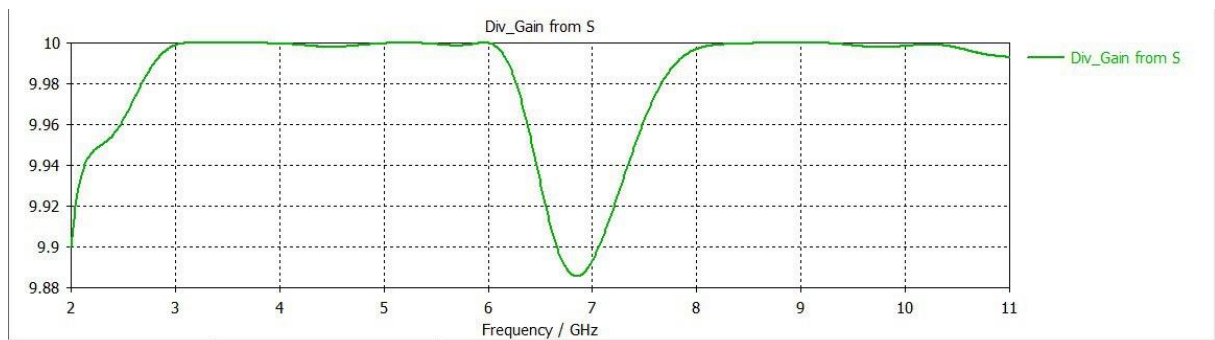


Figure IV.16 : Diversité de gain de l'antenne MIMO proposée en Figure IV.3 (à partir de la matrice *S*)

On observe que les deux paramètres de performance MIMO sont bien à la plage acceptable. Pour le ECC doit être minimale à 0.5 (notre valeur ECC < 0.025) ce qui est fortement acceptable.

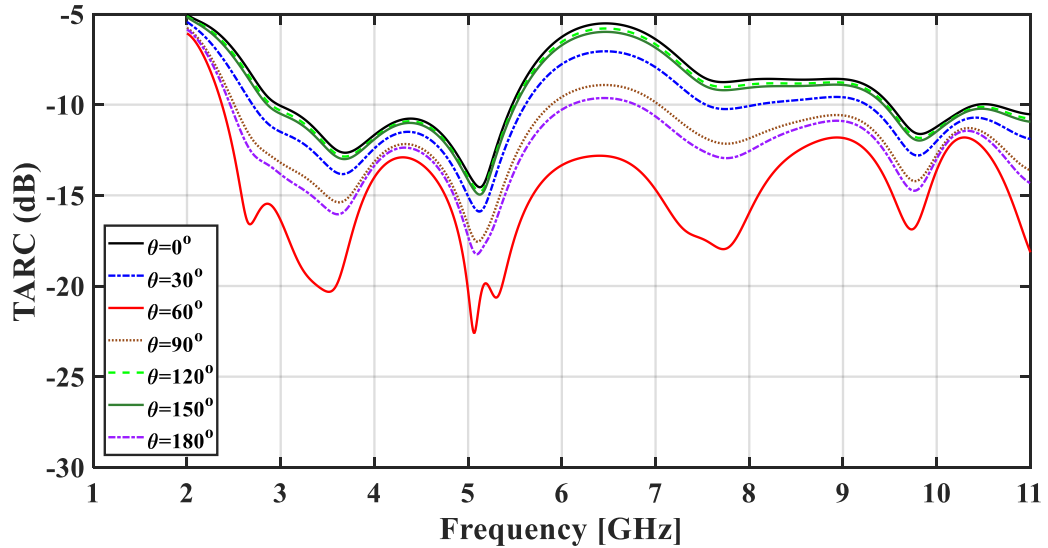


Figure IV.17 : performance de diversité (TARC) de l'antenne MIMO proposée en Figure IV.14

