

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



MEMOIRE

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

En : Télécommunications

Spécialité : Systèmes des Télécommunications

Par : HADDOUINE KHADIDJA et REGGANI HANANE

Sujet

**Conception et réalisation des antennes fractales imprimées à gain élevé
pour les applications satellitaires**

Soutenu publiquement, le 12/06/2024, devant le jury composé de :

M ^{me} H. BENOSMAN	MCA	Université de Tlemcen	Présidente
M ^r A. DJEMAI	MCB	Université de Tlemcen	Examineur
M ^{me} Y. BELHADEF	MCA	Université de Tlemcen	Encadreur
M ^r M.A. RABAH	MRA	Université de Tlemcen	Co-Encadreur

Année universitaire : 2023/2024

Remerciements

Nous tenons à saisir cette occasion et adresser nos sincères remerciement et nos profondes reconnaissances à Dieu le tout puissant et miséricordieux qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce modeste travail.

Nous présentons tout d'abord nos sincères remerciements et nos profondes gratitude à notre encadreur Madame **BELHADEF Yamina** pour sa disponibilité et ses conseils judicieux et pertinents qui ont aidé à l'amélioration de ce mémoire.

Nous exprimons notre profond respect et nos sincères gratitude à notre co-encadreur Monsieur **RABAH Mohammed Amin** pour leur aide et leurs précieux conseils.

Nos vifs remerciements vont aussi aux membres du jury de notre Projet de Fin d'Etude:

Madame la présidente de jury « BENOSMAN Hayet », nous vous exprimons notre reconnaissance et notre remerciement pour avoir accepté de présider ce jury.

Monsieur l'examineur « DJEMAI Abderrazak », merci infiniment d'avoir accepté de faire partie du jury de notre travail de recherches.

Nous remercions également l'ensemble des professeurs qui nous ont enseigné.

Enfin, un grand remerciement à toutes nos familles et nos amies.

Dédicace

Je dédie ce travail :

*A mon père pour son sacrifice et son soutien tout au long de mon parcours
d'étude.*

A ma mère qui m'a éclairée le chemin par ses conseils judicieux.

*A mes frères Kheireddine, Mohammed Riyad, Younes et Abdenour pour leurs
encouragements.*

A ma sœur Afaf et Safia pour leur tendresse et amour.

A ma binôme Hanane

A toute ma famille et mes copines.

Khadidja

Dédicace

Je dédie ce travail à ma famille qui m'a doté une éducation agréable. Son amour a fait de moi ce que je suis aujourd'hui. Particulièrement à mon support dans ma vie qui m'a appris, m'a supporté et m'a dirigé vers la gloire mon chère père OTMANE.

A celle qui m'a arrosé de tendresse et d'espairs, qui m'a bénie par ces prières, ma chère mère.

A mes grands-pères, que j'espère que dieu leur accordera une longue vie dans son bon plaisir, je leur souhaite une bonne santé.

A mes deux frères Khaled et Mustapha, et ma petite sœur Nour El Houda qui m'avez toujours soutenue et encouragée durant ces années d'études.

A ma chère binôme Khadîdja pour son entente et sa sympathie.

A toute ma famille.

HANANE

Résumé

L'objectif de ce mémoire est la contribution à la conception et à la réalisation des réseaux d'antennes fractales imprimées pour les applications satellitaires à gain élevé. Nous avons simulé des réseaux d'antennes fractales de type Minkowski à deux, quatre et huit éléments alimentés par des diviseurs de puissance en jonction T afin d'augmenter le gain des structures proposées. Une autre technique d'augmentation du gain a été appliquée sur le réseau d'antennes à quatre éléments, qui est la technique DGS en insérant des fentes sur le plan de masse de la structure. Dans le but de bénéficier d'une géométrie à taille réduite par rapport au réseau d'antennes à huit éléments avec un gain convenable aux fréquences de résonances trouvées. La simulation a été effectuée par le logiciel le logiciel CST Microwave Studio. Les résultats de simulation obtenus et les mesures des prototypes réalisés sont très satisfaisants en termes d'adaptation, de gain et de bande passante.

Mots clés : Antenne imprimée, Antenne fractale, Réseaux d'antennes, Conception, Réalisation, Systèmes satellitaires, CST Microwave Studio, Résultats

Abstract

The objective of this dissertation is to contribute to the design and realization of printed fractal antenna arrays for high-gain satellite applications. We simulated Minkowski-type fractal antenna arrays with two four, and eight elements fed by T-junction power dividers to increase the gain of the proposed structures.

Another gain enhancement technique was applied to the four-element antenna array, which is the DGS technique by inserting slots on the ground plane of the structure. The aim was to achieve a compact geometry compared to the eight-element antenna array with suitable gain at the resonant frequencies found. The simulation was performed using CST Microwave Studio software. The simulation results obtained and the measurements of the prototypes are very satisfactory in terms of matching, gain, and bandwidth.

Keywords: Printed antenna, Fractal antenna, Antenna arrays, Design, Realization, Satellite systems, CST Microwave Studio, Results.

المخلص:

- الهدف من هذه الأطروحة هو المساهمة في تصميم و انتاج مصفوفات هوائيات فراكتالية مطبوعة لتطبيقات الاقمار الصناعية ذات الكسب العالي. لقد قمنا بمحاكات مصفوفات الهوائية الفراكتالية من نوع Minkowski مكونة من عنصرين و اربعة وثمانية عناصر مغذية بمقسمات الطاقة تقاطع T من اجل زيادة كسب الهياكل المقترحة.
 - ثم تطبيق تقنية اخرى لزيادة الكسب على مصفوفة الهوائي ذات العناصر الاربعة وهي تقنية DGS عن طريق ادخال فتحات على مستوى الارضي للهيكل. بهدف الاستفادة من هندسة ذات حجم مصغر مقارنة بمصفوفة الهوائي المكونة من ثمانية عناصر مع كسب مناسب عند الترددات المطلوبة .
 - ثم اجراء المحاكاة بواسطة برنامج CST Micro wave studio كانت نتائج المحاكاة التي تم الحصول عليها وقياسات النماذج الاولية مرضية للغاية من حيث التكيف و الكسب و عرض النطاق الترددي.
- الكلمات المفتاحية :** الهوائي المطبوع ، الهوائي فراكتالي ، مصفوفات الهوائي ، الانتاج انظمة الاقمار الصناعية النتائج

