

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلكايد - تلمسان

Université AbouBekr Belkaïd- Tlemcen – Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

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

En : Télécommunication

Spécialité : Réseau et télécommunication

Par : GOUAL Mohammed Amine Khatir

HOUARI Mohammed Fedl Allah

Conception d'un réseau d'antenne miniaturisé pour les applications 5G

Soutenu publiquement, le 20/06/2022, devant le jury composé de :

MR S.MERIAH

Pr Univ.Tlemcen

Président

MR A.BOUACHA

Pr Univ.Tlemcen

Examineur

Mme F.BOUSALAH

MCA Univ.Tlemcen

Encadrante

Mr A.M RABAH

MRA CDS Oran

Co-encadreur

Remerciements

Tout d'abord nous remercions avant tous, le grand dieu notre créateur de nous avoir donné la force, la volonté et le courage pour mener à bien ce modeste travail.

Nous remercions vivement, notre Directrice de mémoire Madame

BOUSALAH Fayza *de nous avoir pris en charges, et pour sa*

disponibilité, son aide et ses précieux conseils et aussi Mr RABAH

Amine en tant que co-encadrant qui s'est toujours montré à l'écoute et

très disponible tout au long de la réalisation de ce mémoire.

Nos vifs remerciements pour l'ensemble des enseignants du département de télécommunications qui ont contribué à notre formation d'ingénieur en télécommunications.

En fin, nous remercions tous les gens qui ont contribué de près ou de loin à ce travail.

Merci...

Dédicace

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

Je dédie ce travail à :

A ma grand-mère, qui m'a toujours poussé à aller de l'avant avec ses prières.

A mon grand-père, mon premier encadrant depuis ma naissance.

Je ne serai jamais assez reconnaissant envers eux.

A mes parents, pour leur patience, pour leurs bras chaleureux, pour avoir dissipé mes doutes.

A mes frères Wassim et Abdelillah qui m'ont accompagné de leur amour.

A mes amis de toujours Moussa et Riyad.

A Mon binôme HOUARI Fedl-Allah avec qui j'ai pu réaliser ce travail.

A toute la promo de Télécommunication dont je fais partie.

A mes professeurs tout au long du cycle de mes études qui m'ont dirigé vers la porte de réussite.

GOUAL Mohammed Amine Khatir

Dédicace

Je dédié ce travail

A ma très chère maman MALIKA, quoi que je fasse quoi que je dise je ne saurais point te remercier comme il se doit, ta présence a mes côtés a toujours été ma source de force et de réussite.

A mon très cher père NOUREDDINE, tu as toujours été mon exemple et mon support dans la vie et tu m'as toujours encouragé, je souhaite du tout cœur que dieu te guérit inchallah et te donne la santé.

A mes adorables sœurs ZINEB, SOUMIA, GHIZLENE puisse dieu leurs donne de santés bonheurs et succès et les protèges.

A mon cher grand père, mes oncles, mes tantes, ma chère tante AMARIA qui m'a toujours soutenu Allah yerhamha w Yerham tous les morts, et toute ma famille du près ou du loin.

A ma chère RIHEB, qui n'a pas cessée de m'encourager et me soutenir que je la souhaite toute la joie et la réussite.

A mes sincères amis qui sont toujours là à mes côtés jusqu'à maintenant.

Sans oublier mon binôme GOUAL AMINE pour sa patience et sa compréhension tout au long de ce projet. Merci infiniment à vous tous, que dieu vous garde pour moi.

Fedlallah

Résumé

La 5G est une nouvelle technologie de communications à travers le monde, cette dernière comporte plusieurs objectifs, dont les plus importants sont de résoudre les problèmes de saturation de la 4G en zone urbaine et de permettre la transition numérique de l'industrie et des services. Elle s'appuie sur plusieurs avancées majeures qui permettent d'améliorer la connectivité et la fiabilité, d'augmenter les débits des transferts d'information et de réduire le temps de latence (le délai de transmission des données).

Afin de miniaturiser les antennes planaires (patch); nous avons utilisé, les techniques de miniaturisations basées sur les techniques des métamatériaux. Les métamatériaux prennent de l'ampleur ces dernières années. L'utilisation de ces matériaux offre des avantages tels que la réduction du poids et de l'encombrement, ce qui est bénéfique pour leur intégration dans des systèmes électroniques tel que les systèmes de télécommunications en général et les systèmes de téléphonie pour la 5^{ème} génération (5G) en particulier. Notre travail consiste à donner un aperçu sur les antennes planaires et le mécanisme de leurs fonctionnements à base de métamatériaux, nous allons proposer une démarche de conception d'une antenne patch déposée sur un substrat monocouche en plaçant au-dessus une cellule CSRR à base de métamatériaux. Nous utiliserons aussi une autre technique de miniaturisation qui est à base d'un substrat à haute permittivité comme le silicone, pour faire ensuite une étude comparative entre les deux techniques et aussi avec celles des antennes avec le substrat FR4.

Ensuite, nous allons concevoir un réseau d'antennes à 2, 4 et 8 éléments pour avoir un gain élevé, qui est le but de notre travail pour les applications 5G. Par la suite, nous allons faire une étude de synthèse pour extraire les différents paramètres influant sur son comportement électromagnétique. L'antenne étudiée et conçue vise à être utilisée pour des applications de télécommunications et téléphoniques en 5G dans la bande de fréquence [3.3-3.8]GHz, à la fréquence de travail 3,5GHz.

Mots-clés : Silicone, FR4, Antenne planaire, CST MWS, Matlab, directivité, diagramme de rayonnement, réseau d'antenne, 5G.

Abstract

5G is a new communication technology around the world, with several objectives, the most important of which are to solve the problems of 4G saturation in urban areas and to allow the digital transition of industry and services. It builds on several major advances that improve connectivity and reliability, increase data transfer rates, and reduce latency (data delay).

To miniaturize planar antennas (patch); we used miniaturization techniques based on metamaterial techniques. Metamaterials have been gaining momentum in recent years. The use of these materials offers advantages such as reduced weight and bulk, which is beneficial for their integration into electronic systems such as telecommunication systems in general and telephony systems for the 5th generation (5G) in particular. Our work consists in giving an overview on planar antennas and the mechanism of their metamaterial-based operations, we will propose an approach of designing a patch antenna deposited on a monolayer substrate by placing above a metamaterial-based CSRR cell. We will also use another miniaturization technique based on a high permittivity substrate such as silicone, to then make a comparative study between the two techniques and also with those of the antennas with the FR4 substrate.

Next, we will design a network of 2, 4 and 8 element antennas to have a high gain, which is the goal of our work for 5G applications. Next, we will do a synthesis study to extract the various parameters influencing its electromagnetic behavior. The antenna studied and designed is intended to be used for 5G telecommunications and telephony applications in the frequency band [3.3-3.8]GHz, at the working frequency 3.5GHz.

Keywords: Silicone, FR4, Planar antenna, CST MWS, Matlab, directivity, radiation pattern, antenna array, 5G

ملخص

الجيل الخامس هي تقنية اتصالات جديدة حول العالم، وللأخيرة عدة أهداف أهمها حل مشاكل تشبع الجيل الرابع في المناطق الحضرية وتمكين التحول الرقمي للصناعة والخدمات. يعتمد على العديد من التطورات الرئيسية التي تعمل على تحسين الاتصال والموثوقية وزيادة سرعات نقل المعلومات وتقليل زمن الوصول (وقت نقل البيانات).

من أجل تصغير الهوائيات المستوية (اللاصقة) ؛ استخدمنا تقنيات التصغير بناءً على تقنيات المواد الخارقة. اكتسبت المواد الخارقة زخمًا في السنوات الأخيرة. يوفر استخدام هذه المواد مزايا مثل انخفاض الوزن والحجم ، وهو أمر مفيد لدمجها في الأنظمة الإلكترونية مثل أنظمة الاتصالات السلكية واللاسلكية بشكل عام وأنظمة الهاتف للجيل الخامس (G5) على وجه الخصوص. يتمثل عملنا في تقديم نظرة عامة على الهوائيات المستوية وآلية عملها استنادًا إلى المواد الفوقية ، وسوف نقترح نهجًا تصميميًا لهوائي التصحيح المودع على ركيزة أحادية الطبقة عن طريق وضعه فوق خلية CSRR بناءً على المواد الخارقة. سنستخدم أيضًا تقنية تصغير أخرى تعتمد على ركيزة عالية السماحية مثل السيليكون ، لإجراء دراسة مقارنة بين التقنيتين وأيضًا مع تلك الخاصة بالهوائيات ذات الركيزة FR4.

بعد ذلك ، سنقوم بتصميم مصفوفة هوائيات مكونة من 2 و 4 و 8 عناصر للحصول على مكاسب عالية ، وهو هدف عملنا لتطبيقات الجيل الخامس ، وبعد ذلك سنقوم بدراسة توليفية لاستخراج المعلمات المختلفة التي تؤثر على سلوكها الكهرومغناطيسي. الهوائي الذي تمت دراسته وتصميمه مخصص للاستخدام في تطبيقات الاتصالات والهاتف في G5 في نطاق التردد [3.3-3.8] جيجاهرتز ، عند تردد العمل 3.5 جيجاهرتز.

الكلمات المفتاحية: سيليكون ، FR4 ، هوائي مستوي ، CST MWS ، Matlab ، اتجاهية ، مخطط إشعاع ، صفيق الهوائي ، 5G.

Sommaire

Chapitre I : 5G & réseaux d'antennes imprimées	17
I.1 INTRODUCTION	17
I.2 LE RESEAU 5G	17
I.3 RESEAUX MOBILES DE 5EME GENERATION	17
I.4 VISION DE LA 5G	18
I.5 PERSPECTIVES DES RESEAUX MOBILES DE LA 5G	18
I.6 TECHNOLOGIES CLES DE LA 5G	19
I.6.1 Ondes millimétriques	19
I.6.2 Microcellules	20
I.6.3 Formation de faisceaux(Beamforming)	20
I.6.4 Full-duplex	20
I.6.5 Massive -MIMO	21
I.7 ARCHITECTURE DE RESEAU MOBILE 5G	21
I.8 DOMAINES D'UTILISATIONS DE LA 5G	22
I.9 DEFINITION D'UNE ANTENNE	23
I.10 PARAMETRES CARACTERISTIQUES D'UNE ANTENNE	23
I.10.1 Impédance d'entrée	23
I.10.2 Coefficient de réflexion	24
I.10.3 Rapport d'onde stationnaire (ROS)	24
I.10.4 Diagramme de rayonnement	24
I.10.5 Directivité	25
I.10.6 Gain	25
I.10.7 Fréquence de résonance et bande passante	25
I.11 ANTENNE IMPRIMEE	26
I.11.1 Structure d'une antenne imprimée	26
I.11.2 Avantages et inconvénients de l'antenne patch	27
I.11.3 Mécanismes de rayonnement de l'antenne patch	28
I.11.4 Techniques d'alimentation des antennes patch	28
2. Méthode de sonde coaxiale	29
3. Méthode de couplage électromagnétique	29
4. Méthode de couplage par fente.....	30
I.12 CALCUL DES DIMENSIONS D'UNE ANTENNE IMPRIMEE	30
I.13 RESEAU D'ANTENNES IMPRIMEES	31
I.14 TYPE DE RESEAUX D'ANTENNES IMPRIMEES	31
I.14.1 Réseaux linéaires	32
1.7.1.1 Facteur de réseau	32

I.14.2 Réseaux planaires.....	33
I.14.3 Réseaux circulaires.....	33
I.14.4 Réseaux cylindriques.....	34
I.14.5 Réseaux coniques.....	34
I.15 ALIMENTATION DES RESEAUX D'ANTENNES.....	35
I.15.1 Dispositifs utilisés dans les réseaux.....	35
A. Les Déphaseurs :.....	35
(a) Les déphaseurs à lignes :.....	35
(b) Les déphaseurs à ferrites :.....	35
I.15.2 Diviseurs ou combineurs.....	35
A. La jonction T.....	36
B. Diviseur de Wilkinson.....	36
C. Le coupleur par proximité.....	36
D. L'anneau hybride.....	37
I.16 TECHNIQUES D'ALIMENTATION D'UN RESEAU D'ANTENNES.....	37
I.16.1 Alimentation série.....	37
I.16.2 Alimentation parallèle.....	38
I.17 DOMAINE D'APPLICATION.....	38
I.18 AVANTAGES ET INCONVENIENTS DES RESEAUX D'ANTENNE.....	38
I.19 CONCLUSION.....	39
Chapitre II : Métamatériaux.....	44
II.1 INTRODUCTION.....	44
II.2 HISTORIQUE.....	44
II.3 DEFINITION.....	45
II.4 TERMINOLOGIE.....	46
II.5 PRINCIPES ET PROPRIETES.....	46
II.6 CLASSIFICATION DES METAMATERIAUX.....	49
II.6.1 Les matériaux doublement positifs (dps).....	49
II.6.2 Les matériaux à perméabilité négative (MNG).....	50
II.6.3 Les matériaux à permittivité négative (ENG).....	51
II.6.4 Les Matériaux doublement négatifs (DNG).....	52
II.7 APPLICATIONS LIEES AUX ANTENNES.....	53
II.8 CONCLUSION.....	56
Chapitre III : Simulations et résultats.....	60
III.1 INTRODUCTION.....	60
III.1.1 Présentation du logiciel Microwave Studio de CST.....	60
III.2 CAHIER DES CHARGES.....	61

III.2.1	Calculs théoriques des dimensions de l'antenne patch rectangulaire.....	61
III.3	RESULTATS DE CONCEPTION ET DE SIMULATION DE L'ANTENNE PATCH.....	63
III.3.1	Conception de l'antenne patch rectangulaire avec encoches	64
III.3.2	Conception de l'antenne patch avec une nouvelle structure	68
III.4	CONCEPTION ET SIMULATION DES CELLULES SRR ET CSRR	72
III.4.1	Conception et simulation de la cellule SRR ou RAF à 2 anneaux.....	72
III.4.2	Conception et simulation de la cellule CSRR ou RAFC à 2 anneaux	75
III.4.3	Conception et simulation d'une antenne patch associée aux cellules CSRR	76
III.4.4	Interprétation des résultats de simulation avant adaptation	77
III.4.5	Conception et simulation d'une antenne patch associée à une cellule CSRR avec optimisation.....	78
III.5	MISE EN PLACE D'UN RESEAU D'ANTENNES POUR LA FREQUENCE 3.5 GHZ	80
III.5.1	Réseau d'antennes à 2 éléments	81
III.5.2	Réseau d'antennes à 4 éléments	86
III.5.3	Réseau d'antennes à 8 éléments	91
III.6	MISE EN PLACE D'UN RESEAU D'ANTENNES A BASE METAMATERIAUX	96
III.6.1	Réseau d'antennes à deux éléments	96
III.6.2	Réseau d'antennes à 4 éléments	98
III.6.3	Réseau d'antennes à 8 éléments :.....	100
III.7	COMPARAISON DES RESULTATS.....	102
III.8	REUSLTATS EXPEREMENTAUX	103
III.8.1	Réseau d'antennes (2× 1) :	103
III.8.2	Mesure de coefficient de réflexion et rapport d'onde stationnaire	104
III.9	CONCLUSION.....	105

LISTE DES FIGURES

Chapitre I : 5G et réseaux d'antennes imprimées.

Figure I-1 : Techniques utilisées dans la technologie 5G [7].	19
Figure I-2 : Spectres des fréquences (ondes millimétriques) [15].	20
Figure I-3 : Massive MIMO [18].	21
Figure I-4 : Répartition des applications 5G en trois domaines d'utilisation [21].	22
Figure I-5 : Exemple d'un diagramme de rayonnement en 3D, et diagramme dans le plan YoZ (gain en dB).	25
Figure I-6 : Illustration de la bande passante à -10 dB d'une antenne.	26
Figure I-7 : La Structure de l'antenne micro ruban [29].	27
Figure I-8 : Différentes forme des éléments rayonnants [27].	27
Figure I-9 : Analogie optique du mécanisme de rayonnement [31].	28
Figure I-10 : Alimentation par une ligne micro ruban.	29
Figure I-11 : Alimentation par sonde coaxiale.	29
Figure I-12 : Alimentation par couplage électromagnétique.	29
Figure I-13 : Alimentation par couplage fente.	30
Figure I-14 : Géométrie d'un réseau antenne patch 4x4 [33].	31
Figure I-15 : Réseau antenne patch réel 4x4 [33].	31
Figure I-16 : Géométrie d'un réseau linéaire.	32
Figure I-17 : Géométrie d'un réseau planaire.	33
Figure I-18 : Géométrie d'un réseau circulaire.	33
Figure I-19 : Géométrie d'un réseau cylindrique de M anneaux de rayon a espacés d'une distance d suivant l'axe z et composés de N éléments.	34
Figure I-20 : Géométrie d'un réseau conique de M anneaux espacés d'une distance d et composés de N éléments.	34
Figure I-21 : Déphaseurs en série.	35
Figure I-22 : Déphaseurs en parallèle.	35
Figure I-23 : La jonction T.	36
Figure I-24 : Diviseur Wilkinson.	36
Figure I-25 : coupleur par proximité.	37
Figure I-26 : L'anneau hybride.	37
Figure I-27 : Alimentation en série.	37
Figure I-28 : Alimentation en parallèle.	38

CHAPITRE II : Métamatériaux

Figure II-1 : Coupe de Lycurgus en lumière réfléchiée à gauche, en lumière transmise à droite.	44
Figure II-2 : Photographie du premier méta-matériau à indice de réfraction négatif réalisé par l'équipe de David Smith en 2000.	45
Figure II-3 : Schéma du premier SRR imaginé par John Pendry [3].	45
Figure II-4 : Trièdre direct et indirect caractérisé par la règle de la main droite et main gauche respectivement : (a) milieu main droite, (b) milieu main gauche.	47
Figure II-5 : Représentation vectorielle d'une onde plane : (a) milieu main droite, (b) milieu main gauche.	47
Figure II-6 : Propagation d'ondes électromagnétique dans différents milieux.	48
Figure II-7 : Classement des matériaux en fonction du signe de leur permittivité ϵ et de leur perméabilité μ .	49
Figure II-8 : Résonateur en Anneau Fendu « RAF » (Split Ring Resonator « SRR ») introduit par Pendry...	50
Figure II-9 : (a) Réseau de RAF introduit par Pendry, (b) : Cellule unitaire du RAF.	50

Figure II-10 : Métamatériaux ENG formé par un réseau de tiges métalliques.	52
Figure II-11 : (a) cellule DNG- "SRR+Tige". (b) perméabilité et permittivité de la cellule "SRR+Tige".	52
Figure II-12 : Cellule DNG sous forme de « Ω ».	53
Figure II-13 : (a) antenne patch à large bande et leur S11 [10], (b) antenne patch avec trois cellules unitaires de type CDRR et leurs S11 [12].	54
Figure II-14 : Structures d'antenne patch monopole à bande coupée et leur S11 [14,15].	55

CHAPITRE III : Simulations & Réalisation

Figure III-1 : Interface du CST [1].	61
Figure III-2 : Antenne patch initiale (a)FR4 (b) Silicone.	63
Figure III-3 :Coefficient S11 de l'antenne patch sans encoches en fonction de la fréquence pour les substrats FR4 Silicone.	64
Figure III-4 : Antenne imprimée avec encoches (a) FR4 (b) Silicone.	65
Figure III-5 : Coefficient S11 de l'antenne patch avec encoches en fonction de la fréquence (S1,1) FR4 (S1,1_1) Silicone.	65
Figure III-6 : Taux d'ondes stationnaire (1) FR4 (2) Silicone.	66
Figure III-7 : le gain d'antenne (a) FR4 (b) Silicone.	67
Figure III-8 : Diagramme de rayonnement en 3D.	67
Figure III-9 : Diagramme de rayonnement en présentation polaire.	68
Figure III-10 : Antenne patch avec une nouvelle structure (a)FR4 (b) Silicone.	69
Figure III-11 : Coefficient S11 de l'antenne en fonction de la fréquence (S1,1) FR4 (S1,1_1) silicone.	69
Figure III-12 : le taux d'ondes stationnaire pour la nouvelle structure (1) FR4 (1_1) Silicone.	70
Figure III-13 : le gain d'antenne.	71
Figure III-14 : Diagramme de rayonnement du gain en 3d.	71
Figure III-15 : Diagramme de rayonnement en présentation polaire (a) FR4 (b) Silicone.	72
Figure III-16 : Représentation de la cellule unitaire SRR.	73
Figure III-17 : représentation des paramètres S11 et S21 qui se croisent.	74
Figure III-18 : Coefficient detransmission S21 en dB.	74
Figure III-19 :Coefficient de réflexion S11 en dB.	74
Figure III-20 : Représentation d'un résonateur complémentaire en anneau fendu (CSRR) carré.	75
Figure III-21 : Coefficient de réflexion (S11) pour la CSRR.	76
Figure III-22 : coefficient de transmission (S21) pour la CSRR.	76
Figure III-23 : Coefficients de réflexion des différentes antennes avant adaptation.	77
Figure III-24 : Différentes antennes et position des cellules CSRR avant adaptation.	78
Figure III-25 : 2CSRR horizontales sur le patch après l'optimisation.	79
Figure III-26 : Coefficient de réflexion (S11) en dB.	80
Figure III-27 : Diagramme de rayonnement en 3D.	80
Figure III-28 : Structure de jonction de la division reliée avec 2 éléments.	82
Figure III-29 : Coefficient de réflexion (1) FR4 (2) Silicone.	83
Figure III-30 : Taux d'ondes stationnaire VWSR (1) FR4 (2) Silicone.	83
Figure III-31 : Gain (a) FR4 (b) Silicone.	84
Figure III-32 : Diagramme de rayonnement en 3d (a) FR4 (b) Silicone.	85
Figure III-33 : Diagramme de rayonnement en présentation polaire (a) FR4 (b) Silicone.	86
Figure III-34 : Réseau d'antenne à 4 éléments proposé.	87
Figure III-35 : Coefficient de réflexion (1) FR4 (2) Silicone.	88
Figure III-36 : le VSWR en fonction de la fréquence (a) FR4 (b) Silicone.	88
Figure III-37 : le gain (a)FR4 (b) Silicone.	89

Figure III-38 : Diagramme de rayonnement du gain en 3d (a)FR4 (b) Silicone.....	90
Figure III-39 : Diagramme de rayonnement en présentation polaire (a) FR4 (b) Silicone.....	91
Figure III-40 : Réseau d'antenne à 8 éléments proposé.	92
Figure III-41 : Coefficient de réflexion (1) FR4 (2) Silicone.	93
Figure III-42 : le VSWR en fonction de la fréquence (a) FR4 (b) Silicone.....	93
Figure III-43 : le gain (a)FR4 (b) Silicone.....	94
Figure III-44 : Diagramme de rayonnement du gain en 3d (a)FR4 (b)Silicone.	95
Figure III-45 : Diagramme de rayonnement en présentation polaire (a) FR4 (b) Silicone.....	96
Figure III-46 : Réseau d'antennes à 2 éléments FR4 avec 2 CSRR.....	96
Figure III-47 : Coefficient de réflexion.	97
Figure III-48 : Taux d'ondes stationnaire.....	97
Figure III-49 : Diagramme de rayonnement en 3d et en présentation polaire.	98
Figure III-50 : Réseau d'antennes à 4 éléments FR4 avec 2 CSRR.....	98
Figure III-51 : Coefficient de réflexion.	99
Figure III-52 : Taux d'ondes stationnaire en fonction de la fréquence.	99
Figure III-53 : Diagramme de rayonnement en 3d et en présentation polaire.	100
Figure III-54 : Réseau d'antennes à 4 éléments FR4 avec 2 CSRR.....	100
Figure III-55 : Coefficient de réflexion.	101
Figure III-56 : Taux d'ondes stationnaire en fonction de la fréquence.	101
Figure III-57 : Diagramme de rayonnement en 3D et en présentation polaire.....	102
Figure III-58 : Réseaux d'antenne (2×1) à réaliser (face supérieure et inférieur).....	103
Figure III-59 : Réseau FR4 (2×1) test	104
Figure III-60 :Comparaison de coefficient de réflexion simulé et mesuré réseau d'antennes (2×1).....	104
Figure III-61 : Comparaison de VSWR simulé et mesuré réseau d'antennes (2×1).	105

Chapitre I : 5G & réseaux d'antennes imprimées.

Tableau I-1 : Capacités et valeurs clés 5G de l'UIT-R [10].....	18
Tableau I-2 : Comparaison entre les couches OSI et 5G [11,19].....	22
Tableau I-3 : Principales caractéristiques des domaines d'utilisations de la 5G [20].	23
Tableau I-4 :Les avantages et inconvénients de l'antenne patch [30].	27

CHAPITRE III : Simulations & Réalisation

Tableau III-1 : Dimensions des paramètres de l'antenne patch.	63
Tableau III-2 : Résultats de simulation de l'antenne imprimée initiale.	64
Tableau III-3 : Résultats de simulations avant adaptation.....	77
Tableau III-4 : Résultats de simulations après adaptation.	79
Tableau III-5 : Dimension du réseau d'antenne à 2 éléments.....	82
Tableau III-6 : Dimensions du réseau d'antenne à 4 éléments.	87
Tableau III-7 : Dimensions du réseau d'antenne à 8 éléments.	92
Tableau III-8 : tableau récapitulatif.....	103

INTRODUCTION GENERALE

Au cours de ces dernières décennies, la communication mobile a grandement contribué au développement économique et social des pays développés. Actuellement, ils font partie de la vie quotidienne de millions de personnes dans le monde, et cela devrait continuer à augmenter jusqu'à ce que cela devienne plus inévitable à l'avenir.

De nombreux opérateurs à travers le monde mettent en œuvre LTE (Long Term Evolution) pour fournir des temps d'accès plus rapides et des efficacités plus élevées que les avancées 3G et 3.5G. Il s'agit également d'une évolution 4G dans le développement et la mise en œuvre de LTE-A. Par conséquent, le nouveau système de communication mobile à venir, la cinquième génération (5G), devrait faire face à des défis majeurs [1].

La principale caractéristique des réseaux 5G est qu'ils sont conçus pour que les utilisateurs puissent se connecter et échanger entre plusieurs technologies sans fil en même temps. La 5G se concentre sur les appareils compatibles voix sur IP (VoIP), où les utilisateurs verront des taux de transfert de données élevés (débits de données envoyés) et un volume d'appels modéré. Cette technologie est conçue pour répondre à toutes les exigences des clients qui recherchent des fonctionnalités avancées de leurs téléphones mobiles [2].

Plus récemment, une partie du spectre électromagnétique connue sous le nom de bande millimétrique a été proposée pour la 5G, où plusieurs GHz de cette partie du spectre pourraient être utilisés pour fournir aux utilisateurs de téléphones mobiles des commandes à volume de données élevé et également prendre en charge les connexions entre les petites cellules. À ces fréquences, il y a un large spectre disponible car il n'est pas utilisé actuellement. Selon des mesures récentes, les fréquences 28, 38, 71-76 et 81-86 GHz sont les fréquences les plus confortables dans cette bande de spectre. En raison des courtes longueurs d'onde des ondes millimétriques, des antennes de grande capacité peuvent être fabriquées dans de petits appareils portables et des stations de base [3], [4], [5], [6].

L'antenne patch est conçue pour satisfaire ces besoins, c'est un conducteur métallique de forme particulière placé sur un substrat terminé par un plan de masse ; ses caractères en miniature offrent la possibilité de l'intégrer facilement dans les systèmes d'émission réception.

Notre objectif est d'étudier, de concevoir, d'optimiser et de caractériser une antenne à base de métamatériaux à la fréquence de résonnance 3.5GHz avec un maximum de compacité et une plus grande largeur de bande.

Le but de ce mémoire est de d'étudier l'influence des cellules CSRR en vue d'applications aux antennes.

Ce manuscrit est divisé en trois chapitres :

Le premier chapitre est divisé en deux parties : la première partie présente une description générale sur les antennes imprimées (principe, types, paramètres), ensuite une vue générale sur les antennes patch et leurs caractéristiques ainsi que certaines techniques d'alimentation et le mécanisme de rayonnement.

La deuxième partie traitera l'évolution des technologies des réseaux de télécommunications de la 5ème génération dans le domaine des communications (Architectures, structures, composants, fonctionnement, domaines d'applications, ...).

Dans le second chapitre, nous présentons une synthèse bibliographique sur les métamatériaux avec une analyse de modélisation des différents éléments qui constituent les matériaux main gauche, en s'appuyant sur la cellule SRR (RAF) et sa cellule complémentaire CSRR (RAFC).

Le troisième chapitre est consacré dans la première partie à une description de l'environnement de l'outil de simulation des champs électromagnétiques, le CST Studio Suite (Central Standard Time) qui est un logiciel électromagnétique en 3D.

La deuxième partie parlera de la méthode utilisée pour l'extraction des paramètres effectifs (perméabilité, permittivité et indice de réfraction) à partir des coefficients de réflexion S_{11} et de transmission S_{21} suite aux simulations réalisées par le logiciel CST.

La troisième partie sera consacrée à la modélisation de l'antenne patch rectangulaire puis à l'application de plusieurs cellules métamatériaux CSRR sur le patch et le plan de masse de plusieurs antennes misent sous réseaux afin de miniaturiser la structure.

Nous avons ensuite fait une étude comparative entre les différents réseaux d'antennes utilisant les matériaux FR4 et le silicone afin d'étudier l'influence des matériaux sur les différents paramètres de l'antenne étudiée et aussi sur les réseaux.

Nous terminons par une conclusion générale qui résume l'essentiel de ce travail suivi de perspectives envisageables et possibles.

CHAPITRE I :

5G & réseaux d'antennes imprimées

Chapitre I : 5G & réseaux d'antennes imprimées

I.1 INTRODUCTION

Les antennes sont des composants essentiels des systèmes de réseaux mobiles. Il permet Convertir les ondes de courant/tension en ondes électromagnétiques se propageant dans l'espace. Les antennes imprimées sont largement utilisées dans les terminaux Réseaux 3G et 4G. Cette technologie a attiré beaucoup d'attention et devrait être pour les réseaux 5G.

Comme les réseaux 5G nécessitent de nouvelles bandes de fréquences telles que les ondes millimétriques, ces antennes imprimées doivent s'adapter à ce nouvel usage pour répondre à ce nouveau besoin génération. Nous aborderons trois techniques différentes ; la 5ème Régénération des réseaux mobiles, antennes mmWave et imprimées.

Dans ce chapitre, nous présentons les différents types d'antennes utilisées dans le domaine de télécommunications, leurs descriptions, leurs mécanismes de fonctionnement ainsi que leurs avantages et inconvénients.

I.2 LE RESEAU 5G

Les antennes sont un élément essentiel des systèmes de réseaux mobiles. Il convertit les ondes courant/tension en ondes électromagnétiques se propageant dans l'espace. Les antennes imprimées sont largement utilisées dans les terminaux des réseaux 3G et 4G. Cette technologie a attiré beaucoup d'attention et devrait être utilisée dans les réseaux 5G. Les réseaux 5G nécessitant de nouvelles bandes de fréquences comme les ondes millimétriques, ces antennes imprimées doivent s'adapter à ce nouvel usage afin de répondre aux exigences de la nouvelle génération. Dans ce chapitre, nous aborderons trois technologies différentes ; les réseaux mobiles, en (mm) Wave et la cinquième régénération des antennes imprimées.

I.3 RESEAUX MOBILES DE 5EME GENERATION

La 5G est la prochaine génération de technologie de télécommunications sans fil après les générations précédentes de téléphones mobiles. Il est conçu pour améliorer la vitesse et la réactivité des réseaux sans fil. Selon certaines estimations, les données peuvent être transférées sur des connexions à haut débit en utilisant cette technologie à des vitesses allant jusqu'à 20 Gbit/s, plus rapides que les réseaux câblés, et avec des latences égales ou inférieures à 1 ms pour une utilisation en boucle [7].

L'objectif de la 5G est de fournir une gamme de nouveaux services, la 5G vise à [8] :

1. **10 fois plus de débits expérimentés** : L'ère des débits de pointe plus uniformes et multi Gbps.
2. **10 fois moins de temps de latence** : Les niveaux de latence devraient être aussi bas que 1 ms.

3. **10 fois plus de densité de connexion** : Activation de la connectivité IoT avec peu de complexité et de surcharge de signalisation.
4. **Augmentation de 3 fois dans l'efficacité spectrale** : Une utilisation plus efficace de la bande passante.
5. **100 fois plus de capacité de trafic** : Réseaux très densifiés avec plus de points d'accès partout.
6. **100 fois plus d'efficacité du réseau** : Réseaux énergétiquement efficaces avec traitement de signal et matériel efficaces.

I.4 VISION DE LA 5G

Les systèmes de communication mobile et sans fil 5G nécessiteront une combinaison de nouveaux concepts de système pour améliorer le spectre et l'efficacité énergétique. La vision et les exigences d'un système sans fil 5G sont décrites ci-dessous [9].

Capacités clés	Définition	Valeurs
Débit maximal de données	Débit de données maximum atteignable par utilisateur	20 Gb/s
Taux de données expérimenté par l'utilisateur	Débit de données minimum atteignable pour un utilisateur dans un environnement réseau réel	0.1-1 Gb/s
Latence	Durée entre la transmission d'un paquet de données du nœud source et la réception réussie au nœud de destination	1 ms par voie hertzienne
Mobilité	Vitesse relative entre le récepteur et l'émetteur sous certaines conditions de performance	500 km/h
Densité de connexion	Nombre total d'appareils connectés par unité de surface	106/ km ²
Efficacité énergétique	Nombre de bits pouvant être transmis par joule d'énergie	100 fois comparé avec IMT – Avancé
Efficacité du spectre	Débit de données par unité de ressource spectrale par cellule (ou par unité de surface)	3-5fois comparé avec IMT -

Tableau I-1 : Capacités et valeurs clés 5G de l'UIT-R [10].

I.5 PERSPECTIVES DES RESEAUX MOBILES DE LA 5G

La 5G participera sans aucun doute au développement économique et apportera des améliorations dans tous les domaines tels que [11].

- ✚ **Agriculture** : Développé en utilisant des capteurs et des moteurs, par exemple, pour mesurer et connecter la qualité du sol, la pluie, la température et le vent pour surveiller la croissance des cultures.

- ✚ **Véhicules** : de nombreuses applications sont liées à la communication sans fil intelligente, telles que la gestion des routes, la communication de véhicule à véhicule et la prévention des accidents.
- ✚ **Santé** : comprend des améliorations petites ou complexes telles que des exercices de contrôle, des capteurs de santé grand public, la connectivité sans fil dans les hôpitaux, la surveillance des patients, la télémédecine, la téléchirurgie, etc [12].

I.6 TECHNOLOGIES CLES DE LA 5G

La 5G reprend les technologies déjà utilisées avec la 4G LTE (tel que les bandes de fréquence de la 4G), mais se différencie sur plusieurs points très importants. Elle fait également appel à de nouvelles bandes de fréquences comme les ondes millimétriques permettant d'augmenter notablement le débit au détriment de la portée. En plus de cela, la 5G propose de nouvelles technologies comme celles illustrées dans la Figure I-1.

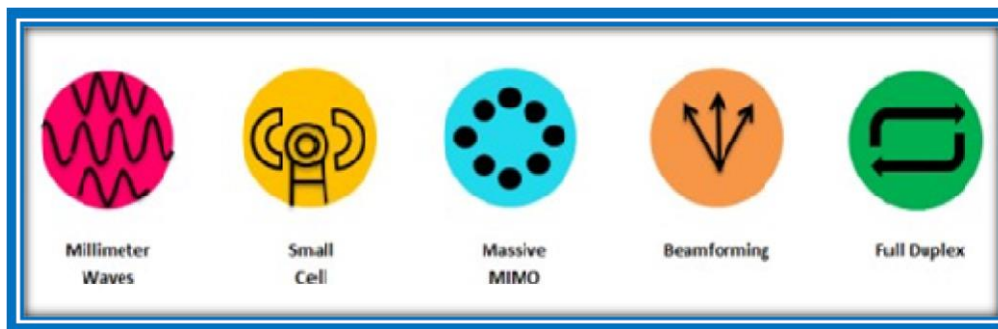


Figure I-1 : Techniques utilisées dans la technologie 5G [7].

I.6.1 Ondes millimétriques

Les ondes millimétriques sont un candidat prometteur et pratique pour les futurs réseaux cellulaires 5G. Le spectre des ondes millimétriques comprend des fréquences de 30 GHz à 300 GHz, correspondant à des longueurs d'onde de l'ordre du millimètre (de 1 mm à 1 cm) (voir Figure I-2). Au cours de la dernière décennie, la plupart des appareils électroniques ont communiqué dans des bandes de fréquences inférieures à 6 GHz. Cette bande est très congestionnée en raison du nombre d'objets connectés, et plus le nombre est élevé, plus la qualité de service est mauvaise.

L'utilisation de fréquences plus élevées et de bandes de fréquences plus larges est importante pour désencombrer le réseau. La haute fréquence permet à plus d'informations de passer par seconde. L'augmentation du spectre permet également d'augmenter le nombre de canaux de transmission. Cependant, mmWave présente certains inconvénients. Ces ondes traversent difficilement les obstacles, ont une portée plus courte et sont facilement absorbées par des obstacles tels que des murs, des arbres ou la pluie. Pour résoudre ces problèmes, nous devons

utiliser de nouvelles technologies, dans lesquelles l'antenne est un élément essentiel qui doit être optimisé [13], [14].

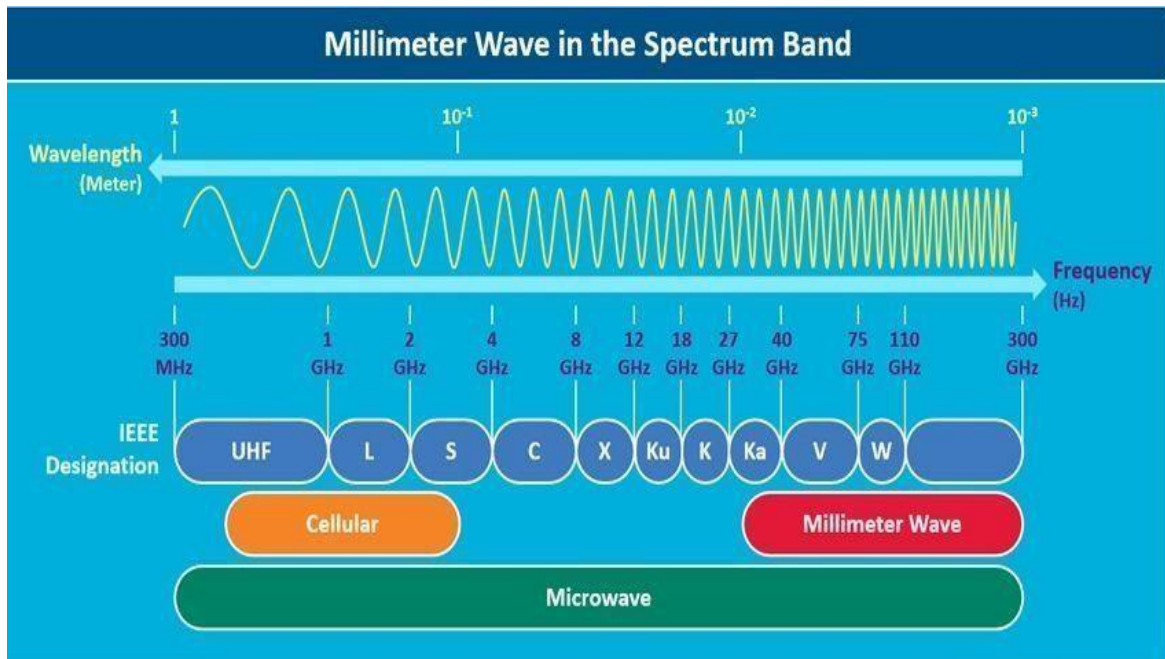


Figure I-2 : Spectres des fréquences (ondes millimétriques) [15].

I.6.2 Microcellules

D'une part, la taille de la cellule diminue ou le nombre d'utilisateurs par cellule diminue [16], et d'autre part, l'efficacité spectrale de la région augmente. Augmentez la capacité globale du réseau en réutilisant le spectre et en réduisant les cellules.

I.6.3 Formation de faisceaux(Beamforming)

Positionnez les vagues dans la direction de chaque objet spécifique. Cette précision augmente l'efficacité du signal et réduit les interférences, consommant ainsi moins d'énergie tout en économisant de l'énergie et de la bande passante [17].