Tableau IV.1 : Comparaison entre l'antenne MIMO avec EBG et l'autre sans EBG

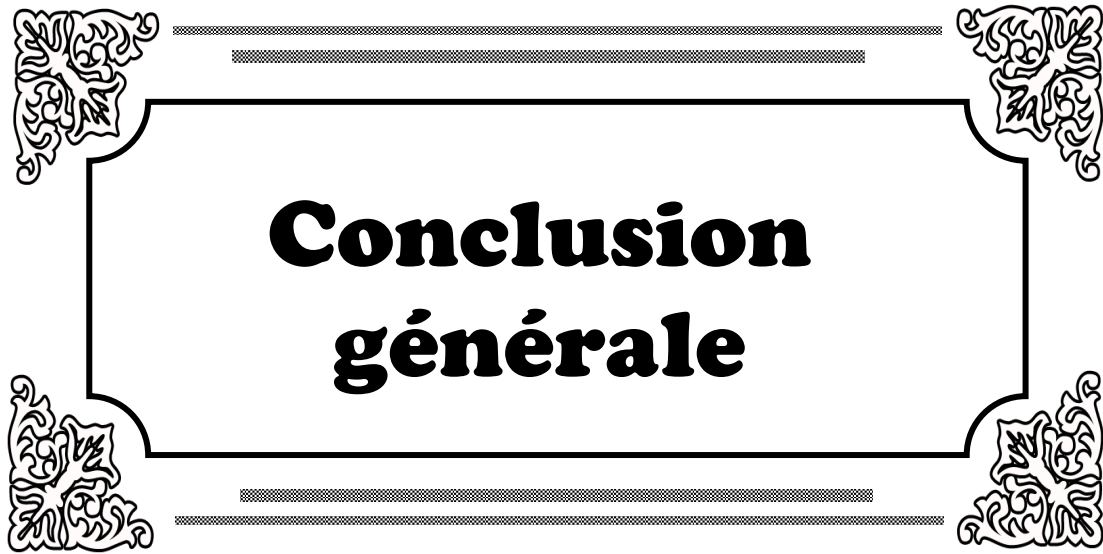
Paramètre	TARC sans EBG		TARC avec EBG	
	A 2.45 GHZ	A 5.8 GHZ	A 2.45 GHZ	A 5.8 GHZ
Valeur (dB)	-10.01	-11.35	-8.51	-10.42

On peut constater à partir des résultats montrés dans le tableau IV.1 que, la structure EBG améliore le fonctionnement de l'antenne MIMO en termes de la minimisation de TARC pour les deux bandes de fréquences 2.45 GHz et de même pour la bande 5.8 GHz.

IV.6 Conclusion

Dans ce chapitre, On a conçu une antenne MIMO à large bande ULB, avec une bande de fréquence allant de 1 à 11 GHz. On a introduit des structures DMS pour augmenter la bande de cette antenne patch conçue en utilisant des slots rectangulaires sur le patch rayonnant et de même une structure DGS au niveau de plan de masse. Cette antenne ULB est utilisée dans la

technologie MIMO (proposition de deux antennes MIMO). Dans la première partie de la conception d'une antenne MIMO, on a présenté les paramètres de performance d'une antenne MIMO tels que ECC, DG et le TARC. Pour améliorer les performances de cette antenne MIMO, on a ajouté des structures EBG entre les deux antennes.



**Conclusion
générale**



Conclusion générale

Dans ce travail, l'étude vise à concevoir une antenne MIMO ULB en utilisant le simulateur CST Studio. Pour atteindre à notre objectif, on a fait une étude paramétrique d'une antenne micro-ruban en utilisant le simulateur CST. L'antenne MIMO conçue est dédiée pour les applications mobiles.

L'objectif essentiel de notre travail était la conception d'une antenne MIMO avec des structures EBG pour les applications mobiles modernes ce qui permet de résoudre les problèmes de capacité et de couverture dans les réseaux mobiles. Généralement, la technologie MIMO permet d'augmenter la capacité du réseau en utilisant plusieurs antennes pour envoyer et recevoir des données simultanément. Les structures EBG permettent de régler les problèmes de couplage entre les antennes et d'atténuer les interférences. Les antennes MIMO couvre différents aspects tels que, les systèmes à très large bande (ULB), les antennes intelligentes, etc. Ces aspects sont liés aux défis et aux opportunités des réseaux de communication sans fil de cinquième génération (5G) et au-delà.

Dans le premier chapitre, nous avons présenté des généralités sur les antennes MIMO, leurs caractéristiques ainsi que son importance dans la télécommunication. Dans le même chapitre, on a vu les Paramètres des antennes MIMO avec leurs domaines d'application, leurs avantages et leurs inconvénients.

Dans le deuxième chapitre, on a fait un état de l'art sur les antennes MIMO, ce qui permet d'acquérir une bonne compréhension de fonctionnement de l'antenne MIMO, Nous avons également appris à connaître plusieurs méthodes pour réduire des problèmes pour améliorer les performances d'antenne MIMO, parmi lesquels nous mentionnons. L'utilisation des méthodes (EBG, DGS, CE et NL) de réduction du couplage mutuel et les comparons pour obtenir un isolement élevé entre les ports des antennes.