CST Micro wave studio

Table des matières

Remerciements	I
Dédicace	II
Dédicace	III
Table des matières	V
Liste des figures	X
Liste des tableaux.....	XIII
Liste des abréviations.....	XIV
Introduction générale.....	1
Chapitre I : Notion de base sur les antennes imprimées et les réseaux d'antennes..	3
I.1 Introduction	3
I.2 Définition	3
I.3. Description	4
I.4 Formes de l'antenne patch	4
I.4.1. Antenne patch rectangulaire	5
I.4.2. Antenne patch circulaire	7
I.5. Techniques d'alimentation	9
I.5.1. Alimentation par une ligne micro ruban	9
I.5.2. Alimentation par sonde coaxiale.....	10
I.5.3. Alimentation par fente (par couplage électromagnétique).....	11
I.5.4. Alimentation par couplage de proximité.....	11
I.6. Techniques adaptation	12
I.6.1. Adaptation par ligne quart d'onde	12
I.6.2. Adaptation avec encoches.....	13
I.7. Caractéristiques radioélectriques de l'antenne	13
I.7.1. Impédance d'entrée.....	13
I.7.2. Coefficient de réflexion	13

I.7.3. Bande passante	15
I.7.4. VSWR	16
I.7.5. Gain	16
I.7.6. Directivité	17
I.7.7. Rendement	17
I.7.8. Diagramme de rayonnement	18
I.7.9. Polarisation	18
I.7.9.1. Polarisation linéaire (rectiligne)	19
I.7.9.2. Polarisation circulaire	19
I.7.9.3. Polarisation elliptique	19
I.8. Avantages et Inconvénients des antennes patch	19
I.8.1. Avantages	19
I.8.1. Inconvénients	20
I.9. Domaine d'application des antenne patch	20
I.10. Réseaux d'antennes imprimées	20
I.10.1. Type de réseaux d'antennes imprimées	20
I.10.1.1. Réseau planaire	21
I.10.1.2 Réseau circulaire	21
I.10.1.3. Réseau cylindrique	22
I.10.1.4. Réseau conique	22
I.10.2. Technique d'alimentation du réseaux d'antennes	23
I.10.2.1. Alimentation série	23
I.10.2.2. Alimentation parallèle	23
I.10.3. Domaines d'applications	23
I.10.4. Avantages des réseaux d'antennes	24
I.11. Conclusion	24
Chapitre II :	25
Antennes fractales et les systèmes satellitaires	25
II.1. Introduction	25
II.2. Définition d'une antenne fractale	25

II.3. Différentes formes fractales	26
II.3.1. Courbe de koch	26
II.3.2. Triangle de Sierpinsky	27
II.3.3. Tapis Sierpinsky	27
II.3.4. Fractale de Minkowski	28
II.3.5. Courbe de Hilbert	28
II.3.6. Courbe de Péano	29
II.4. Avantages et les inconvénients	30
II.4.1. Avantages	30
II.4.2. Inconvénients	30
II.5. Domaines d'applications	31
II.6. Systèmes satellitaires	31
II.6.1. Composition du satellite	32
II.6.2. Bandes de fréquences	33
II.6.3. Avantages	34
II.6.4. Inconvénient	34
II.7. Conclusion	35
Chapitre III :	36
Conception et réalisation des réseaux d'antennes fractales imprimées	36
III.1. Introduction	36
III.2. Présentation de logiciel CST	36
III.3. Géométrie de l'antenne Patch initiale	37
III.3.1 Etudes paramétriques	37
III.3.1.1. Variation de la largeur W_p du patch	37
III.3.1.2. Variation de largeur de la ligne quart d'onde W_0 du patch	38
III.3.2. Résultats de simulation	39
III.4. Géométrie de l'antenne patch fractale à la première itération	42
III.4.1. Etudes paramétriques	42
III.4.1.1. Variation de la largeur W_p du patch	42
III.4.1.3. Variation de la larguer de l'encoche W_1	43

III.4.1.4. Variation de la largeur de ligne quart d'onde (W_0) du patch	43
III.4.2. Résultats de simulation.....	44
III.5. Géométrie de l'antenne patch fractale à la deuxième itération	46
III.5.1. Etudes paramétriques	47
III.5.1.1. Variation de la longueur L_p du patch	47
III.5.2. Résultats de simulation.....	47
III.6. Réseau d'antennes à deux éléments de la première itération	49
III.6.1. Etude Paramétrique	51
III.6.1.1. Variation de la longueur x du réseau d'antenne à 2 éléments.....	51
III.6.1.2. Variation de la longueur d'alimentation L_a	51
III.6.2. Résultats de simulation.....	52
III.7. Réseau d'antennes à quatre éléments de la première itération.....	54
III.7.1. Etude Paramétrique	54
III.7.1.1. Variation de la longueur x	54
III.7.1.2. Variation de la longueur d'alimentation L_a	55
III.7.2. Résultats de simulation.....	55
III.8. Réseau d'antenne à huit éléments de la première itération	59
III.8.1. Etude Paramétrique	59
III.8.1.1. Variation de la longueur x	59
III.8.2. Résultats de simulation.....	59
III.9. Réseau d'antennes à deux éléments de la deuxième itération.....	64
III.9.1. Etudes paramétriques	64
III.9.1.1. Variation de la longueur x du diviseur de puissance	64
III.9.1.2. Variation de longueur d'alimentation L_a	65
III.9.2. Résultats de simulation.....	65
III.10. Réseau d'antenne à quarte élément de la deuxième itération.....	67
III.10.1. Etude paramétrique.....	68
III.10.1.1. Variation de la longueur x	68
III.10.2. Résultats de simulation.....	68
III.11. Réseau d'antennes à huit éléments de la deuxième itération.....	71

III.11.1. Etude paramétrique.....	71
<i>III.11.1.1. Variation de la longueur x du réseau d'antennes à 8 éléments</i>	<i>71</i>
III.11.2. Résultats de simulation.....	72
III.12. Réseau d'antennes à 4 éléments avec la technique DGS pour augmenter le Gain.....	76
III.12.1.Etude paramétrique.....	76
<i>III.12.1.1.Variation de la largeur du fente(k)</i>	<i>76</i>
<i>III.12.1.2. Variation de la longueur du fente (lb).....</i>	<i>77</i>
III.12.2.Résultats de simulation.....	77
III.14. Conclusion.....	87
Conclusion générale.....	89
Références bibliographiques	91