I.6.4 Full-duplex

Pour éviter les interférences, la transmission et la réception sans fil ne se produisent généralement pas dans la même bande de fréquences. Par conséquent, afin d'obtenir des signaux en quadrature sans interférence, tout système bidirectionnel doit utiliser soit le domaine fréquentiel FDD, soit le domaine temporel TDD pour séparer les canaux de liaison montante et descendante. Le full duplex permet l'émission et la réception simultanées en même temps et sur la même bande de fréquence. Afin de doubler la capacité du réseau, le réseau 5G utilisera le duplex intégral pour la transmission du signal. Cette technique en

duplex intégral augmente les interférences du signal avec les échos qui sont facilement éliminés par les techniques d'égalisation au niveau du récepteur.

I.6.5 Massive -MIMO

Pour répondre aux demandes de débit croissantes d'un grand nombre d'utilisateurs, les systèmes sans fil actuels utilisent la technologie MIMO pour atteindre une efficacité spectrale et une efficacité énergétique élevées.

Alors que le nombre d'utilisateurs sans fil augmente de manière exponentielle, les nouvelles technologies MIMO telles que le MIMO mono-utilisateur (SU-MIMO) et le MIMO multi-utilisateur (MU-MIMO) ne suffisent pas à répondre à la demande croissante.

Massive MIMO est la technologie la plus excitante de la 5G et au-delà, regroupant des centaines, voire des milliers d'antennes dans les stations de base, desservant simultanément des dizaines d'utilisateurs.

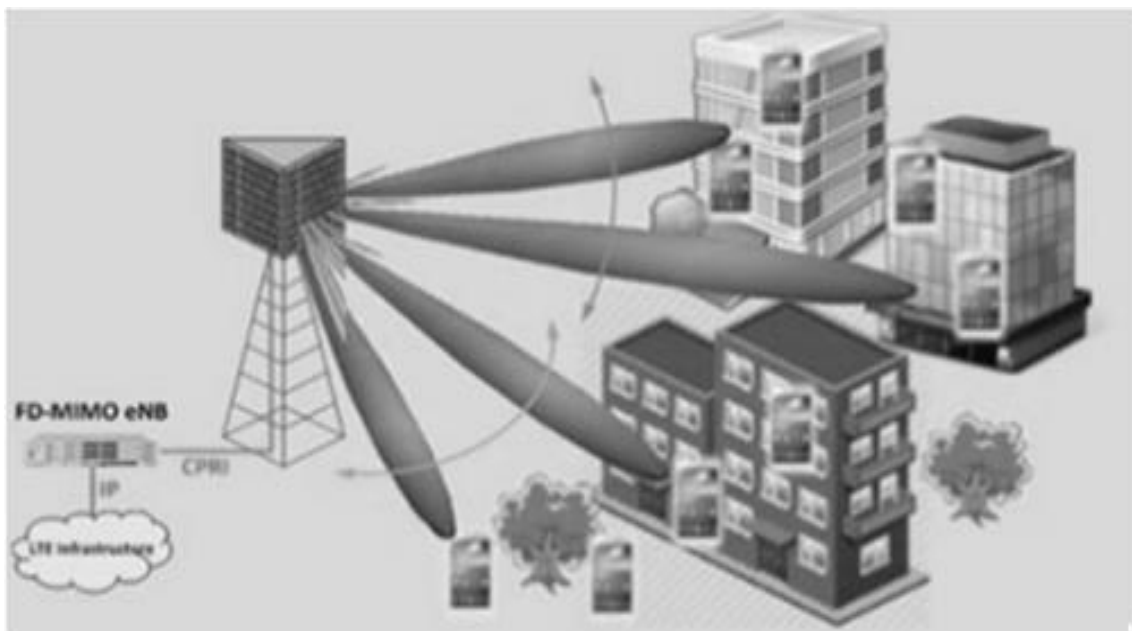


Figure I-3 : Massive MIMO [18].

I.7 ARCHITECTURE DE RESEAU MOBILE 5G

Le concept 5G correspond à la couche OSI (Open Systems Interconnection). Il existe quatre couches de base utilisées dans la 5G. Le tableau I.2 montre la comparaison entre les couches OSI et 5G [11].

Couche application	Application (services)
Couche présentation	
Couche session	Protocole de transport ouvert (OTP)
Couche de transport	
Couche réseau	Couche réseau supérieure
	Couche réseau inférieure
Couche liaison de données (MAC)	Architecture sans fil ouverte (OWA)
Couche physique	

Tableau I-2 : Comparaison entre les couches OSI et 5G [11,19].

I.8 DOMAINES D'UTILISATIONS DE LA 5G

L'UIT envisage trois cibles d'utilisation pour la 5G dans plusieurs domaines : le haut débit mobile amélioré (eMBB), les communications ultra-fiables à faible latence (URLLC) et les communications de masse de type machine (mMTC) (Figure I-4) [20]. Le tableau I.3 décrit les principales caractéristiques des domaines d'utilisation.

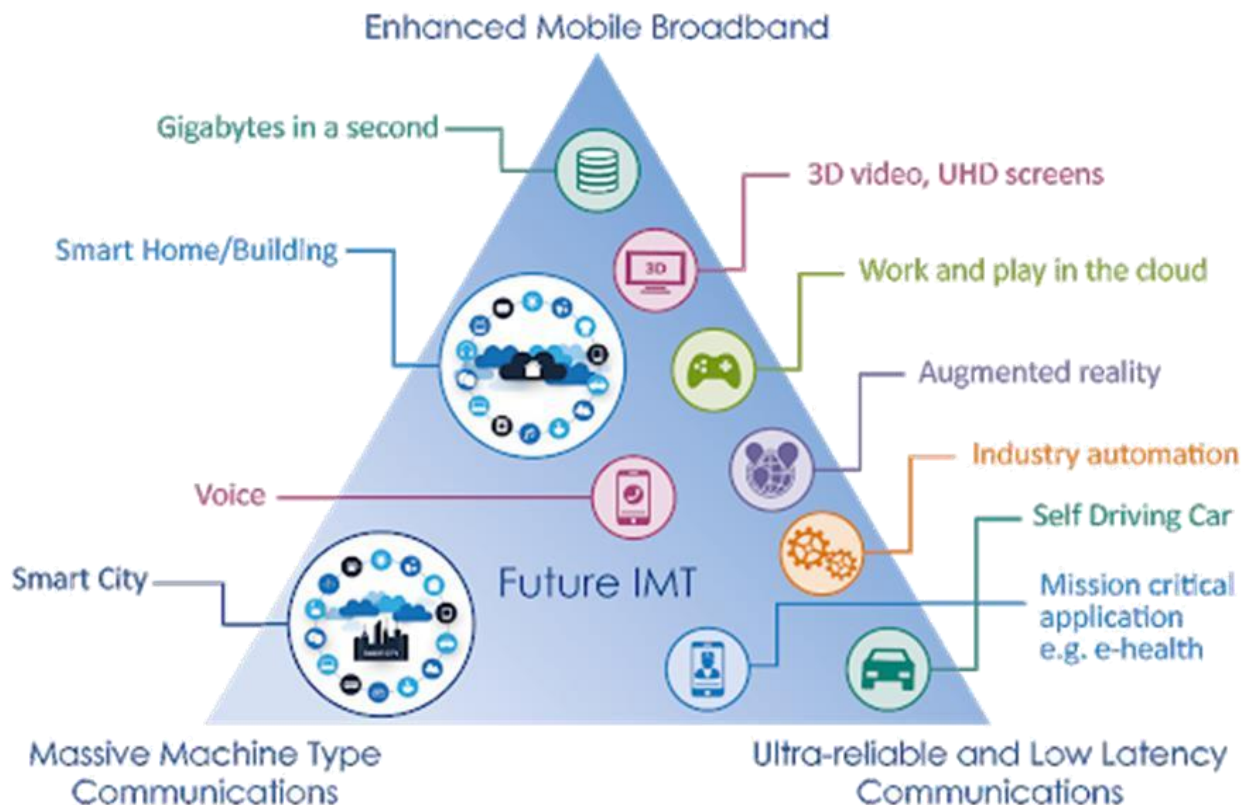


Figure I-4 : Répartition des applications 5G en trois domaines d'utilisation [21].

Enhanced Mobile Broadband (eMBB)	Massive Machine-Type Communication (mMTC)	Ultra-Reliable and Low Latency Communication (URLLC)
<p>Les principales caractéristiques de ce domaine d'utilisation sont : un débit de données élevé et variable (jusqu'à 20 Gbit/s), ainsi qu'une densité d'utilisateurs élevée et une grande mobilité (exemple TGV). L'accès mobile à haut débit amélioré assure une transition en douceur entre le réseau fixe et le réseau mobile</p>	<p>Ce domaine d'utilisation se caractérise par un très grand nombre d'appareils connectés (Internet des objets (IoT)), qui transmettent généralement un faible volume (peu d'octets) de données et ne sont pas sensibles au temps. Les appareils doivent être avantageux et avoir une très grande autonomie (durée de vie des piles jusqu'à 10 ans).</p>	<p>Ce domaine est caractérisé par des connexions fiables et/ou sensibles au temps avec des vitesses de transmission garanties, des temps de latence assurés de quelques millisecondes et une probabilité de défaillance définie (exemples : commande à distance de machines, gestion de l'énergie dans les réseaux intelligents (smart grids) ou commande de véhicules autonomes).</p>

Tableau I-3 : Principales caractéristiques des domaines d'utilisations de la 5G [20].

I.9 DEFINITION D'UNE ANTENNE

Une antenne est un dispositif qui permet de transformer l'énergie électrique en énergie électromagnétique en émission et vice versa en réception afin d'assurer la transmission sans fil de l'information. On peut qualifier les antennes comme des adaptateurs d'impédances entre l'espace et l'émetteur ou le récepteur [22].

I.10 PARAMETRES CARACTERISTIQUES D'UNE ANTENNE

Une antenne est caractérisée par différents paramètres qu'on peut classer soit en caractéristiques électriques, soit en caractéristiques de rayonnement.

I.10.1 Impédance d'entrée

L'impédance d'entrée est définie comme étant l'impédance présentée par une antenne à ses bornes ; elle est égale au rapport de la tension \mathcal{V}_e sur le courant \mathbf{I}_e présenté à l'entrée [23] :

$$Z = \frac{V_e}{I_e} = R + jX \quad (\text{I.1})$$

I.10.2 Coefficient de réflexion

Le coefficient de réflexion est un paramètre qui quantifie la quantité de signal réfléchi par rapport au signal incident. En général, le coefficient Γ est lié à l'impédance d'entrée Z_e et à l'impédance caractéristique Z_c de l'antenne :

$$\Gamma = \frac{Z_e - Z_c}{Z_e + Z_c} \quad (\text{I.2})$$

Signalons qu'on peut représenter Γ sous forme de paramètre S en dB tel que :

$$S_{11} = 20 \log g(\Gamma) \quad (\text{I.3})$$

I.10.3 Rapport d'onde stationnaire (ROS)

Standing Wave Ratio (ROS) ou VSWR en anglais signifie Voltage Standing Wave Ratio, qui, comme le coefficient de réflexion, reflète l'adaptation ou l'inadéquation de l'impédance entre deux composants. Lorsque l'adaptation n'est pas parfaite, une partie de l'onde réfléchie se superpose à l'onde incidente pour former une seule onde, dite onde stationnaire. Elle est définie comme le rapport de la valeur maximale (+V) à la valeur minimale (-V) de l'amplitude de l'onde stationnaire, qui est donnée par la relation suivante [24] :

$$\text{ROS} = \frac{(+v) + (-v)}{(+v) - (-v)} \quad (\text{I.4})$$

Il est lié au coefficient de réflexion Γ par la relation :

$$\text{ROS} = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} \quad (\text{I.5})$$

I.10.4 Diagramme de rayonnement

Le diagramme de rayonnement d'une antenne représente la variation de la puissance rayonnée par unité d'angle solide dans différentes directions de l'espace. Sauf dans le cas d'antennes omnidirectionnelles sur certains plans, une antenne ne rayonne pas sa puissance uniformément dans toutes les directions de l'espace [22].

Il est donné par la relation suivante :

$$r(\theta, \varphi) = \frac{p(\theta, \varphi)}{p(\theta_0, \varphi_0)} \quad (\text{I.6})$$

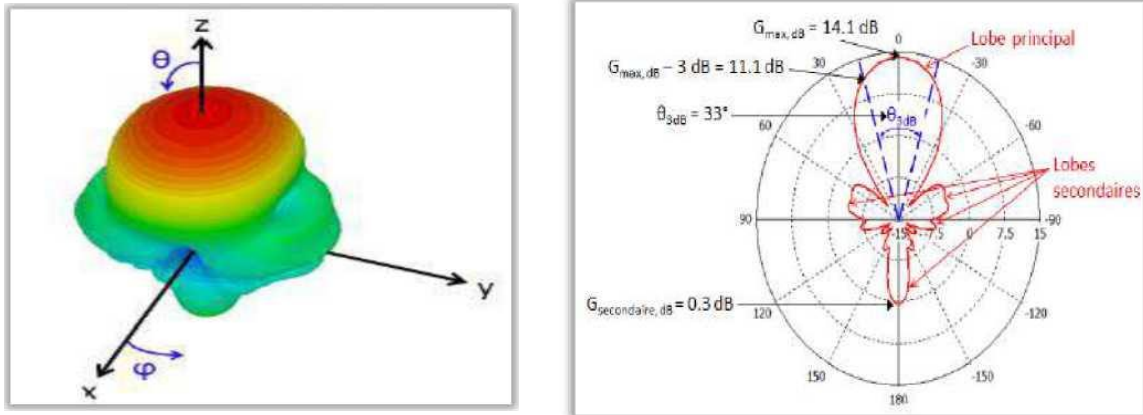


Figure I-5: Exemple d'un diagramme de rayonnement en 3D, et diagramme dans le plan YoZ (gain en dB).

I.10.5 Directivité

La directivité est le rapport de la puissance émise dans la plus grande direction à sa distribution spatiale globale. Ainsi, lorsqu'une antenne autorise une petite ouverture de rayonnement, on dira une antenne fortement directive, tandis qu'une antenne faiblement directive autorise une grande ouverture de rayonnement [23].

$$D(\theta, \varphi) = \frac{4\pi U(\theta, \varphi)}{P} \quad (I.7)$$

Où : U est l'intensité de rayonnement de l'antenne, et P est la puissance totale rayonnée

I.10.6 Gain

Le gain est une quantité descriptive des performances de l'antenne. Prendre le gain de l'antenne isotrope comme référence unifiée (0 dB). Le gain d'une antenne dans une direction donnée est le rapport de l'intensité du rayonnement à celle d'une antenne isotrope [24].

$$G(\theta, \varphi) = 4\pi \left(\frac{U(\theta, \varphi)}{\text{Source isotropique sans perte}} \right) \quad (I.8)$$

I.10.7 Fréquence de résonance et bande passante

La bande passante de l'antenne détermine la bande de fréquence dans laquelle le coefficient de réflexion est inférieur à un seuil arbitrairement défini. La bande passante est généralement proportionnelle à la bande de fréquence avec une réflectivité inférieure à -10 dB. Dans certaines applications, ce niveau peut être augmenté à -6 dB, permettant certaines limitations dans la conception de l'antenne, par exemple pour certaines antennes mobiles. La fréquence

de résonance correspond à la fréquence à laquelle l'antenne est la plus adaptée, c'est-à-dire la fréquence avec le coefficient de réflexion le plus faible. Sur une bande passante donnée, plusieurs minimas et donc plusieurs fréquences de résonance peuvent être observées [25].

La bande passante est définie par la formule suivante :

$$BP = \frac{f_2 - f_1}{f_c} \quad (I.9)$$

Avec f la fréquence maximale et f la fréquence minimale entre lesquelles le coefficient de réflexion est inférieur à -10 dB (voire -6dB) et f la fréquence centrale [26].

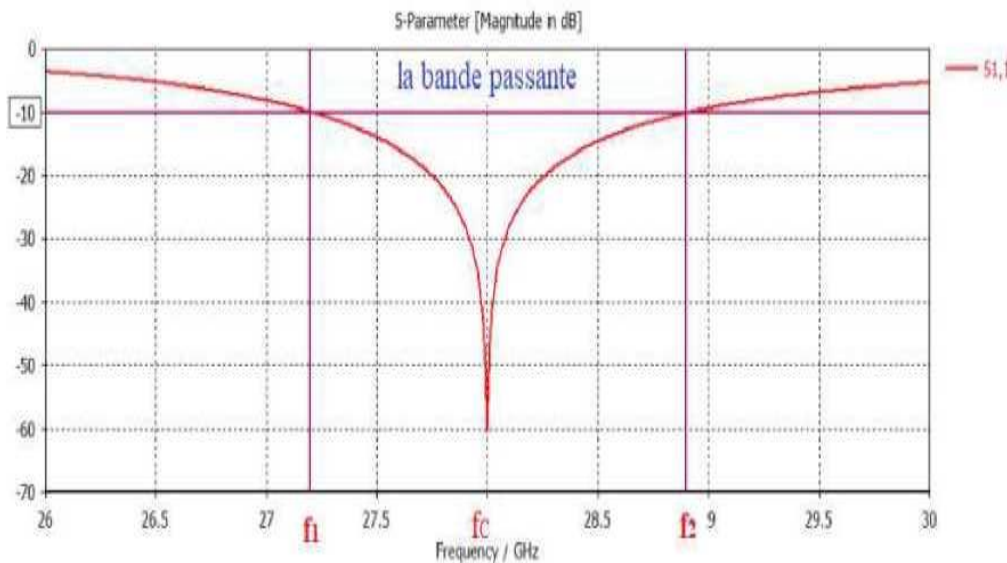


Figure I-6 : Illustration de la bande passante à -10 dB d'une antenne.

I.11 ANTENNE IMPRIMÉE

Les antennes imprimées consistent généralement en un plan de masse, une ou plusieurs couches de substrat avec des constants diélectriques identiques ou différents. En surface, nous avons un élément rayonnant de géométrie quelconque appelé patch. Il existe plusieurs modes d'alimentation ou d'excitation qui peuvent rendre le diagramme de rayonnement polarisé linéairement ou circulairement [27,28].

I.11.1 Structure d'une antenne imprimée

Une antenne imprimée est constituée d'un élément rayonnant et d'un plan de masse. Les deux surfaces conductrices sont séparées par une plaque isolante appelée substrat. Ce type d'antenne a une grande directivité, et le rayonnement est maximal dans la direction verticale de l'antenne. La figure I-7 montre les différents éléments qui composent une antenne imprimée [29].

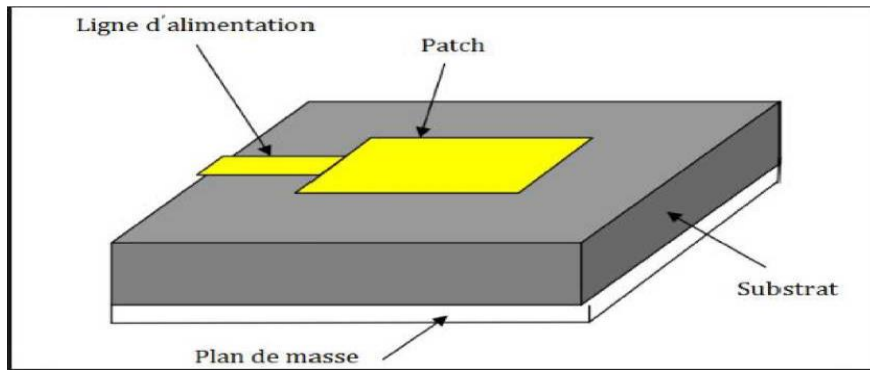


Figure I-7 : La Structure de l'antenne micro ruban [29].

Les éléments rayonnants des antennes imprimées peuvent prendre de nombreuses formes, notamment des rectangles, des carrés, des triangles, des cercles, etc. Ces formes sont les plus populaires car elles sont faciles à analyser et à fabriquer, et elles présentent également des diagrammes de rayonnement intéressants. La figure I-8 montre les formes de surface rayonnante les plus couramment utilisées.

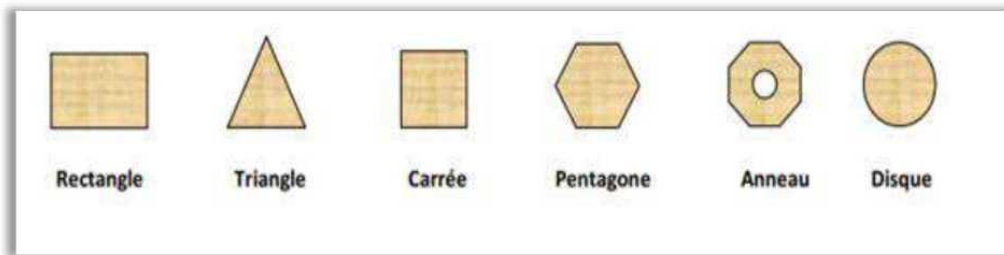


Figure I-8 : Différentes forme des éléments rayonnants [27].

I.11.2 Avantages et inconvénients de l'antenne patch

Les principaux avantages et inconvénients de l'antenne patch sont récapitulés dans le tableau suivant :

Avantages	Inconvénients
1-Réduire le poids et l'encombrement. 2-Faible coût et robustesse (installation sur surface rigide). 3-Polyvalence (fréquence, polarisation, graphique...) 4-Facile à intégrer dans les circuits intégrés micro-ondes. 5- S'adapter aux surfaces	1- Ils ont besoin d'un substrat de bonne qualité avec les valeurs suivantes : $2,2 < sr < 12$ 2- Faible consommation d'énergie. 3- L'impédance d'entrée est difficile à calculer et à régler. 4- Réduire l'efficacité des actions correctives (pertes réseau).

Tableau I-4: Les avantages et inconvénients de l'antenne patch [30].

I.11.3 Mécanismes de rayonnement de l'antenne patch

Pour mieux comprendre le mécanisme de rayonnement des antennes imprimées, la littérature scientifique s'appuie généralement sur la théorie de l'optique [24]. Considérons la figure I.9:

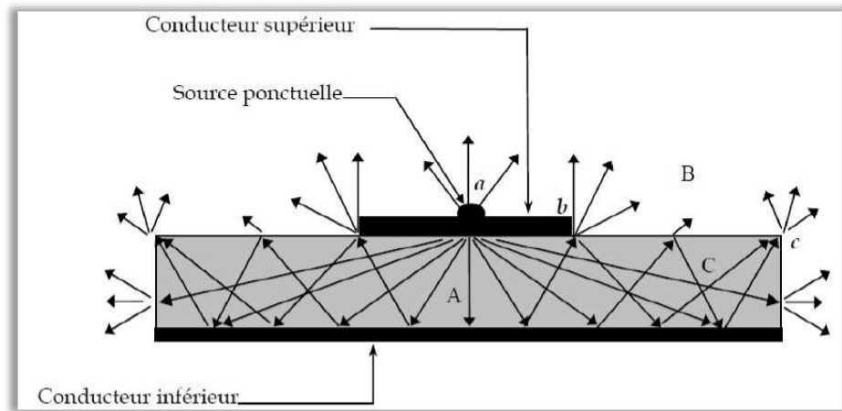


Figure I-9 : Analogie optique du mécanisme de rayonnement [31].

La source ponctuelle placée en (a) émet un rayonnement uniforme dans toutes les directions. Une partie de ce dernier est réfléchi par le plan de masse, puis par le conducteur supérieur et ainsi de suite. Certains de ces rayons aboutissent sur l'arrête du conducteur (b), qui les diffracte et par conséquent le champ se décompose en deux composantes normale et tangentielle par rapport au plan de masse.

On peut donc envisager trois régions :

La région A : Est la plus dense en rayons, le champ électromagnétique s'accumule plus fortement dans cette zone de l'espace. Cette propriété est d'ailleurs utilisée pour la propagation le long des lignes micro-rubans.

La région B (espace libre) : Occupant tout le demi-espace supérieur à l'antenne, représente une zone où le champ se disperse librement dans l'air et vient s'ajouter au rayonnement propre de la source.

La région C : Certains rayons atteignent les surfaces de séparation avec une incidence rasante, et restent piégés dans le diélectrique.

I.11.4 Techniques d'alimentation des antennes patch

L'alimentation de l'antenne imprimée dépend de la manière dont l'antenne est intégrée dans le dispositif. Les principales techniques d'alimentations sont :

1. Méthode de couplage directe

Avantages : Facilité de fabrication et de modélisation.

Inconvénients : Le couplage entre le patch et la ligne produit des niveaux élevés de radiation dans les champs polarisés croisés et induits.

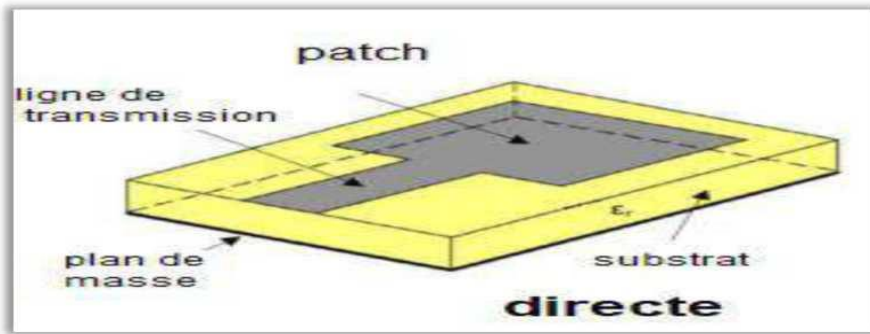


Figure I-10 : Alimentation par une ligne micro ruban.

2. Méthode de sonde coaxiale

Avantages : Facile à construire et posséder un faible niveau de rayonnements parasites.

Inconvénients : La bande passante réduite est obtenue, et Modélisation difficile.

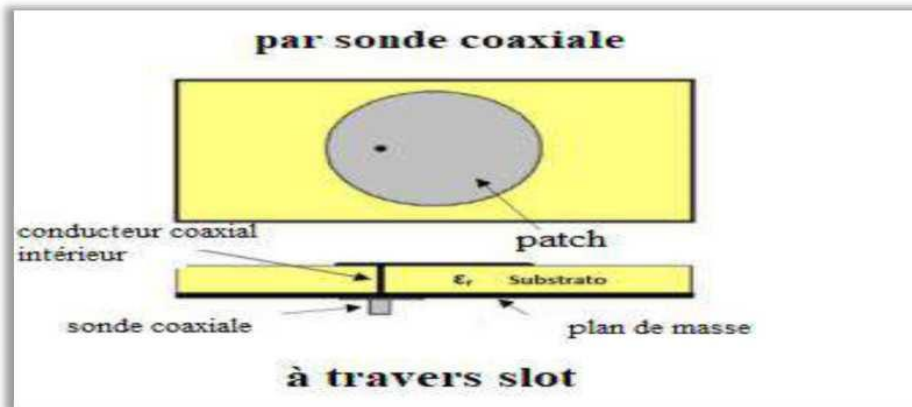


Figure I-11 : Alimentation par sonde coaxiale.

3. Méthode de couplage électromagnétique

Avantages : Faible rayonnement parasite, et très utile quand il s'agit de construire des réseaux d'antennes.

Inconvénients : Fabrication difficile.

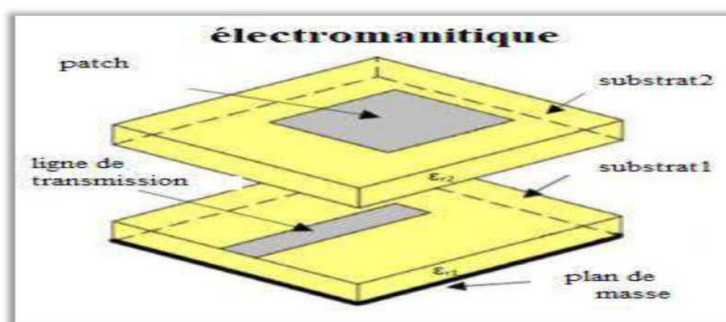


Figure I-12 : Alimentation par couplage électromagnétique.

4. Méthode de couplage par fente

Avantages : Modélisation facile, et très faible niveau de rayonnement parasite.

Inconvénients : Fabrication difficile.

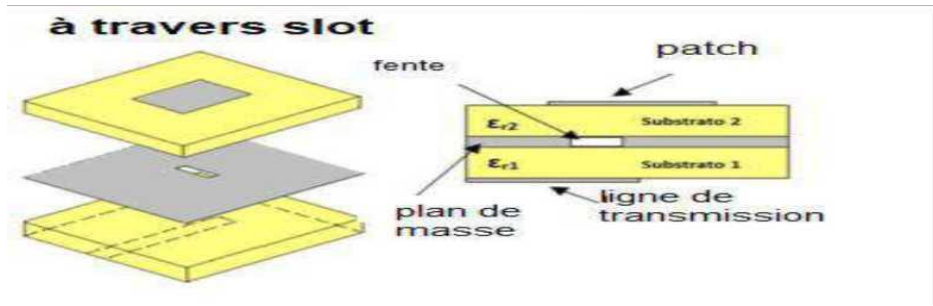


Figure I-13 : Alimentation par couplage fente.

I.12 CALCUL DES DIMENSIONS D'UNE ANTENNE IMPRIMEE

- Pour le FR4 :

- La bande passante [3.1-3.8] GHz
- $c = 3 * 10^8$ m/s ; $\epsilon_r=4.3$ mm ; $h = 1.6$ mm ; $f_r = 3.5$ GHz

- ✓ Détermination de la largeur de patch W_p :

$$w_p = \frac{c}{2f_r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r+1}} \quad (\text{I.10})$$

- ✓ Détermination de la longueur de patch L_p :

$$L_p = L_{eff} - 2\Delta L = \frac{c}{2f_r \sqrt{\epsilon_{eff}}} - 2\Delta L \quad (\text{I.11})$$

- ✓ Calcul de constants diélectriques effectifs ϵ_{eff} :

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r+1}{2} + \frac{\epsilon_r-1}{2} \left[\left(1 + 12 \frac{h}{w}\right)^{-\frac{1}{2}} \right] \quad (\text{I.12})$$

$$\Delta L = 0.412h \frac{(\epsilon_{eff}+0.3) \left(\frac{w}{h}+0.264\right)}{(\epsilon_{eff}-0.258) \left(\frac{w}{h}+0.813\right)} \quad (\text{I.13})$$

- ✓ Calcul de longueur d'alimentation (L) :

$$L_f = \frac{c}{2f} \quad (\text{I.14})$$

- ✓ Calcul de longueur de substrat (L_g) :

$$Lg = Lp + 6.h + Lf \text{ (I.15)}$$

✓ Calcul la largeur du substrat (wg) :

$$wg = wp + 6.h \text{ (I.16)}$$

I.13 RESEAU D'ANTENNES IMPRIMEES

L'utilisation d'antennes imprimées à patch unique s'est généralement avérée insuffisante pour respecter les limites de rayonnement imposées. Certaines propriétés telles qu'un gain élevé ou des lobes principaux en forme ne peuvent souvent être obtenues qu'en combinant plusieurs sources rayonnantes ensemble pour former un système appelé réseau d'antennes [28,32]. Ainsi, selon le nombre et la nature des éléments, leur forme d'alimentation et leur disposition technique dans le réseau, l'avantage d'assembler plusieurs antennes principales permet d'obtenir un rayonnement très directionnel.

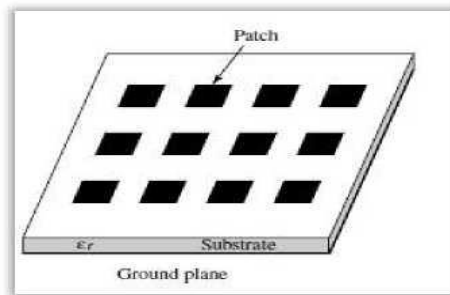


Figure I-14 : Géométrie d'un réseau antenne patch 4x4 [33].

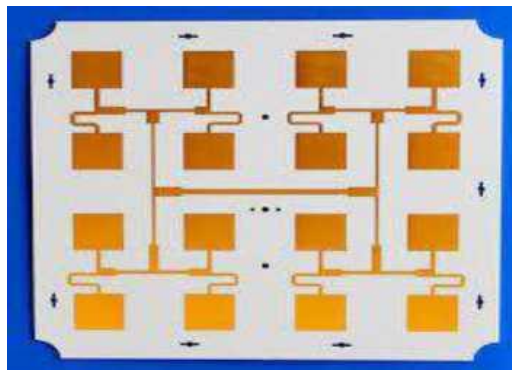


Figure I-15 : Réseau antenne patch réel 4x4 [33].

I.14 TYPE DE RESEAUX D'ANTENNES IMPRIMEES

L'utilisation d'une seule antenne imprimée n'est pas suffisante pour répondre aux limitations de rayonnement imposées, pour améliorer les performances de ces antennes, plusieurs éléments rayonnants sont associés pour former un système appelé réseau, qui peut compenser

les limitations des caractéristiques de l'antenne. Antenne De nombreux facteurs tels que l'espacement des patches, la phase et la taille du plan de masse sont ajustés individuellement pour obtenir un gain plus élevé et un lobe principal cohérent.

I.14.1 Réseaux linéaires

Comme le montre la figure (16), il s'agit d'un ensemble de N éléments rayonnants déposés en ligne droite selon un axe (x, y ou z), séparés par la même distance et excités par le même réseau électrique. [34]. Chaque élément est supposé avoir la même amplitude d'alimentation, mais chaque élément a un déphasage progressif, en fonction de la distance entre les éléments. Le champ électromagnétique total « E » de ce réseau linéaire est la somme des champs de chacun de ses éléments, donnée par l'équation suivante :

$$E = E_0(I_0 + I_1 e^{jkd \cos \theta} + K + IN - 1 e^{jk(N-1)d \cos \theta}) \quad (\text{I.17})$$

$$E = E_0 \sum_{n=0}^{N-1} (I_n) e^{jnkd \cos \theta} \quad (\text{I.18})$$

Où :

E_0 : le champ rayonné par l'antenne de base située à l'origine et alimentée par 1A et $I_n = a_n e^{jn\alpha}$. α et a_n sont les coefficients de source.

$$E = E_0 \sum_{n=0}^{N-1} a_n e^{j(kd \cos \theta + \alpha)} \quad (\text{I.19})$$

$$E = E_0 \sum_{n=0}^{N-1} a_n e^{jn\psi} \quad (\text{I.20})$$

$\psi = kd \cos \theta + \alpha$ est défini comme l'angle électrique où d est la distance entre les antennes adjacentes, θ est l'angle d'élévation, α est la phase progressive de l'alimentation et k est le nombre d'onde donné par $k = 2\pi/\lambda$.

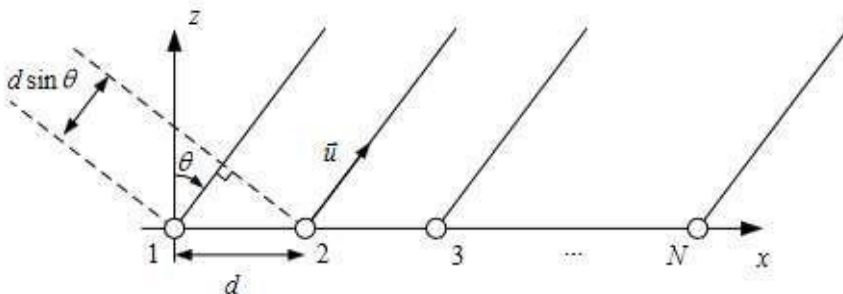


Figure I-16 : Géométrie d'un réseau linéaire.

1.7.1.1 Facteur de réseau

L'expression d'interférence entre le rayonnement de N éléments de réseau est appelée facteur

de réseau, qui dépend du nombre et de la forme des éléments d'antenne, de la fréquence de fonctionnement, de l'excitation de chaque élément et de la distance entre les éléments.

Le motif de trame final est le produit du facteur de trame et du motif des éléments rayonnants individuels.

Le facteur de réseau est obtenu à partir de la relation : $FR = (FRI) * (\text{champ de l'élément d'antenne})$ [35].

I.14.2 Réseaux planaires

Les réseaux planaires sont une généralisation des plans de réseaux linéaires, qui peuvent prendre la forme de mailles rectangulaires, triangulaires ou circulaires [34]. Comme illustré dans la Figure (17).

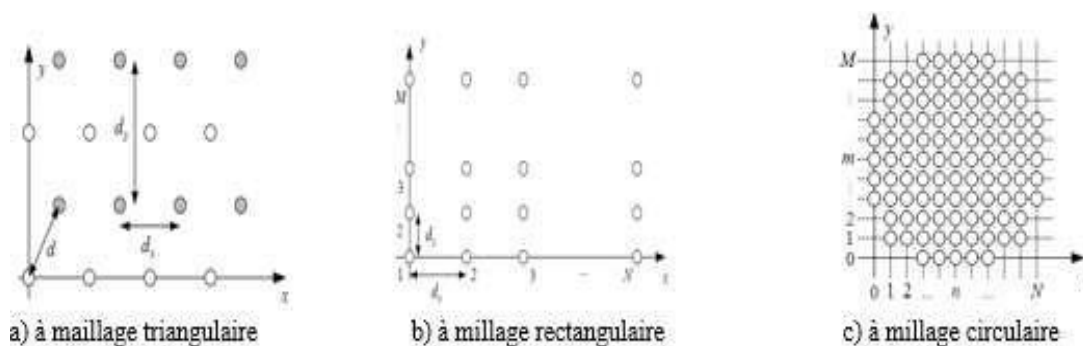


Figure I-17 : Géométrie d'un réseau planaire.

I.14.3 Réseaux circulaires

C'est un réseau dont les éléments rayonnants sont répartis autour d'un cercle de rayon « a » tel qu'illustré dans la figure (18) [34].

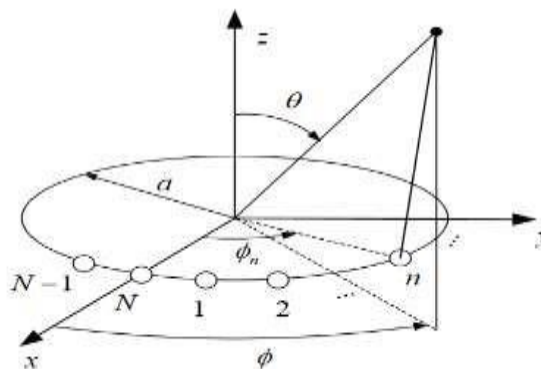


Figure I-18 : Géométrie d'un réseau circulaire.

I.14.4 Réseaux cylindriques

Un réseau cylindrique est une combinaison de plusieurs réseaux circulaires le long d'un axe (x, y ou z), comme le montre le schéma de principe de la Figure (19) [36].

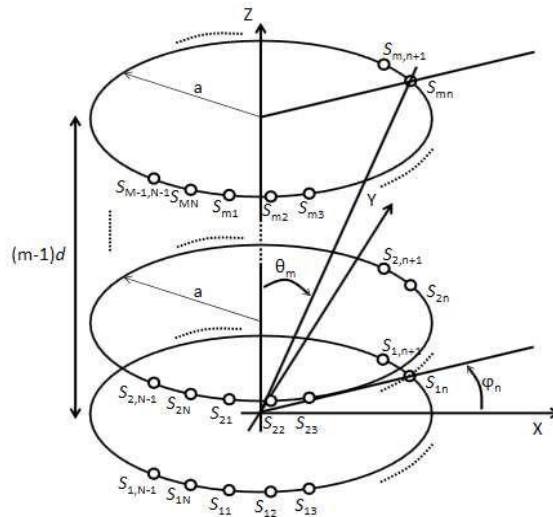


Figure I-19 : Géométrie d'un réseau cylindrique de M anneaux de rayon a espacés d'une distance d suivant l'axe z et composés de N éléments.

I.14.5 Réseaux coniques

Ceci est une autre généralisation des réseaux circulaires avec des anneaux de N éléments avec des rayons différents, séparés par la même distance "d". Ils ont presque les mêmes propriétés que les réseaux cylindriques. La figure (20) montre la géométrie du réseau de cônes [36].

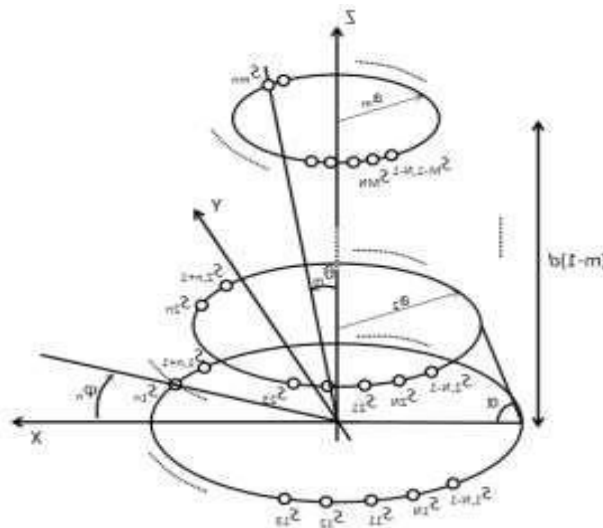


Figure I-20 : Géométrie d'un réseau conique de M anneaux espacés d'une distance d et composés de N éléments.