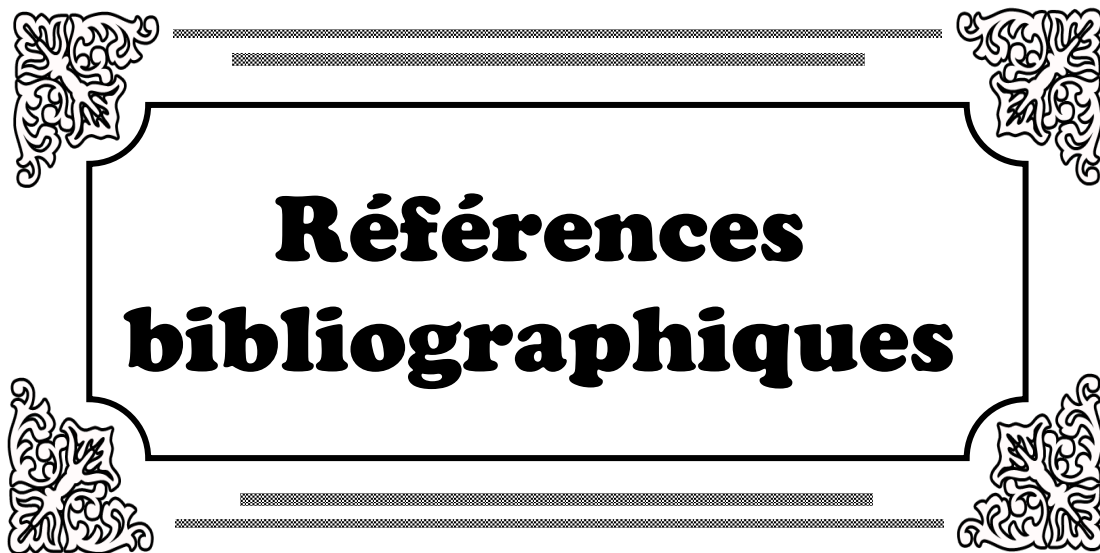
Dans le troisième chapitre, on a donné une présentation de logiciels CST et montré comment créer, simuler, et analyser une antenne patch rectangulaire en utilisant le simulateur CST MICROWAVE STUDIO. On a fait une étude paramétrique sur plusieurs paramètres d'antenne tel que la taille du plan de masse, les dimensions du patch (longueur et largeur) et la création des fentes sur le patch ...etc. pour avoir les effets des différents paramètres sur les performances de l'antenne, on a fixé certains paramètres ensuite, on varier les autres paramètres

un par un pour déterminer leur impact sur la réponse d'antenne. Puis on va observer l'influence de la variation de ce paramètre sur les caractéristiques de l'antenne.

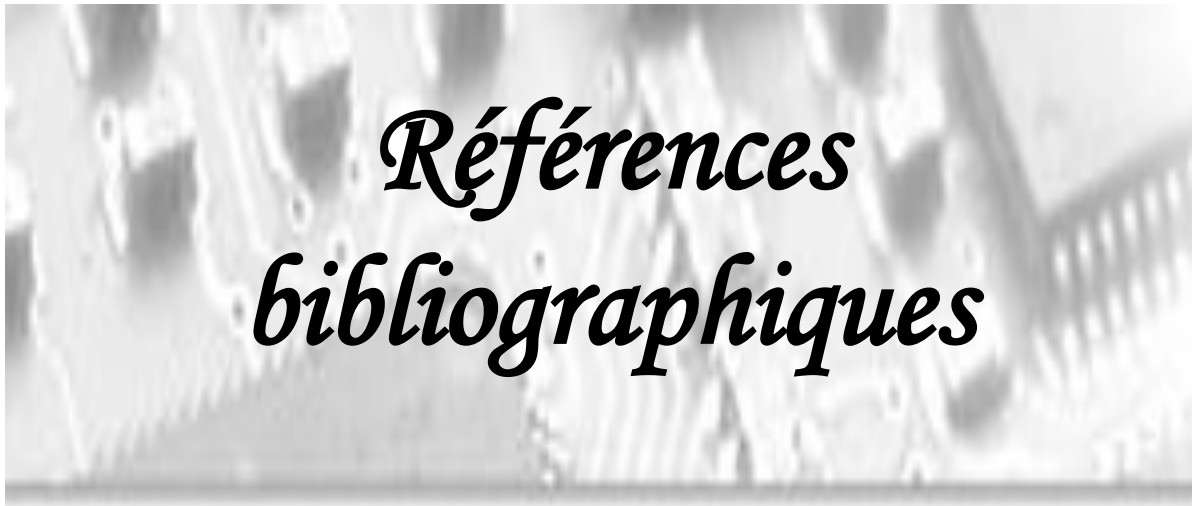
Les résultats de simulation ont montré que les dimensions du patch ont un effet sur la bande passante et le gain de l'antenne. Il a également été démontré que la permittivité du substrat peut avoir un impact majeur sur la fréquence de résonance de l'antenne et sur sa bande passante.