Liste des figures

Figure I.1: Antenne patch.....	3
Figure I.2: Géométrie d'une antenne micro-ruban [I.8].....	4
Figure I.3: Formes d'une antenne patch	5
Figure I.4: Antenne patch micro ruban rectangulaire [I.8].....	5
Figure I.5: Antenne patch micro ruban circulaire.	8
Figure I.6: Alimentation par ligne micro ruban [I.16], [I.17].	10
Figure I.7: Alimentation par sonde coaxiale.	10
Figure I.8: Alimentation par fente (par couplage électromagnétique).	11
Figure I.9: Alimentation par couplage de proximité.	12
Figure I.10: Adaptation par une ligne quart d'onde.	12
Figure I.11: Adaptation avec encoches [I.20].....	13
Figure I.12: Exemple de coefficient de réflexion	14
Figure I.13: Illustration de la bande passante à -10 dB d'une antenne [I.8].	15
Figure I.14: Diagrammes de rayonnement d'une antenne	18
Figure I.15: Types de polarisation [I.8].	19
Figure I.16: Géométrie d'un réseau planaire [I.38].	21
Figure I.17: Géométrie d'un réseau circulaire [I.38].	21
Figure I.18: 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.38].	22
Figure I.19: Géométrie d'un réseau conique de M anneaux espacés d'une distance de composés de N éléments [I.38].	22
Figure I.20: Alimentation en série [I.38].	23
Figure I.21: Alimentation en parallèle [I.38].	23
Figure II. 1: Exemple d'antenne fractale.	26
Figure II. 2: Courbe de koch	26
Figure II. 3: Triangle de Sierpinsky.	27
Figure II. 4: Quatre itérations du tapis de Sierpinsky [II.53].	28
Figure II. 5: Génération de la fractale de Minkowski [II.55] [II.56].	28
Figure II. 6: Génération de la courbe de Hilbert [II.59].	29
Figure II. 7: Génération de la courbe de Péano	30
Figure II. 8: Exemple d'un satellite.....	32
Figure II. 9: Composition du satellite.	32
Figure III. 1: Géométrie de l'antenne patch initiale.....	37
Figure III. 2: Influence de la largeur W_p sur l'adaptation.....	38
Figure III. 3: Influence de W_0 sur l'adaptation.	38
Figure III. 4 (a) : Coefficient de réflexion.	40

Figure III. 5 (e) : Diagrammes de rayonnement en 3D (Gain + Directivité).....	41
Figure III. 6: Géométrie de l'antenne patch fractale à la première itération.....	42
Figure III. 7: Influence de la longueur W_p sur l'adaptation.	42
Figure III. 8: Influence de la longueur L_p sur l'adaptation.	43
Figure III. 9: Influence de W_1 sur l'adaptation.	43
Figure III. 10: Influence de la largeur de la ligne quart d'onde W_0 sur l'adaptation.	43
Figure III. 11 (a) : Coefficient de réflexion de l'antenne fractale à la 1 ^{ère} itération. (b) : Rapport d'onde stationnaire. (c) : Partie réelle de l'impédance d'entrée de l'antenne. (d): Gain de l'antenne.	45
Figure III. 12 . (e) : Diagrammes de rayonnement en 3D (Gain + Directivité). (f) : Diagrammes de rayonnement polaires en 2D.....	46
Figure III. 13: Géométrie de l'antenne Patch fractale à la deuxième itération.....	46
Figure III. 14: Influence de la longueur L_p sur l'adaptation.	47
Figure III. 15. (a) : Coefficient de réflexion de l'antenne fractale à la 2 ^{ème} itération. (b) : Rapport d'onde stationnaire. (c) : Partie réelle de l'impédance d'entrée de l'antenne. (d) : Gain de l'antenne.	48
Figure III. 16 (e) : Diagrammes de rayonnement en 3D (Gain + Directivité). (f) : Diagrammes de rayonnement polaires en 2D.....	49
Figure III. 17 : Géométrie de réseau d'antennes à deux éléments.	50
Figure III. 18: Variation de la longueur x	51
Figure III. 19: Variation de la longueur d'alimentation L_a	51
Figure III. 20 . (a) : Coefficient de réflexion du réseau d'antennes à 2 éléments de la 1 ^{ère} itération. (b) : Rapport d'onde stationnaire. (c) : Partie réelle de l'impédance d'entrée de l'antenne. (d) : Gain de l'antenne.....	53
Figure III. 21 (e) : Diagrammes de rayonnement en 3D (Gain + Directivité). (f) : Diagrammes de rayonnement polaires en 2D.....	53
Figure III. 22: Géométrie du réseau d'antennes à quart éléments de la 1 ^{ère} itération.....	54
Figure III. 23: Variation de la longueur x de la jonction T	55
Figure III. 24: Variation de la longueur d'alimentation L_a	55
Figure III. 25 . (a) : Coefficient de réflexion du réseau d'antennes à 4 éléments de la 1 ^{ère} itération. (b) : Rapport d'onde stationnaire. (c) : Partie réelle de l'impédance d'entrée de l'antenne. (d) : Gain de l'antenne.....	57
Figure III. 26 (i) : Diagrammes de rayonnement en 3D et 2D pour $f= 6$ GHz. (f) : Diagrammes de rayonnement en 2D et 3D pour $f= 7.68$ GHz. (g) : Diagrammes de rayonnement en 3D et polaires en 2D pour $f= 8.616$ GHz.	58
Figure III. 27: Géométrie du réseau d'antennes à huit éléments.	59
Figure III. 28: Variation de la longueur x du diviseur de puissance.	59
Figure III. 29 (a) : Coefficient de réflexion du réseau d'antennes à 8 éléments de la 1 ^{ère} itération. (b) : Rapport d'onde stationnaire. (c) : Partie réelle de l'impédance d'entrée de l'antenne. (d) : Gain de l'antenne.....	61