I.15 ALIMENTATION DES RESEAUX D'ANTENNES

L'objectif principal du réseau d'alimentation de l'antenne est d'assurer une excitation correcte en amplitude et en phase de tous les éléments du réseau.

I.15.1 Dispositifs utilisés dans les réseaux

Étant donné que les éléments du réseau sont excités en amplitude et en phase, l'utilisation de déphaseurs et de diviseurs ou combineurs de puissance est à la base de l'alimentation du réseau d'antennes [37].

A. Les Déphaseurs :

On distingue deux types de déphaseurs :

(a) Les déphaseurs à lignes :

Sont constitués d'un ensemble de lignes de longueurs différentes. Des commutateurs permettent d'insérer l'impédance de chaque tronçon de ligne selon la phase désirée.

(b) Les déphaseurs à ferrites :

Sont constitués d'un barreau de ferrite autour duquel est enroulé un fil qui sert à fixer la valeur du champ magnétique du barreau. Le champ magnétique est varié l'intensité d'excitation. Les déphaseurs sont placés en parallèle ou en série comme présentés dans les figures (21) et (22).



Figure I-21 : Déphaseurs en série.

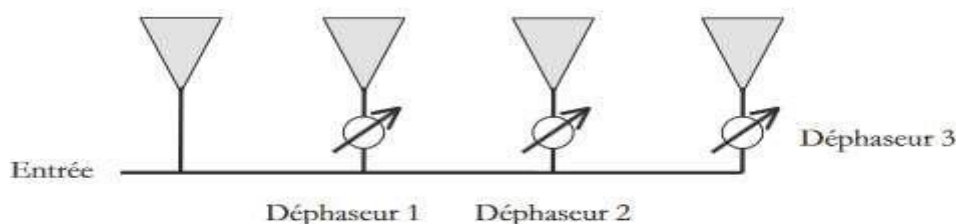


Figure I-22 : Déphaseurs en parallèle.

I.15.2 Diviseurs ou combineurs

C'est un appareil à trois voies, une à l'entrée et deux ou plus à la sortie, qui peuvent être isolées ou non. Chaque sortie d'un diviseur de tension est considérée comme une entrée d'un autre diviseur de tension, et la combinaison varie en fonction du choix des alimentations en

série ou en parallèle et du type d'élément rayonnant. Parmi les diviseurs utiliser en distingue [38].

A. La jonction T

Il s'agit d'un modèle facile à mettre en œuvre, mais le manque d'isolement entre les deux ports de sortie crée un couplage entre deux composants adjacents, ce qui affecte le diagramme de rayonnement du réseau, qui peut être compensé en supprimant la partie triangulaire de la ligne, comme indiqué dans la figure Comme le montre la Figure (23) [35].

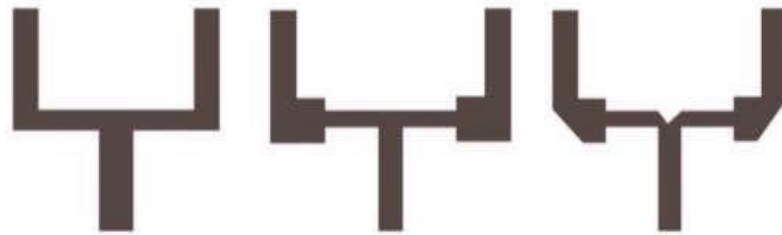


Figure I-23 : La jonction T.

B. Diviseur de Wilkinson

Afin d'adapter parfaitement l'alimentation, il est préférable d'utiliser un diviseur de tension de type Wilkinson, qui présente des caractéristiques particulières telles que : un réseau à faibles pertes d'insertion et d'isolement, un isolement élevé entre les ports de sortie est assuré par la résistance R, mais ce circuit L'inconvénient apparaît au niveau des soudures sur les deux bords de la résistance. Le diviseur de Wilkinson est représenté sur la figure (24) [35].

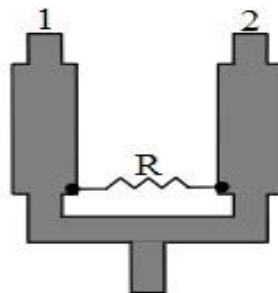


Figure I-24 : Diviseur Wilkinson.

C. Le coupleur par proximité

Il s'agit d'un coupleur directionnel qui couple une certaine partie de la puissance incidente hors du système et fournit de l'énergie via un couplage ouvert dans le plan de masse du réseau d'alimentation. Ce couplage est causé par des pertes [35].

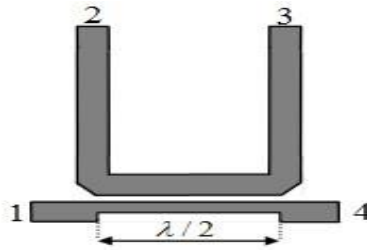


Figure I-25 : coupleur par proximité.

D. L’anneau hybride

Les signaux issus des boucles hybrides ont la même amplitude et un même déphasage de 0° et 180°, et elles présentent l'avantage que leurs performances aux hautes fréquences sont toujours satisfaisantes. L'anneau de mélange est illustré à la Figure (26) [35].

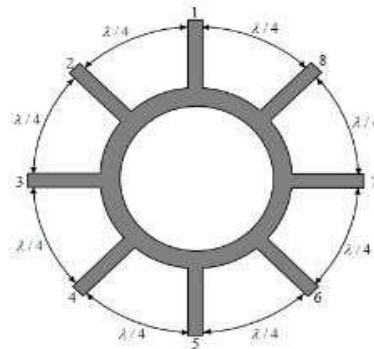


Figure I-26 : L’anneau hybride.

I.16 TECHNIQUES D’ALIMENTATION D’UN RESEAU D’ANTENNES

Le choix du réseau d'alimentation dépend de plusieurs paramètres tels que le gain, la perte, la bande passante, l'angle souhaité, la polarisation, le niveau du réseau et les lobes latéraux, la capacité du réseau d'alimentation et la polarisation [39]. Il existe plusieurs arrangements pour distribuer la puissance d'entrée d'une source à un réseau, les plus courants de ces réseaux sont :

I.16.1 Alimentation série

Les éléments rayonnants sont disposés en ligne droite et sont interconnectés par une pluralité de lignes micro ruban, dont chacune comporte un déphaseur en entrée. Une alimentation de ce type est représentée sur la Figure (27) [39,40].



Figure I-27 : Alimentation en série.

I.16.2 Alimentation parallèle

L'alimentation consiste à alimenter N éléments rayonnants à travers (N-1) diviseurs de puissance, qui sont également répartis sur chaque lien. Dans ce type d'alimentation, il y a des pertes dues au rayonnement dues aux discontinuités de la configuration parallèle. Une telle alimentation est représentée sur la Figure (28) [39,40].

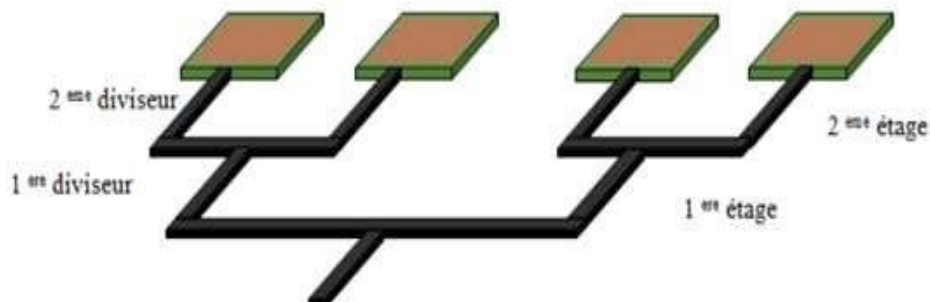


Figure I-28 : Alimentation en parallèle.

I.17 DOMAINE D'APPLICATION

Pour assurer la communication entre deux points distants, les réseaux d'antennes sont utilisés dans plusieurs domaines d'application tels que [35,41] :

- ❖ **Satellites** : Télévision directe domestique ou embarquée sur véhicules, Réseaux à faisceaux commutés à couverture reconfigurable, Systèmes de radiolocalisation par GPS, Galileo.
- ❖ **Aéronautique** : Communication, navigation, altimètres, systèmes d'atterrissages, et radars de poursuite mono-pulse ou synchrone.
- ❖ **Télécommunication** : Téléphonie mobile (terminaux portatifs GSM, DCS, PCS, antennes sur stations de bases.

I.18 AVANTAGES ET INCONVENIENTS DES RESEAUX D'ANTENNE

Les avantages de l'association d'antennes dans un réseau de site sont les suivants [42] :

- ❖ Une plus forte directivité que l'antenne élémentaire.
- ❖ Une augmentation du gain par rapport à l'antenne élémentaire.
- ❖ Une flexibilité du mode d'alimentation avec la possibilité de faire varier son amplitude et sa phase pour obtenir un réseau d'antennes reconfigurables.
- ❖ Une possibilité de choisir le déphasage régulier entre les éléments pour fixer l'orientation du faisceau.

Tandis que les limitations suivantes sont soulignées [41] :

- ❖ La bande passante d'un réseau d'antenne est supérieur à celle d'une antenne élémentaire.
- ❖ Complexité de réalisation.
- ❖ Les niveaux de gain obtenus avec des réseaux, s'approchent des 30 dBi à cause des pertes (Les couplages).

I.19 CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons passé en revue la technologie mobile 5G, ses principes, les différentes technologies utilisées et son architecture globale. Cette technologie continue de transformer notre monde ainsi que notre mode de vie personnel. Toujours dans ce sens, la 5G approche à grands pas pour répondre aux exigences de l'ère actuelle où la vitesse et la haute disponibilité sont les critères les plus importants.

Nous avons présenté les réseaux d'antennes imprimées, en nous concentrant sur leurs principaux types, après avoir pris connaissance de leur technologie et de leurs types d'alimentation, de leurs avantages et inconvénients, et de leurs domaines d'application.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] N. Docomo « DOCOMO 5G White Paper » Juillet 2014.
- [2] R.Sapakal, S. Kadam « 5G Mobile Technology » Journal international de recherche avancée en génie informatique et technologie volume 2, p. 568-571, 2013.
- [3] Shailesh D. Nandgaonkar S.K. Bodhe, B.G. Hogade « Beamforming Techniques for Smart AntennausingRectangular » Journal international du génie électrique ET informatique, volume 4, numéro 2, p. 257-264, 2014.
- [4] S.SunyT.S. Rappaport, « Multi-beamantennacombining for 28 GHz cellular linkImprovement in urbanenvironments » Journal international, volume 8, p. 12, 2013.
- [5] J.G. Andrews, S. Buzzi, W. Choi, S. Hanly, A. Lozano, A. C. Soong, y J. C. Zhang, « Whatwill 5G be ? » IEEE les systèmes de communication, 12 mai 2014.
- [6] T.S. Rappaport, S. Sun, R. Mayzus, H. Zhao, Y. Azar, K. Wang, G. N. Wong, J. K.Schulz, M. Samimi, y F. Gutierrez « MillimeterWave Mobile Communications for 5G Cellular : It Will Work ! » IEEE Journal international, volume 1, p 335-349, 2013.
- [7] M. KHELLADI Mounir, Etude et conception d'un réseau d'antenne pour des applications 5G, Présenté pour l'obtention du diplôme de MASTER,2020.
- [8] Hajri, S-E. (2018, 9 avril). L'amélioration des performances des systèmes sans fil 5G par groupements adaptifs des utilisateurs.
- [9] E.Hossain, M. Rasti, H. Tabassum, A. Abdel Nasser « Evolution towards 5g Multi-Tier Cellular Wireless Networks: An Interference Management Perspective » IEEE Wireless Communications Conférence 17 Feb 2014.
- [10] W. Xiang, K. Zheng, X. Sherman « 5g Mobile Communications » Livre, 14 octobre 2016.
- [11] FEI Hu « Opportunities in 5g Networks a Research and development Perspective » Livre, 5 avril 2016.
- [12] A.Osseiran, J. F. Monserrat, P. Marsch « 5g Mobile and Wireless communications Technology » Livre, Juin 2016.
- [13] François MAGNE. « Télécommunications haut débit en ondes millimétriques »,10 mai 1998.
- [14] R. Ghayoula « Contribution A L'optimisation De La Synthèse Des Antennes Intelligentes.

- [15] Source : Large bande mobile à ondes millimétriques : Unleashing 3-300 GHz Spectrum, 2011.
- [16] T. Nakamura, S. Nagata, A. Benjebbour, Y. Kishiyama, T. Hai, S. Xiaodong, Y. Ning et L. Nan, « Trends in smallcellenhancements in LTE advanced», IEEE Communications Magazine, vol. 51, no. 2, pp. 98-105, 2013.
- [17] ShahramShahbazPanahi, Yindi Jing, in Academic Press Library in Signal Processing, Volume 7, 2018.
- [18] S.Sébastien, « Les Enjeux De La 5G » ARCEP ,2017.
- [19] A. Gohil, H. Modi, S. K. Patel « 5g Technology Of Mobile Communication : A Survey » Conférence Internationale Sur Les Systèmes Intelligents Et Le Traitement Du Signal 2013.
- [20] 5G Vs. 4G | What Is The DifferenceBetween 5G 4G Networks ? (S. d.). iSelect.
- [21] Muteau, S. (2017, 30 août). Les dessous de la 5G. Économie numérique.
- [22] H. Chorfi « Conception D'un Nouveau Système D'antenne Réseau Conforme En Onde Millimétrique » Mémoire de Master, Université Québec Abitibi-Témiscamingue 2012.
- [23] D. Ameziane « Etude Et Optimisation D'antennes Fractales Plaquées » Mémoire de Magister, Université Abou BekrBelkaid de Tlemcen 2008.
- [24] F.A. Belainine, M.A. Salmi « Etude De La Miniaturisation Des Antennes Par Repliement Application Pour La Conception D'une Antenne 2.4ghz » Mémoire de Master, Université Houari Boumediene d'Alger 2013.
- [25] E. Dreina « Conception, Optimisation et Intégration Rf d'un Système d'antennes Miniatures Multi Capteurs utilisant La diversité en Vue d'augmenter les performances Radio d'un Terminal Mobile 4g » Thèse Doctorat, Université de Grenoble, 01 juillet 2010.
- [26] S.Vergerio « Recherche Des Caractéristiques Optimales D'antennes Multi-Capteurs Pour Les Systèmes Mimo » Thèse Doctorat, Université de Provence, 06 juillet 2007.
- [27] M.L.Refice « Modélisation Et Simulation Des Antennes En Onde Millimétrique A Base De Méta Matériaux » Mémoire De Magister, Université Zian Achour de Djelfa 24/05/2014.
- [28] G.Irankunda, E. Ufiteyezu « Etude Et Conception D'une Antenne Patch Rectangulaire Pour Les Réseaux Personnels Sans Fils Wpan A 60 GHz » Mémoire de Master, Université Houari Boumediene d'Alger 2011.
- [29] A. Bouake « simulation d'un réseaux d'antennes pour les mobiles 5G avec CST » Mémoire de Master, Université KasdiMerbah Ouargla 2018.
- [30] F.D.Valdivia « Implementacion De Arreglos De Antenas En La Banda De 28 GHz Para La Quinta Generacion Movil » Mémoire, Université Marta Abreu de las Villas 2016
- [31] D.Aissaoui « Analyse A L 'Aide De Modèles Equivalents D'antennes Imprimées

Alimentées Par Lignes Adaptées » Mémoire de Magister, Université Abou BekrBelkaid de Tlemcen, 2007.

[32] R. Ghayoula « Contribution A L'optimisation De La Synthèse Des Antennes Intelligentes Par Les Réseaux De Neurones » Thèse Doctorat, Université de Tunis El Manar 27 /12/ 2008.

[33] C. Balanis « Antenna Theory, Analysis and Design » Livre, 1982.

[34] NELSON JORGE, Gonçalves Fonseca. *Etude de Systèmes Micro-ondes d'Alimentation d'Antennes Réseau pour Application Multifaisceaux*. Université de Toulouse : s.n., 15/10/2010.

[35] KADRI, BOUFELDJA. *Modélisation des Synthèse de Réseaux Periodiques et non periodiques d'antenne micro-rubans par l'application d'un algorithme Génétique-Flou*. 2011.

[36] VINCENT, JAECK. *Développement d'antennes de communication reconfigurables en bande C pour munition intelligentes*. Université Rennes : s.n., 2016.

[37] M. H. Abu Saada « Design Of Efficient MillimeterWavePlanarAntennas For 5g Communication Systems » Mémoire de Master, Université Islamique de Gaza 2017.

[38] NELSON JORGE, Gonçalves Fonseca. *Etude de Systèmes Micro-ondes d'Alimentation d'Antennes Réseau pour Application Multifaisceaux*. Université de Toulouse : s.n., 15/10/2010.

[39] BOUAKA, ASMA et TEMMAR, LOUIZA. *Simulation d'un réseau d'antenne pour les mobiles 5G avec CST Micro Wave Studio*. 25/06/2018.

[40] BAHLOUL, MOHAMED SALIM. *Etude et coception de Réseaux d'Antenne Imprimées larges bandes à polarisation diverse par l'utilisation d'architectures log périodiques*. Université AboubakrBelkaidTelemcen : s.n., 02/2017.

[41] BEN BRAHEM, SEYF EL ISLAM. *Etude et simulation d'une antenne imprimée rectangulaire mise en réseau*. Université Saad Dahleb Blida : s.n., 2009.

[42] ANDREE, FOUQUE. *Contribution à la conception d'un récepteur mobile faible cout et faible consommation dans la bande Ku pour le standard DVB-S*. Université de Bordeaux : s.n.

CHAPITRE II :

Métamatériaux

Chapitre II : Métamatériaux

II.1 INTRODUCTION

Les métamatériaux sont essentiellement constitués d'un ensemble dense de structures métalliques périodiques incorporées dans un milieu hôte qui présentent des propriétés exotiques qui n'existent pas dans la nature. Les paramètres techniques de base des métamatériaux sont la permittivité relative ϵ_r et la perméabilité relative μ_r . Sur la base de ces deux paramètres, nous pouvons classer les métamatériaux en trois groupes généraux : Double Positif (DPS), dans lequel μ_r et ϵ_r sont tous deux positifs, Simple Négatif (SNG), qui a soit μ_r négatif soit seulement ϵ_r mais pas les deux en même temps et enfin, Double Négatif (DNG), où μ_r et ϵ_r sont tous deux négatifs. Les méthodes de caractérisation des métamatériaux impliquent le calcul des coefficients de transmission et de réflexion d'une dalle échantillon. Selon la façon dont les métamatériaux se comportent avec les ondes électromagnétiques incidentes, ils peuvent être réalisés sous la forme de différentes structures appelées structures à bande interdite électromagnétique (EBG), conducteur magnétique artificiel (AMC), surface à haute impédance (HIS), surfaces sélectives en fréquence (FSS), résonateurs à anneau fendu (SRR), etc.

II.2 HISTORIQUE

Avant même l'apparition du terme méta-matériaux les hommes ont cherché à dépasser les propriétés des matériaux classiques. Comme en témoigne la réalisation de la coupe de Lycurgus, dont le verre présente des inclusions de nanoparticules d'or et d'argent, qui entraînent un changement de couleur de la coupe, selon qu'elle est observée en lumière transmise ou réfléchie [1]



Figure II-1 : Coupe de Lycurgus en lumière réfléchie à gauche, en lumière transmise à droite. Un premier pas vers les méta-matériaux au sens contemporain du terme est réalisé par Victor

Veselago en 1967 [2] avec la publication d'une étude théorique sur la propagation d'une onde électromagnétique dans un milieu matériel en fonction des valeurs prises par la permittivité diélectrique et la perméabilité magnétique relatives du milieu [1].

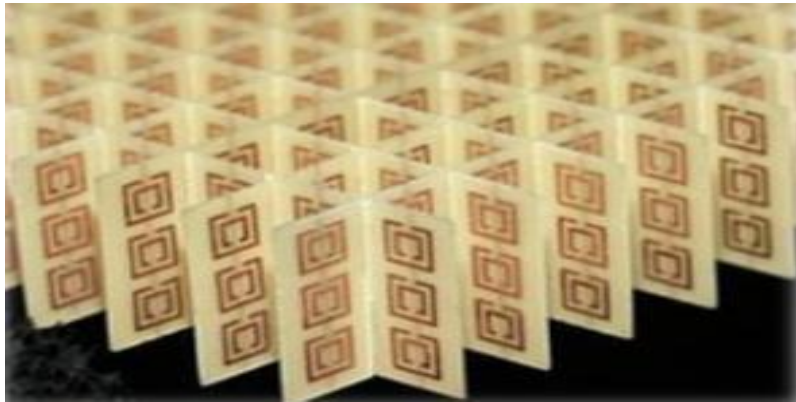


Figure II-2 : Photographie du premier méta-matériau à indice de réfraction négatif réalisé par l'équipe de David Smith en 2000.

Ce n'est qu'en 1999 que l'équipe de John Pendry [3] va changer cet état de fait en montrant dans un article de physique théorique qu'il est possible de générer une réponse magnétique à partir d'objets amagnétiques. La solution proposée est un milieu composé de résonateurs conducteurs (circuits RLC), sensibles au champ électrique, ayant une forme d'anneaux ouverts (« split-ring resonators » - SRR) de taille inférieure à la longueur d'onde d'utilisation [1].

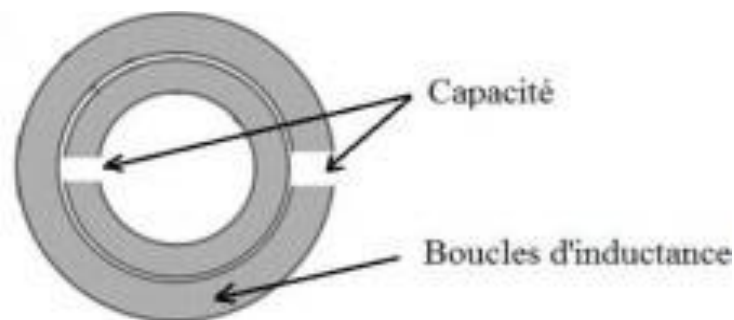


Figure II-3 : Schéma du premier SRR imaginé par John Pendry [3].

Ce premier méta-matériau, fonctionnant dans le domaine des micro-ondes, permet de vérifier les prédictions de Viktor Veselago et de mettre en évidence le phénomène de réfraction négative.

II.3 DEFINITION

Les métamatériaux, comme leur nom l'indique, sont des matériaux artificiels ayant des propriétés physiques supérieures aux matériaux naturels. « Meta » est un préfixe grec signifiant « au-delà » ou « un niveau au-dessus », comme dans métaphysique ou métalogique. Les métamatériaux sont donc des matériaux ayant des propriétés « au-delà » de ce que l'on

peut espérer et observer dans des matériaux naturels. Plus précisément, en électromagnétisme et en optique, les métamatériaux présentent des propriétés nouvelles, susceptibles d'exciter l'imagination des chercheurs et des ingénieurs comme un indice optique négatif ou un effet Doppler inversé, par exemple.

En électromagnétisme, le terme métamatériaux désigne un ensemble des matériaux composites artificiels, il s'agit en général de structures périodiques, diélectriques ou métalliques, qui se comportent comme des matériaux homogènes n'existant pas à l'état naturel [4].

II.4 TERMINOLOGIE

Il existe plusieurs synonymes de métamatériaux dans la littérature qui sont utilisés pour désigner les matériaux gauchers. Ils se résument comme suit :

- Le matériau gaucher est un terme inventé par Veselago [5] pour souligner la propriété fondamentale des métamatériaux, c'est-à-dire l'opposition entre les vitesses de phase et de groupe.

- Matériau double négatif avec permittivité et perméabilité négatives.

- Matériaux à indice négatif. Le terme décrit les matériaux 2D et 3D. En revanche, il ne peut pas être utilisé pour les matériaux 1D car la notion d'angle de réfraction perd tout son sens.

- Matériau d'onde réfléchi (matériau d'onde anti-Ward). Le terme met l'accent sur une autre propriété, mais ne donne aucune information réelle sur la définition des métamatériaux, puisque les ondes réfléchies sont également observées dans les structures classiques.

- Le milieu Veselago est un terme honorant le scientifique considéré comme le père des métamatériaux. Seulement, il ne fournit aucune information physique sur les propriétés des matériaux.

- Matériaux diélectriques à vitesse de phase négative. Le terme peut indiquer la nouveauté des métamatériaux qui utilisent les informations de phase des paramètres S du système de la même manière que les modules. Les modules avec ces paramètres sont de loin les plus couramment utilisés pour exécuter des fonctions. Bien que très précis d'un point de vue sémantique, le terme est rarement utilisé par la communauté scientifique.

II.5 PRINCIPES ET PROPRIETES

En électromagnétisme, comme les matériaux homogènes tels que le diélectrique ou le conducteur sont caractérisés par leurs paramètres intrinsèques constitutifs qui sont la permittivité (ϵ) et la perméabilité (μ), de l'autre côté, les matériaux non homogènes tels que

les métamatériaux peuvent être caractérisés par une permittivité (ϵ) et une perméabilité (μ) dites « effectives », qui s'écrivent sous la forme suivant μ_{eff} , ϵ_{eff} avec un indice de réfraction :

$$\eta_{eff} = \sqrt{\mu_{eff}} \cdot \sqrt{\epsilon_{eff}} \quad (\text{II.1})$$

A savoir que le Métamatériau peut donner naissance à des paramètres effectifs séparément négatifs ou simultanément négatifs, ce qui est illustré par un $\eta_{eff} < 0$. Ce type de matériau est qualifié de matériau à main gauche (Left-Handed Materials « LHM ») du fait que le vecteur d'onde \vec{K} et le vecteur de Poynting sont antiparallèles et le trièdre formé par les vecteurs \vec{E} , \vec{H} et \vec{K} est en effet indirect (Figure II-4).

Si $\epsilon > 0$ et $\mu > 0$: le trièdre est direct ; sinon, si ces paramètres changent de signe le trièdre devient indirect.

$$\vec{K} \times \vec{E} = \omega \mu \vec{H}$$

$$\vec{K} \times \vec{H} = -\omega \epsilon \vec{E}$$

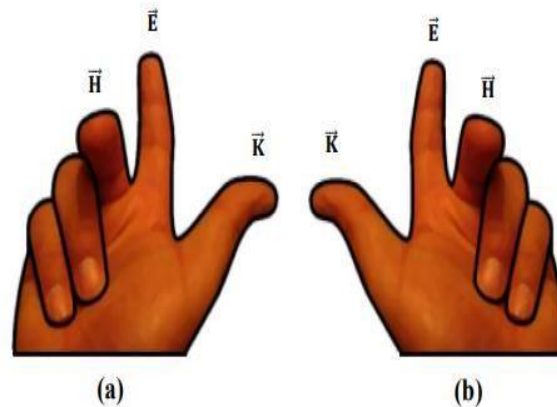


Figure II-4 : Trièdre direct et indirect caractérisé par la règle de la main droite et main gauche respectivement : (a) milieu main droite, (b) milieu main gauche.

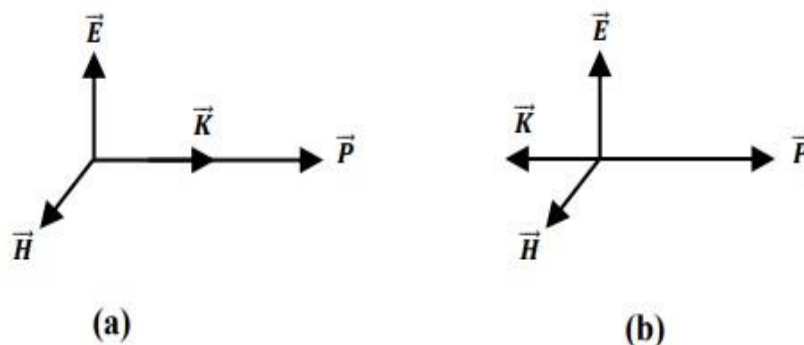


Figure II-5 : Représentation vectorielle d'une onde plane : (a) milieu main droite, (b) milieu main gauche.

- (a) Selon l'équation $\vec{P} = 1/2 \vec{E} \times \vec{H}^*$ (II.2) le vecteur de Poynting est de sens opposé que celui du vecteur d'onde \vec{K} . Selon Veselago, la permittivité et la perméabilité du milieu

main gauche doivent être liées à la fréquence du champ électromagnétique excitant, la densité de puissance U serait aussi négative.

- (b) La vitesse de phase $V_{\varphi} = \omega / \beta$ (II.3), et la vitesse de groupe $V_g = \partial\omega / \partial\beta$ (II.4) d'une onde électromagnétique sont opposées.

La vitesse de groupe peut être négative, mais ceci peut provoquer un phénomène d'atténuation. Selon l'équation de la vitesse de phase, la pente de la constante de phase reste positive tandis que le rapport ω / β peut prendre une valeur négative ou positive.

Dans le milieu à main gauche la vitesse de phase négative est schématisée par un phénomène de retro propagation [6]. Selon Veselago ces propriétés engendreront l'inversion des lois de la physique classique telles que :

- L'inversion de la loi de Snell-Descartes avec un indice de réfraction négatif.
- L'inversion de l'effet Doppler.
- L'inversion du rayonnement de Cerenkov.

La figure suivante montre la propagation d'une onde électromagnétique dans différents milieux.

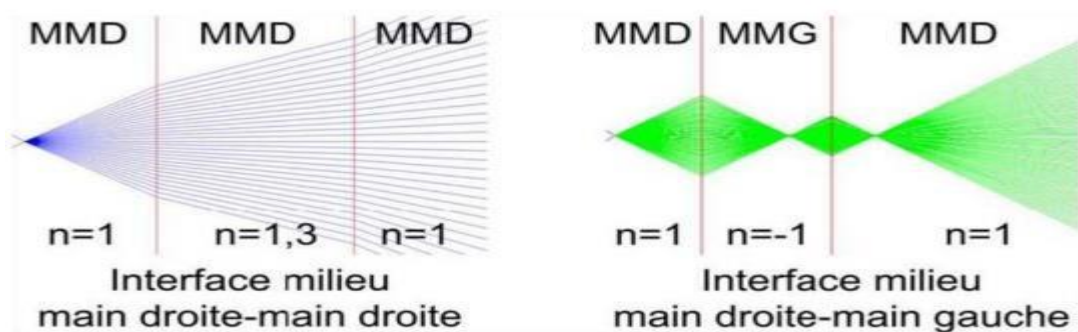


Figure II-6 : Propagation d'ondes électromagnétique dans différents milieux.

On résume les propriétés des métamatériaux en ces points :

- Indice de réfraction est négatif ;
- Permittivité perméabilité sont négatives ;
- Lors de la propagation d'une onde plane dans un métamatériau, le trièdre formé par :

Les vecteurs $(\vec{k}, \vec{E}, \vec{H})$ est inversé.

- Les vitesses de phase et de groupe sont opposées (alors qu'elles sont de même sens dans un milieu classique).

- Contrairement aux milieux classiques, ils amplifient les ondes évanescentes.
- L'effet Doppler est inversé.
- L'effet Tcherenkov est inversé.
- Il existe des ondes de surface, appelées « plasmons » pour les deux polarisations, qui peuvent être propagatives ou rétro-propagatives.
- Il existe des modes guidés rétro-propagatifs et des modes à fuite rétropropagatifs.

II.6 CLASSIFICATION DES METAMATERIAUX

En électromagnétisme, tout matériau homogène peut être décrit par ses paramètres constitutifs que sont la permittivité et la perméabilité. Ces deux paramètres permettent de déterminer la réponse du matériau à un champ électromagnétique. En règle générale ϵ et μ sont à la fois positifs dans des matériaux ordinaires, cela signifie que l'indice de réfraction est positif. Les différentes possibilités du couple (ϵ, μ) sont $(+, +)$, $(+, -)$, $(-, +)$ et $(-, -)$.

Une représentation de ces paramètres dans un plan comprenant quatre cadrans afin d'inscrire les métamatériaux dans le prolongement des matériaux disponibles à l'état naturel est illustrée dans la figure II-7 qui résume toutes les configurations possibles.

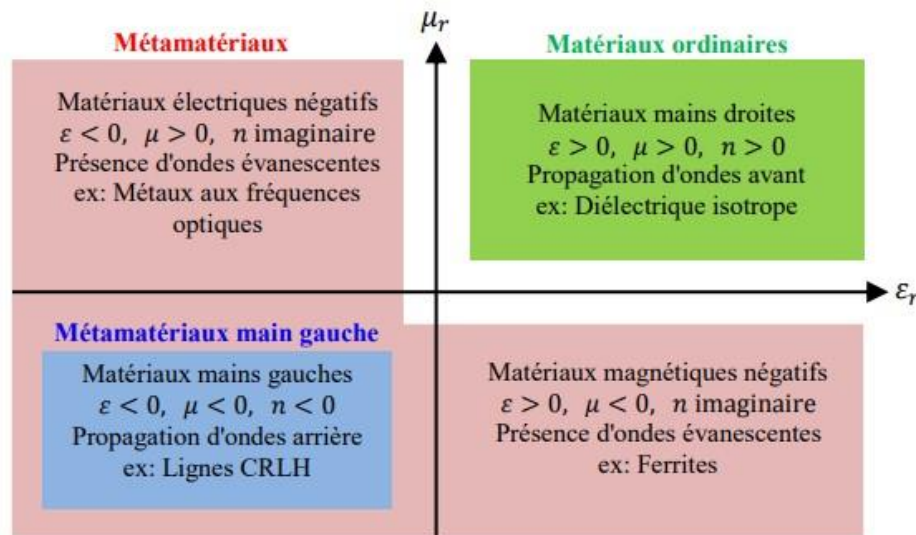


Figure II-7 : Classement des matériaux en fonction du signe de leur permittivité ϵ et de leur perméabilité μ .

II.6.1 Les matériaux doublement positifs (dps)

Les matériaux DPS (Double Positive) correspondent aux matériaux classiques dits (matériaux main droite (MMD)) sont les matériaux qui présentent des paramètres

intrinsèques positifs et non nuls ($\epsilon > 0$ et $\mu > 0$). Les matériaux diélectriques et magnétiques font partie de cette catégorie.

L'expression main droite vient du fait qu'il faille utiliser la main droite pour trouver le trièdre direct (\vec{E} , \vec{H} , \vec{K}).

II.6.2 Les matériaux à perméabilité négative (MNG)

Grâce aux travaux de Pendry, la possibilité de créer des milieux non-magnétiques avec une réponse magnétique est devenue une réalité. Ces travaux qui portent sur le magnétisme créé par une inclusion métallique appelée split ring resonator (SRR) ou résonateur en anneau fendu (RAF).

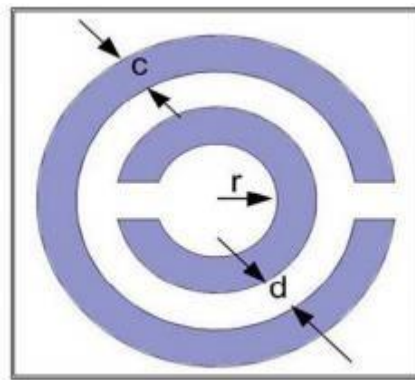


Figure II-8 : Résonateur en Anneau Fendu « RAF » (Split Ring Resonator « SRR ») introduit par Pendry.

Ce résonateur est composé de deux anneaux fendus concentriques imbriqués l'un dans l'autre, et disposés d'une façon opposée, dont les dimensions caractéristiques sont petites devant la longueur d'onde incidente, typiquement de l'ordre de $\lambda/10$. Vu ses petites dimensions devant la longueur d'onde, l'onde électromagnétique est incapable de détecter la configuration interne du milieu, par contre elle donne les paramètres effectifs de l'ensemble du milieu.

Cet élément crée en plus de sa résonance, une perméabilité effective négative dans une bande étroite de fréquence autour de sa résonance. Un autre avantage de ce résonateur est son faible encombrement, ce qui rend possible son intégration aux systèmes de télécommunications.

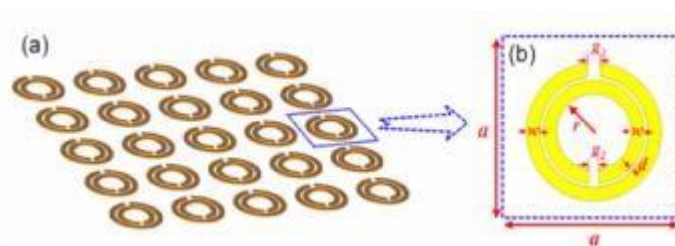


Figure II-9 : (a) Réseau de RAF introduit par Pendry, (b) : Cellule unitaire du RAF.

L'expression de la perméabilité effective est donnée par :

$$\mu_{eff} = \frac{F}{\omega^2 - \omega_0^2 + i\gamma\omega} \quad (\text{II.5})$$

F : le volume de la structure.

ω : La pulsation angulaire, ω_0 : la pulsation de résonance.

II.6.3 Les matériaux à permittivité négative (ENG)

Selon le modèle de Drude, les métaux ne sont pas des milieux préparatifs à partir d'une certaine fréquence qui est la fréquence Plasma électrique (ω_{pe}). En effets, en dessous de cette fréquence les métaux présentent une permittivité négative.

$$\varepsilon_{eff} = \frac{\omega_{pe}^2}{\omega^2 + i\omega_c} \quad (\text{II.6})$$

Avec : ω_{pe} : la pulsation du plasma électrique.

ω_c : la pulsation de collision.

J.Pendry, proposa de réaliser un plasma artificiel en diluant le milieu métallique afin d'abaisser sa fréquence plasma et de satisfaire les conditions d'obtention d'une permittivité négative en dessous de l'ordinaire.

Sachant que la fréquence plasma électrique s'écrit sous la forme suivante [7] :

$$\omega_{pe}^2 = \frac{\rho e^2}{\varepsilon_0 + m_{eff}} \quad (\text{II.7})$$

Avec : ρ : La densité des électrons.

e : La charge des électrons. m_{eff} : La masse effective des électrons.

La démarche consistait à réaliser un réseau d'inclusions métalliques plus lourdes et ayant une densité d'électrons plus faible. La configuration retenue (Figure II 10) se base sur un réseau de tiges métalliques de rayon r, avec un pas du réseau a La fréquence de plasma pour cette configuration devient :

$$\omega_{pe}^2 = \frac{2\pi c_0^2}{a^2 + \ln(a/r)} \quad (\text{II.8})$$

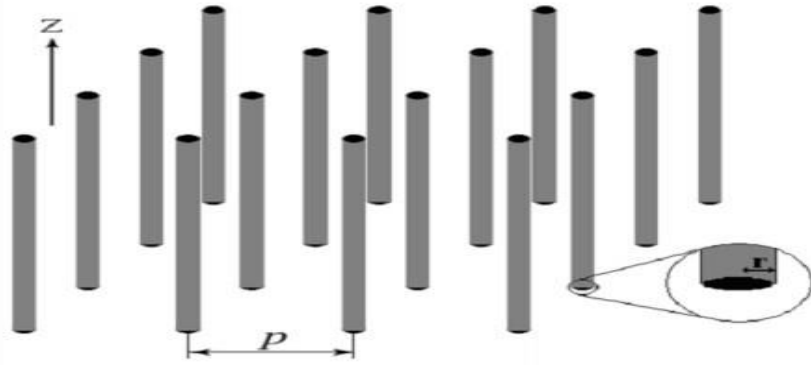


Figure II-10 : Métamatériaux ENG formé par un réseau de tiges métalliques.

II.6.4 Les Matériaux doublement négatifs (DNG)

Les matériaux DNG sont les matériaux avec une permittivité et une perméabilité simultanément négative, ces métamatériaux peuvent être réalisés par des cellules << imbriquées >> ou des cellules << combinées >>.

Le premier type imbrique deux cellules unitaires basiques : une cellule de type MNG, et l'autre de type ENG. A la résonance cette cellule composite montre un phénomène doublement négatif, l'exemple de ce type, réalisé par l'équipe de D.R.Smithse présente comme une cellule (SRR+Tige), (Figure II -11.a).

Cette cellule imbrique deux cellules unitaires basiques : la SRR ayant une activité magnétique et le réseau de tiges responsable de l'activité électrique.

A la résonance cette cellule composite montre un phénomène doublement négatif (Figure II -11. b).