Dans la partie d'optimisation avec l'algorithme intégré dans le simulateur CST, nous avons utilisé plusieurs étapes importantes du programme de simulation : *identification des paramètres à varier, la gamme de variation, méthode d'optimisation choisie et les objectifs*. L'antenne MIMO conçue fonctionne dans une large bande allant de 2 à 11 GHz où elle inclut les deux bandes de fréquences correspondantes aux applications WLAN (Bi-bande : WLAN_1 et 2 ($f_1=2.45\text{GHz}$ et $f_2= 5.8 \text{ GHz}$)).

Comme perspectives pour les travaux au futur, nous avons proposé de concevoir une antenne MIMO à un grand nombre des antennes ce qui permet d'augmenter fortement la capacité de système de communications avec des performances acceptables.



**Références
bibliographiques**



*Références
bibliographiques*

Références bibliographiques

- [1] A GSA Executive Report from Ericsson, Huawei and Qualcomm, “The road to 5G: Drivers, applications, requirements and technical development,” Global Mobile Suppliers Assoc., Ericsson, Stockholm, Sweden, GSA Executive Rep., Nov. 2015.
- [2] L. Zhu, H. S. Hwang, E. Ren, and G. Yang, “High performance MIMO antenna for 5G wearable devices,” in *Proc. IEEE Int. Symp. Antennas Propag. USNC/URSI Nat. Radio Sci. Meeting*, San Diego, CA, USA, Jul. 2017, pp. 1869–1870
- [3] N. S. Jawali, V. S. Melkeri, and G. Kalnoor, “Design and Enhancement of MIMO Antennas for Smart 5G Devices,” *Microstrip Antenna Design for Wireless Applications*, pp. 169–181, Oct. 2021, doi: 10.1201/9781003093558-14.
- [4] R. Hussain, M. U. Khan, M. A. Abou-Khousa, and M. S. Sharawi, “MIMO Antennas for 5G-Enabled Devices,” *Wideband, Multiband, and Smart Antenna Systems*, pp. 95–130, 2021, doi: 10.1007/978-3-030-74311-6_4.
- [5] L. Malviya, R. K. Panigrahi, and M. V. Kartikeyan, “5G Massive MIMO Technology,” *MIMO Antennas for Wireless Communication*, pp. 27–34, Dec. 2020, doi: 10.1201/9781003080275-ch05.
- [6] S. Zhang and G. F. Pedersen, “Mobile terminal LTE MIMO antennas for 700 MHz LTE band,” 2016 10th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), Apr. 2016, doi: 10.1109/eucap.2016.7481319.
- [7] M. Hardman and S. Lindenmeier, “A Wideband Automotive 4x4-MIMO 5G Antenna System with Decoupling Circuit for a Single Shark Fin Cover,” 2023 17th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), Mar. 2023, doi: 10.23919/eucap57121.2023.10132927.
- [8] Y. Andreev, V. Koshelev, and S. Smirnov, “Characteristics of an Ultrawideband 8x8 Array of Cylindrical Helical Antennas,” 2018 20th International Symposium on High-Current Electronics (ISHCE), Sep. 2018, doi: 10.1109/ishce.2018.8521217.
- [9] G. Tsoulos, Ed., “MIMO System Technology for Wireless Communications,” *Electrical Engineering & Applied Signal Processing Series*, Mar. 2006, doi: 10.1201/9781420005929.
- [10] H. Sinha, M. R. Meshram, and G. R. Sinha, “Performance Assessment For Alamouti Coding Technique For Rayleigh Fading Channel,” *i-manager’s Journal on Communication Engineering and Systems*, vol. 2, no. 3, pp. 23–28, Jul. 2013, doi: 10.26634/jcs.2.3.2333.
- [11] Patel, Sagarkumar, “Analysis & Implementation of different detection techniques for Multiple Input Multiple Output communication system”, International conference 2012