Figure III. 30 Diagrammes de rayonnement en 3D (Gain + Directivité) et en 2D (e) pour $f=6$ GHz, (f) pour $f=7.2$ GHz, (g) pour $f=8.19$ GHz, (h) pour $f=9.17$ GHz et (i) pour $f=9.73$ GHz.	63
Figure III. 31: Géométrie du réseau d'antennes à deux éléments.	64
Figure III. 32: Variation de la longueur x du réseau à deux éléments.	64
Figure III. 33: Variation de longueur d'alimentation L_a du réseau à deux éléments.	65
Figure III. 34 (a) : Coefficient de réflexion du réseau d'antennes à 8 éléments de la 1 ^{ère} itération. (b) : Rapport d'onde stationnaire. (c) : Partie réelle de l'impédance d'entrée de l'antenne. (d) : Gain de l'antenne.	66
Figure III. 35 (e) : Diagrammes de rayonnement en 3D (Gain + Directivité). (f) : Diagrammes de rayonnement polaires en 2D.	67
Figure III. 36: Géométrie de réseau d'antennes à quatre éléments.	67
Figure III. 37: Variation de la longueur x du réseau à 4 éléments.	68
Figure III. 38 (a) : Coefficient de réflexion du réseau d'antennes à 4 éléments de la 2 ^{ème} itération. (b) : Rapport d'onde stationnaire. (c) : Partie réelle de l'impédance d'entrée de l'antenne. (d) : Gain du réseau d'antennes.	69
Figure III. 39 :Diagrammes de rayonnement en 3D (Gain +Directivité) et en 2D, (e) pour $f=6$ GHz, (h) pour $f=7.94$ GHz et (g) pour $f=8.872$ GHz.	71
Figure III. 40: Géométrie de réseau d'antennes à huit éléments.	71
Figure III. 41: Variation de la longueur x du réseau à 8 éléments.	72
Figure III. 42 (a) : Coefficient de réflexion du réseau d'antennes à 8 éléments de la 2 ^{ème} itération. (b) : Rapport d'onde stationnaire. (c) : Partie réelle de l'impédance d'entrée de l'antenne. (d) : Gain du réseau d'antennes.	73
Figure III. 43: Diagrammes de rayonnement en 3D (Gain +Directivité) et en 2D, (e) pour $f=6.09$ GHz, (f) pour $f=6.65$ GHz et (g) pour $f=8.16$ GHz, (h) pour $f=8.65$ GHz et (i) pour $f=9.20$ GHz.	75
Figure III. 44 :Réseau d'antenne à quatre éléments avec la technique DGS.	76
Figure III. 45: Variation de la largeur du fente k	76
Figure III. 46: Variation de la longueur du fente (l_b).	77
Figure III. 47 (a) : Coefficient de réflexion du réseau d'antennes à 4 éléments avec la technique DGS. (b) : Rapport d'onde stationnaire (c) : Partie réelle de l'impédance d'entrée de l'antenne. (d) : Gain du réseau d'antennes.	78
Figure III. 48 (e) : Diagrammes de rayonnement en 3D (Gain + Directivité) pour $f=6$ GHz. (f) : Diagrammes de rayonnement polaires en 2D pour $f=6$ GHz.	79
Figure III. 49 : Diagrammes de rayonnement en 3D (Gain + Directivité) pour $f=8$ GHz (f) : Diagrammes de rayonnement polaires en 2D pour $f=8$ GHz	79
Figure III. 50 : Prototypes des structures d'antennes réalisés. (a) Réseau à 8 éléments à la 2 ^{ème} itération. (b) Réseau à quatre éléments avec la technique DGS.	Error! Bookmark not defined.

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Equations de l'antenne patch rectangulaire.....	8
Tableau I.2: Equations de l'antenne patch circulaire.....	10
Tableau II.1 : Bandes de fréquences et leurs services.....	43
Tableau III.1 : Dimensions de l'antenne patch initiale.....	50
Tableau III.2 : Dimensions de l'antenne patch fractale à la première itération	55
Tableau III.3 : Dimensions de l'antenne patch fractale à la 2 ^{ième} itération.....	59
Tableau III.4 :Dimensions du diviseur de puissance en jonction	63
Tableau III.5 : Dimensions du réseau d'antennes à deux éléments de la 1 ^{ière} itération.....	64
Tableau III.6 : Dimensions du réseau d'antennes à quatre éléments de la première itération.....	68

Liste des abréviations

L : Longueur

W : Largeur

S₁₁ : Coefficient de réflexion

2D et 3D : Deux et trois dimensions

Γ : Coefficient de réflexion

VSWR: Voltage Standing Wave Ratio

Pray : La puissance rayonnée

U_i : L'intensité de rayonnement d'une source isotrope.

ϵ_r : Permittivité relative

H : L'épaisseur

f_r : fréquence de résonance

λ : Longueur d'onde

U (θ, ϕ) : Intensité de rayonnement de l'antenne.

G (θ, ϕ) : Gain

D (θ, ϕ) : Directivité

Pray : Puissance rayonnée

η_{ray} : Rendement de rayonnement

BP : Bande passante

Q : Facteur de qualité

CST: Computer Simulation Technology

Z₀ : Impédance caractéristique de la ligne

Z_{in} : Impédance d'entrée de l'antenne

ϵ_{eff} : permittivité diélectrique effective du substrat

L_{eff} : Longueur effective du patch

dB : décibel

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

L'élément essentiel qui joue un rôle crucial dans les systèmes de communications spatiales est généralement l'antenne. Pour arriver à une communication fiable et performante dans les applications spatiales, des concepteurs ont créé des dispositifs d'antennes imprimées de types fractales, ces dispositifs sont devenus indispensables dans le domaine des télécommunications grâce à leur faible poids, volume, coûts et simplicité de fabrication.

Notre projet de fin d'études vise à contribuer à l'étude et à la conception des antennes fractales à gain élevé en utilisant des réseaux d'antennes à la fréquence de résonance 6 GHz qui correspond à la bande C [4-8] GHz des systèmes satellitaires. Plusieurs études paramétriques ont été menées afin d'optimiser les performances des réseaux d'antennes proposées en termes d'adaptation, de gain et de bande passante.

Ce mémoire est organisé en trois chapitres distincts :

Dans le premier chapitre, nous aborderons le concept des antennes imprimées ainsi que les différentes formes les plus utilisées dans la littérature, comme les antennes patch de formes rectangulaire et circulaire. Par la suite, nous présentons les techniques d'alimentation et les caractéristiques radioélectriques des antennes patch qui sert à examiner les performances de ces dernières en termes d'adaptation, d'impédance d'entrée, de gain, de directivité et de diagramme de rayonnement. De même, les avantages, les inconvénients et les domaines d'applications de ces structures ont été exposés pour montrer l'intérêt de l'utilisation des antennes patch dans des différentes applications. Cette partie est consacrée aussi aux réseaux d'antennes qui restent une technique prometteuse pour les chercheurs afin d'augmenter le gain de l'antenne.

Pour le deuxième chapitre, et dans notre étude, nous nous concentrons sur les bénéfices distincts liés à l'utilisation des antennes fractales. Tout d'abord, l'emploi des fractales permet de réduire l'encombrement des antennes patch qui peuvent être intégrées dans les dispositifs électroniques de petites tailles. Ensuite, en utilisant des géométries fractales, il est possible d'améliorer les performances des antennes électriquement petites, qui sont souvent difficiles à ajuster à la fréquence de résonance. Nous allons faire une étude détaillée sur les antennes fractales en présentant les différentes formes fractales les plus connues, leurs avantages, leurs inconvénients et les différents domaines d'applications. Nous aborderons finalement les systèmes satellitaires comme des exemples d'applications pour les systèmes antennaires de types fractals.