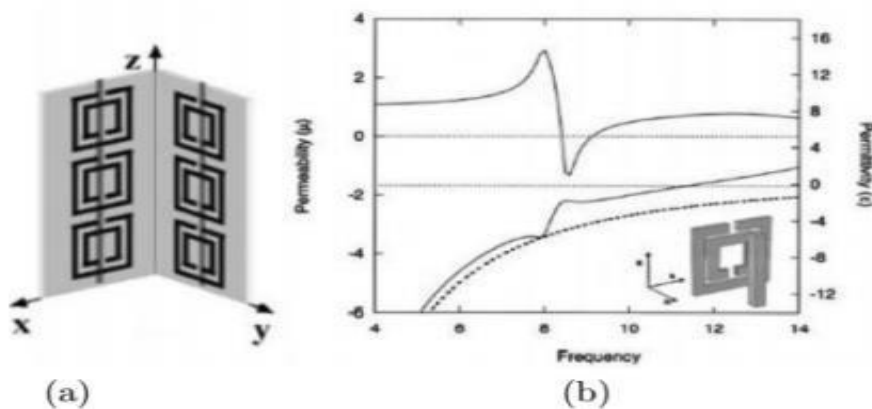


Figure II-11 : (a) cellule DNG- "SRR+Tige". (b) perméabilité et permittivité de la cellule "SRR+Tige".

Le deuxième type est basé sur un seul motif responsable sur une double activité simultanément. Comme exemple, la cellule DNG ayant l'allure de la lettre grecque « Ω » a été introduite par l'équipe de N.Engeta [23] (Figure II -12), et repoussée par H.Griguer [8-9].

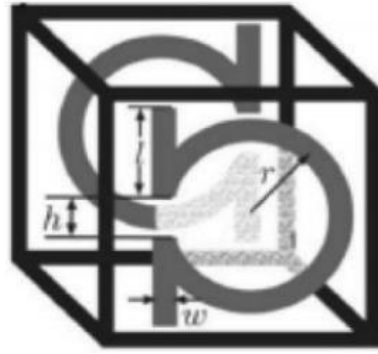


Figure II-12 : Cellule DNG sous forme de « Ω ».

II.7 APPLICATIONS LIEES AUX ANTENNES

Les métamatériaux sont à l'étude pour de nombreuses applications. En télécommunication le déploiement est surtout au niveau des antennes à métamatériaux.

Les applications dans le domaine des antennes, sont l'élargissement de la bande passante, le rejet de bandes de fréquences, l'augmentation de la directivité, l'amélioration du gain et la miniaturisation.

L'élargissement de la bande passante peut être obtenu en utilisant différentes techniques à base de métamatériaux, par exemple on peut concevoir des antennes patch démétallisées sur le patch et le plan de masse par des structures périodiques de deux dimensions, ces structures sont composées de résonateurs en anneaux fendus ou autres types de cellule unité à métamatériaux (tel que le résonateur en S ou oméga ... etc) [10,11] comme représente dans la figure II-13 (a).

Chaque cellule unité représente une fente qui pourra créer de nouvelle résonance. Le choix de la forme et de la taille de ces fentes déterminera les fréquences de fonctionnement de l'antenne et les impédances d'entrée.

L'association des résonances des fentes avec la résonance de l'élément métallique favoriserait ici l'élargissement de la bande passante. Ainsi que, pour ce type des antennes, le lobe principal du diagramme de rayonnement change de direction vers la position horizontale au lieu de la direction verticale grâce à l'effet du métamatériau.

Une des applications des métamatériaux concernant l'amélioration de l'adaptation des antennes patch est l'utilisation des fentes de type SRR ou DRR dans le patch ou dans le plan de masse. Dans [12], l'insertion de trois fentes de type DRR dans le patch rectangulaire donne une bonne adaptation qui atteint un niveau moins de -15 dB dans toute la bande définie par le FCC (3.1-10.7 GHz) [13].

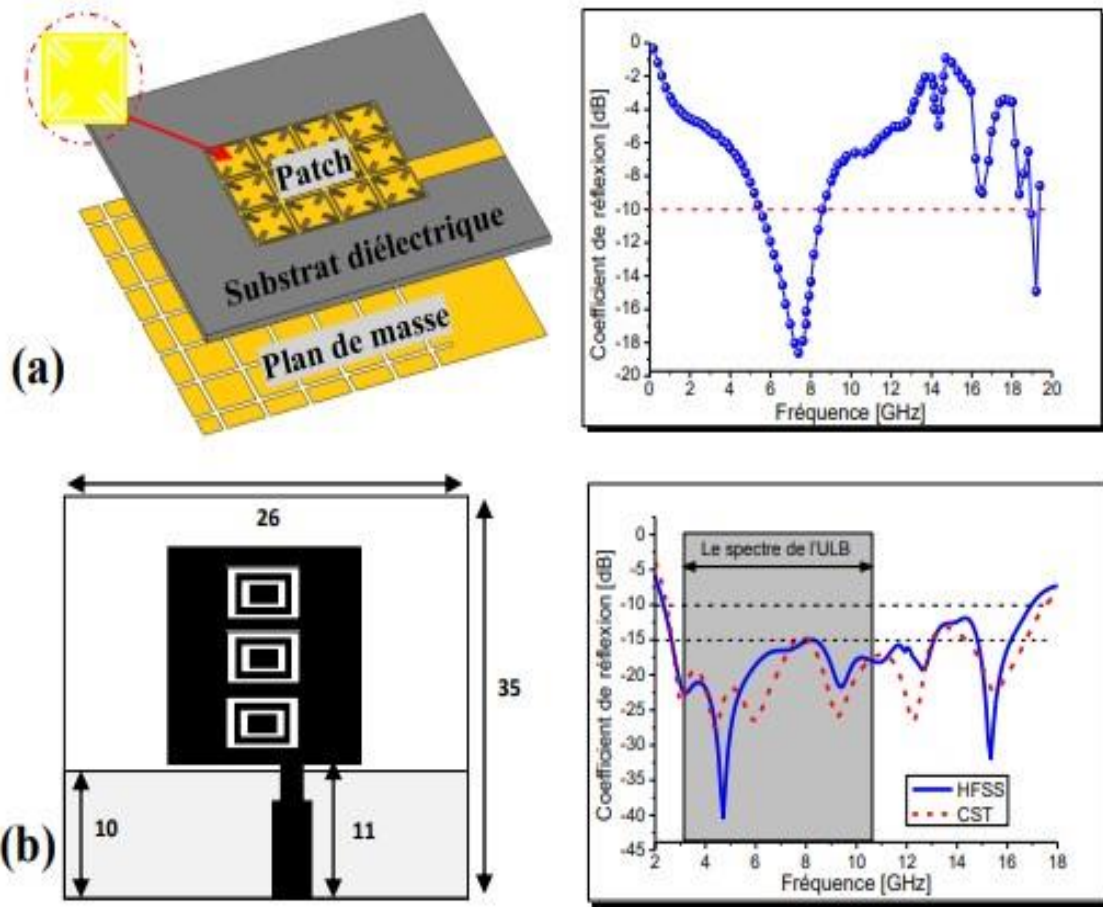


Figure II-13 : (a) antenne patch à large bande et leur S11 [10], (b) antenne patch avec trois cellules unitaires de type CDRR et leurs S11 [12].

L'utilisation des structures métamatériaux, RAF (résonateur en anneau fendu) ou RAFC (résonateur en anneau fendu complémentaire), permet également de stopper certaines bandes de fréquence due à leurs propriétés non ordinaires. Quand les ondes électromagnétiques se propagent sur les SRRs le long de la direction, la polarisation de champ électrique est gardée le long de l'axe, et la polarisation du champ magnétique est gardée le long de l'axe. En raison de cette propriété, ces structures réfléchissent parfaitement les ondes EM.

Cheolbok Kim et al. et J. Kim et al [14,15] ont inséré la structure SRR sur l'élément rayonnant et la ligne d'alimentation CPW pour obtenir la fonction stop bande dans l'antenne ULB. Cette méthode est présentée sur la figure II -14.

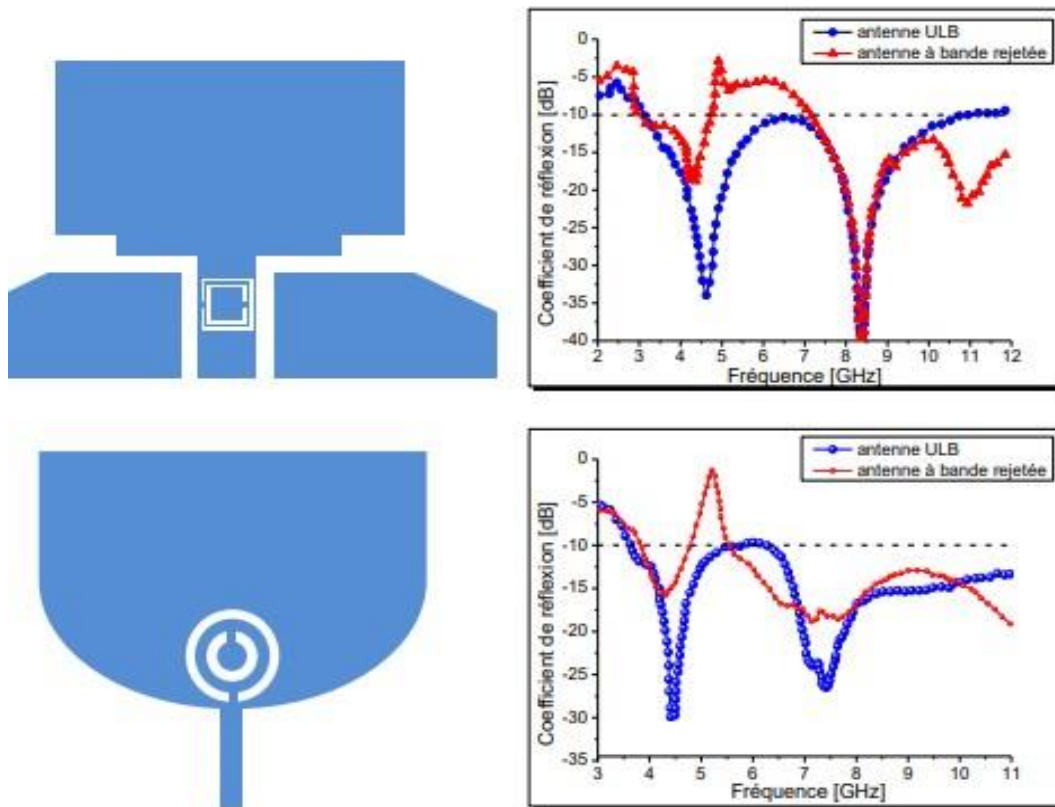


Figure II-14 : Structures d'antenne patch monopole à bande coupée et leur S11 [14,15].

Dans le domaine des antennes, certains métamatériaux trouvent également des applications en raison de leurs propriétés en réflexion. En particulier, ils permettent de réaliser des conducteurs magnétiques matriciels (Artificial Magnetic Conductors (AMC)). Du point de vue de leurs propriétés en réflexion, ceux-ci s'apparentent à des équivalents magnétiques des surfaces métalliques, et présentent un déphasage à la réflexion de valeur nulle. Cette propriété permet d'importantes réductions d'encombrement pour les systèmes comportant une antenne et un plan réflecteur arrière, telles les antennes à cavité [16,17], ou les antennes comportant un plan de masse, telles les antennes patch [18]. De plus, il est possible d'obtenir simultanément une réduction des ondes de surface sur ces plans réflecteurs, qui sont à l'origine de couplages parasites lorsque l'on souhaite réaliser un réseau d'antennes ou pour des applications Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) [18, 19].

Des applications exploitant les propriétés de réfraction de certains métamatériaux ont également été proposées. Ainsi, si on place une antenne non directive à l'intérieur d'une lame de métamatériau présentant un indice effectif proche de zéro, on obtiendra une forte augmentation de la directivité, avec la formation d'un lobe principal étroit orienté suivant la normale à la lame [20].

Pendant plusieurs années les matériaux à indice négative ont très fortement attiré l'attention des antennistes. Ces matériaux ont été proposés aussi pour réaliser des miniaturisations d'antennes et pour optimiser leurs performances [21]. Ainsi, Mohmoud Abdalla, et al, ont conçu une antenne patch compact triple bande à base de métamatériau pour tous les applications WiMAX [22]. Cette antenne a été conçue à l'aide d'une antenne patch rectangulaire monopôle alimentée par ligne microbande coplanaire CPW et deux cellules à métamatériaux. Chaque cellule peut être conçue séparément pour résonner à une fréquence différente afin qu'il puisse présenter deux bandes de fréquences différentes. L'antenne patch monopôle contribue à obtenir la troisième bande. Une réduction de la taille de 66%, 50% et 25% aux 2.4GHz, 3.5 GHz et 5.5 GHz respectivement a été réalisé.

II.8 CONCLUSION

Le concept de métamatériaux et de réfraction négative dans les structures artificielles périodiques ouvre de nouvelles voies de recherche en électromagnétisme, ouvrant la voie à un grand potentiel, notamment dans le domaine des télécommunications, notamment les antennes patch. Cette nouvelle classe de matériaux, appelés métamatériaux, a été largement utilisée pour concevoir des dispositifs hyperfréquences tels que des antennes, des guides d'ondes, des filtres, etc.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Christophe COUTANT, « Synthèse, assemblage et caractérisation de matériaux plasmoniques pour une application aux métamatériaux », Thèse de doctorat, Université de BORDEAUX, le 16 Décembre 2014.
- [2] V. G. Veselago, “The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ ,” Sov. Phys. USPEKHI, vol. 10, no. 4, pp. 509–513, 1968.
- [3] C. F. Bohren and J. Huffman, Absorption and Scattering of Light by Small Particles. Wiley-VCH, 1983.
- [4] S.A.Ramakrishna, T. M. Grzegorzczak, “Physics and applications of negative refractive index materials”, CRC press, 2009.
- [5] V. G. Veselago, “The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ ”, Soviet Physics USPEKHI, 10 (1968), 509–514. Aprévoiser
- [6] E. Lheurette, « Métamatériaux à indice négatif de réfraction : des micro-ondes aux fréquences térahertz, HDR, ». Thèse de Doctorat ; Université de Lille 1, Juin 2009.
- [7] Lalj H. Griguer H. Drissi M. “Filtre microondes Reject-band à base des Métamatériaux” Congrès Méditerranéen des Télécoms (CMT2010), Casablanca (Maroc), 4p, mars 2010.
- [8] Lalj H. Griguer H. Drissi M. “Compact Bandstop Filter based on Complementary Metamaterial Resonators” Colloque International Telecom’2011 & 7èmes JFMMA, Tanger (Maroc), 16-18 Mars, 2011
- [9] Griguer H. Marzolf E. Lalj H. Riouch F. Drissi M. « Investigation and Design of 3D Metamaterial for the Enhancement of Patch Antenna Radiation” IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI National Radio Science Meeting, ISBN : 978-1-4244-3647-7, Charleston (USA), 4p, 1-5 juin 2009.
- [10] L.W. Li, Y.N. Li, T.S. Yeo, J.R. Mosig and O.J.F. Martin, “A broadband and high-gain Metamaterial microstrip antenna”, Applied Physics Letters, 96 (2010), 164101.
- [11] H. XIONG, J. S. HONG, and Y.H. PENG, “Impedance bandwidth and gain improvement for microstrip antenna using metamaterials”, Radio Eng, 21 (2012), 993-998.
- [12] T. Bougoutaia, D. Khedrouche and A. Hocini “Bandwidth Improvement for Compact Microstrip Patch Antenna Using Metamaterials”, Acta Physica Polonica A, 129 (2016), 538540.
- [13] Federal Communication Commission, “First order and report: Revision of part 15 of the Commission's rules regarding UWB transmission systems”, April 22, 2002.

- [14] C. Kim ; J. Jang; Y. Jung; H. Lee; J. Kim; S. Park and M. S. Lee, “Design of a frequency notched UWB antenna using a slot-type SRR”, *International Journal of Electronics and Communication*, (2009), 1087-1093.
- [15] J. Kim ; C. S. Cho and J. W. Lee, “5.2 GHz notched ultra-wideband antenna using slotted SRR”, *Electronics Letters*, 42 (2006), 315-316.
- [16] A. P. Feresidis, G. Goussetis, S. Wang et J. C. Vardaxoglou, “Artificial magnetic conductor surfaces and their application to low-profile high-gain planar antennas”, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 53 (2005), 209 - 215.) for □□□□
- [17] A. Ourir, A. de Lustrac J.-M. Lourtioz, “All-metamaterial-based subwavelength cavities (ultrathin directive antennas”, *Applied Physics Letters*, 88 (2006), 084103.
- [18] D. Sievenpiper, L. Zhang, R. F. Jimenez Broas, G. Alexopolous et E. Yablonovitch, “impedance electromagnetic surfaces with a forbidden frequency band”, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 47 (1999), 2059 - 2074.
- [19] K. M. K. H. Leong, C. J. Lee and T. Itoh, “Compact metamaterial-based antennas for mimo applications”, *International Workshop on Antenna Technology: Small and Smart Antennas Metamaterials and Applications*, Cambridge, UK, 21-23 March 2007.
- [20] S. Enoch, G. Tayeb, P. Sabouroux, N. Guerin et P. Vincent, “A metamaterial for directive emission” *Physical Review Letters*, 89 (2002), 213902.
- [21] H. A. Jang, D. O. Kim, and C. Y. Kim, “Size Reduction of Patch Antenna Array Using CSRRs Loaded Ground Plane”, *Progress In Electromagnetics Research Symposium Proceedings KL, MALAYSIA*, 27-30 March, 2012.
- [22] M. Abdalla, U. Abdelnaby and A. A. Mitkees, “Compact and Triple Band Meta-Material Antenna for All WiMAX Applications”, *International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP)*, Nagoya, Japan, 29 Oct.-2 Nov, 2012.

CHAPITRE III :
Simulations et résultats

Chapitre III : Simulations et résultats

III.1 INTRODUCTION

L'objectif de ce chapitre est de concevoir des antennes imprimées pour les applications 5G. Nous décrirons d'abord brièvement le logiciel utilisant CST Microwave Studio (MWS), puis nous commencerons par la première étape, qui consiste à étudier la première antenne monocristalline rayonnant à la fréquence de résonance de 3.5 GHz, puis nous effectuerons des simulations pour trouver les paramètres internes (paramètres S ..., bande passante) et caractéristiques externes (gain et diagrammes de rayonnement). Ensuite, nous allons concevoir une structure unique pour l'antenne, le but est d'augmenter le gain, la meilleure façon est de concevoir un réseau d'antennes.

Enfin, nous présentons des résultats de simulation pour évaluer les performances de notre antenne proposée en termes de coefficient de réflexion, de rapport d'onde stationnaire (VSWR), de diagramme de rayonnement, de gain et d'efficacité. Nous terminons ce chapitre par des comparaisons générales et des conclusions.

III.1.1 Présentation du logiciel Microwave Studio de CST

Le logiciel CST (Computer Simulation Technology) Microwave Studio est un outil dédié à la conception électromagnétique de composants haute fréquence tels que les lignes de transmission, les filtres, les antennes, etc. Basé sur la résolution des équations de Maxwell, le logiciel suit la technique Finite Integral (FIT) et peut être considéré comme une puissante méthode FDTD (Finite Difference Time Domain).

Les méthodes numériques (FIT) fournissent une discrétisation spatiale qui permet de décrire directement en 3D tous les composants du système décrit, ce qui le rend applicable à de nombreux problèmes électromagnétiques, allant du calcul de champs statiques aux applications haute fréquence dans le domaine temporel ou fréquentiel.

Pour résoudre numériquement les équations de Maxwell, un domaine de calcul est défini. Par conséquent, l'espace est divisé en cellules de base, les mailles dites parallélépipédiques. Par conséquent, la discrétisation résultante est volumétrique, et chaque cellule du maillage est cubique. Une fois les composants modélisés, une procédure de maillage automatique peut être appliquée avant de démarrer le moteur de simulation.

L'outil Time Solver remplace les dérivées partielles par des différentiels. Cet outil d'analyse temporelle est très avantageux en termes de temps de calcul [1].

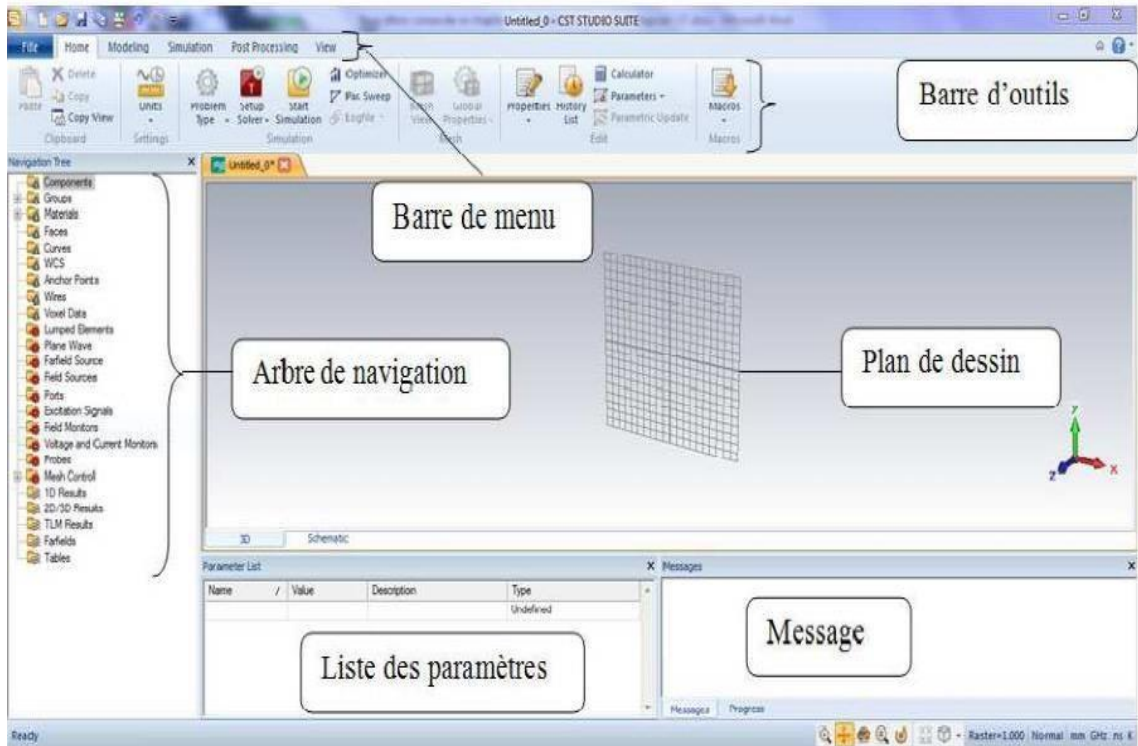


Figure III-1 : Interface du CST [1].

III.2 CAHIER DES CHARGES

Ce projet consiste à réaliser une antenne patch à la fréquence de 3.5 GHz. Le cahier des charges nous impose les valeurs caractérisant des différents éléments de l'antenne :

- Permittivité diélectrique du substrat $\epsilon_r = 4.3$ (FR4) et $\epsilon_r=11.9$ (Silicone).
- Hauteur du substrat diélectrique : $h_s = 1.6mm$.
- Fréquence de résonance que l'on désire : $= 3.5GHz$.
- Adaptation à 50 Ohm.
- Alimentation par ligne microstrip.
- Epaisseur de la métallisation : $h_c = 0.035mm$.

III.2.1 Calculs théoriques des dimensions de l'antenne patch rectangulaire

➤ Détermination de la largeur W_p du patch :

Cette formule calcule la largeur de patch pour un fonctionnement à la fréquence de résonance de 3,5 GHz. Cette formulation optimise le rayonnement et confine les modes d'ordre supérieur.[2]

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

- Détermination de la longueur de patch (**Lp**) :

$$Lp = L_{eff} - 2\Delta L = \frac{c}{2f_r \sqrt{\epsilon_{eff}}} - 2\Delta L \quad (\text{III.2})$$

- La longueur efficace **L_{eff}** :

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

- Calcul des constantes diélectriques effectifs **ε_{eff}** :

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[\left(1 + 12 \frac{h}{w} \right)^{-\frac{1}{2}} \right] \quad (\text{III.4})$$

- Extension de longueur (**ΔL**) :

$$\Delta L = 0.412h \frac{(\epsilon_{eff} + 0.3) \left(\frac{w}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon_{eff} - 0.258) \left(\frac{w}{h} + 0.813 \right)} \quad (\text{III.5})$$

- Détermination de la longueur d'alimentation (**Lf**) :

$$Lf = \frac{c}{2f} \quad (\text{III.6})$$

- Détermination de la longueur de substrat (**Lg**) :

$$Lg = Lp + 6.h + Lf \quad (\text{III.7})$$

- Détermination de la largeur du substrat (**wg**) :

$$Wg = wp + 6.h \quad (\text{III.8})$$

- Détermination de la largeur de la ligne d'alimentation (**wf**) avec **Zc=50Ω** :

Nous avons utilisé le calculateur cst pour calculer wf.

Paramètres	FR4	Silicone
W_p (mm)	26.326	16.86
ϵ_{eff}	3.7601	9.658
L_e (mm)	12.47	8.32
ΔL (mm)	0.7251	0.644
(mm)	20.216	12.10
(mm)	42.857	42.857
(mm)	3.137	1.27
(mm)	72.673	64.557
(mm)	35.926	26.46

Tableau III-1 : Dimensions des paramètres de l'antenne patch.

III.3 RESULTATS DE CONCEPTION ET DE SIMULATION DE L'ANTENNE PATCH

Maintenant, avec toutes les dimensions calculées, nous pouvons représenter l'antenne patch à 3.5 GHz à CST, ce qui représente l'une des fréquences utilisées pour les applications 5G.

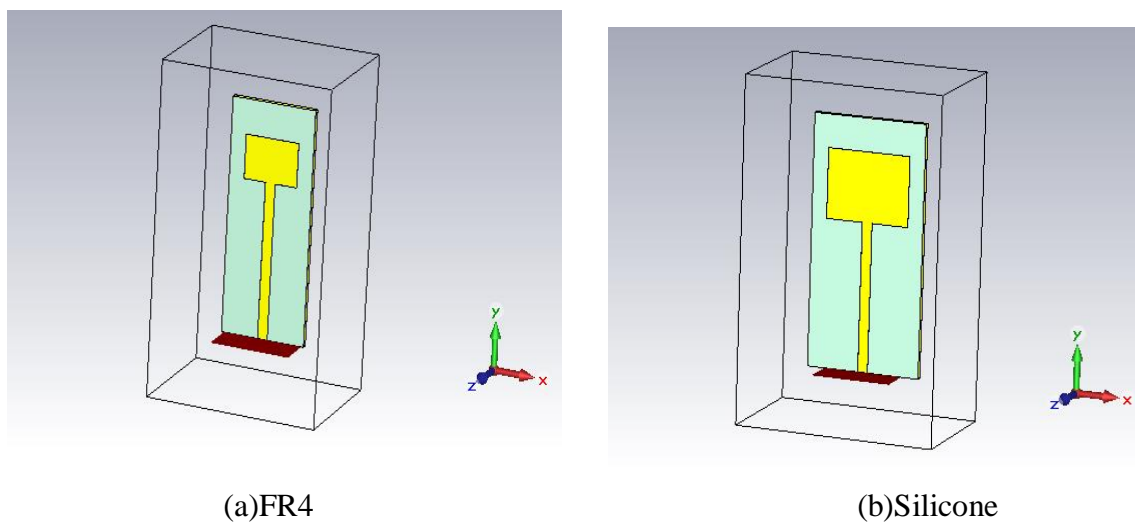


Figure III-2 : Antenne patch initiale (a)FR4 (b) Silicone.

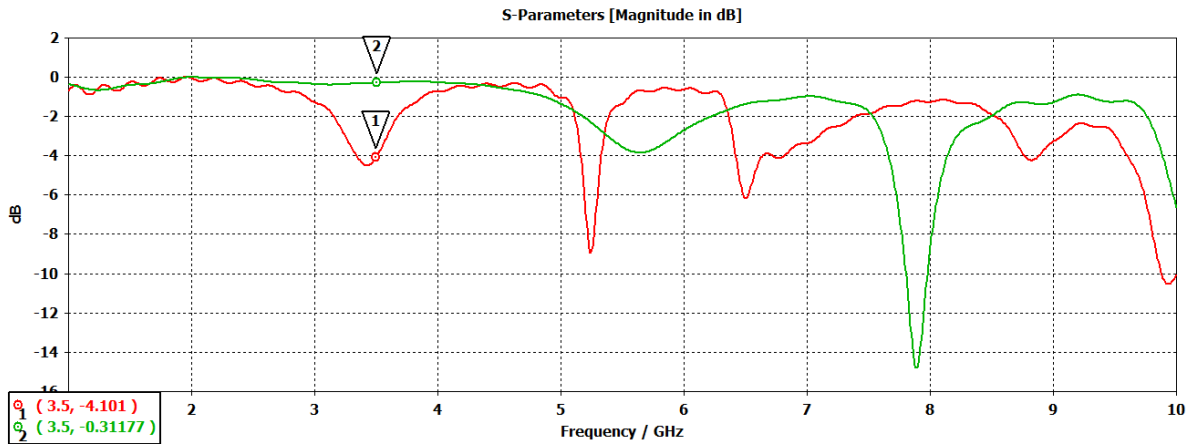


Figure III-3 : Coefficient S11 de l'antenne patch sans encoches en fonction de la fréquence pour les substrats FR4 Silicone.

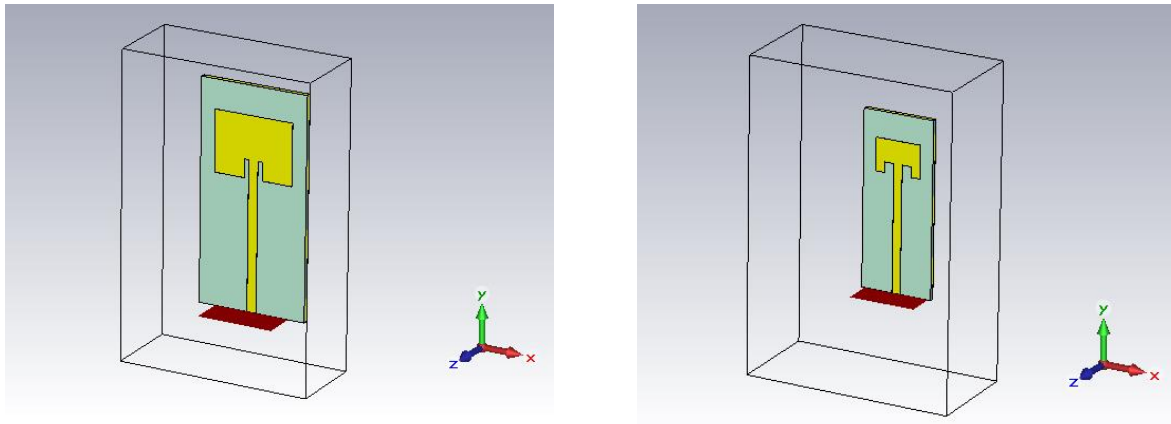
Paramètres	FR4	Silicone
Coefficient de réflexion S1 ,1	-25.824	-18.723
VSWR	4.31	51.99
Gain	6.18	5.34

TableauIII-2 : Résultats de simulation de l'antenne imprimée initiale.

Nous avons remarqué que notre antenne ne s'adapte pas à notre fréquence de résonance, pour bien l'adapter nous allons utiliser la méthode encoche.

III.3.1 Conception de l'antenne patch rectangulaire avec encoches

La figure (III.4) montre une antenne patch rectangulaire avec des rainures pour mieux accueillir l'antenne patch à la fréquence de résonance de 3.5 GHz



(a)FR4

(b) Silicone

Figure III-4 : Antenne imprimée avec encoches (a) FR4 (b) Silicone.

La figure III.5 représente le résultat de simulation du coefficient S11 de l'antenne patch avec encoches adaptées en fonction de la fréquence.

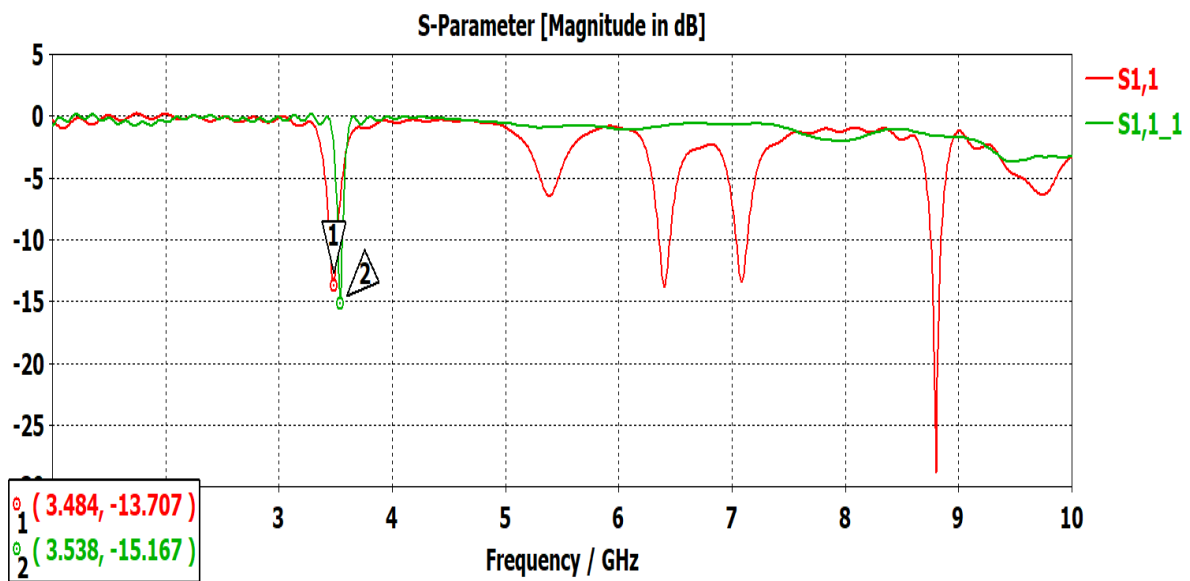


Figure III-5 : Coefficient S11 de l'antenne patch avec encoches en fonction de la fréquence (S1,1) FR4 (S1,1_1) Silicone.

La figure III.5 représente le résultat de simulation du coefficient S11 qui est de l'ordre de -13.707 dB pour FR4 et -15.167 dB silicone pour les fréquences de résonnances de 3.484 GHz et 3.538 GHz.

La figure III.6 représente le taux d'ondes stationnaireVSWR de l'antenne patch avec encoches.

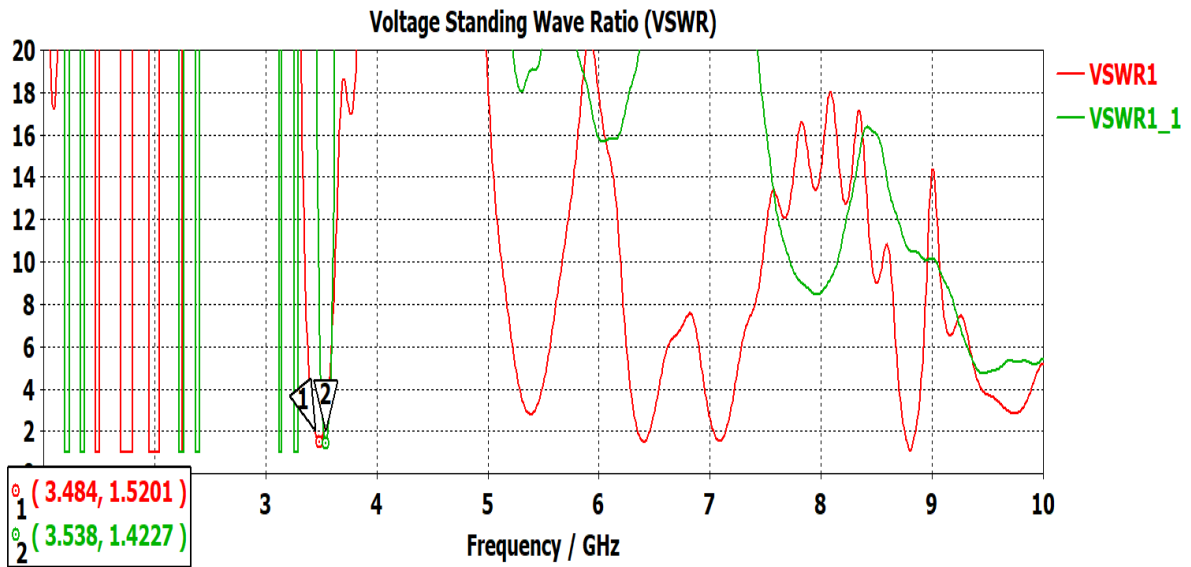
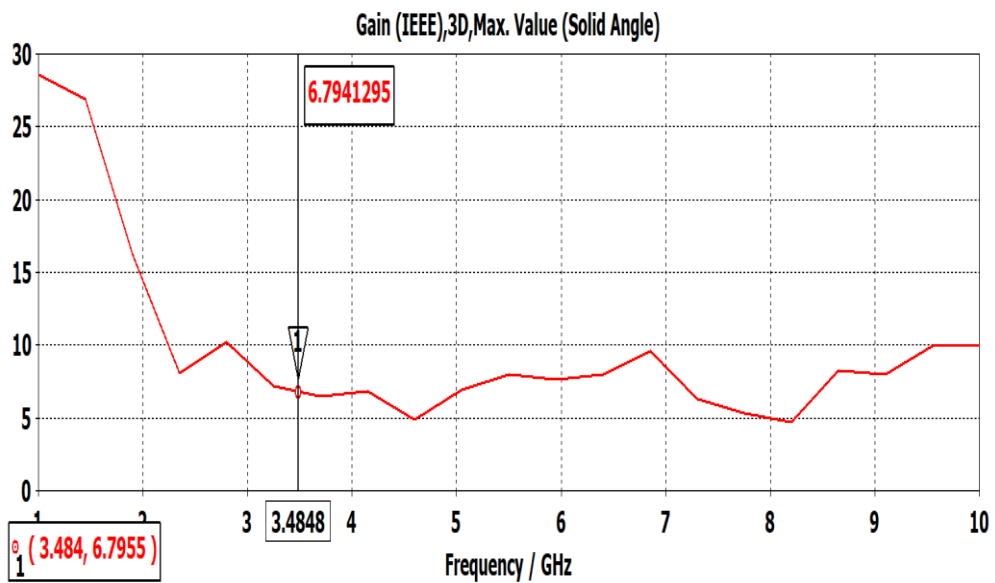
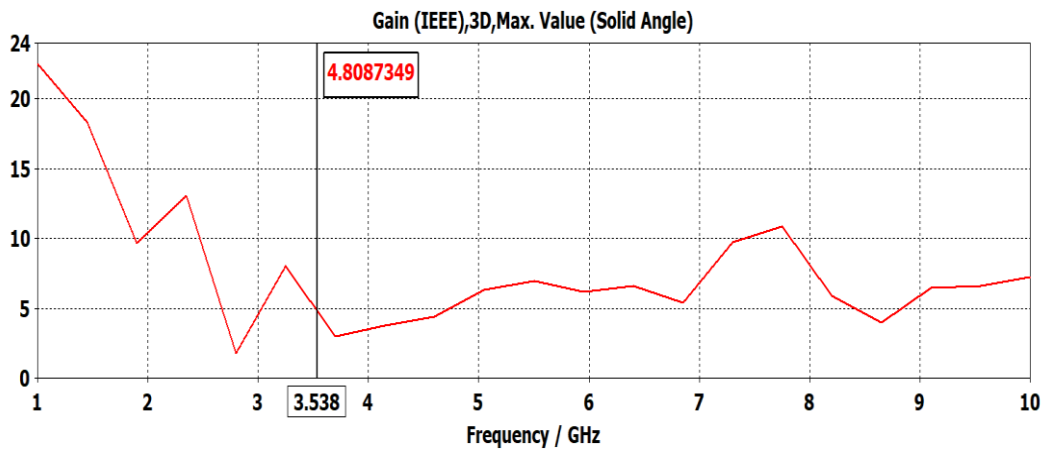


Figure III-6 : Taux d'ondes stationnaire (1) FR4 (2) Silicone.

La figure III.7 représente le gain d'antenne.