- [12] site web: www.elliptika.com/fr/boutique/banc-de-mesure-dantennes date de visite Juin 2023.
- [13] Anjali Ashish Chaudhari, “Multiband and Wideband MIMO Antennas for Mobile Applications”, Thèse de Doctorat, University de Mumbai, 2016.
- [14] Y. Kumar, S. Tripathi, B. Raj “Multifunctional MIMO Antennas: Fundamentals and Applications”, CRC press, 2022
- [15] Amyar Amal. Conception et analyse d’une antenne MIMO fractal 4x4 pour les applications ULB. Mémoire de fin d’étude. Université 8Mai 1945 – Guelma .2016
- [16] A. Diallo. Systèmes multi-antennes pour diversité et MIMO. Autre. Université Nice Sophia Antipolis, 2007. Français. <tel-00454612>
- [17] N. Shoaib, S. Shoaib, R. Y. Khattak, I. Shoaib, X. Chen and A. Perwaiz, "MIMO Antennas for Smart 5G Devices," in IEEE Access, vol. 6, pp. 77014-77021, 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2876763.
- [18] S. Tariq, S. I. Naqvi, N. Hussain and Y. Amin, "A Metasurface-Based MIMO Antenna for 5G Millimeter-Wave Applications," in IEEE Access, vol. 9, pp. 51805-51817, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3069185.
- [19] A. A. Megahed, M. Abdelazim, E. H. Abdelhay and H. Y. M. Soliman, "Sub-6 GHz Highly Isolated Wideband MIMO Antenna Arrays," in IEEE Access, vol. 10, pp. 19875-19889, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3150278.
- [20] S. Nej, A. Ghosh, S. Ahmad, J. Kumar, A. Ghaffar and M. I. Hussein, "Design and Characterization of 10-Elements MIMO Antenna With Improved Isolation and Radiation Characteristics for mm-Wave 5G Applications," in IEEE Access, vol. 10, pp. 125086-125101, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3225446.
- [21] Z. Ren and A. Zhao, "Dual-Band MIMO Antenna With Compact Self-Decoupled Antenna Pairs for 5G Mobile Applications," in IEEE Access, vol. 7, pp. 82288-82296, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2923666.

المخلص

من أجل مواكبة متطلبات الأنظمة الخلوية الحديثة المشار إليها في الحاجة إلى دعم تطبيقات المجال الواسع. تعتبر الهوائيات متعددة المدخلات من أكثر العناصر التي تشهد تقدماً استثنائياً واهتماماً متزايداً في الوقت الحالي. مما يمكن تلبية متطلبات معدل البيانات العالية من خلال تشغيل النطاق الترددي العالي ، وتحسين الكفاءة الطيفية وإدماج نظام هوائي متعدد المدخلات (MIMO) ، خلال هذا العمل، قمنا بتصميم و تطوير هوائي متعدد المدخلات واسع التردد و الذي يعمل في نطاق 2 جيجا هرتز حتى 11 جيجا هرتز. تم تحقيق هذا الهوائي باستخدام دراسة بارامترية متعمقة سمحت لنا بالحصول على فكرة رائعة عن تأثير كل معلمة على خصائص الهوائي مثل معامل الانعكاس و عرض النطاق الترددي ، للحصول على الشكل النهائي للهوائي، تم إعادة التكوين باستعمال عملية التحسين باستخدام خوارزمية أسراب الطيور المدمجة في برنامج المحاكاة CST

الكلمات المفتاحية: هوائيات متعددة المدخلات ، هيكل DMS ، هيكل DGS ، هوائي واسع التردد ،

Abstract

To stay up with the requirements of modern cellular systems indicated in the need to support wide-field applications, MIMO antenna are regarded the most sectors that are witnessing extraordinary progress and increasing attention in the current moment. As a result, High data rate requirements can be met through high bandwidth operation, improved spectral efficiency and the incorporation of MIMO antenna system.

In this work, we developed a novel Ultra-Wideband antenna which can be functional from 2 GHz to 11 GHZ using DMS and DGS structures. The final form of the designed MIMO antenna is achieved using a deep parametric study that allow us to have a good idea about the effect of each parameter on the antenna patch such as reflection coefficient, VSWR, and directivity. The MIMO antenna was designed with reduced ground and slots on the patch. To increase the isolation between two antennas of the final structure, EBG structure are used between the antennas. an optimization process was run using the integrated PSO algorithm in the CST software.