INTRODUCTION GENERALE

Le troisième chapitre se focalise sur la simulation et la réalisation d'antennes imprimées de formes fractales. Dans un premier temps, nous allons concevoir une structure fractale de type Minkowsk à la deuxième itération à la fréquence de résonance 6 GHz pour la bande C satellitaire. Afin d'augmenter le gain de cette structure, nous allons réaliser des réseaux d'antennes fractales à deux, quatre et huit éléments simulés par le logiciel de simulation CST MICROWAVE STUDIO. Une autre technique d'augmentation du gain de l'antenne a été employée qui est la technique DGS (Detected Ground Surface) en insérant des fentes sur le plan de masse du réseau d'antennes à quatre éléments afin de garder une taille réduite de réseau d'antennes proposé par rapport au réseau d'antennes à huit éléments avec un gain acceptable pour les applications spatiales dans les ondes centimétriques.

Finalement, nous allons conclure notre travail en présentant une conclusion générale et les perspectives.

Chapitre I : Notion de base sur les antennes imprimées et les réseaux d'antennes

Chapitre I : Notion de base sur les antennes imprimées et les réseaux d'antennes

I.1 Introduction

Dans les systèmes de communications sans fils, les systèmes radars et les systèmes satellitaires, les antennes imprimées sont largement utilisées à cause de leur coût de fabrication faible, sa compatibilité avec les circuits intégrés, sa taille réduite, son poids léger et ses performances radioélectriques intéressantes [I.1], [I.2].

Les technologies actuelles en microondes sont très intéressées par le développement de l'antenne patch, et l'amélioration de ses performances radioélectriques dans plusieurs cas d'application. De plus, le caractère en miniature de l'antenne imprimée avec un gain élevé et une large bande passante offre la possibilité de l'intégrer facilement dans les systèmes de communications spéciales [I.3].

Dans le premier chapitre, nous allons présenter en détail des généralités sur les antennes patch et ses différentes caractéristiques principales. Par suite, nous allons exposer les diverses méthodes d'alimentation des antennes imprimées avec contacts et sans contacts, leurs domaines d'applications, ses avantages et ses inconvénients.

I.2 Définition

L'antenne patch (ou imprimée) est un dispositif qui produit une onde électromagnétique en émission et inversement en réception c-à-d capte une onde électromagnétique et produit un signal électrique afin de garantir la transmission de l'information et adapte correctement l'équipement radioélectrique au milieu de propagation [I.4], [I.5].

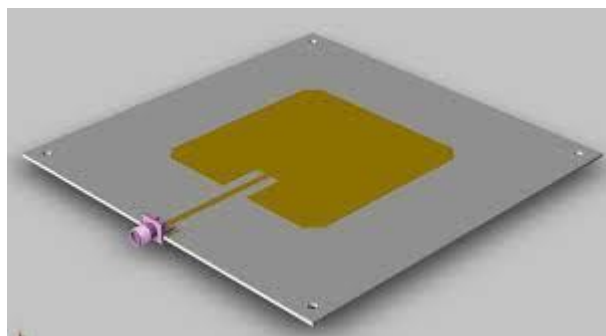


Figure I.1: Antenne patch

Chapitre I : Notion de base sur les antennes imprimées et les réseaux d'antennes

I.3. Description

L'antenne imprimée est constituée d'un substrat diélectrique formé d'un matériau diélectrique de permittivité relative ϵ_r , d'un plan de masse placé au-dessous du substrat et d'une plaque métallique déposée sur la face supérieure du substrat comme le montre la figure I.2 [I.6], [I.7].

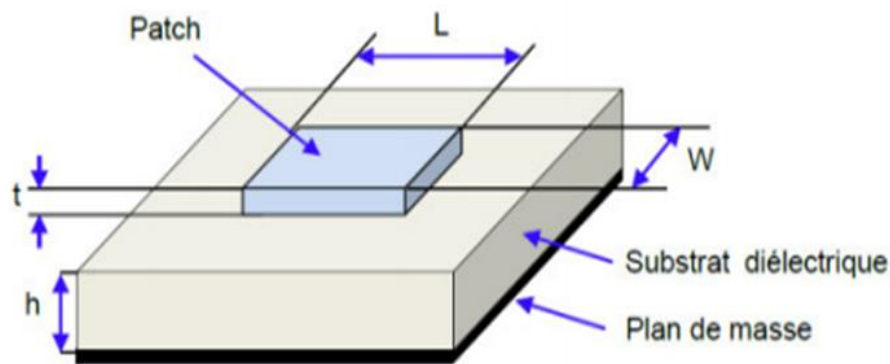


Figure I.2: Géométrie d'une antenne micro-ruban [I.8].

- **Plan de masse** : est la surface conductrice (cuivre) recouvrant la partie inférieure du substrat. Cela fait briller la partie supérieure [I.9].
- **Substrat** : améliore la bande passante, augmente la puissance rayonnée et réduit les pertes par effet joule de l'antenne [I.10].
- **Élément rayonnant** : généralement constitué de matériaux conducteurs tels que l'argent, le cuivre, l'or, etc. La forme de ce dernier peut varier, et son choix dépendra du type d'application recherché et des paramètres qu'on cherche à optimiser (bande passante, puissance rayonnement, gain, etc.) [I.6], [I.11].

I.4 Formes de l'antenne patch

Dans les antennes patch on trouve pratiquement plusieurs formes de l'élément rayonnant qui vont influencer sur la nature du rayonnement de l'antenne, alors on trouve

Chapitre I : Notion de base sur les antennes imprimées et les réseaux d'antennes

l'élément rayonnant de la forme d'un rectangle, d'un disque circulaire, d'une forme triangulaire ou même sous forme d'un losange.

Les antennes patch rectangulaires sont faciles à fabriquer et offrent une bonne directivité et les antennes patch circulaires sont souvent utilisées pour les applications de communications par satellite en raison de leur capacité à maintenir la polarisation circulaire. Par contre, les antennes patch triangulaires sans mois courantes mais elles peuvent offrir de meilleures performances dans certaines situations. Enfin, les antennes patch de forme de losange peuvent être utilisées pour les applications spécifiques nécessitant une directivité particulière [I.12].