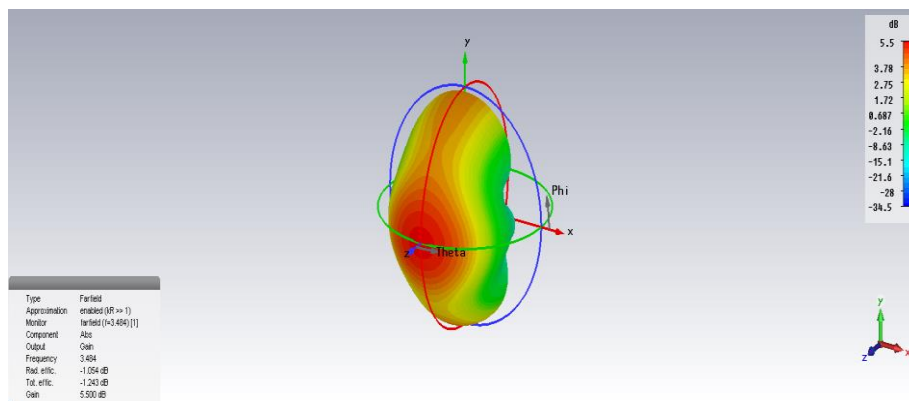
(a) FR4



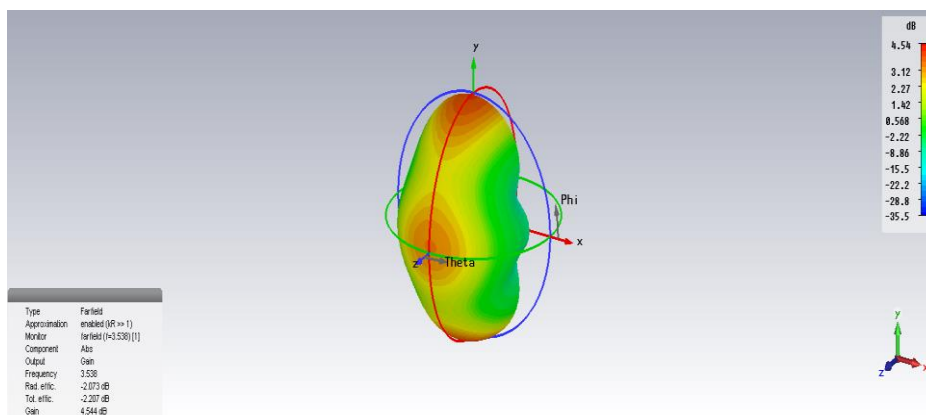
(b) Silicone

Figure III-7 : le gain d'antenne (a) FR4 (b) Silicone.

Sur les figures III.8, III.9 on représente respectivement les diagrammes de rayonnements 3D et en polaire de l'antenne à la fréquence de résonance 3.5 GHz.

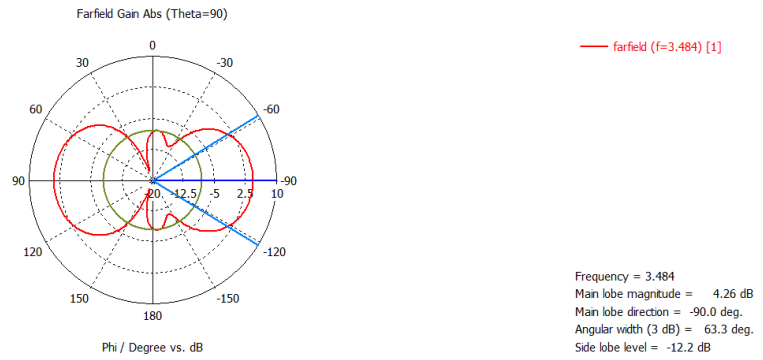


(a)FR4

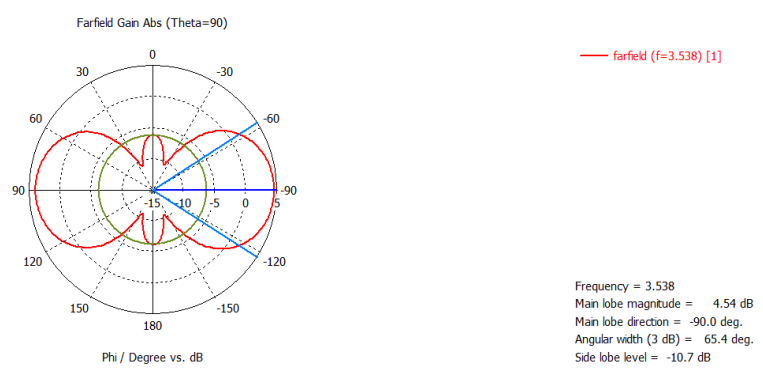


(b)Silicone

Figure III-8 : Diagramme de rayonnement en 3D.



(a)FR4

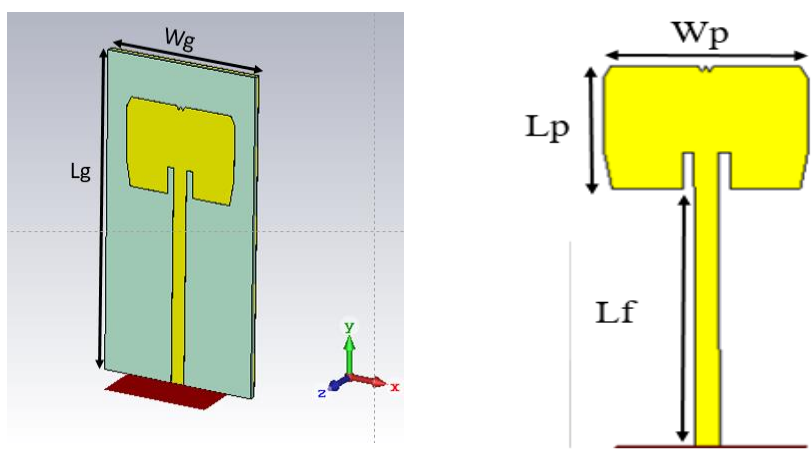


(b)Silicone

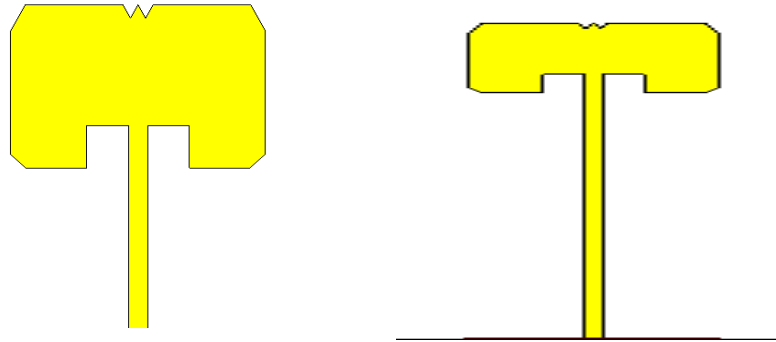
Figure III-9 : Diagramme de rayonnement en présentation polaire.

III.3.2 Conception de l'antenne patch avec une nouvelle structure

Après avoir réalisé une antenne patch rectangulaire connue de la littérature qui résonne à 3.5 GHz, nous vous proposons maintenant un nouveau design pour l'antenne précitée.



(a)FR4



(b)Silicone

Figure III-10 : Antenne patch avec une nouvelle structure (a)FR4 (b) Silicone.

- **Coefficient de réflexion :**

Le paramètre S11 de l'antenne patch présente un comportement approprié, comme le montre la figure III.8. L'antenne résonne à 3.5 GHz, ce qui signifie un bon résultat.

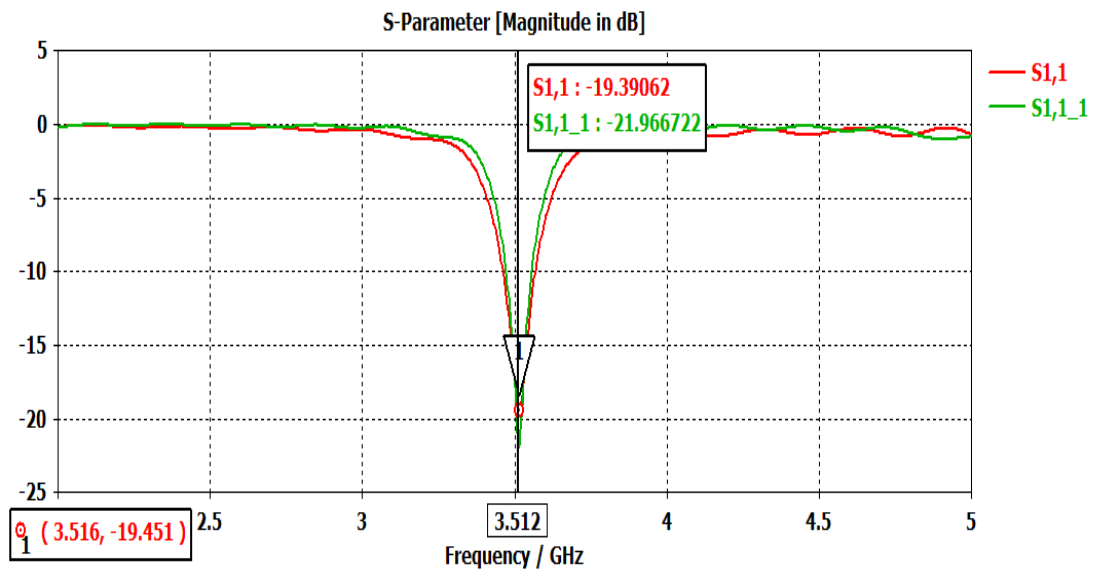


Figure III-11 : Coefficient S11 de l'antenne en fonction de la fréquence (S1,1) FR4 (S1,1_1) silicone.

-**Taux d'ondes stationnaire**

Le VSWR nous donne une bonne qualité d'adaptation nous avons relevé un VSWR<2 pour la fréquence de résonance 3.5GHz comme l'indique la figure III.12.

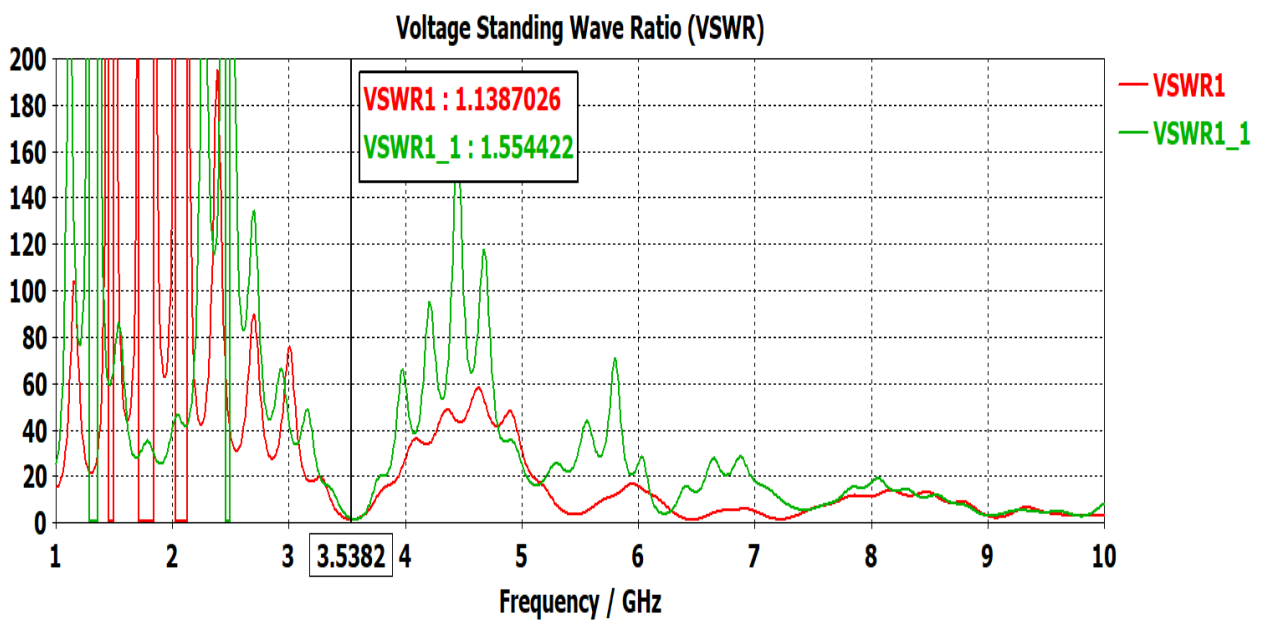
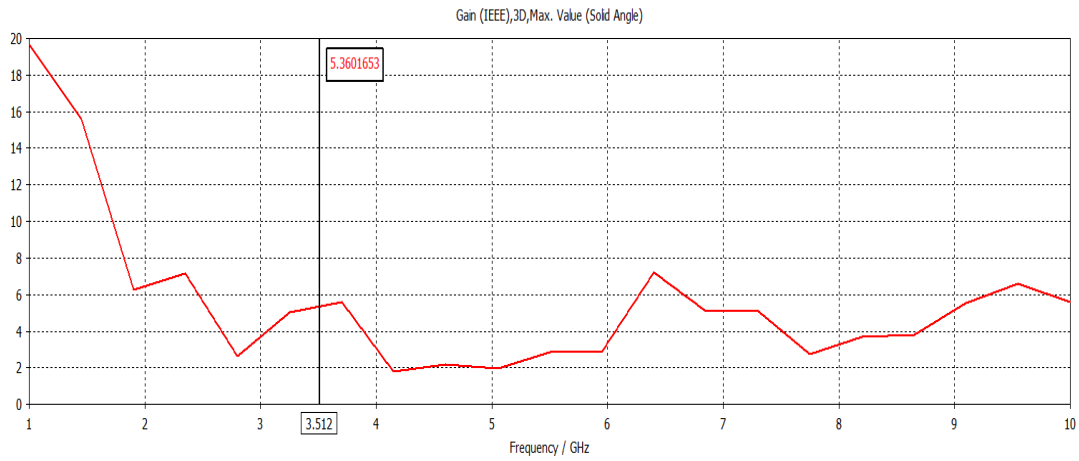
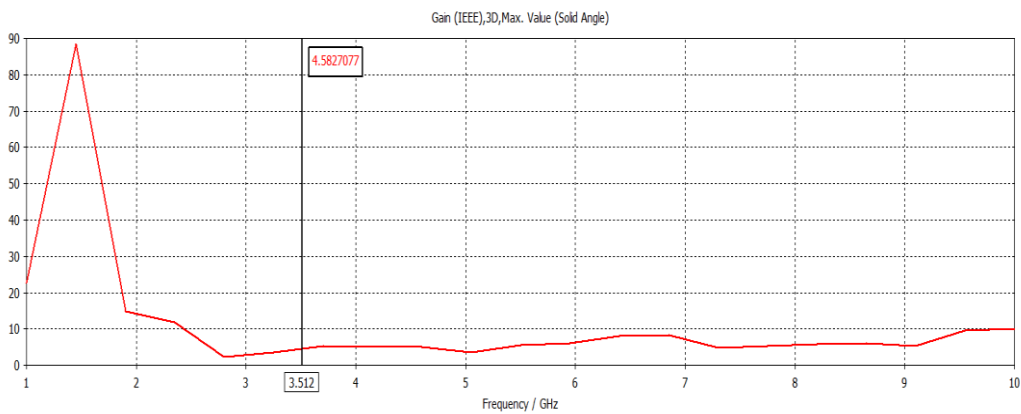
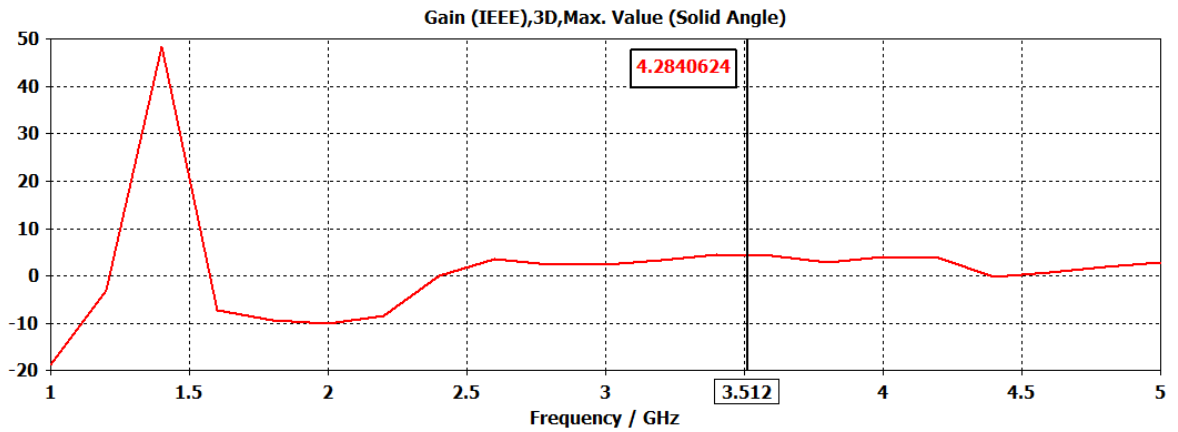


Figure III-12 : le taux d'ondes stationnaire pour la nouvelle structure (1) FR4 (1_1) Silicone.

-Gain de l'antenne :



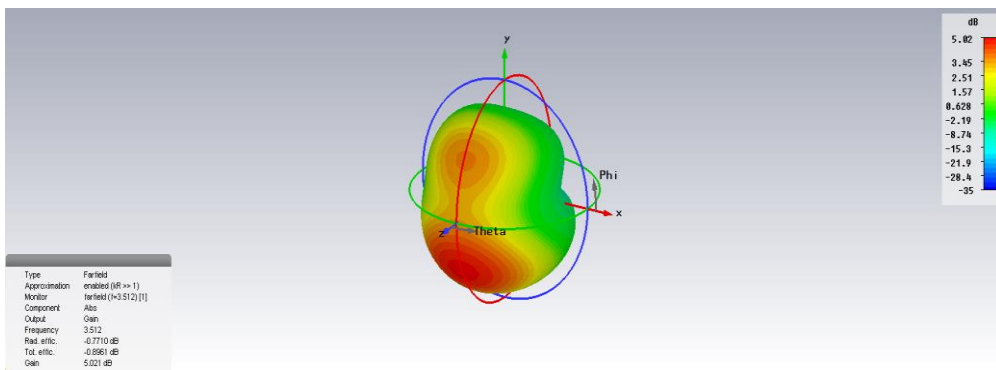
(a) FR4



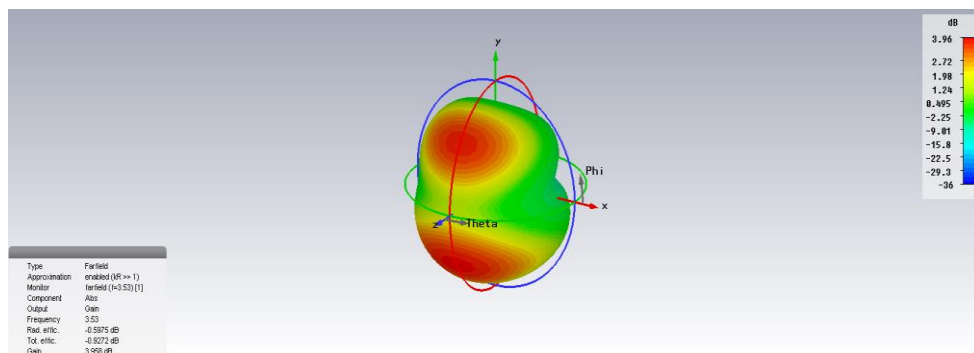
(b) Silicone

Figure III-13 : le gain d'antenne.

-Diagramme de rayonnement du gain



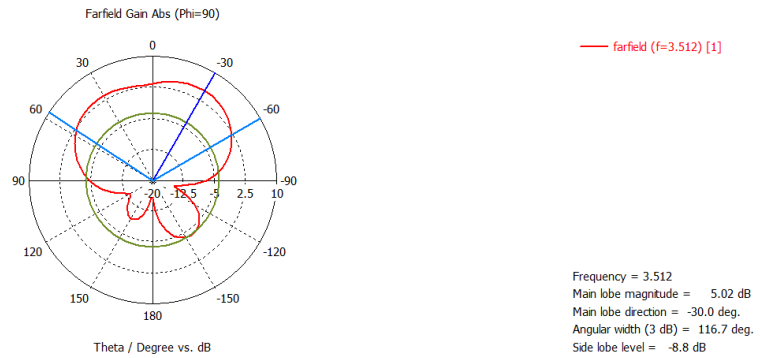
(a)FR4



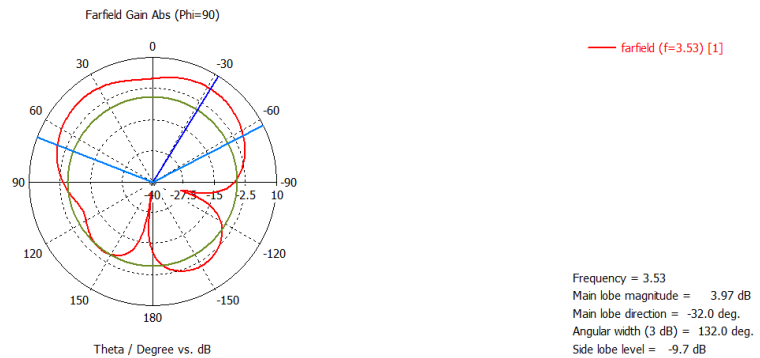
(b)Silicone

Figure III-14 : Diagramme de rayonnement du gain en 3d.

Le diagramme de rayonnement de l'antenne a une forme appropriée comme le montre la figure III.15, la valeur de gain est = 5.01 dB pour FR4 et 4.33 dB pour le substrat silicone.



(a)FR4



(b)Silicone

Figure III-15 : Diagramme de rayonnement en présentation polaire (a) FR4 (b) Silicone.

D'après la figure on remarque que le rayonnement est concentré dans la partie supérieure de l'antenne (entre le plan Y et Z).

III.4 CONCEPTION ET SIMULATION DES CELLULES SRR ET CSRR

III.4.1 Conception et simulation de la cellule SRR ou RAF à 2 anneaux

La figure III-14 montre une configuration typique du RAF circulaire introduit par Pendry, qui constitue l'élément de base pour la fabrication des MNG. Le résonateur, constitué de deux anneaux métalliques imbriqués l'un dans l'autre de manière opposée, fonctionne sur la base du phénomène de résonance électromagnétique des inclusions qui créent une polarisation artificielle. Il s'agit de l'inductance de la boucle, et de la composante capacitive due à la capacité entre les deux boucles.

L'objectif principal de la conception RAF est de générer une réponse magnétique négative dans une bande de fréquence étroite. À cette fin, nous avons étudié la cellule unitaire illustrée à la Figure III-16, dimensionnée pour un fonctionnement à 3,5 GHz. L'épaisseur des deux anneaux métalliques en cuivre est de 0,5 mm, et ils sont disposés d'un côté d'un substrat

diélectrique FR4 avec une permittivité relative de 4,3 et une perte tangentielle de l'ordre de 0,0035.

-Pour concevoir un SRR on prend les dimensions suivantes :

-La dimension de l'are du substrat est $L_s = 5.55\text{mm}$.

-La longueur $W_1 = 5.3\text{ mm}$.

-La largeur de substrat $a = 0.3\text{ mm}$.

-La distance entre les deux anneaux $b = 0.15\text{ mm}$.

-La largeur du gap $c = 0.3\text{ mm}$.

Les matériaux utilisés :

✚ Le SSR : cuivre (Cooper)

✚ Le gap : cuivre (Cooper)

✚ Pour le substrat : FR-4

✚ Le Box : vacuum

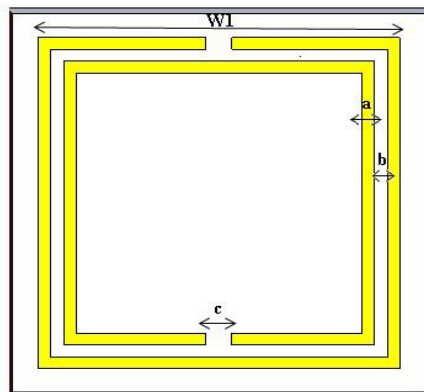


Figure III-16 : Représentation de la cellule unitaire SRR.

Le résultat de simulation de SRR est présenté sur les figures suivantes :

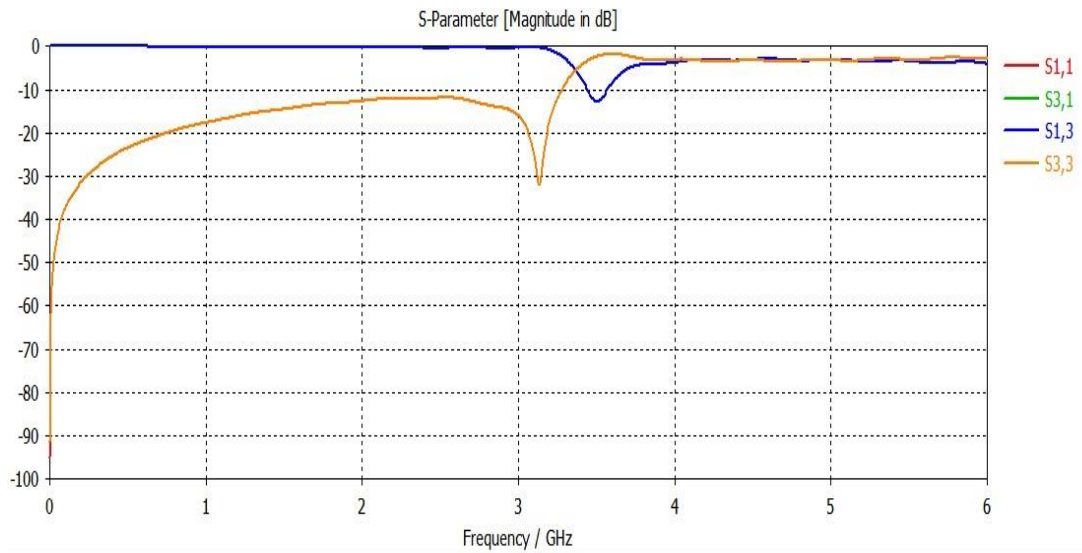


Figure III-17 : Représentation des paramètres S11 et S21 qui se croisent.

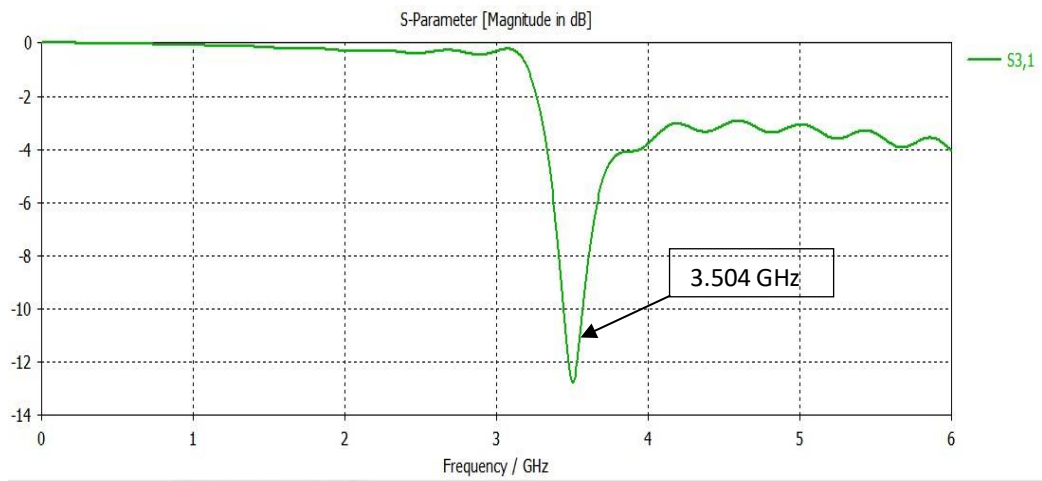


Figure III-18 : Coefficient de transmission S₂₁ en dB.

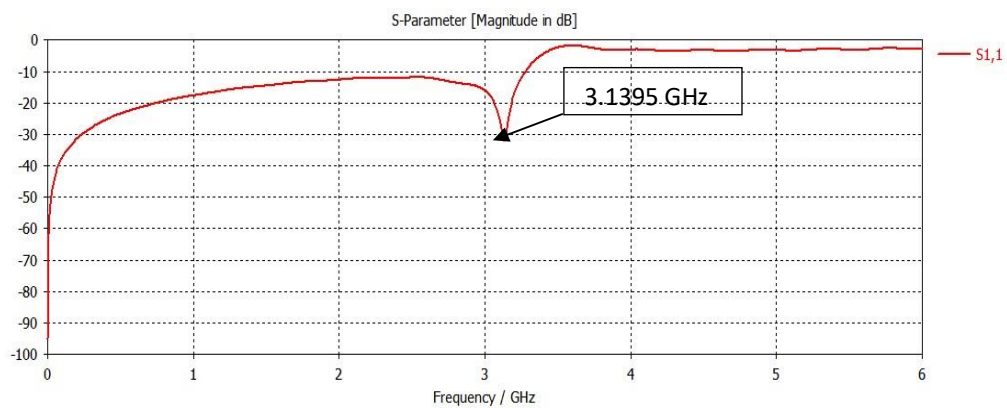


Figure III-19: Coefficient de réflexion S₁₁ en dB.

Les figures III.18 et III.19 montrent les coefficients de réflexion (S_{11}) et de transmission (S_{21}) en dB après le carré RAF montré dans la figure de simulation. On peut observer que le coefficient de réflexion (S_{21}) est inférieur à -10 dB à 3.504 GHz. On observe également que le coefficient de réflexion (S_{11}) du RAF est de -31,2 dB pour une fréquence de 3,1395 GHz. Cette résonance est la résonance magnétique et la résonance électrique obtenues après que le champ magnétique pénètre dans l'anneau et génère un courant induit circulant sur l'anneau et excite la découpe de l'anneau.

III.4.2 Conception et simulation de la cellule CSRR ou RAFC à 2 anneaux

Les cellules SRR complémentaires appelées CSRR sont les doubles homologues des SRR, parfois appelées « résonateurs en anneau fendu à fentes », constituées de fentes de la même taille que le SRR correspondant. Selon le principe de dualité, les propriétés de CSRR ont une relation duale avec les propriétés de SRR. SRR se comporte comme un dipôle magnétique ponctuel, tandis que CSRR se comporte comme un dipôle électrique ponctuel polarisé négativement. En raison de la taille partagée, les unités SRR et CSRR présentent approximativement la même fréquence de résonance. La Figure III.16 montre un CSRR à 2 anneaux.

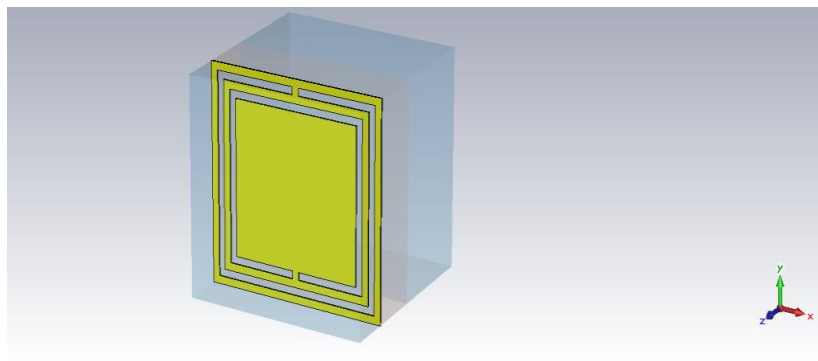


Figure III-20 : Représentation d'un résonateur complémentaire en anneau fendu (CSRR) carré.

La figure III.21 représente le coefficient de réflexion (S_{11}) de la cellule complémentaire CSRR.

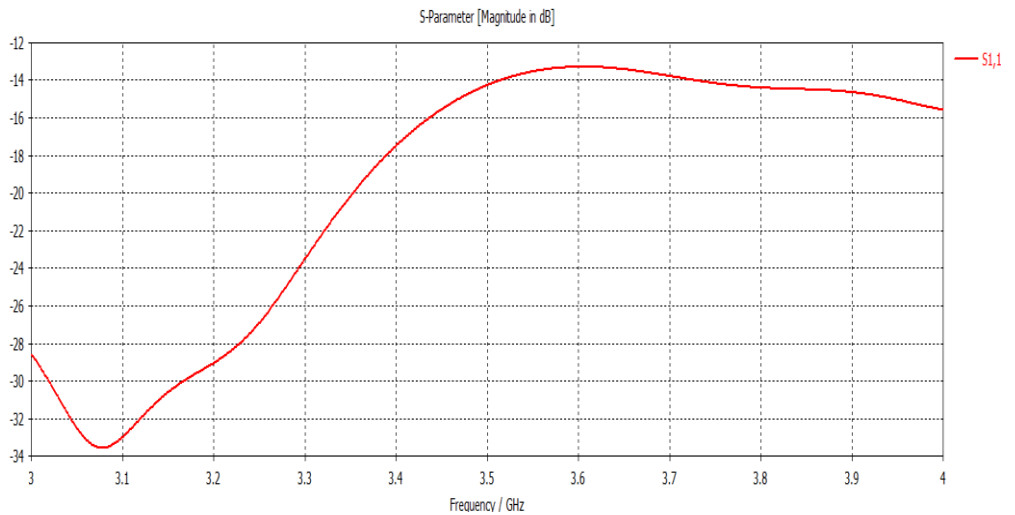


Figure III-21 : Coefficient de réflexion (S11) pour la CSRR.

La figure III.22 représente le coefficient de transmission (S₂₁) de la cellule complémentaire CSRR.

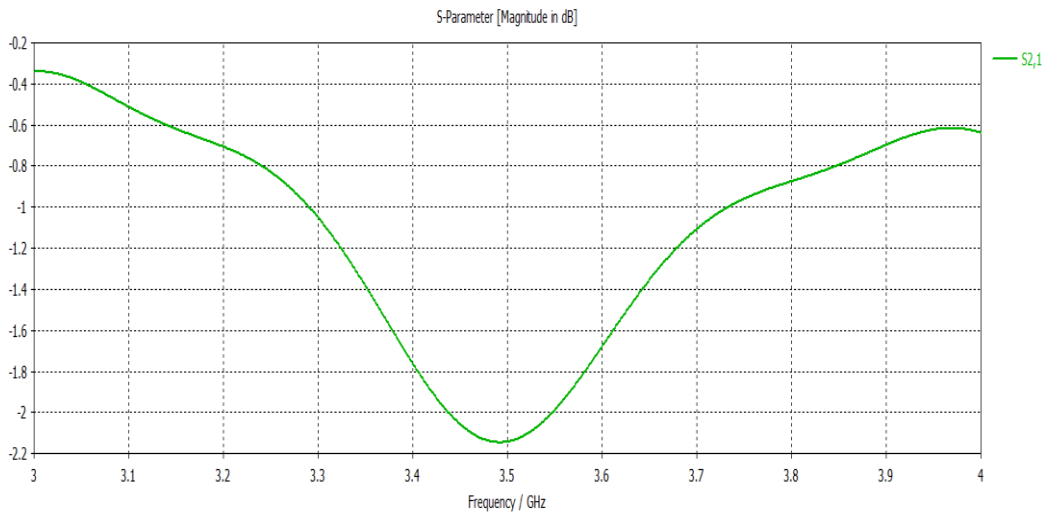


Figure III-22 : coefficient de transmission (S21) pour la CSRR.

On note que le CSRR a un coefficient de réflexion S₁₁ de -34 dB pour une fréquence de 3,09 GHz, et un coefficient de transmission S₂₁ de -2,2 dB à 3,5 GHz. En raison de la taille partagée, SRR et CSRR présentent approximativement la même fréquence de résonance.

III.4.3 Conception et simulation d'une antenne patch associée aux cellules CSRR

Dans cette partie, nous avons chargé l'antenne patch via l'unité CSRR. Cette partie comprend la détermination du placement optimal du CSRR sur le patch pour étudier l'effet des changements dans le métamatériau CSRR cellulaire sur les antennes, l'un changeant leur nombre et leur placement sur le patch et le plan de masse. Pour illustrer les différentes étapes

de notre étude, nous avons utilisé une unité CSRR résonante à 3,5 GHz et un patch conçu dans la section précédente pour accueillir 3,5 GHz.

Différentes configurations d'antenne patch et CSRR sont simulées sous CST. Les résultats de simulation du paramètre S11 en fonction du nombre de cellules CSRR et de leurs positions montrent que la fréquence de résonance et la bande passante varient avec le nombre de cellules CSSR utilisées.

III.4.4 Interprétation des résultats de simulation avant adaptation

Le tableau III.3 montre les différents résultats obtenus à partir des antennes en fonction du nombre d'antennes Cellules CSRR sur un patch, avant adaptation avec un demi-plan de masse.

Cellules	Fréquence (GHz)	S ₁₁ (dB)	Gain(dB)	BP
1CSRR	1.486	-16.88	2.143	0.43
2CSRR horizontales	1.549	-27.086	2.187	1.4439
2CSRR verticales	1.468	-17.536	2.107	0.30
3CSRR	1.54	-26.224	2.181	1.4573

Tableau III-3 : Résultats de simulations avant adaptation.

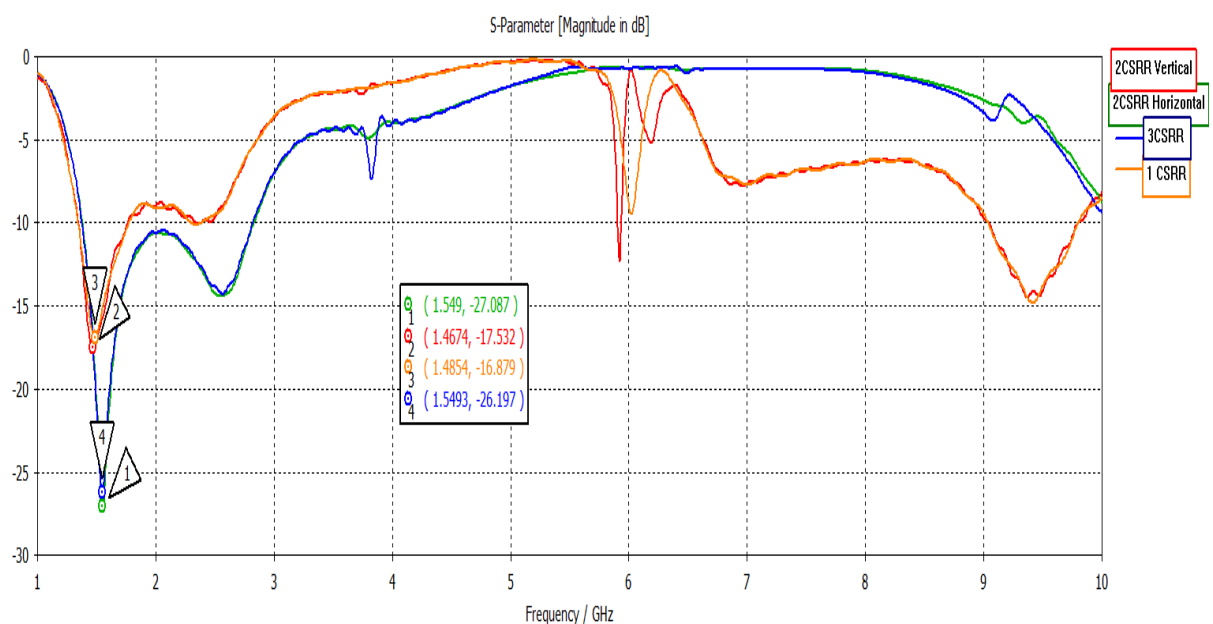


Figure III-23 : Coefficients de réflexion des différentes antennes avant adaptation.