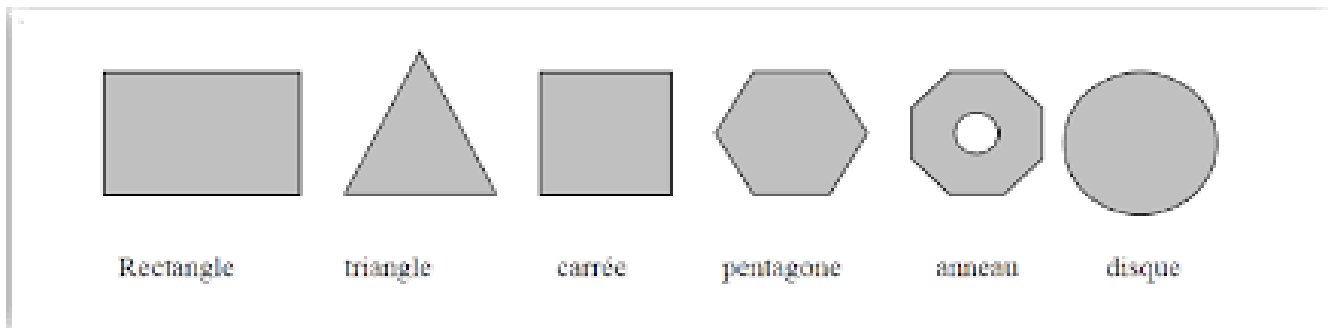


Figure I.3: Formes d'une antenne patch

I.4.1. Antenne patch rectangulaire

Le patch rectangulaire est la configuration la plus courante. L'analyse est très simple à l'aide de modèles de la ligne de transmission et de la cavité, qui sont les plus précis pour les substrats minces [I.2].

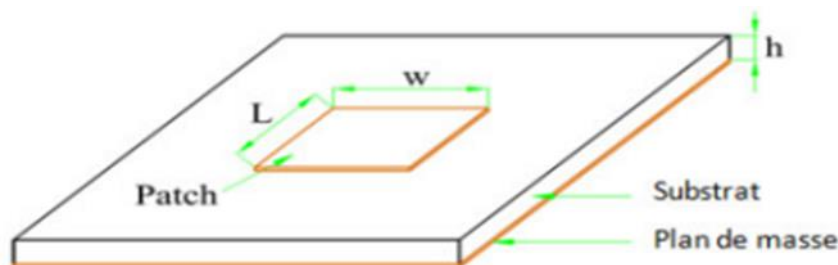


Figure I.4: Antenne patch micro ruban rectangulaire [I.8].

Chapitre I : Notion de base sur les antennes imprimées et les réseaux d'antennes

Dans le tableau I.1, nous donnons les équations théoriques pour calculer les paramètres géométriques d'une antenne patch rectangulaire [I.8], [I.13].

Paramètres de l'antenne patch rectangulaire		Equations
La largeur		$w = \frac{c}{2f_r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}}$
Fréquence de résonance		$f_r = \frac{c}{2L_{eff} \sqrt{\epsilon_{eff}}}$
Constant diélectrique (ϵ_{eff})		Pour $w/h > 1$: $\epsilon_{reff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[1 + 12 \frac{h}{w} \right]^{-\frac{1}{2}}$
La longueur		$L = L_{eff} - 2\Delta L$
L'extension de la longueur (ΔL)		$\frac{\Delta L}{h} = 0,412 \frac{(\epsilon_{eff} + 0,3) \left(\frac{w}{h} + 0,264 \right)}{(\epsilon_{eff} - 0,258) \left(\frac{w}{h} + 0,8 \right)}$
Substrat et plan de masse	La longueur	$L_g = L_a + L + 6 \times h$
	La largeur	$w_g = w + 6 \times h$

Chapitre I : Notion de base sur les antennes imprimées et les réseaux d'antennes

La longueur de la ligne d'alimentation	Simple	$L_a = \frac{\lambda}{2} = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_{eff}}}$
	Quart d'onde	$L_a = \frac{\lambda}{4} = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_{eff}}}$
L'impédance caractéristique de la ligne microruban		$Z_c = \begin{cases} \frac{60}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \ln \left[\frac{8h}{w_0} + \frac{w_0}{4h} \right], & \frac{w_2}{h} \leq 1 \\ \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon_{eff}} \left[\frac{w_0}{h} + 1,393 + 0,667 \ln \left(\frac{w_0}{h} + 1,444 \right) \right]}, & \frac{w_2}{h} \geq 1 \end{cases}$

Tableau I.1 : Equations de l'antenne patch rectangulaire

Avec :

L_{eff} : longueur effective du patch.

L : longueur du patch.

W : la largeur du patch.

$\epsilon_{r\,eff}$: permittivité effective.

ϵ_r : permittivité relative.

h : épaisseur du substrat.

I.4.2. Antenne patch circulaire

Sur la figure I.5, on représente une antenne patch micro ruban circulaire.

Chapitre I : Notion de base sur les antennes imprimées et les réseaux d'antennes

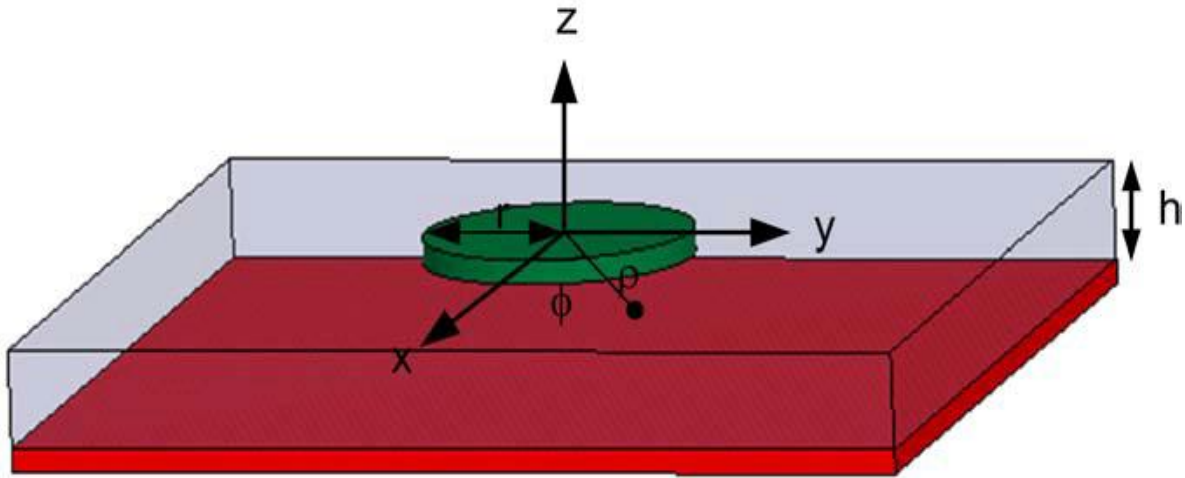


Figure I.5: Antenne patch micro ruban circulaire.

Dans le tableau suivant, nous donnons les équations pour une antenne patch circulaire [I.8].

Constant diélectrique (ϵ_{eff})		$\epsilon_{reff} = \frac{\epsilon_r - 1}{2} \frac{\epsilon_r + 1}{2} \left[1 + 12 \frac{h}{w} \right]^{-\frac{1}{2}}$
La longueur		$L = L_{eff} - 2\Delta L$
L'extension de la longueur (ΔL)		$\frac{\Delta L}{h} = 0,412 \frac{(\epsilon_{eff} + 0,3) \left(\frac{w}{h} + 0,264 \right)}{(\epsilon_{eff} - 0,258) \left(\frac{w}{h} + 0,8 \right)}$
Substrat et plan de masse	La longueur	$L_{gs} = L_{1s} + 2a + 6 \times h$
	La largeur	$w_{gs} = 2a + 6 \times h$
La longueur de la ligne d'alimentation	Simple	$L_{1s} = \frac{\lambda}{2} = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_{eff}}}$
	quart d'onde	$L_1 = \frac{\lambda}{4} = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_{eff}}}$

Chapitre I : Notion de base sur les antennes imprimées et les réseaux d'antennes

L'impédance caractéristique de la ligne microruban	$Z_c = \begin{cases} \frac{60}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \ln \left[\frac{8h}{w_2} + \frac{w_2}{4h} \right] \frac{w_2}{h} \leq 1 \\ \frac{120}{\sqrt{\epsilon_{eff}} \left[\frac{w_2}{h} + 1,393 + 0,667 \ln \frac{w_2}{h} + 1,44 \right]} \frac{w_2}{h} \geq 1 \end{cases}$
--	--

Tableau I.2: Equations de l'antenne patch circulaire [I.8].

Avec :

L_{eff} : longueur effective du patch.

L : longueur du patch.

W : La largeur du patch.

$\epsilon_{r\,eff}$: permittivité effective.

ϵ_r : permittivité relative.

H : épaisseur du substrat.

I.5. Techniques d'alimentation

Les antennes patch peuvent être alimentées par une variété de techniques d'alimentations, divisées en deux catégories : avec contact (micro ruban, câble coaxial) et sans contact (alimentation via espace ou couplage de proximité) [I.14].

I.5.1. Alimentation par une ligne micro ruban

Dans ce type d'alimentation, une ligne micro ruban (généralement d'une impédance de $50 \, \Omega$) est connectée directement à l'élément rayonnant. L'avantage de ce mode d'alimentation est qu'elle est gravée sur le même substrat. Cette technologie est plus simple à mettre en œuvre et moins cher [I.14], [I.15]

Chapitre I : Notion de base sur les antennes imprimées et les réseaux d'antennes

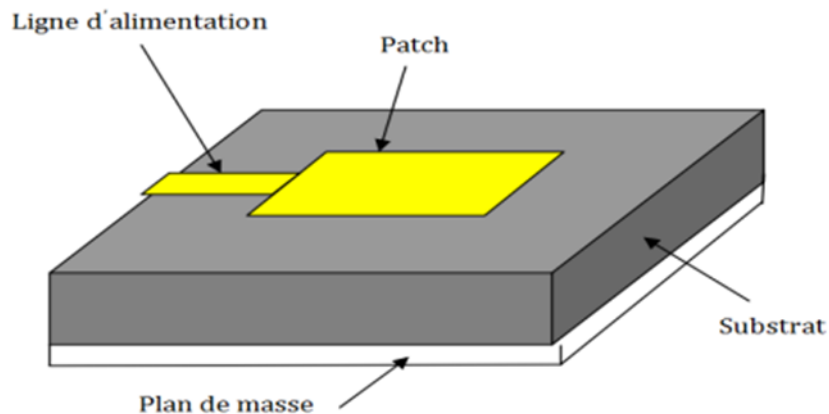


Figure I.6: Alimentation par ligne micro ruban [I.16], [I.17].

I.5.2. Alimentation par sonde coaxiale

L'alimentation par sonde coaxiale est générée par contact direct entre l'élément rayonnant et le câble coaxiale, pour ce faire, percez un trou dans le plan de masse et le diélectrique pour faire passer le conducteur central qui est soudé à l'élément rayonnant et le conducteur extérieur du câble est soudé au plan de masse. Cette technique permet une meilleure adaptation dans le cas de substrats minces. Par contre dans le cas de substrat épais, la réactance inductive apportée par la sonde supplémentaire va affecter la bande passante de son rayonnement [I.18].

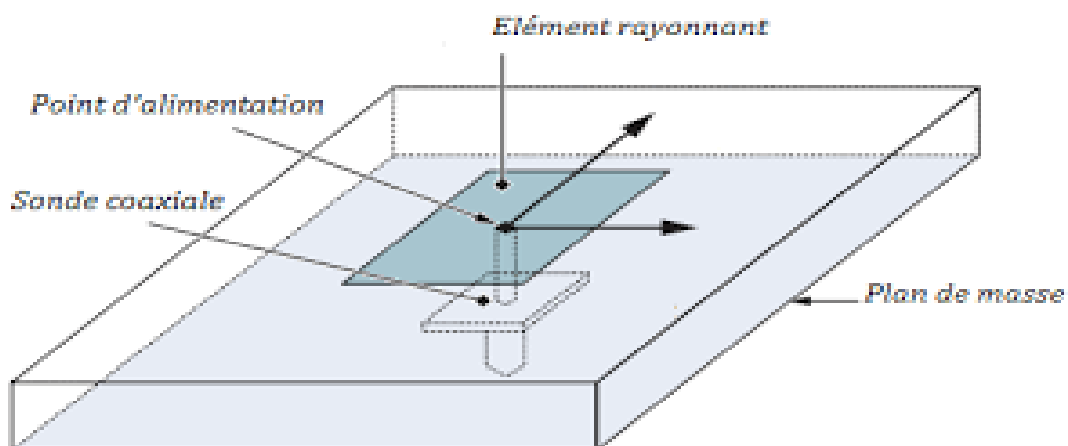


Figure I.7: Alimentation par sonde coaxiale.

Chapitre I : Notion de base sur les antennes imprimées et les réseaux d'antennes

I.5.3. Alimentation par fente (par couplage électromagnétique)

Le transfert de puissance de la ligne à l'élément rayonnant s'effectue par couplage magnétique de la ligne à travers la fente. Ce type d'alimentation est appelé alimentation à fente et en réalité l'hémisphère supérieur du patch n'a plus de rayonnement parasites, contrairement au rayonnement arrière, cette technique nécessite un positionnement très précis ce qui n'est pas toujours facile à obtenir, notamment dans le cas de petite structure [I.18].