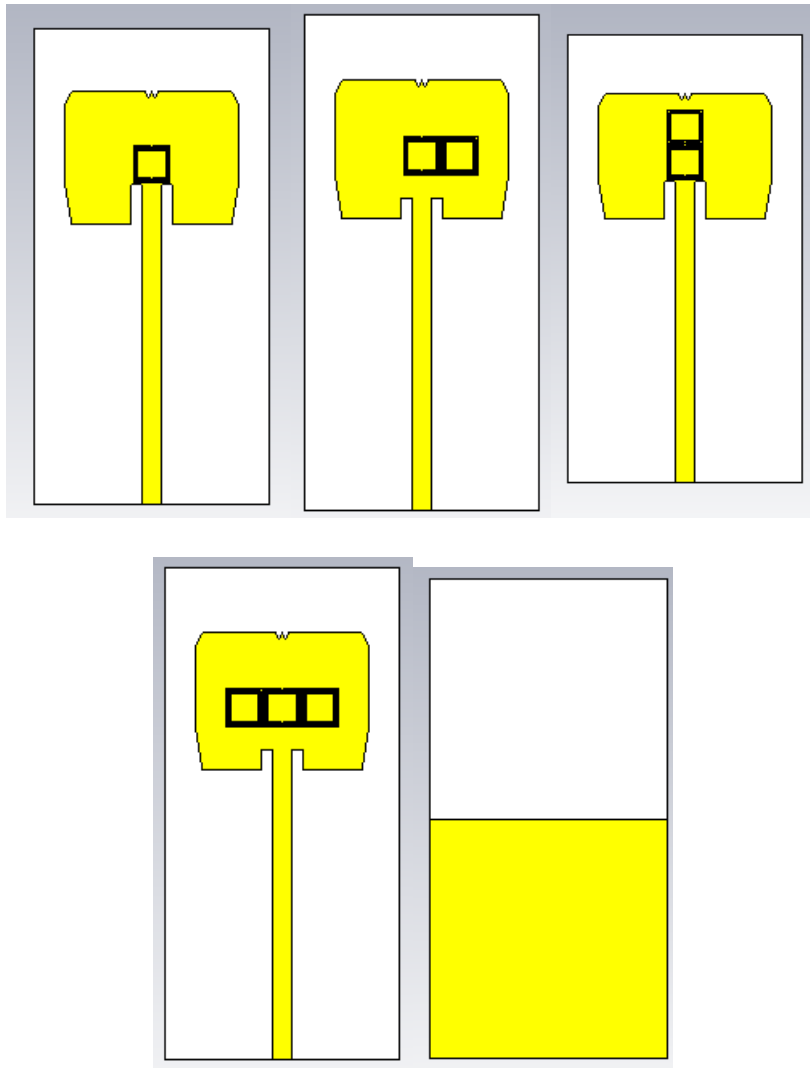


Figure III-24 : Différentes antennes et position des cellules CSRR avant adaptation.

III.4.5 Conception et simulation d'une antenne patch associée à une cellule CSRR avec optimisation

Après avoir utilisé le résonateur CSRR proposé, nous avons remarqué qu'il ne résonnait pas à la fréquence de résonance de 3,5 GHz, pour laquelle nous avons essayé d'ajuster les résultats de simulation pour mieux s'adapter après avoir modifié certains paramètres d'antenne. Pour obtenir une fréquence de résonance de 3,5 GHz, il faut modifier L_p (la longueur du patch) et W_p (la largeur du patch) ainsi que L_f (la longueur d'alimentation) et L_g (la longueur de la masse). Le tableau ci-dessous montre les modifications apportées à l'antenne pour résonner à 3,5 GHz.

Cellules	fréquence (GHz)	S_{11} (dB)	Gain (dB)	BP	L_p	W_p	L_f	L_g	Taux d'optimisation (%)
1CSRR	1.882	-12.71	2.164	0.5411	18	21.31	26.857	72.673	33.7504
2CSRR horizontales	3.502	-16.75	2.186	0.036	17.98	24.31	25.807	72.673	34.8758
	6.832	-46.19							
2CSRR verticales	1.773	-12.78	2.059	0.3592	20	16.31	26.799	72.673	44.8601
	5.923	-13.28							
3CSRR	3.384	-8.619	-7.132	/	18	24.31	26.857	72.600	27.9516
	6.05	-9.775							

Tableau III-4 : Résultats de simulations après adaptation.

D'après les résultats du tableau III.4, on note les meilleurs résultats obtenus à partir de 2 antennes patch CSSR avec 2 fréquences de résonance (double fréquence), notons que l'une à la fréquence 3.502 GHz et l'autre 6.832 GHz a un coefficient de réflexion $S_{11}=-16,75$ dB et $S_{11}=-46,19$ dB respectivement.

Les résultats de la simulation avec 2CSRR présentée sur les figures suivantes :

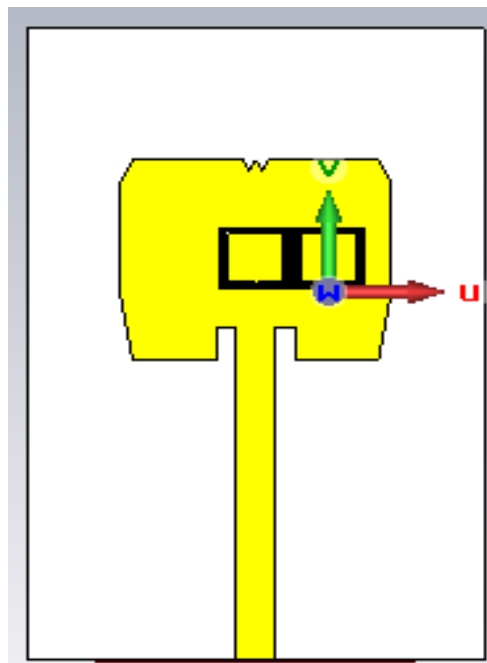


Figure III-25 : 2CSRR horizontales sur le patch après l'optimisation.

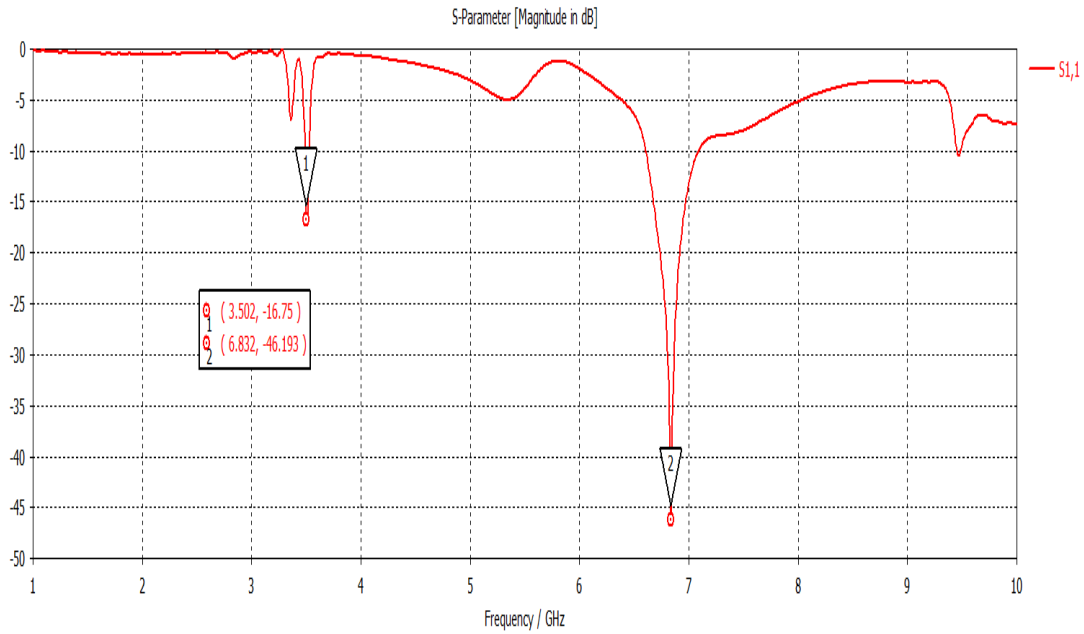


Figure III-26 : Coefficient de réflexion (S11) en dB.

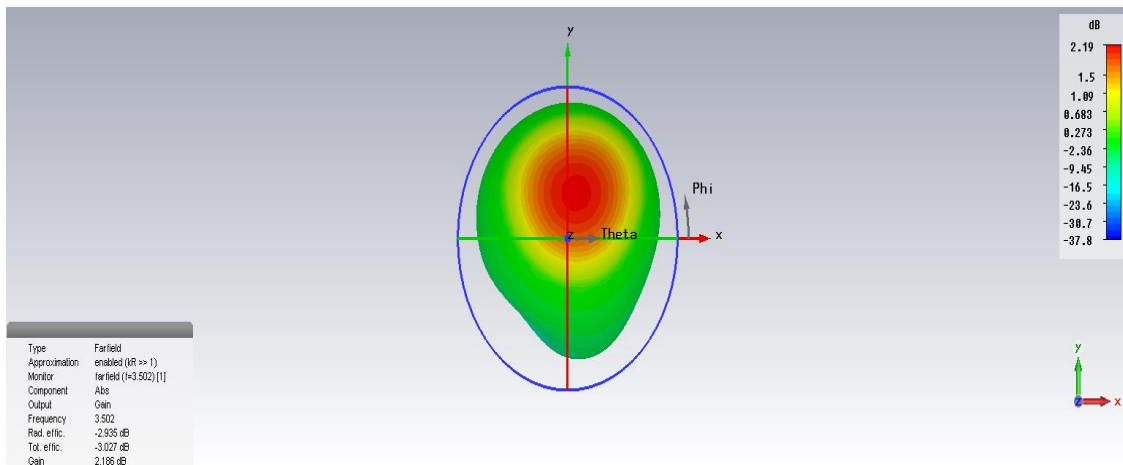


Figure III-27 : Diagramme de rayonnement en 3D.

Les Figures III.26 et III.27 montrent que l'adaptation est bien réalisée, le coefficient de réflexion S_{11} atteint un niveau proche de -16.75dB à la fréquence de résonance 3.502 GHz et concernant le gain d'antenne est au tour de 2.186dB.

III.5 MISE EN PLACE D'UN RESEAU D'ANTENNES POUR LA FREQUENCE 3.5 GHZ

Pour obtenir un diviseur de puissance sous la forme d'une jonction en T avec un bon rayonnement, les étapes suivantes doivent être suivies :

- L'impédance d'entrée de la première alimentation $Z_0 = 50\Omega$.
- L'impédance d'entrée de la deuxième alimentation $Z_1 = 75\Omega$ avec $Z_0 = nZ_s$

Avec : n : est le nombre de branches.

- Z_0 : est l'impédance d'entrée.
- Z_s : est l'impédance de sortie

L'impédance d'entrée de la troisième source d'alimentation est la même que la première impédance d'entrée.

On a utilisé les impédances Z_0 et Z_s pour obtenir le meilleur résultat possible.

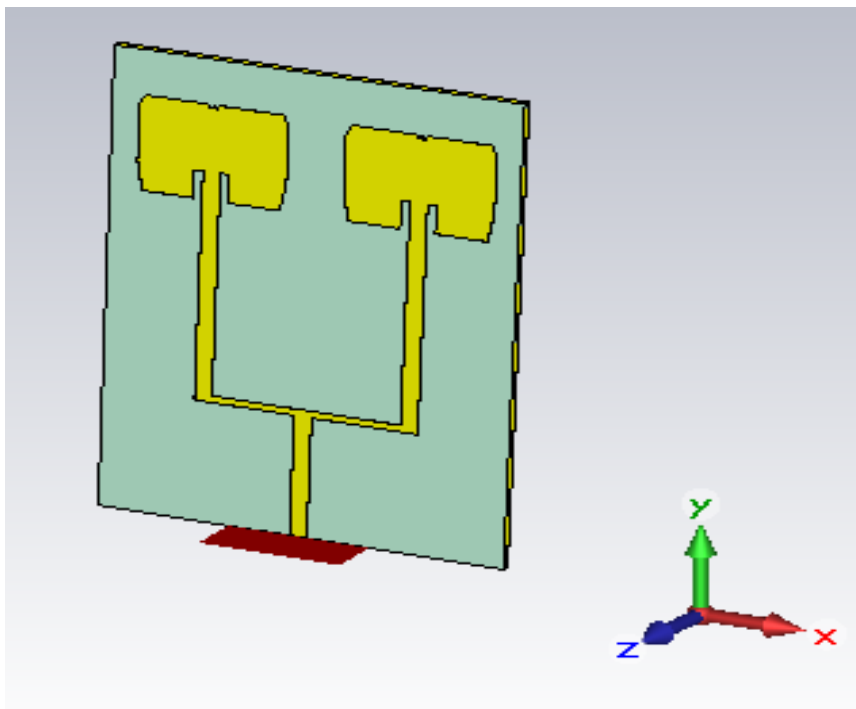
III.5.1 Réseau d'antennes à 2 éléments

Pour faciliter le calcul de la longueur et de la largeur de chaque ligne d'alimentation, le programme "Microstrip Line Calculator" a été utilisé.

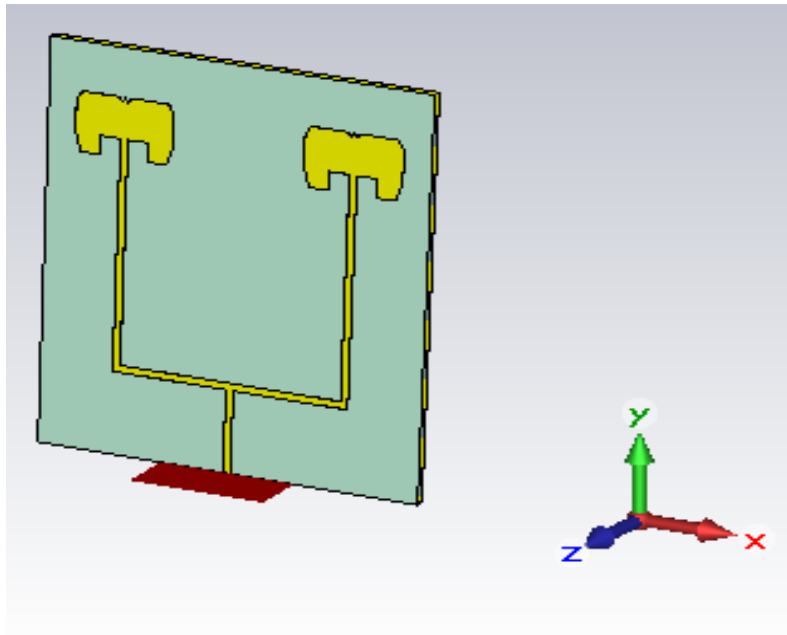
Cette nouvelle technique de diviseur de fréquence est conçue pour augmenter le gain et améliorer le résultat du paramètre S11 pour obtenir un bon rayonnement du réseau d'antennes 2x1.

Avec L : longueur de la ligne et W : largeur de la ligne.

Le but de cette conception de réseau d'antennes à 2 éléments est d'augmenter le gain, et l'antenne utilisée dans ce réseau est l'antenne rectangulaire conçue plus tôt dans ce chapitre, à l'exception de la jonction en T.



(A)FR4



(B) Silicone

Figure III-28 : Structure de jonction de la division reliée avec 2 éléments.

Paramètres	'Wg' (Largeur de Substrat et de plan de masse)		'Lg' (Longueur de Substrat et de plan de masse)		'Hs' (Épaisseur De substrat)		'λ' (L'espace entre Les 2 éléments du patch)	
	FR4	Silicone	FR4	Silicone	FR4	Silicone	FR4	Silicone
Valeurs (mm)	35.926	26.46	72.673	64.857	1.6	1.6	40.19	24.85

Tableau III-5 : Dimension du réseau d'antenne à 2 éléments.

-Coefficient de réflexion :

La figure III.29 montre que l'adaptation est bien réalisée puisque le coefficient de réflexion S11 atteint un niveau proche de -25.075dB et -15.17dB pour FR4 et Silicone respectivement à la fréquence de résonance 3.5 GHz.

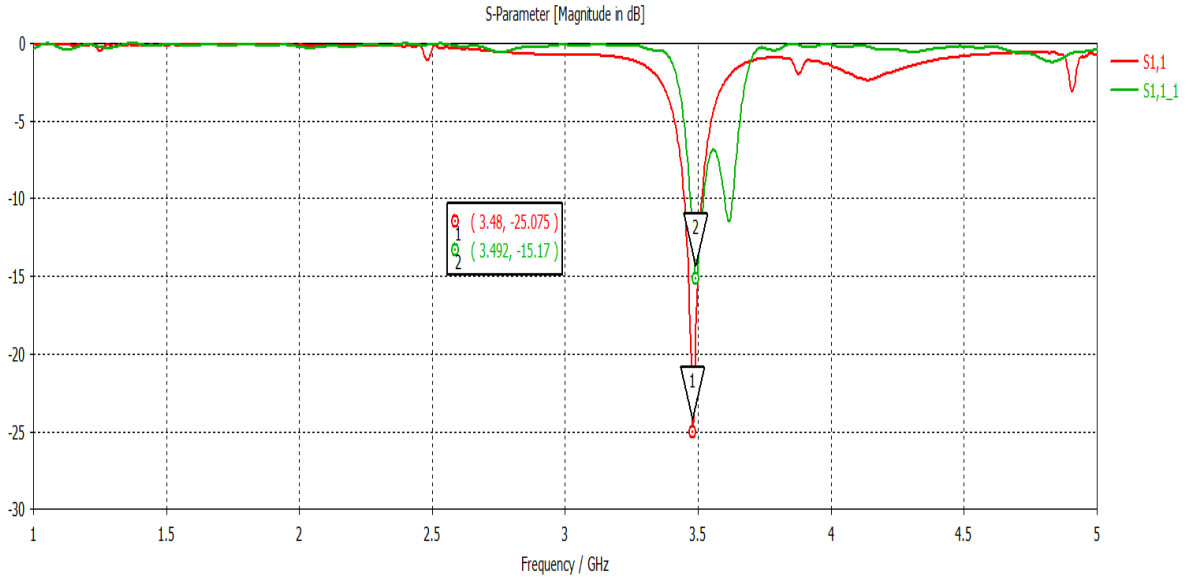


Figure III-29 : Coefficient de réflexion (1) FR4 (2) Silicone.

-Taux d'ondes stationnaire VWSR :

Nous montrons également le rapport d'ondes stationnaires et nous trouvons VSWR < 2, 1,1181 pour FR4 et 1,4223 pour la silicone, ce qui nous indique que l'adaptabilité de l'antenne est grandement améliorée par rapport aux résultats précédents.

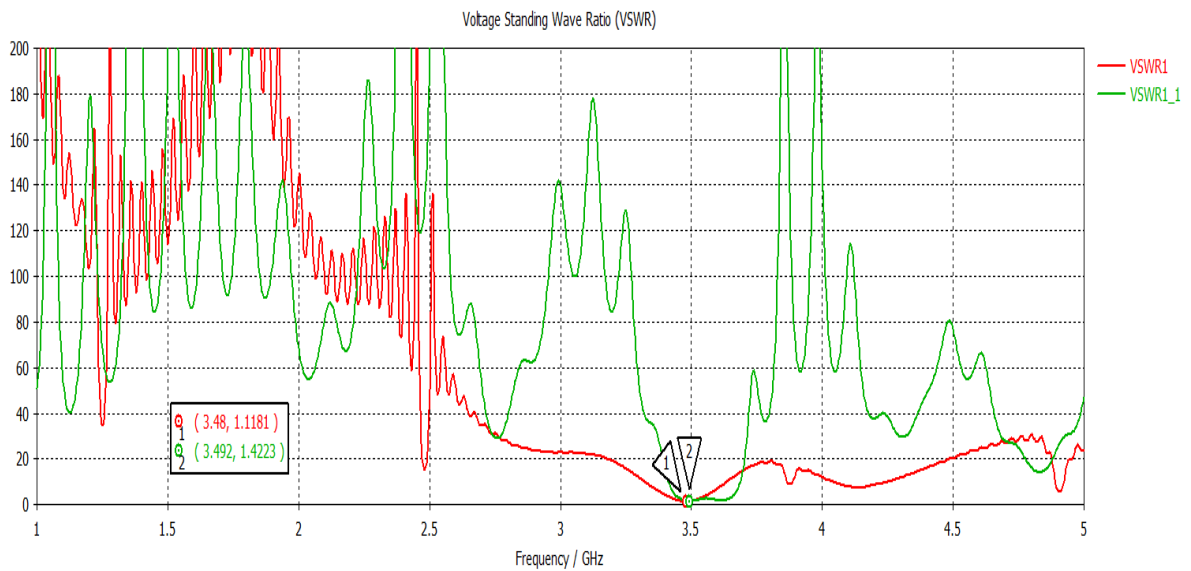
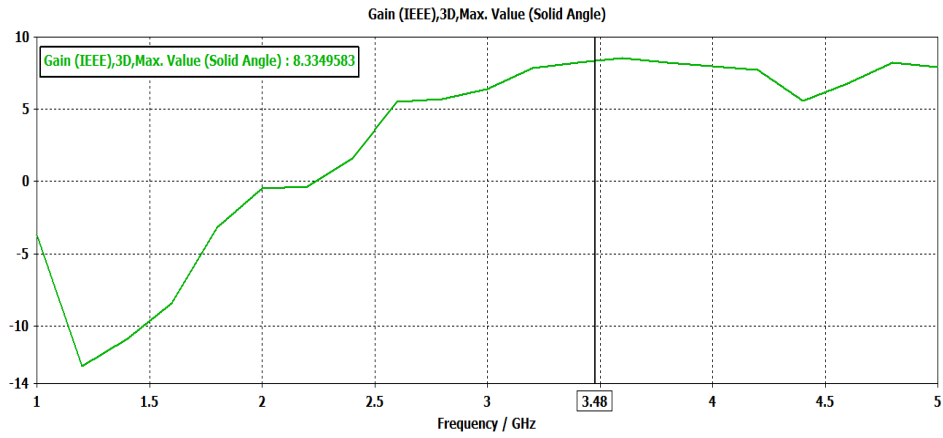


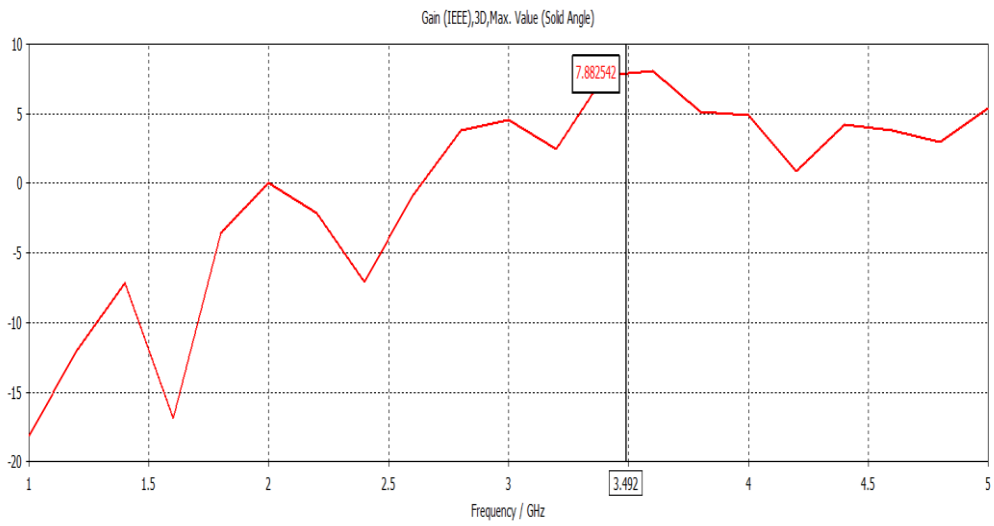
Figure III-30 : Taux d'ondes stationnaire VWSR (1) FR4 (2) Silicone.

-Le gain :

On remarque que le gain a bien augmenté par rapport à un seul élément répondant à l'exigence de cette conception.



(a)FR4

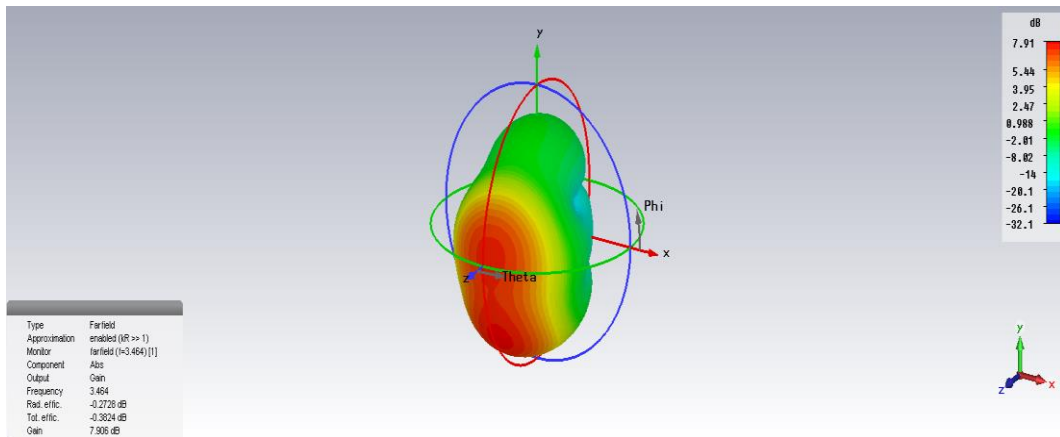


(b)Silicone

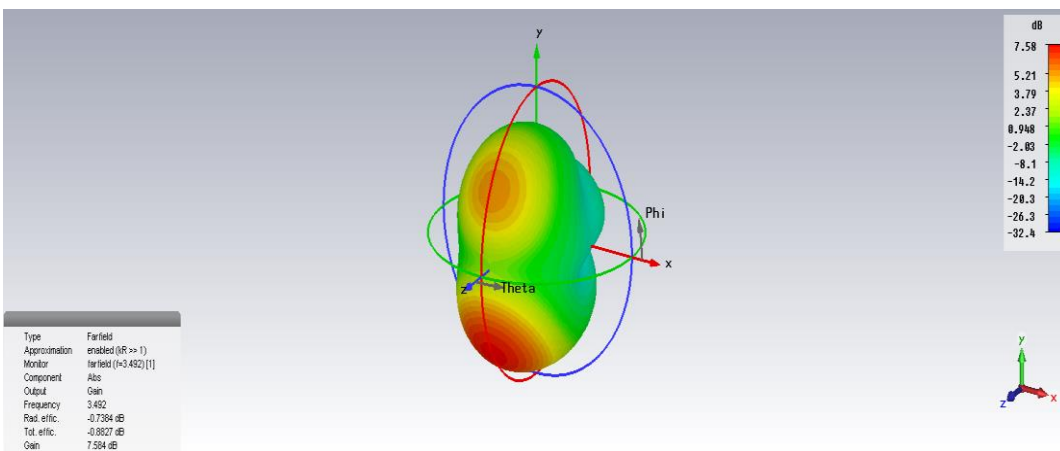
Figure III-31 : Gain (a) FR4 (b) Silicone.

-Diagramme de rayonnement du gain :

Le diagramme de rayonnement de l'antenne a une forme appropriée comme le montre la figure III.32 parce que le rayonnement est concentré dans la partie supérieure de l'antenne (plan Z).

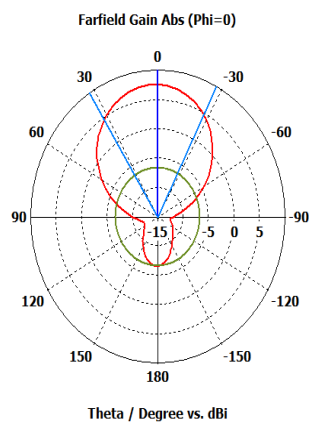


(a)FR4



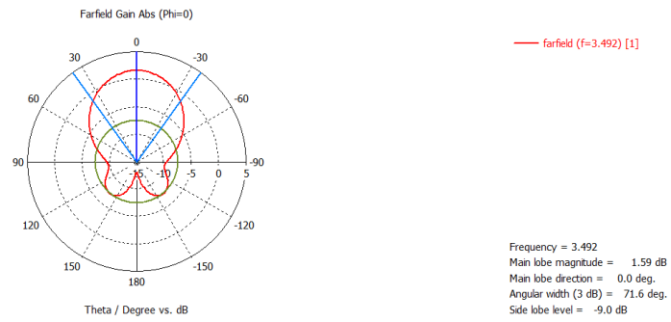
(b)Silicone

Figure III-32 : Diagramme de rayonnement en 3d (a) FR4 (b) Silicone.



Frequency = 3.48 GHz
 Main lobe magnitude = 7.57 dBi
 Main lobe direction = 0.0 deg.
 Angular width (3 dB) = 59.7 deg.
 Side lobe level = -14.2 dB

(a)FR4



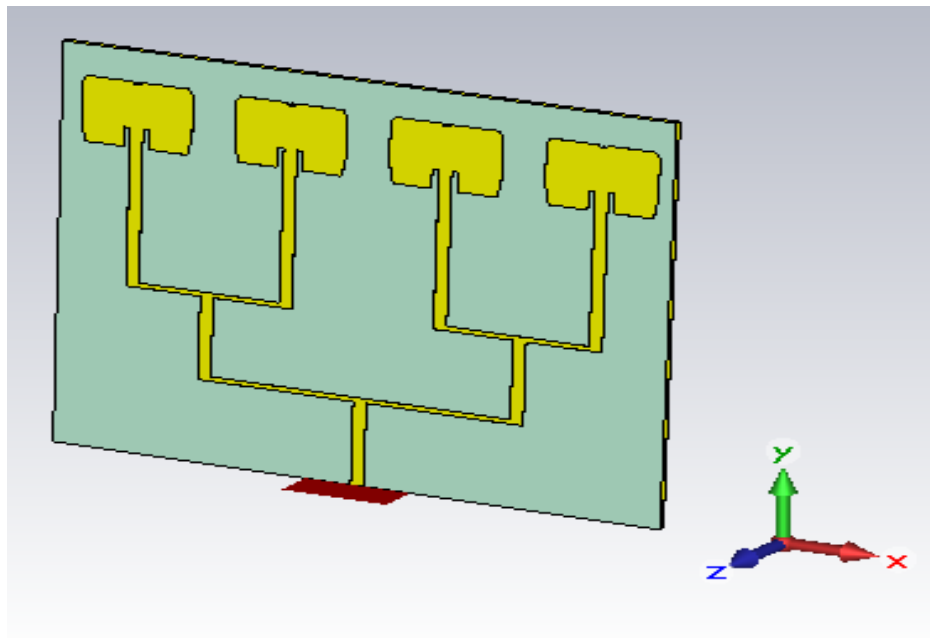
(b)Silicone

Figure III-33 : Diagramme de rayonnement en présentation polaire (a) FR4 (b) Silicone.

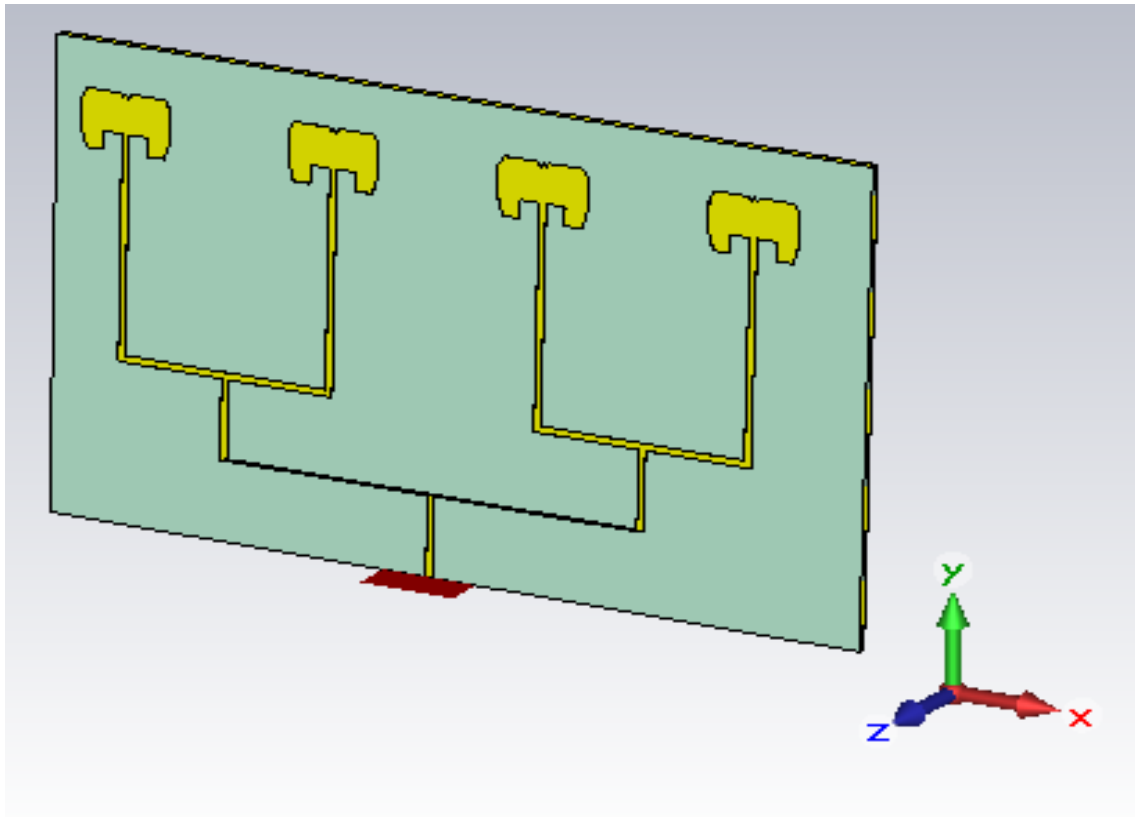
D'après les résultats de la Figure III.33, nous observons que le diagramme polaire de notre antenne est bien directif. Mais sur le plan E, on remarque que seul le lobe principal dépasse 3 dB, contrairement aux autres lobes secondaires.

III.5.2 Réseau d'antennes à 4 éléments

Le but de cette conception de réseau d'antennes à 4 éléments est d'augmenter le gain et la directivité, et les antennes utilisées dans ce réseau sont les antennes rectangulaires conçues plus tôt dans ce chapitre, à l'exception de la jonction en T.



(a)FR4



(b)Silicone

Figure III-34 : Réseau d'antenne à 4 éléments proposé.

Le tableau III.6 Résume les valeurs des principaux paramètres suivis dans la conception de notre réseau d'antennes proposé :

Paramètres	'Wg' (Largeur de Substrat et de plan de masse)		'Lg' (Longueur de Substrat et de plan de masse)		'Hs' (Épaisseur De substrat)		'Λ' (L'espace entre Les 2 éléments du patch)	
	FR4	Silicone	FR4	Silicone	FR4	Silicone	FR4	Silicone
Valeurs (mm)	35.926	26.46	72.673	64.857	1.6	1.6	40.19	24.85

Tableau III-6 : Dimensions du réseau d'antenne à 4 éléments.

-Coefficient de réflexion

Lafigure III.35 montre que l'adaptation est bien réalisée puisque le coefficient de réflexion S11 atteint un niveau proche de -12.631dB à la fréquence 3.476Ghz pour le substrat FR4 et concernant le Silicone on a -11.796dBet -10.648dBpour les fréquences 3.5Ghz et 3.628Ghz respectivement.

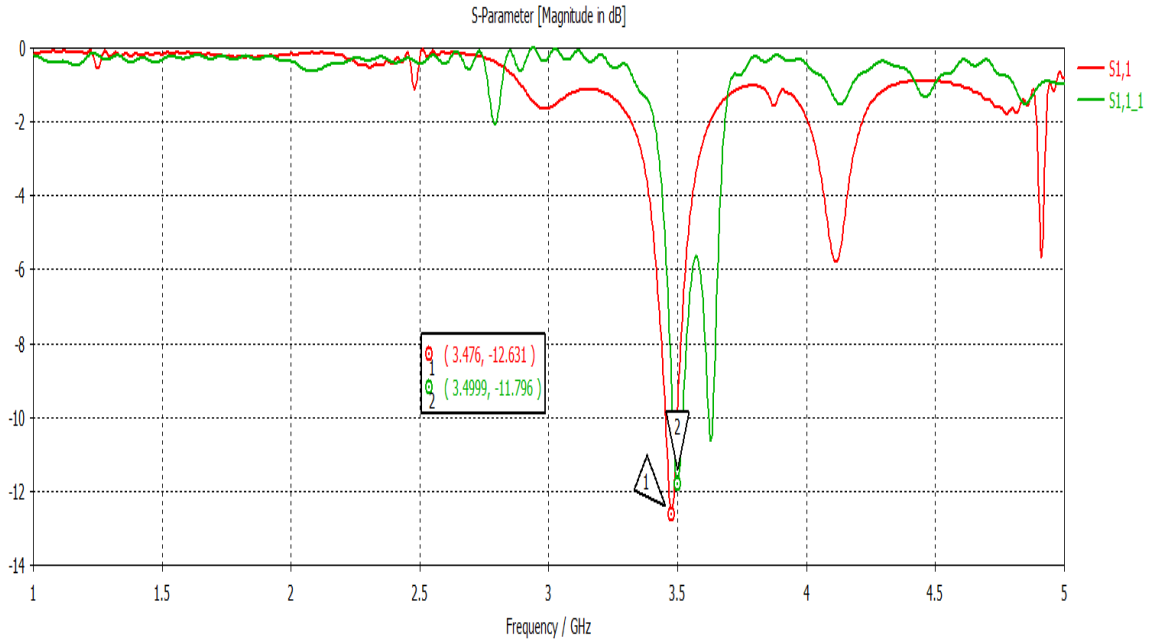


Figure III-35 : Coefficient de réflexion (1) FR4 (2) Silicone.

-TAUX D'ONDE STATIONNAIRE (VSWR) :

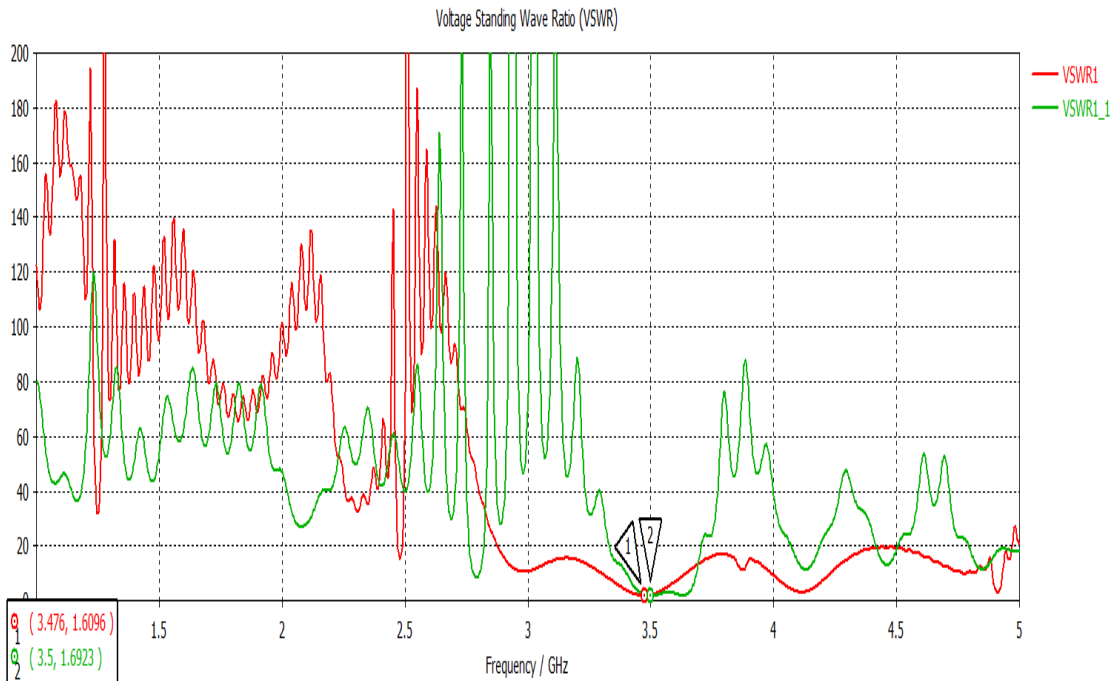
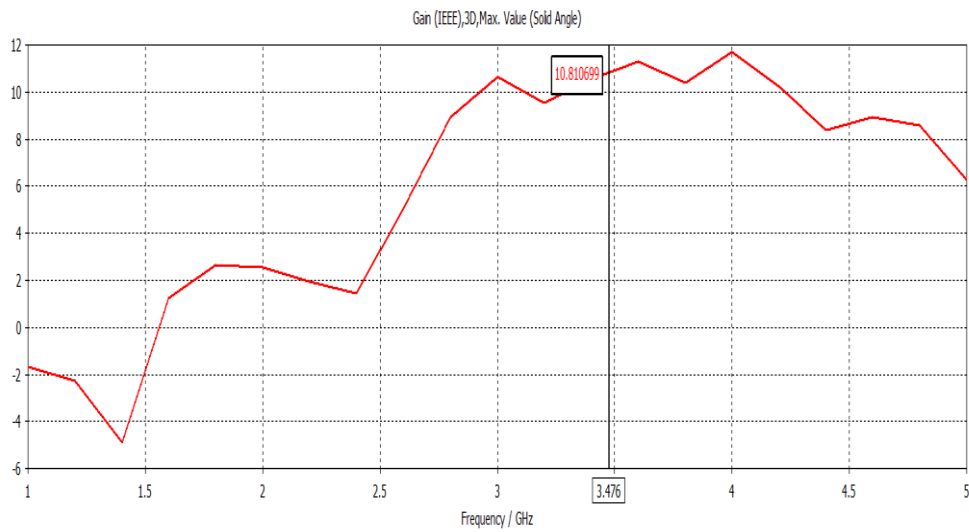


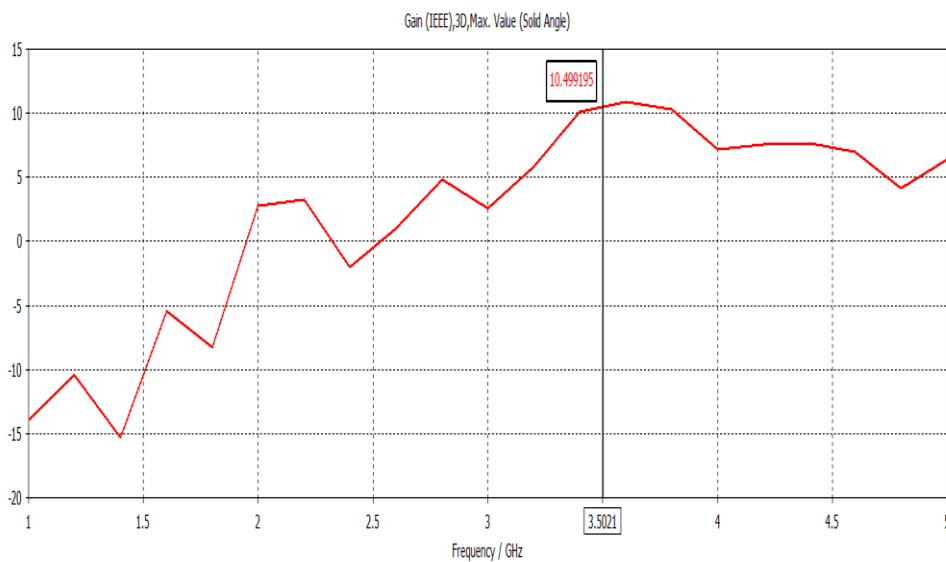
Figure III-36 : le VSWR en fonction de la fréquence (a) FR4 (b) Silicone.

D'après la figure III.31 on remarque qu'on a un $VSWR < 2$, ce qui confirme que nos réseaux sont bien adaptés au tour de la fréquence de résonance 3.5GHz.

-Le gain :



(a)FR4

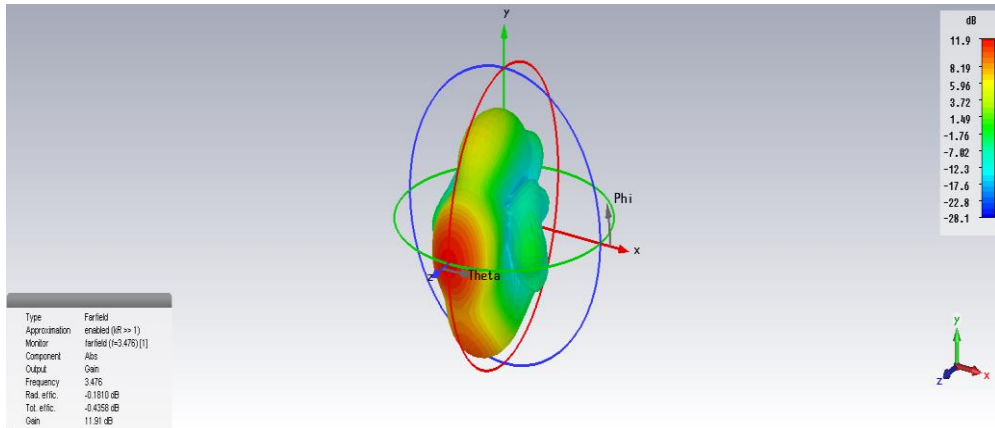


(b)Silicone

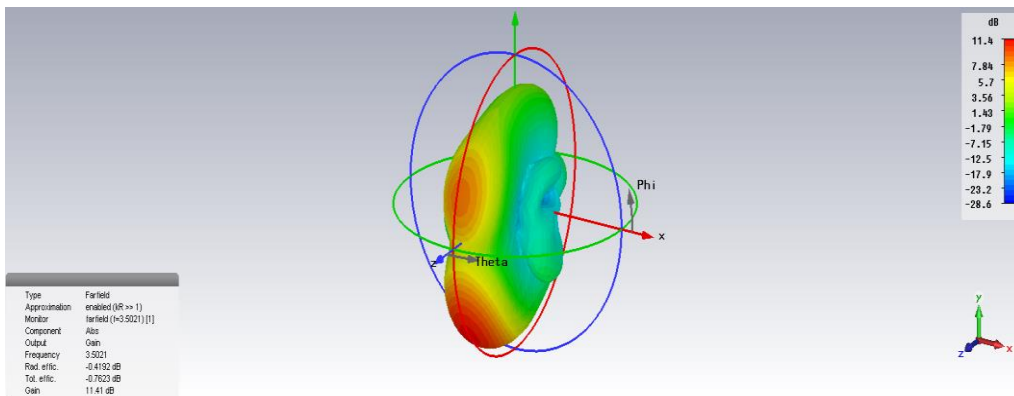
Figure III-37 : le gain (a)FR4 (b) Silicone.

Comme le réseau à deux éléments, le gain de réseau à quatre éléments qui répond aux exigences de cette conception est encore augmenté.

-Diagramme de rayonnement :

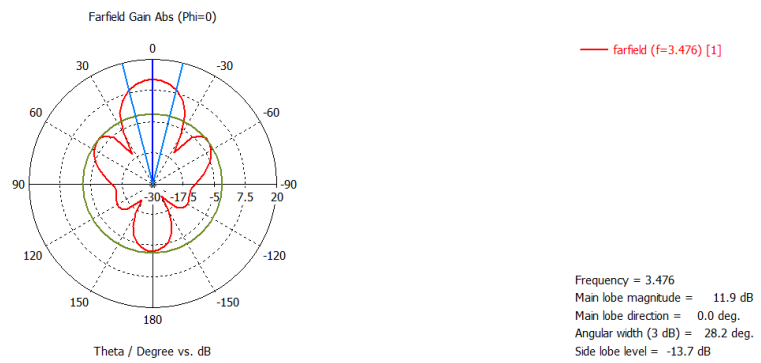


(a)FR4

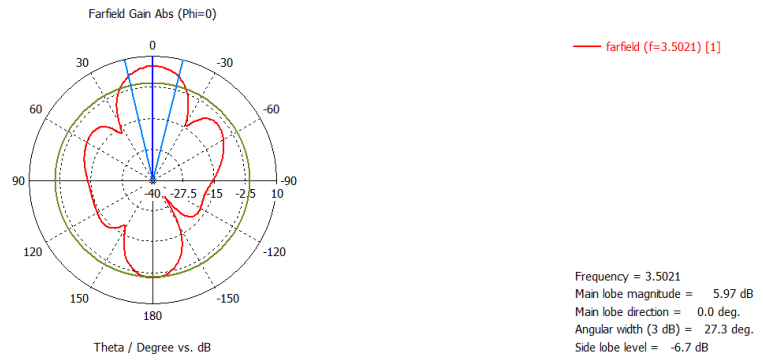


(b)Silicone

Figure III-38 : Diagramme de rayonnement du gain en 3d (a)FR4 (b) Silicone.



(a)FR4

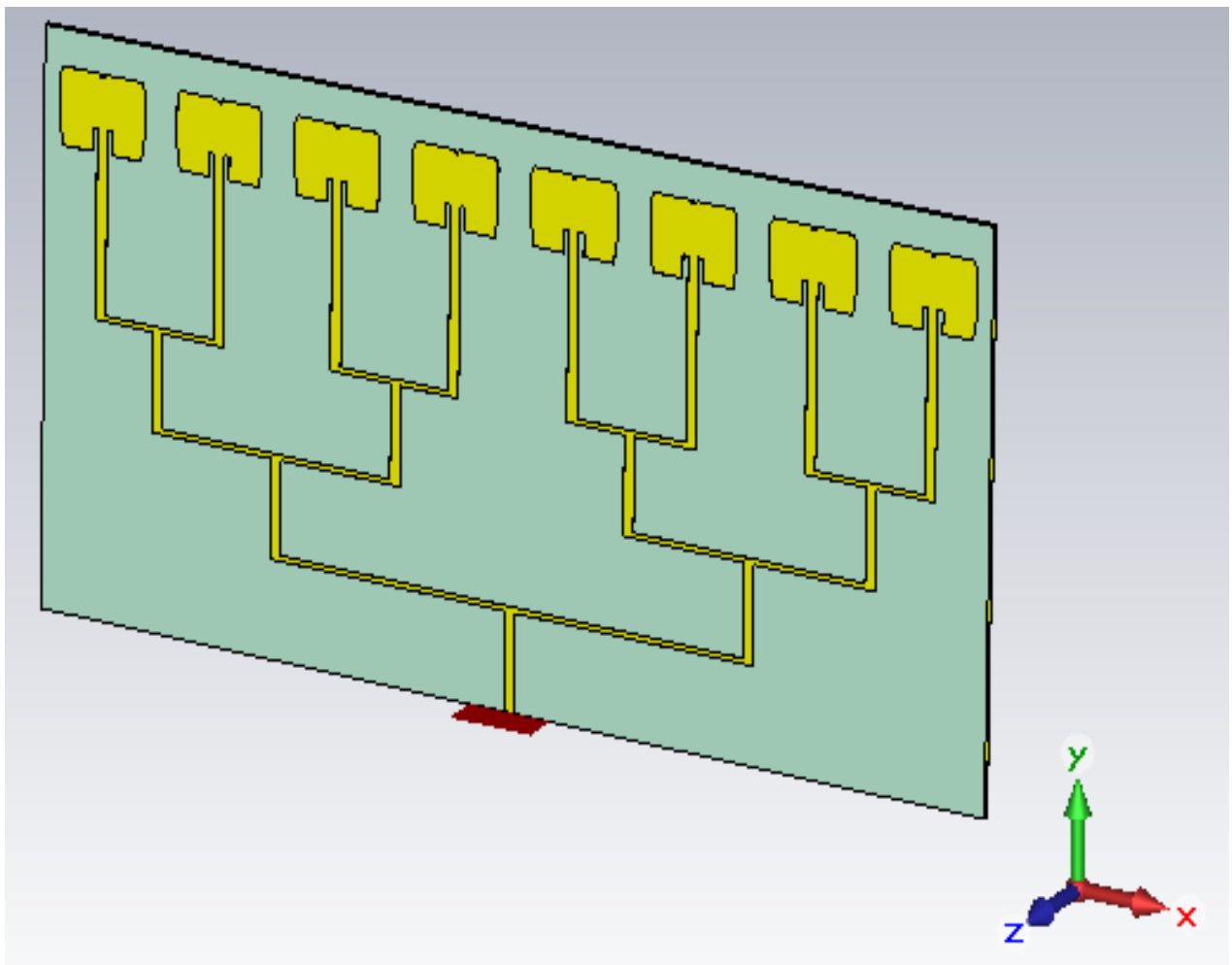


(b)Silicone

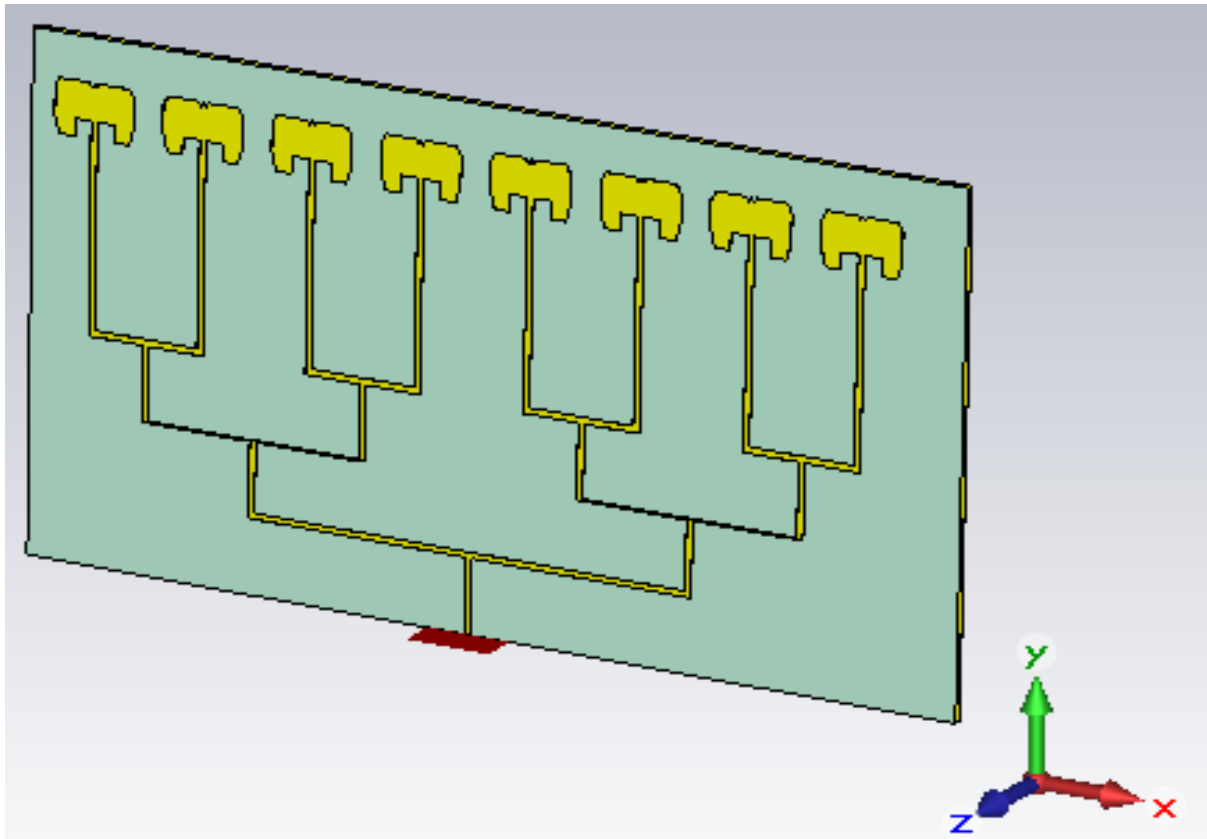
Figure III-39 : Diagramme de rayonnement en présentation polaire (a) FR4 (b) Silicone.

III.5.3 Réseau d'antennes à 8 éléments

Le but de cette conception du réseau d'antennes à 8 éléments est d'augmenter le gain et la directivité l'antenne utilisée dans ce réseau est l'antenne rectangulaire conçue précédemment dans ce chapitre, en plus de la jonction T.



(a)FR4



(b)Silicone

Figure III-40 : Réseau d'antenne à 8 éléments proposé.

Le tableau III.7 Résume les valeurs des principaux paramètres suivis dans la conception de notre réseau d'antennes proposé :

Paramètres	'Wg' (Largeur de Substrat et de plan de masse)		'Lg' (Longueur de Substrat et de plan de masse)		'Hs' (Épaisseur De substrat)		'Λ' (L'espace entre Les 2 éléments du patch)	
	FR4	Silicone	FR4	Silicone	FR4	Silicone	FR4	Silicone
Valeurs (mm)	35.926	26.46	72.673	64.857	1.6	1.6	40.19	24.85

Tableau III-7 : Dimensions du réseau d'antenne à 8 éléments.

-Coefficient de réflexion :

La figure III.41 montre que le coefficient de réflexion S11 atteint un niveau proche de -10.61dB et -20.205dB pour FR4 et Silicone respectivement à la fréquence de résonance 3.5 GHz.

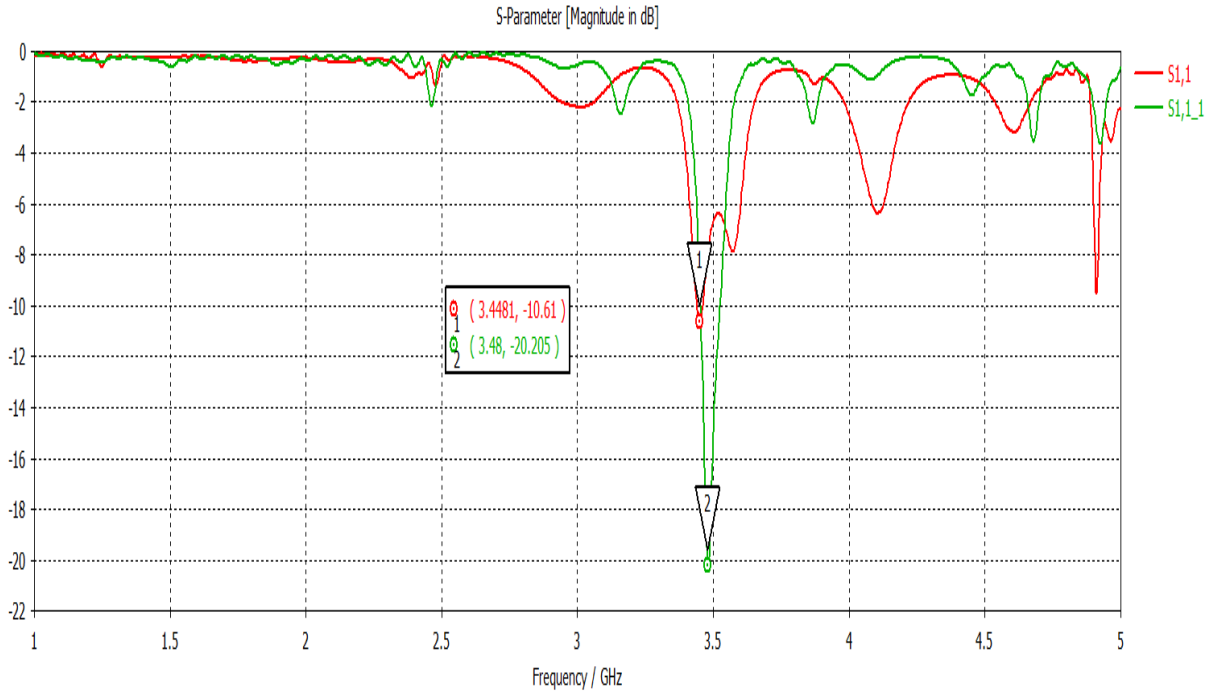


Figure III-41 : Coefficient de réflexion (1) FR4 (2) Silicone.

-Taux d'ondes stationnaire (VSWR) :

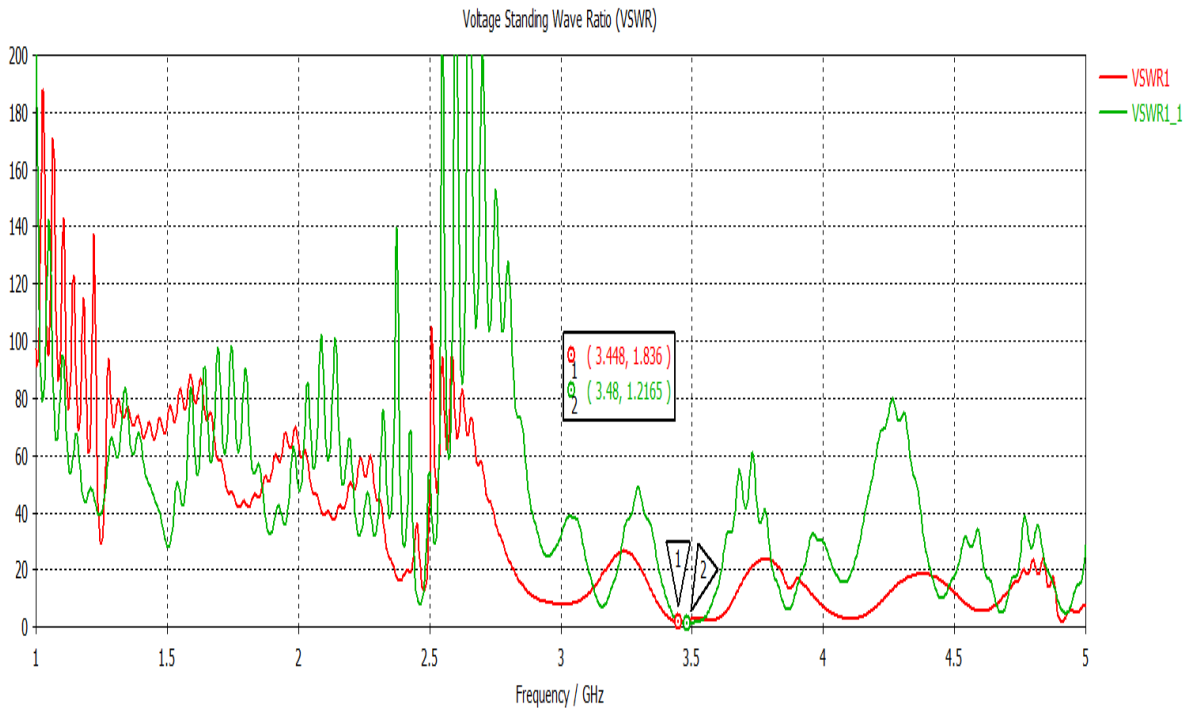
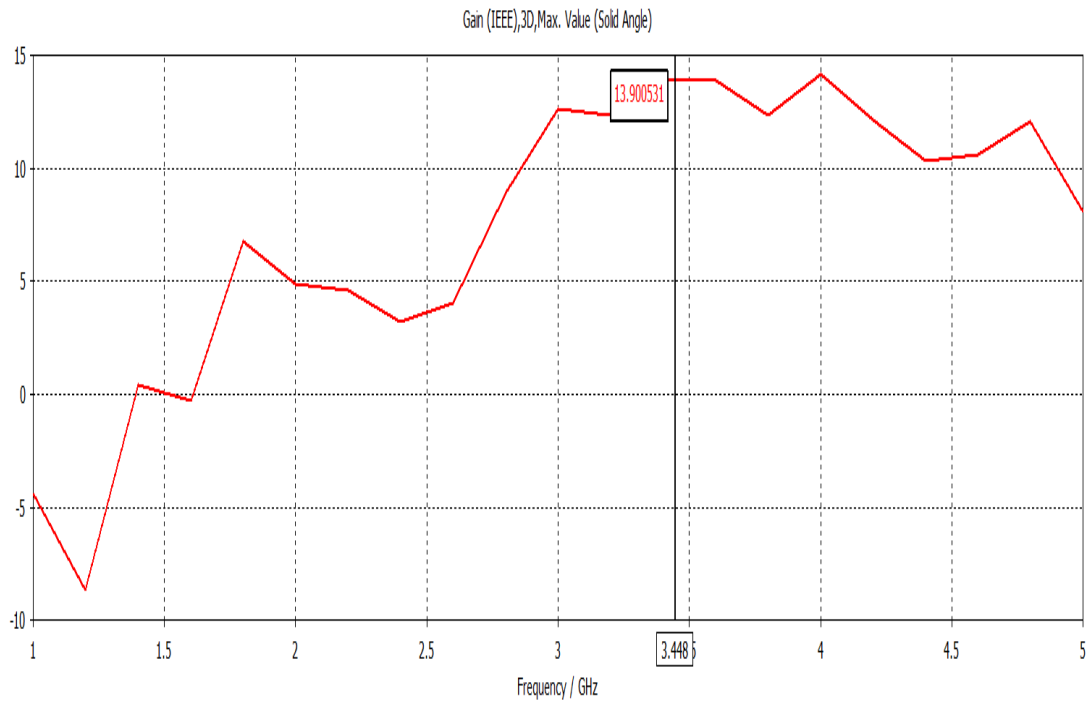


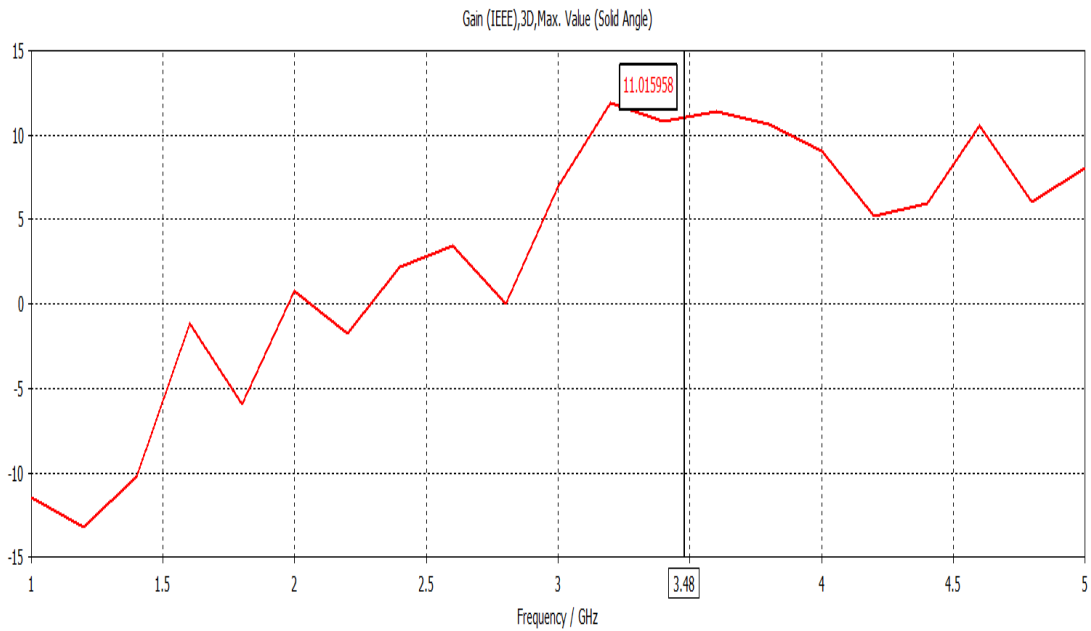
Figure III-42 : le VSWR en fonction de la fréquence (a) FR4 (b) Silicone.

D'après la figure III.42 on remarque qu'on a un $VSWR < 2$, ce qui confirme que nos réseaux sont bien adaptés au tour de la fréquence de résonance 3.5GHz.

-LE GAIN :



(a)FR4

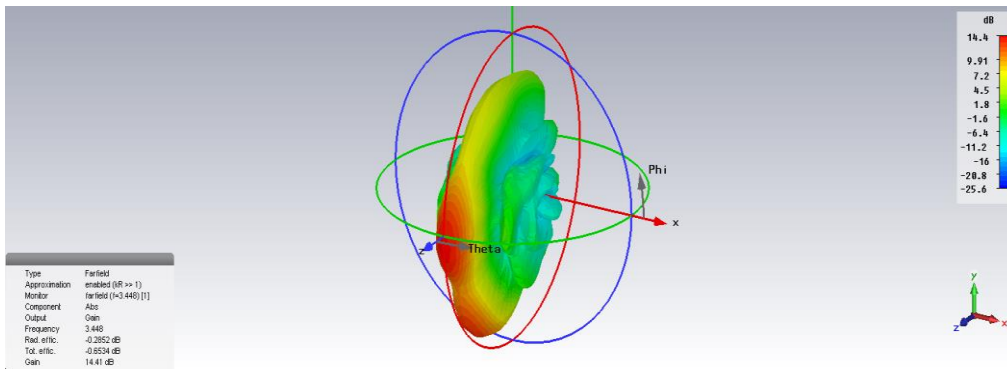


(b)Silicone

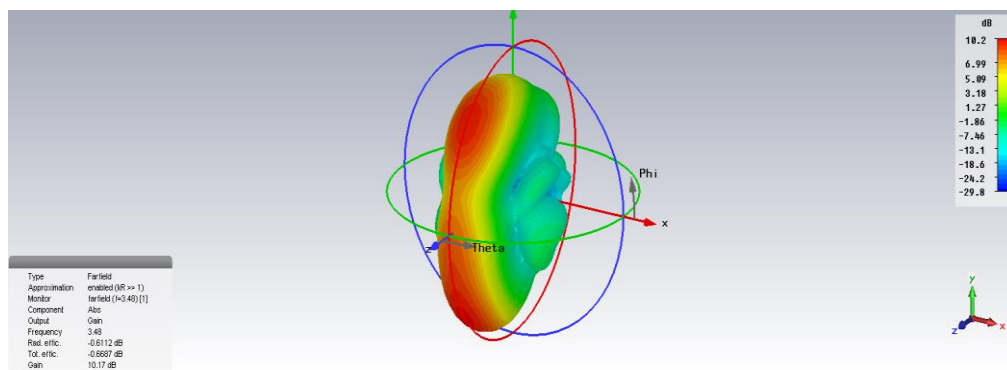
Figure III-43 : le gain (a)FR4 (b) Silicone.

Comme pour le réseau à 4 éléments le gain a encore augmenté pour le réseau à 8 éléments répondant à l'exigence de cette conception.

-Diagramme de rayonnement :

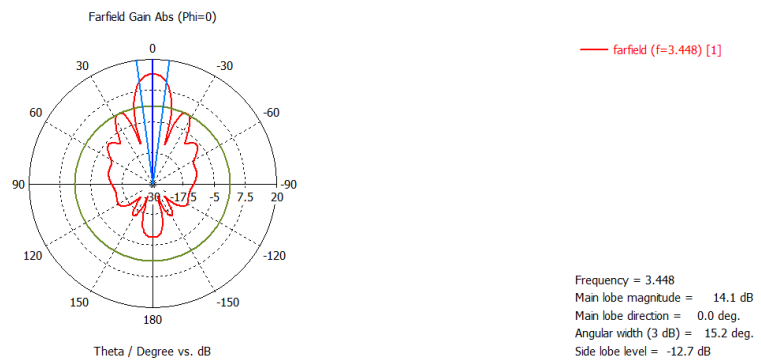


(a)FR4

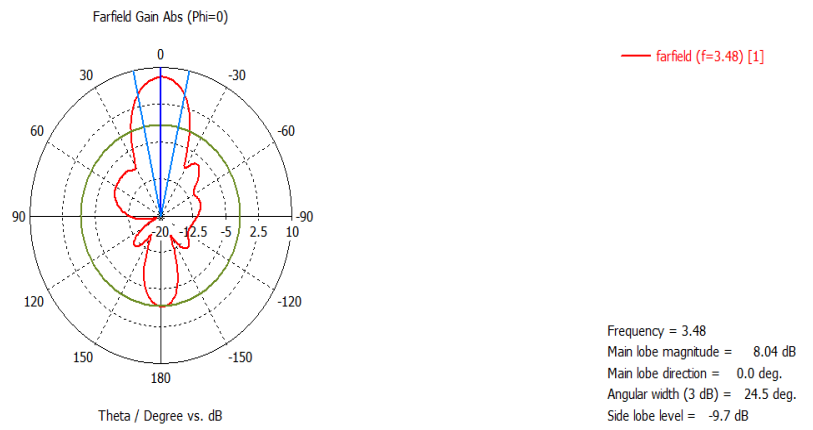


(b)Silicone

Figure III-44: Diagramme de rayonnement du gain en 3d (a)FR4 (b)Silicone.



(a)FR4



(b)Silicone

Figure III-45 : Diagramme de rayonnement en présentation polaire (a) FR4 (b) Silicone.

III.6 MISE EN PLACE D'UN RESEAU D'ANTENNES A BASE METAMATERIAUX

III.6.1 Réseau d'antennes à deux éléments

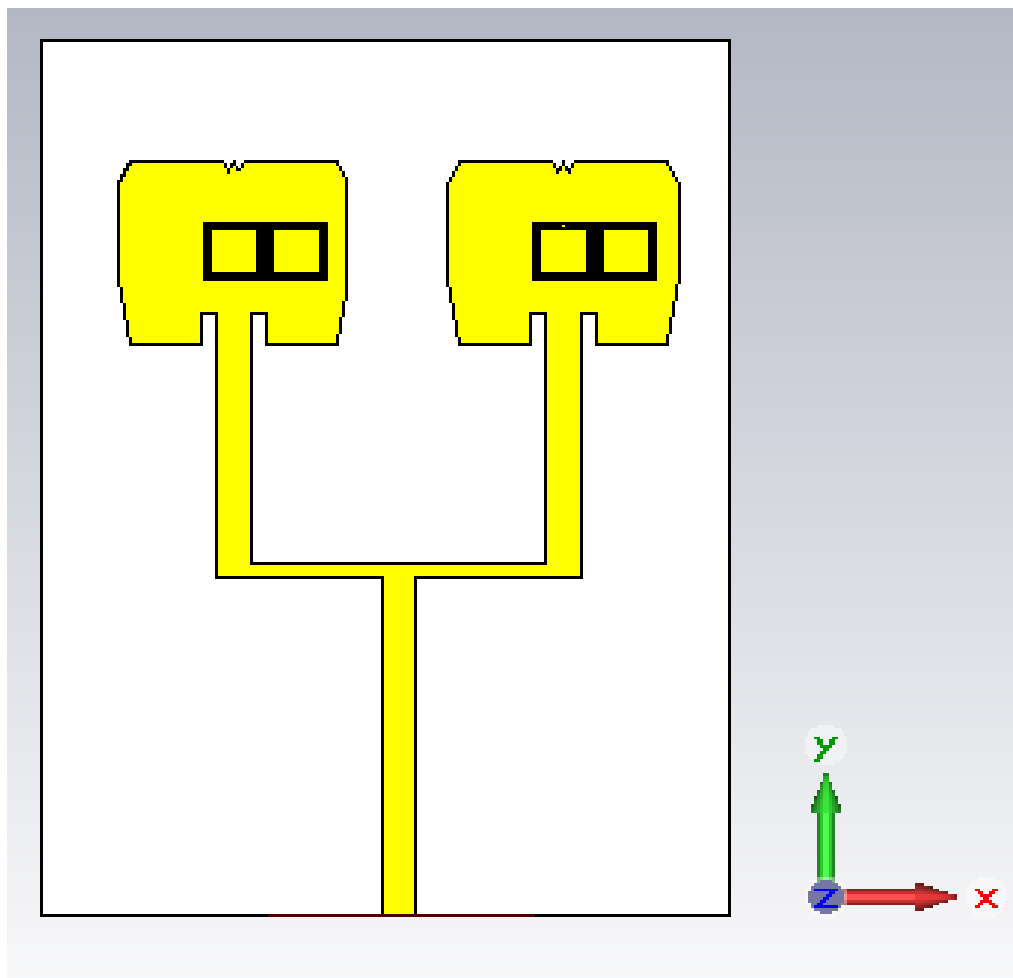


Figure III-46 : Réseau d'antennes à 2 éléments FR4 avec 2 CSRR.

-Coefficient de réflexion :

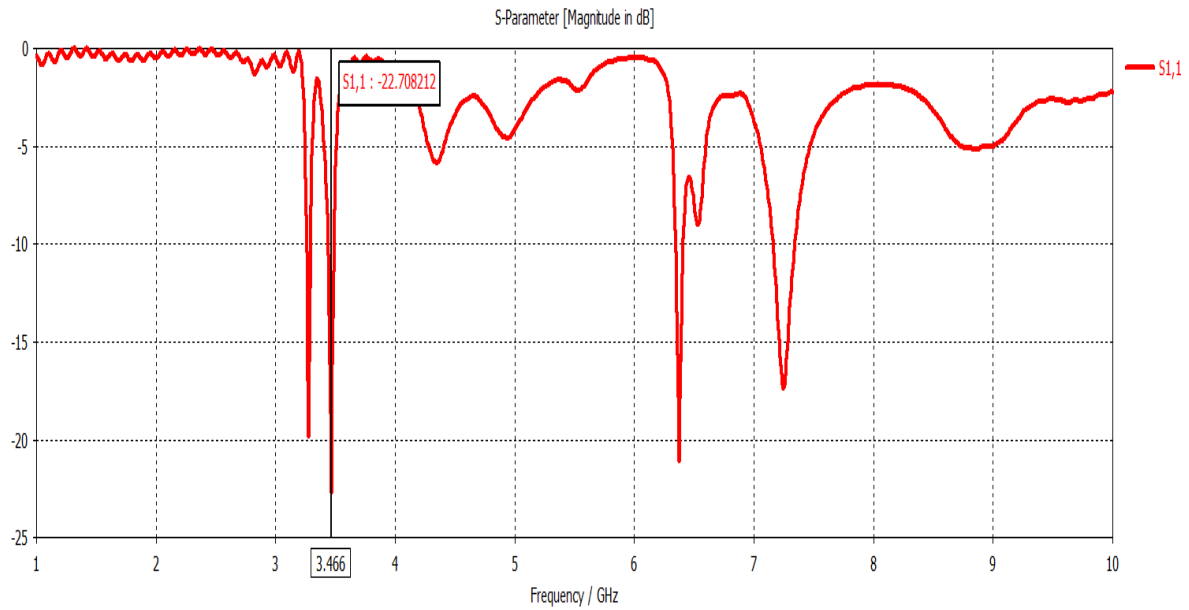


Figure III-47 : Coefficient de réflexion.

La figure III.47 montre que l'adaptation est bien faite, puisque le coefficient de réflexion S11 atteint un niveau proche de -22.7082dB à la fréquence 3.466GHz.

-Taux d'ondes stationnaire :

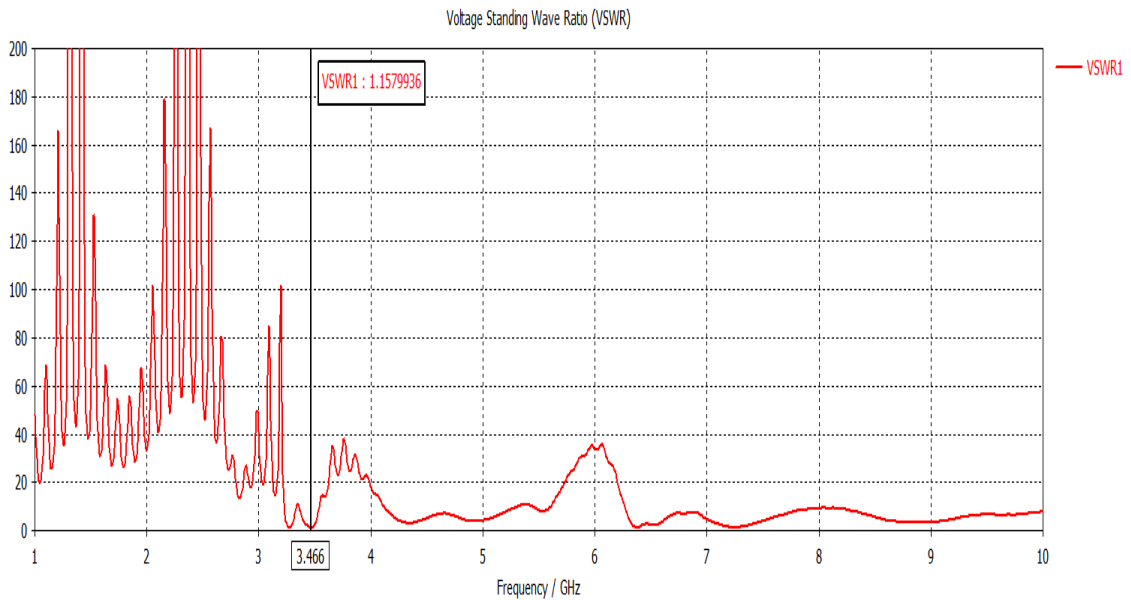


Figure III-48 : Taux d'ondes stationnaire.

D'après la figure III.48 on a eu un $VSWR < 2$ ce qui illustre une bonne qualité d'adaptation.

-Diagramme de rayonnement :

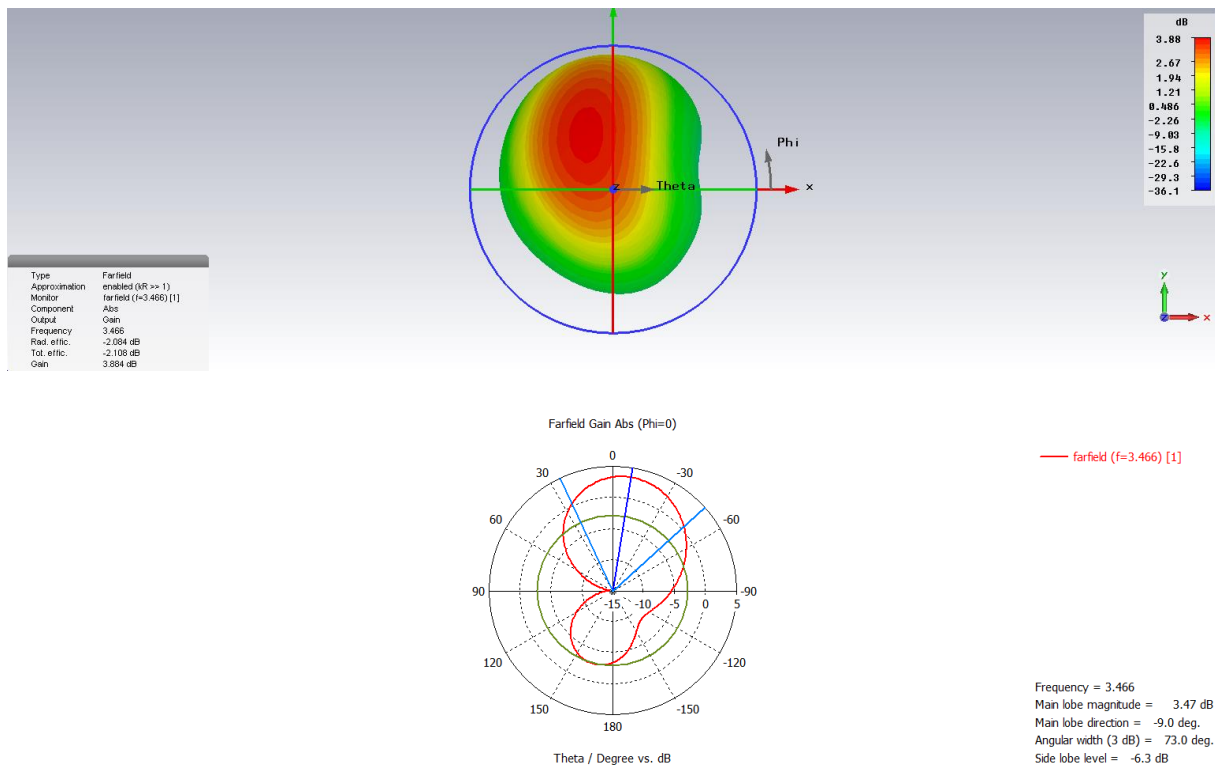


Figure III-49 : Diagramme de rayonnement en 3d et en présentation polaire.

III.6.2 Réseau d'antennes à 4 éléments

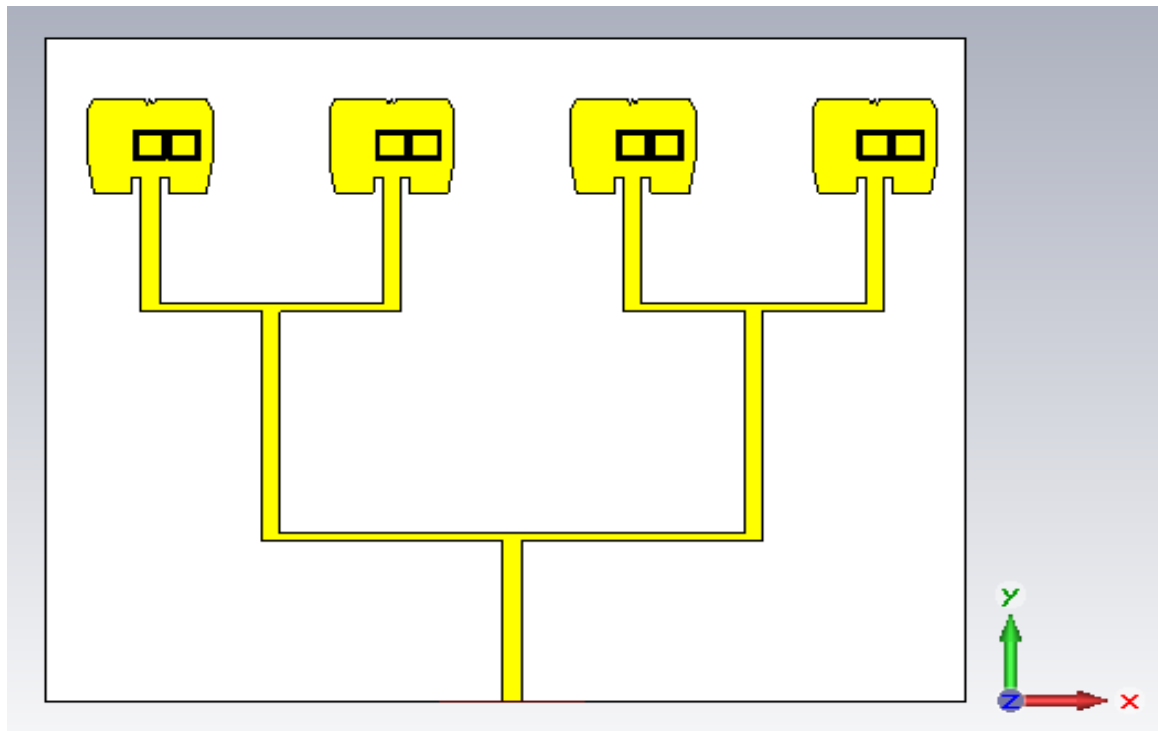


Figure III-50 : Réseau d'antennes à 4 éléments FR4 avec 2 CSRR.

-Coefficient de réflexion :

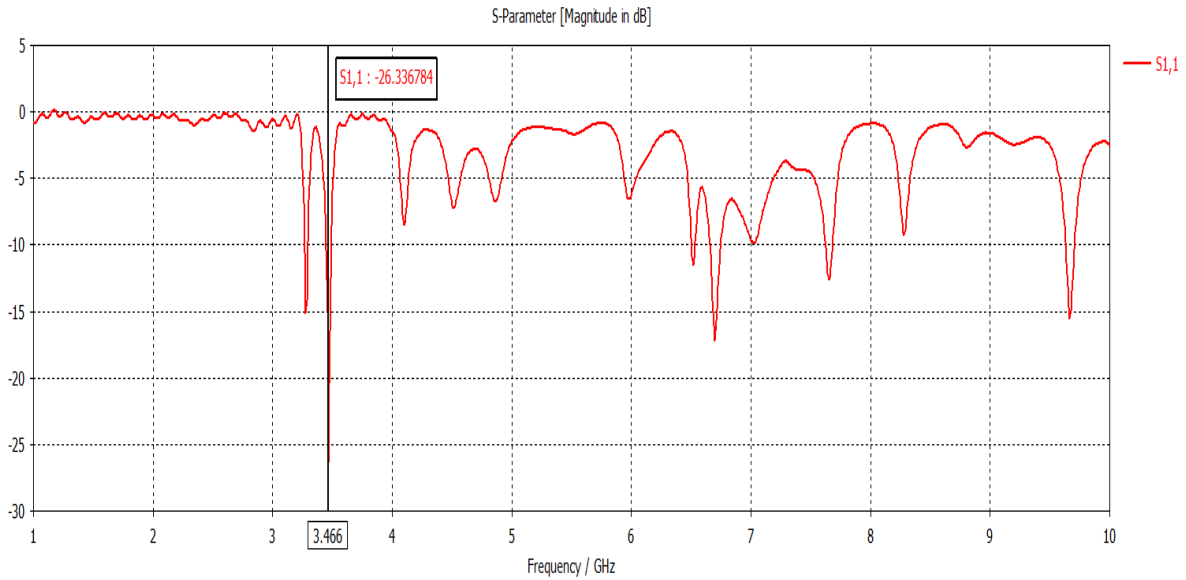


Figure III-51 : Coefficient de réflexion.

La figure III.51 montre que l'adaptation est bien faite, puisque le coefficient de réflexion S11 atteint un niveau proche de -26.3367dB à la fréquence 3.466GHz.

-Taux d'ondes stationnaire :

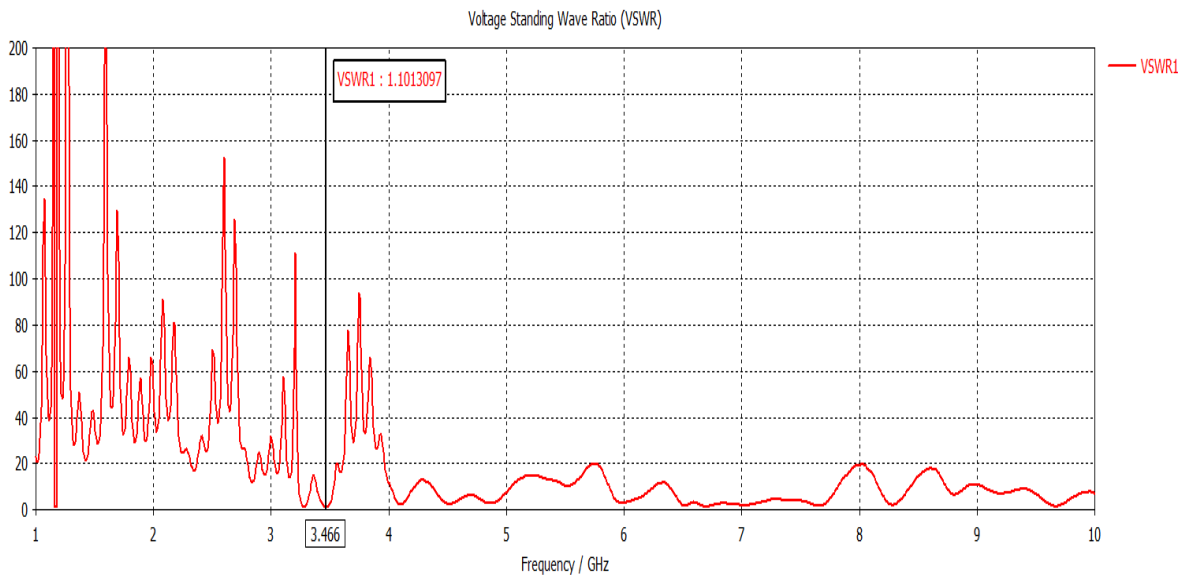


Figure III-52 : Taux d'ondes stationnaire en fonction de la fréquence.

D'après la figure III.52 on a eu un $VSWR < 2$ ce qui illustre que notre antenne est bien adaptée.

-Diagramme de rayonnement :

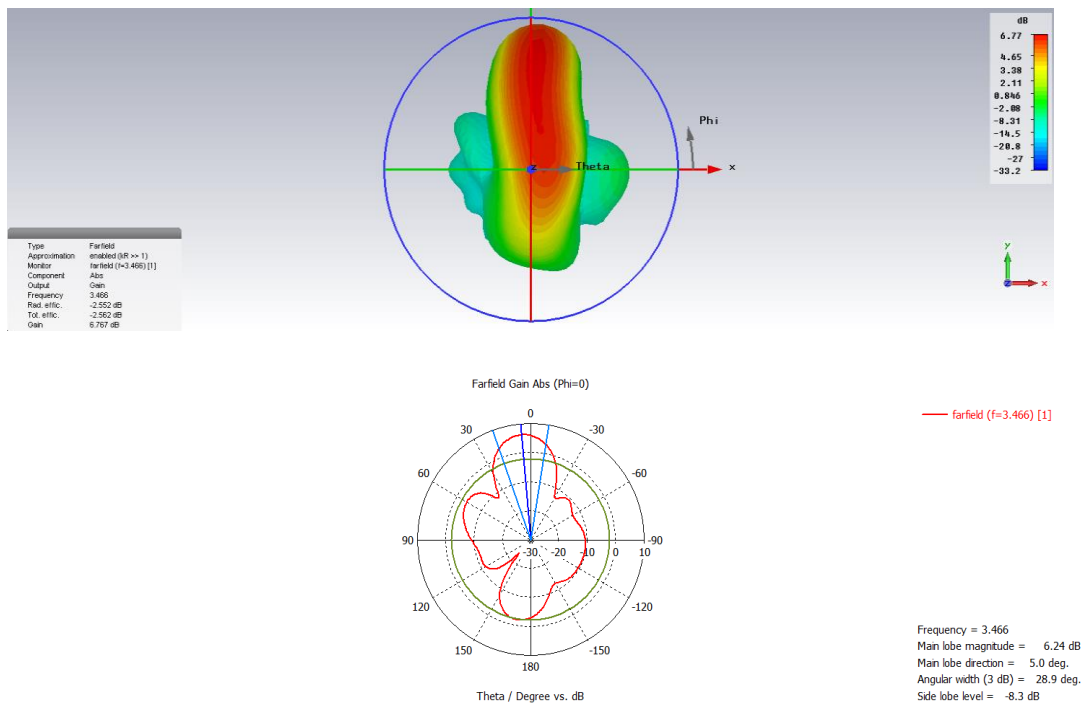


Figure III-53 : Diagramme de rayonnement en 3d et en présentation polaire.

Le gain de l'antenne à 4 éléments est autour de 6.767 dB à la fréquence de résonance 3.466Ghz

III.6.3 Réseau d'antennes à 8 éléments

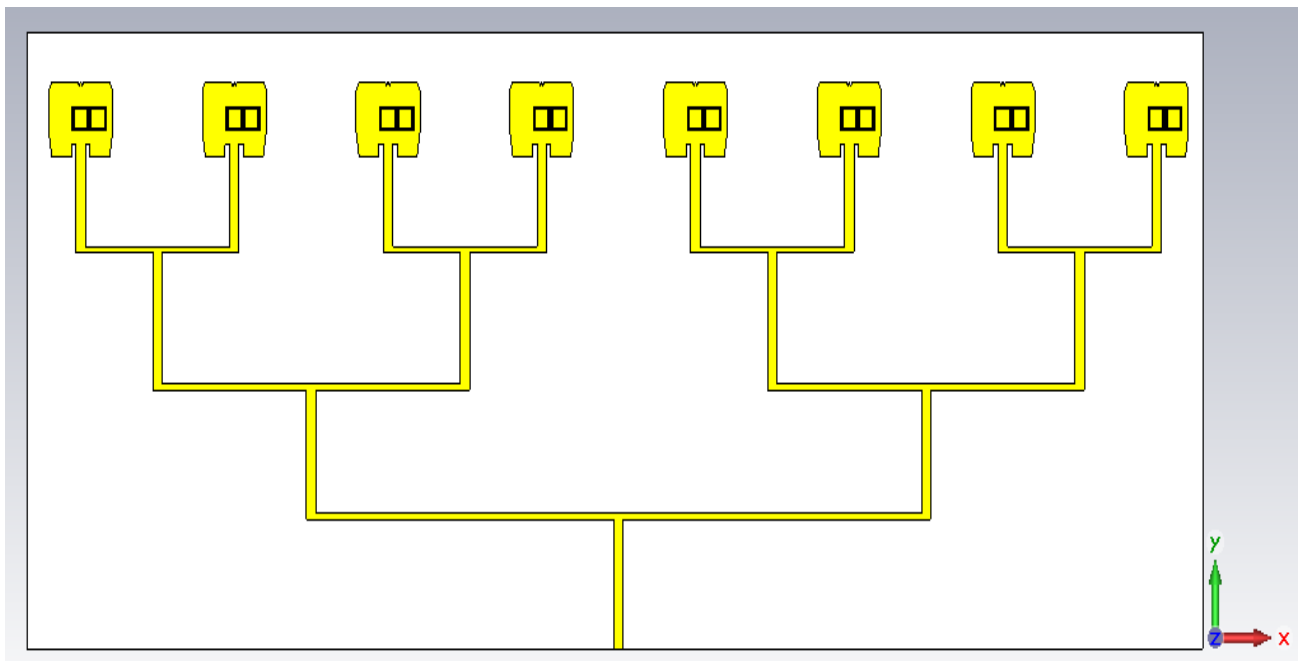


Figure III-54 : Réseau d'antennes à 4 éléments FR4 avec 2 CSRR.

-Coefficient de réflexion :

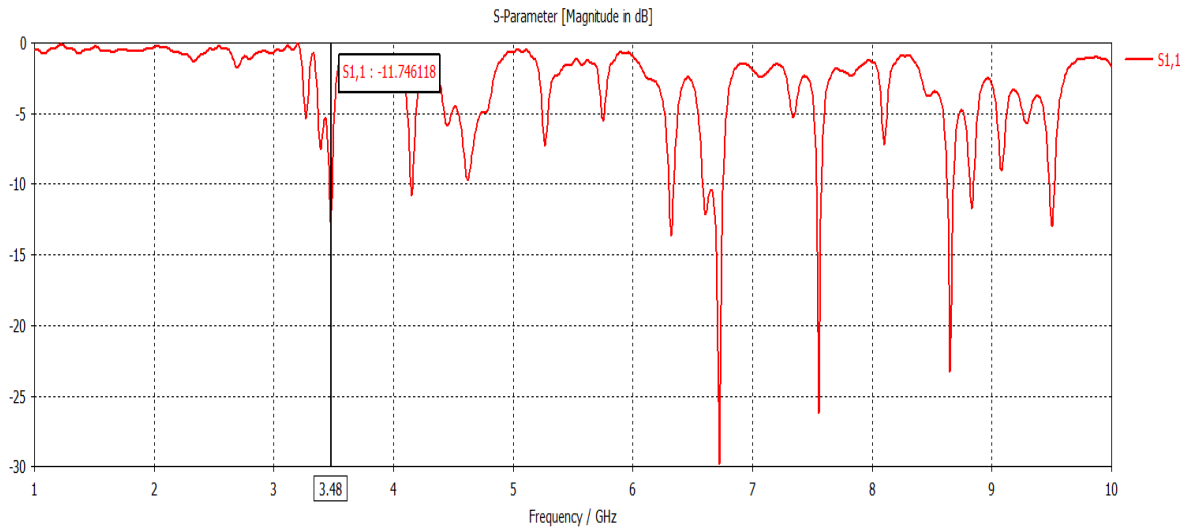


Figure III-55 : Coefficient de réflexion.

La figure III.55 montre que le coefficient de réflexion S11 atteint un niveau proche de -11.74dB, -10.827dB, -13.661dB, -29.851dB, -26.217dB, -23.289dB, -11.68dB, -13.009dB pour les fréquences 3.48 GHz, 4.15 GHz, 6.319 GHz, 6.724 GHz, 7.552 GHz, 8.65 GHz, 8.8304 GHz, 9.5043 GHz respectivement.

-Taux d'ondes stationnaire :

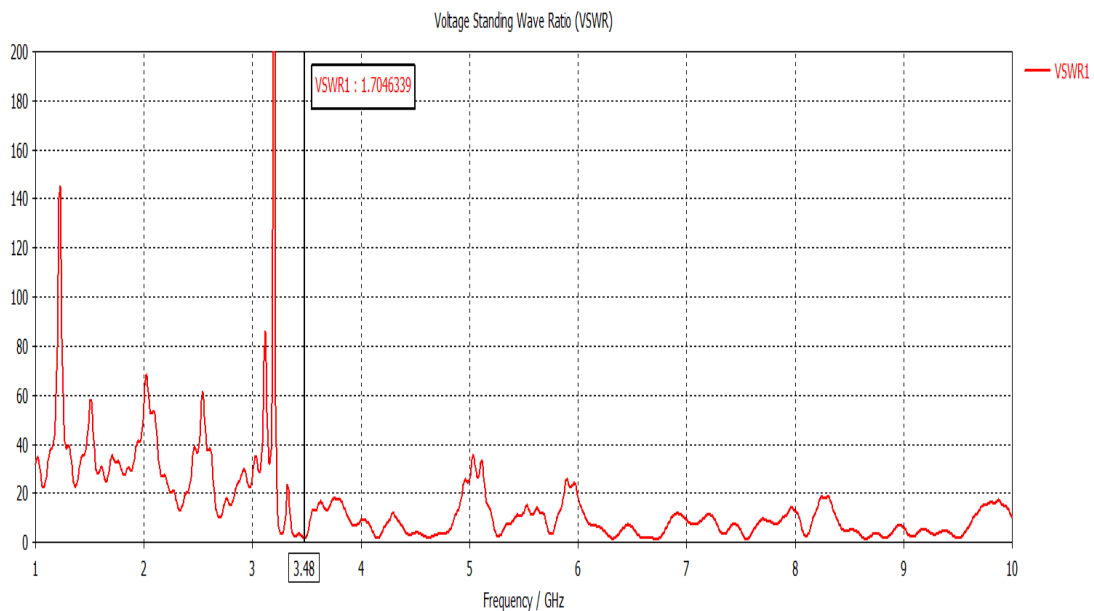


Figure III-56 : Taux d'ondes stationnaire en fonction de la fréquence.

D'après la figure III.56 on a obtenu un $VSWR < 2$ ce qui montre une bonne qualité d'adaptation.

-Diagramme de rayonnement :

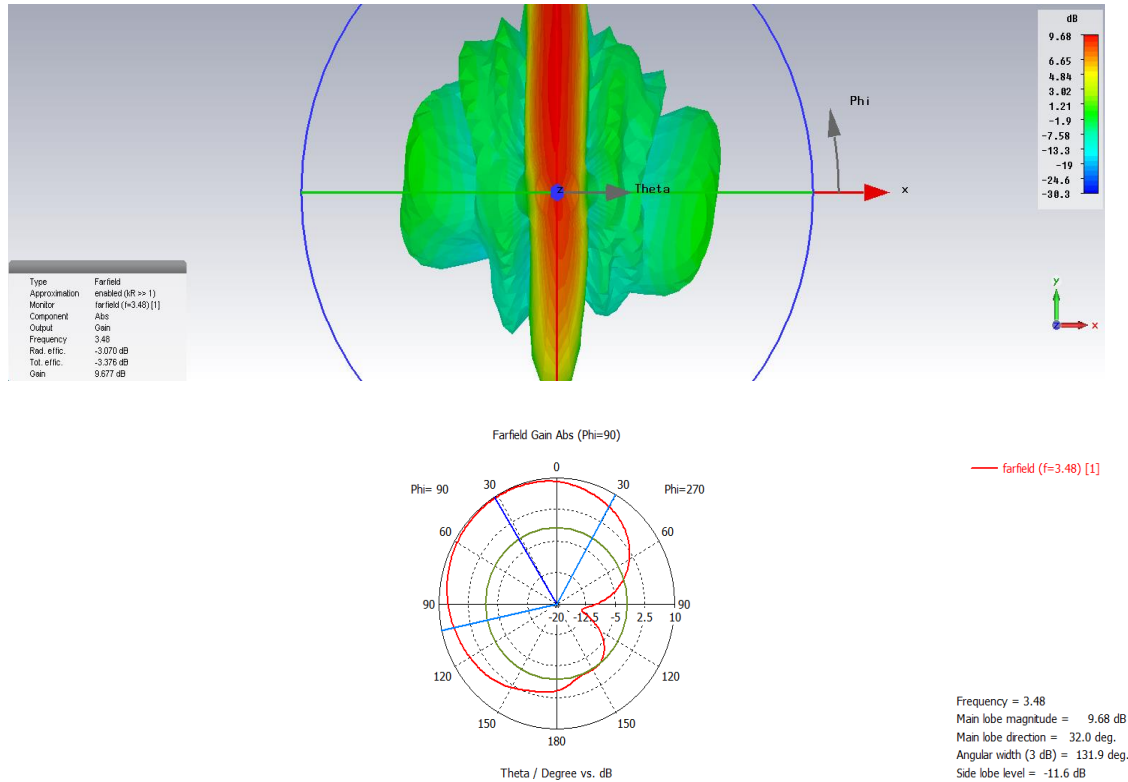


Figure III-57 : Diagramme de rayonnement en 3D et en présentation polaire.

La Figure III.57 montre que le gain de l'antenne à 8 éléments est autour de 9.677 dB à la fréquence de résonance 3.48 GHz.

III.7 COMPARAISON DES RESULTATS

Au cours des dernières années, des efforts importants ont été déployés dans la conception des réseaux d'antennes pour les applications 5G. Pour vérifier les performances de notre réseau d'antennes, nous allons faire une comparaison générale. Le tableau III.8 résume les caractéristiques de notre réseau d'antennes.

PARAMETRES		Fréquence de résonance (GHz)	Coefficient de réflexion (dB)	Gain (dB)	BP (GHz)	VSWR	EFFICACITE
1 élément	FR4	3.512	-19.3906	5.021	0.105	1.1387	96.52%
	Silicone	3.512	-21.9667	3.958	0.091	1.5544	89.73%
	FR4 AVEC 2 CSRR	3.502	-16.75	2.186	0.05	1.3405	42.04%
2 éléments	FR4	3.48	-25.075	7.906	0.076	1.1181	95.92%
	Silicone	3.492	-15.17	7.584	0.06	1.4223	77.99%
	FR4 AVEC 2 CSRR	3.466	-22.708	3.884	0.067	1.1579	66.22%
4 éléments	FR4	3.476	-12.631	11.91	0.055	1.6096	98.34%
	Silicone	3.5	-11.796	11.41	0.051	1.6923	72.54%
	FR4 AVEC 2 CSRR	3.466	-26.3367	6.767	0.038	1.1013	72.99%
8 éléments	FR4	3.448	-10.61	14.41	0.038	1.836	98.02%
	Silicone	3.48	-20.205	10.17	0.082	1.2165	80.66%
	FR4 AVEC 2 CSRR	3.48	-11.74	9.677	0.031	1.7046	75.96%

Tableau III-8 : tableau récapitulatif.

III.8 REUSLTATS EXPEREMENTAUX

III.8.1 Réseau d'antennes (2× 1)

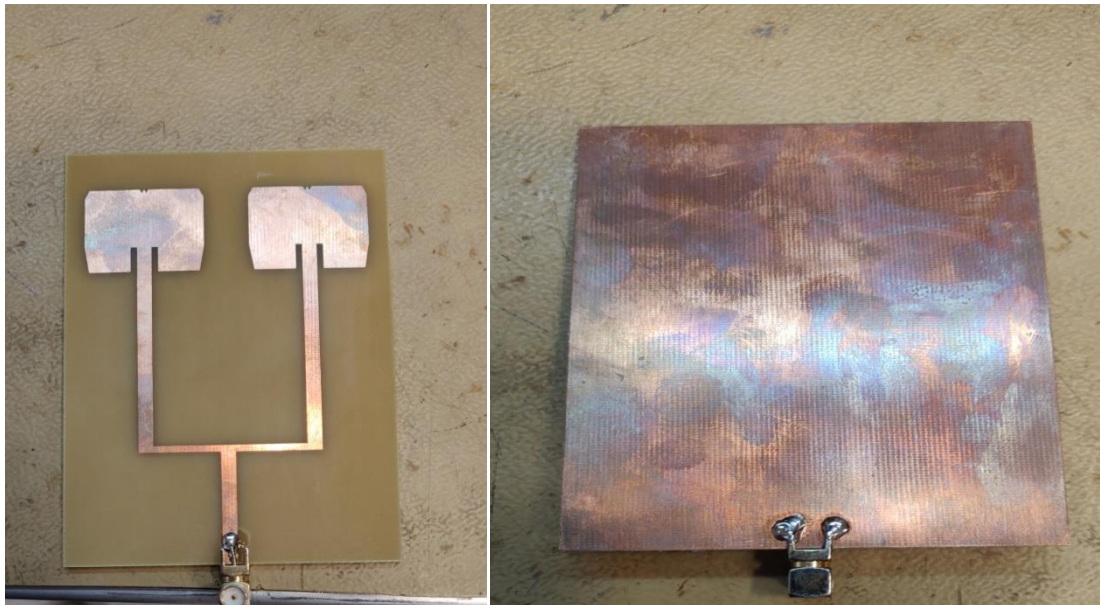


Figure III-58 : Réseaux d'antenne (2×1) à réaliser (face supérieure et inférieure)

III.8.2 Mesure de coefficient de réflexion et rapport d'onde stationnaire

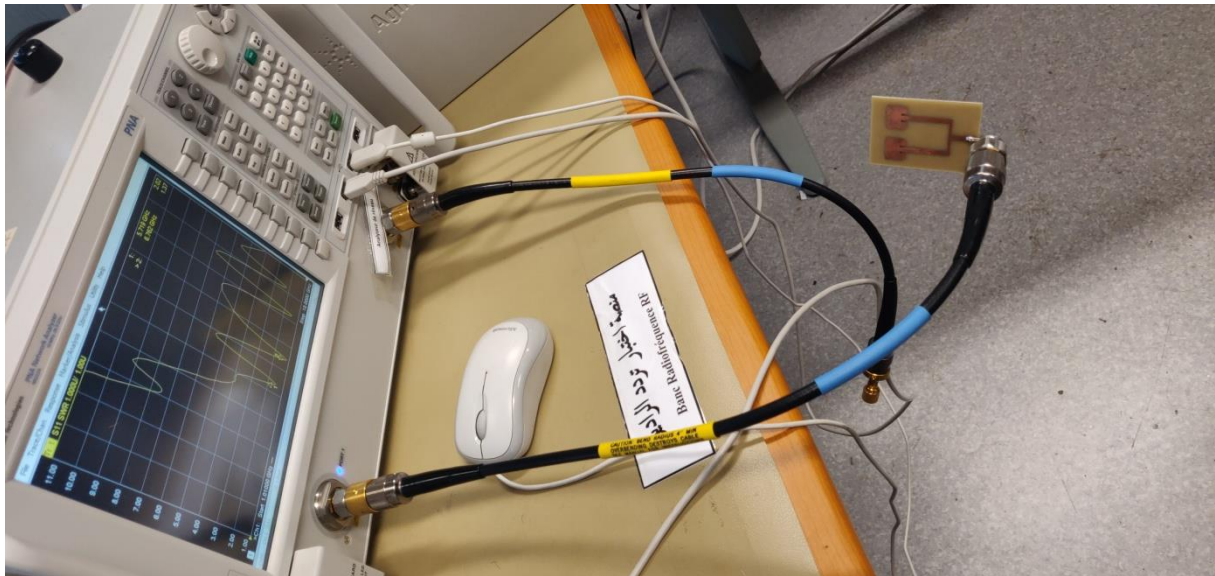


Figure III-59 : Réseau FR4 (2×1) résultats de mesure au niveau de l'Agence Spatiale Algérienne-Centre de développement des satellites, Bir El Djir 31130-Oran-Algérie.

Après avoir exporté les résultats de l'analyseur, nous sommes confrontés aux résultats de la simulation électromagnétique. La comparaison simulation/mesure du réseau d'antennes (2×1) est représentée sur la figure suivante :

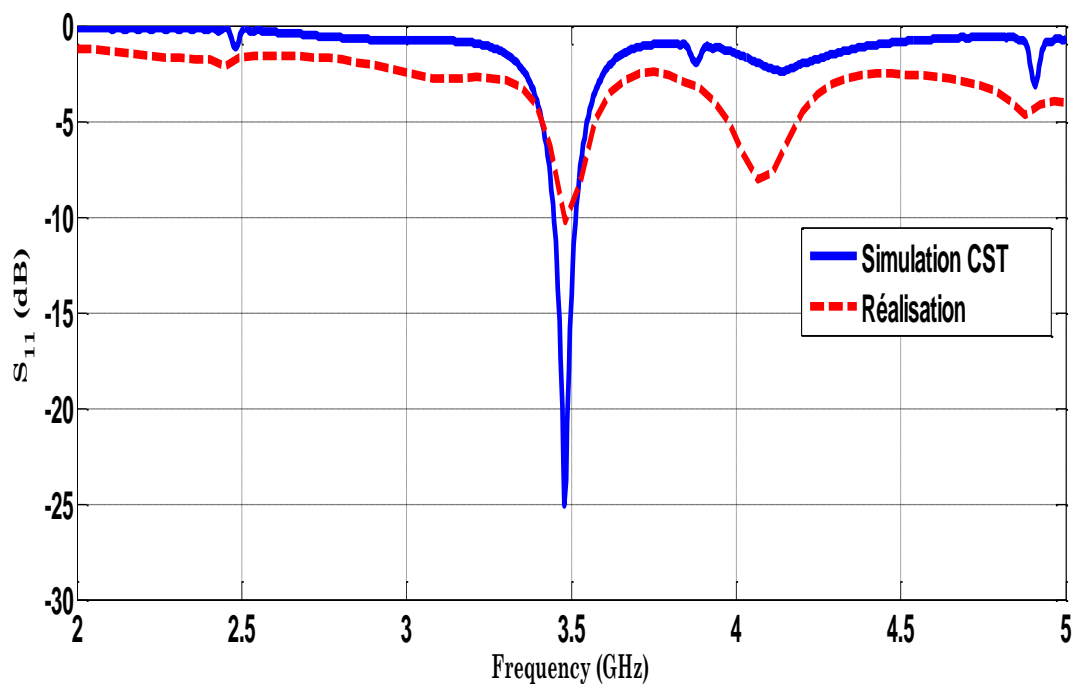


Figure III-60 : Comparaison de coefficient de réflexion simulé et mesuré réseau d'antennes (2×1) éléments.

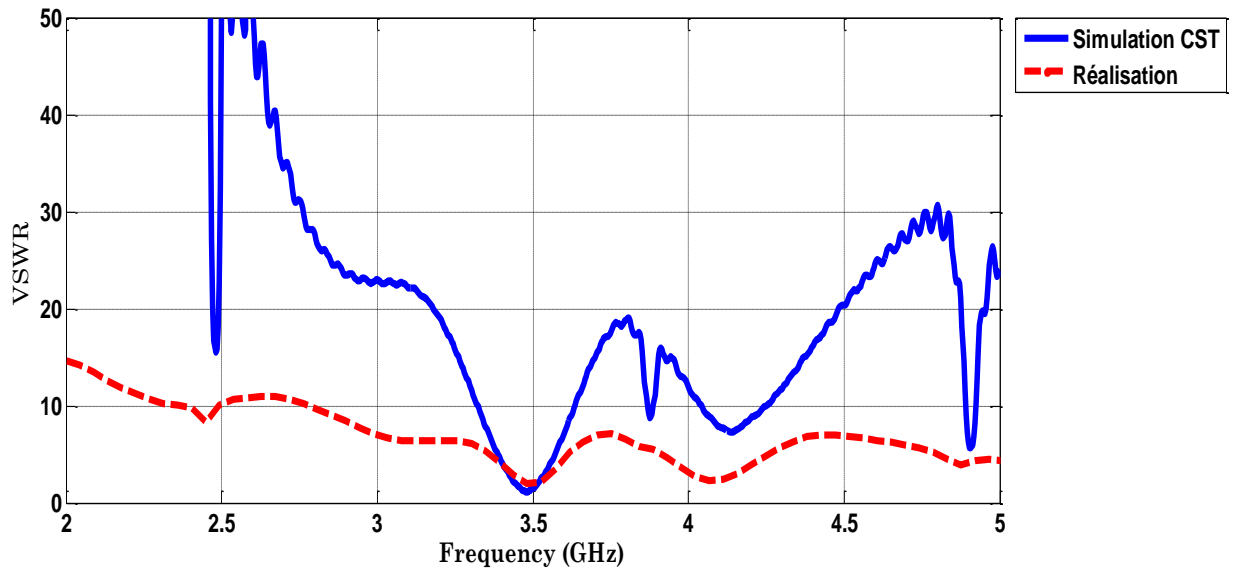


Figure III-61 : Comparaison de VSWR simulé et mesuré réseau d'antennes (2×1).

D'après les figures III (60, 61), un léger décalage de fréquence dans la bande passante doit être noté. Pour le réseau, il y a un léger décalage entre la simulation et la mesure, et ces différences peuvent être attribuées à des défauts de fabrication et/ou à l'incertitude de mesure. Malgré ces différences, les résultats obtenus lors des mesures répondent aux spécifications fixées dans notre cahier des charges.

III.9 CONCLUSION

Ce travail nous permet d'apprendre à utiliser les outils de modélisation numérique en micro-ondes. Les antennes patch peuvent être modélisées à l'aide d'outils informatiques spécialisés, en l'occurrence Microwave Studio (CST). Cette modélisation permet également d'étudier l'effet de différents paramètres sur le diagramme de rayonnement d'une antenne patch rectangulaire.

Dans la première partie, nous avons présenté une antenne patch rectangulaire multicouches pour les applications 5G

Dans la deuxième partie, les différentes structures présentées sont paramétrées pour avoir une réponse à la fréquence de résonance de 3,5 GHz. Tout d'abord, nous démontrons un résonateur magnétiquement actif RAF (SRR) et un carré RAF-C (CSRR) pour vérifier son fonctionnement à cette fréquence. Les résultats de simulation obtenus de la cellule SRR et de

la cellule complémentaire CSRR confirment que le comportement en encoche est obtenu près de la fréquence de résonance de la cellule.

Dans la troisième partie, nous proposons de nouveaux modèles d'antennes basés sur des associations d'antennes patch avec des résonateurs métamatériaux de type CSRR à 2. Ces nouveaux modèles d'antennes ont ensuite été développés et validés expérimentalement selon la méthode proposée par le CST. Ces modèles varient en fonction du nombre et de l'emplacement des résonateurs CSRR, soit sur le patch, soit sur le plan de masse. Nous avons ensuite confirmé que l'emplacement de la cellule par rapport à l'antenne, au plan de masse, au patch et au plan de masse a été choisi pour optimiser le niveau de couplage et assurer l'effet métamatériau souhaité. Les résultats de mesure et de simulation obtenus confirment que les caractéristiques passe-bande sont obtenues autour de la fréquence de résonance de 3,5 GHz de l'antenne et de l'élément CSRR. Dans ce chapitre, nous avons simulé une antenne patch, puis nous avons attribué des éléments métamatériaux pour voir l'effet de ces éléments sur le comportement de l'antenne. Par conséquent, les métamatériaux peuvent avoir des propriétés au-delà du comportement des antennes. L'objectif de ce travail est de miniaturiser les antennes patch à l'aide d'unités CSRR embarquées sur le patch ou le plan de masse ou des deux côtés simultanément. Les techniques de miniaturisation des antennes peuvent minimiser les coûts ainsi que le gain d'espace de travail, augmentant ainsi le gain de matériaux et de surfaces à utiliser.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[1] K.Meradi,R.Oulmi « Etude et conception de structures d'antenne à gain élevé à base de cavité Fabry Pérot FPCA pour les applications 5G» Mémoire de Master, Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi – Bordj Bou Arreridj , le 21/09/2021

[2] Constantine A. Balanis, “Antennatheoryanalysis and design”, A John Wiley& Sons, INC Publication, Third Edition. Hoboken, New Jersey 2005.

CONCLUSION GENERALE

Le but de ce mémoire est d'étudier l'influence des matériaux composites (métamatériaux) sur les propriétés des antennes patch. Tout d'abord, dans le 1^{er} chapitre, nous étudions l'état de l'art dans différentes antennes planaires, en particulier les antennes patch. Cette dernière présente les avantages d'une ligne micro ruban (légèreté, petite taille, structure plate, faible coût) et permet de créer facilement des réseaux constitués de plusieurs dizaines d'éléments. Cependant, leur bande passante est encore faible (quelques pourcents), leur gain reste moyen (-30 dB pour le réseau) et ils ne peuvent transmettre plus de quelques dizaines de watts.

Dans le 2^{ème} chapitre, nous étudions quelques types de métamatériaux électriques (SRR carré, CSRR carré) et magnétiques. Les métamatériaux présentent à la fois une permittivité négative et une perméabilité magnétique correspondant à des indices de réfraction négatifs. Ceci peut être réalisé par le mode SRR et CSRR, qui présente des polarisabilités électriques et magnétiques avec des valeurs négatives dans la bande de résonance. Cette bande est étroite et correspond à un phénomène de dispersion négative.

Dans le 3^{ème} chapitre, nous appliquons les métamatériaux aux structures radiatives. Des techniques pour améliorer les performances des antennes patch ont également été proposées. La technique consiste à placer le métamatériau gauche au-dessus de l'antenne pour miniaturiser l'antenne patch initiale. Le comportement en fréquence de l'antenne métamatériau est analysé et son diagramme de rayonnement est obtenu par simulation logicielle CST.

Afin de faire une miniaturisation des réseaux d'antennes, nous avons utilisé deux techniques de miniaturisation, la première en utilisant les métamatériaux sur le patch et le plan de masse et aussi en utilisant un plan de masse partiel, la deuxième technique et d'utiliser un substrat à haute permittivité qui est le silicone avec une permittivité de 11,9. Cette technique nous a permis de diminuer les différentes dimensions des antennes planaires.

Nous avons ensuite fait une étude comparative entre les différents réseaux d'antennes utilisant les matériaux FR4 et le silicone, nous avons remarqué que les antennes à base de FR4 donnent de meilleurs résultats comparant au FR4, n'empêche que le silicone à son tour donne de bons résultats dédiés pour des antennes flexibles et reconfigurables.

Les résultats obtenus dans la simulation sont satisfaisants et montrent une amélioration significative des performances de l'antenne. Au final, nous devons encore faire beaucoup d'analyses et de simulations pour contrôler tous les modes et toutes les fréquences de coupure possibles afin de tirer pleinement parti de ces structures. D'un point de vue, nous espérons appliquer différents métamatériaux cellulaires sous différentes formes.

PRODUCTION SCIENTIFIQUE

A. GOUAL, F. HOUARI, F. BOUSALAH, A. RABAH, H. BENOSMAN, « **3.5GHz ANTENNA DESIGN FOR 5G APPLICATION** », La 7ème édition de ce symposium (MISC'2022) du 30 au 31 octobre 2022 à l'Université de Mostaganem – Abdelhamid Ibn Badis, Algérie **MISC2022**, <https://easychair.org/conferences/?conf=misc2022>. Date de soumission de l'article le 10 juin 2022.