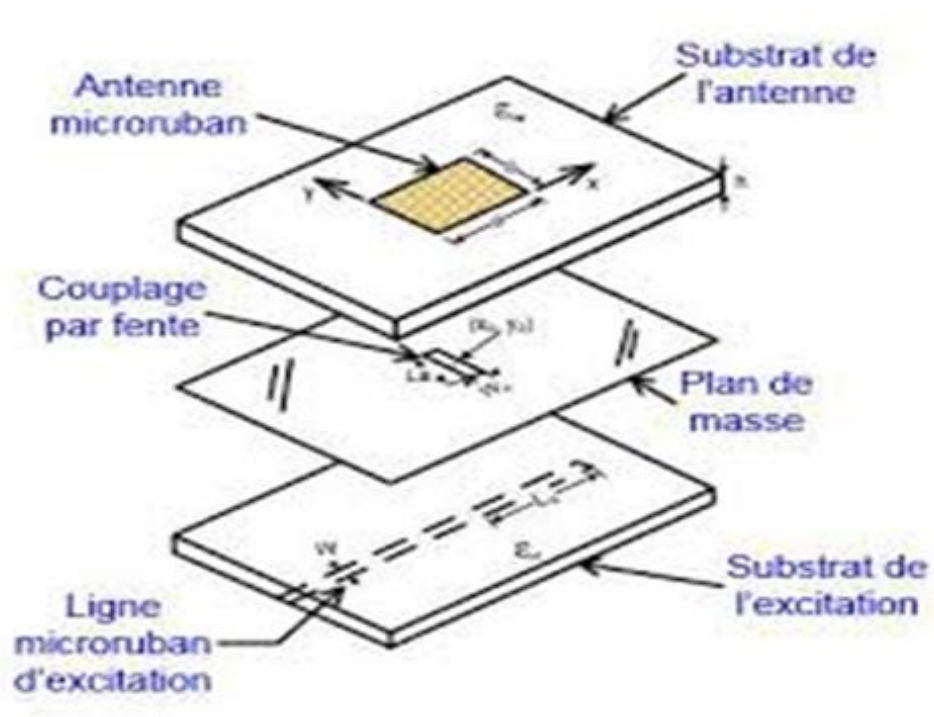


Figure I.8: Alimentation par fente (par couplage électromagnétique).

I.5.4. Alimentation par couplage de proximité

Dans ce cas, la ligne d'alimentation est positionnée entre le patch et le plan de masse et placée entre deux substrats diélectriques. Le substrat inférieur est assez fin et présente une constante diélectrique élevée, et le substrat supérieur est plus épais et présente une constante diélectrique faible. Cela réduit considérablement le rayonnement de la ligne [I.18].

Chapitre I : Notion de base sur les antennes imprimées et les réseaux d'antennes

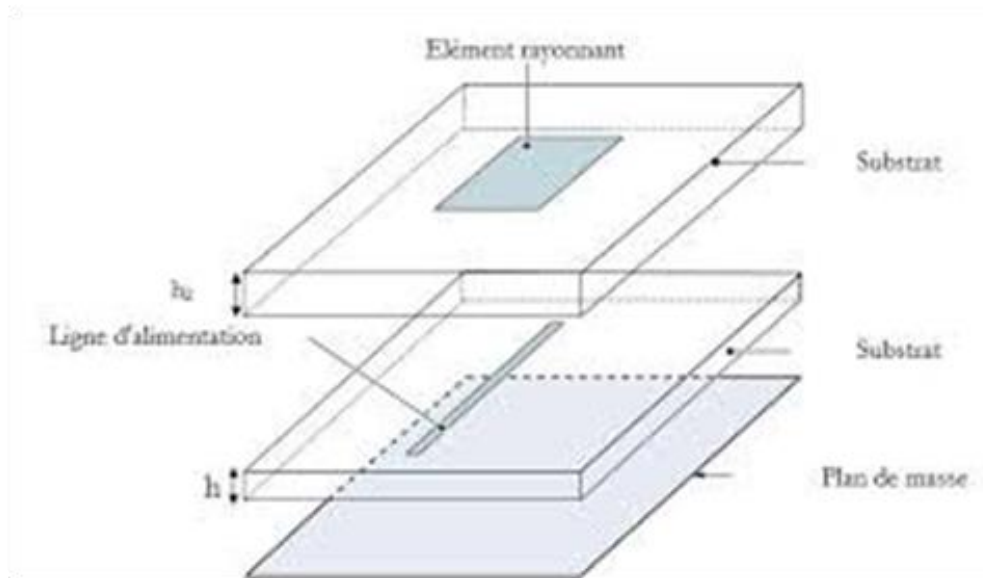


Figure I.9: Alimentation par couplage de proximité.

I.6. Techniques adaptation

Dans la construction de circuits hyperfréquences on cherche souvent de les adapter, c'est-à-dire : transformer l'impédance d'entrée à une impédance différente de celle obtenue à l'extrémité du circuit (généralement l'impédance caractéristique). Plusieurs techniques d'adaptation existent, les plus couramment utilisées sont les suivantes :

I.6.1. Adaptation par ligne quart d'onde

Pour améliorer les performances de l'antenne en termes d'adaptation, nous utilisons un transformateur quart d'onde, il suffit de placer le transformateur entre la ligne micro ruban et l'extrémité du patch comme indiqué sur la figure I.10 [I.19] :

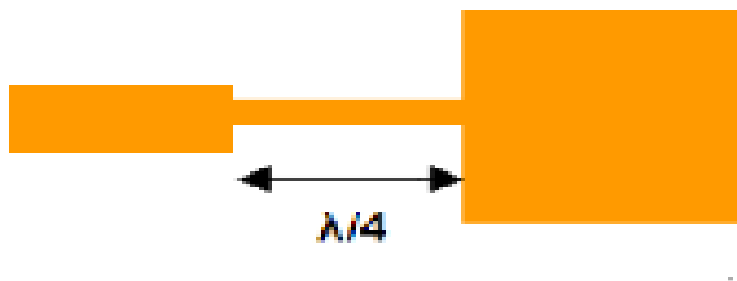


Figure I.10: Adaptation par une ligne quart d'onde.

Chapitre I : Notion de base sur les antennes imprimées et les réseaux d'antennes

I.6.2. Adaptation avec encoches

L'adaptation avec des encoches est une technique permettant d'obtenir une bonne adaptation en modifiant la géométrie de l'antenne au point de la liaison entre l'élément rayonnant et la ligne d'alimentation [I.20].

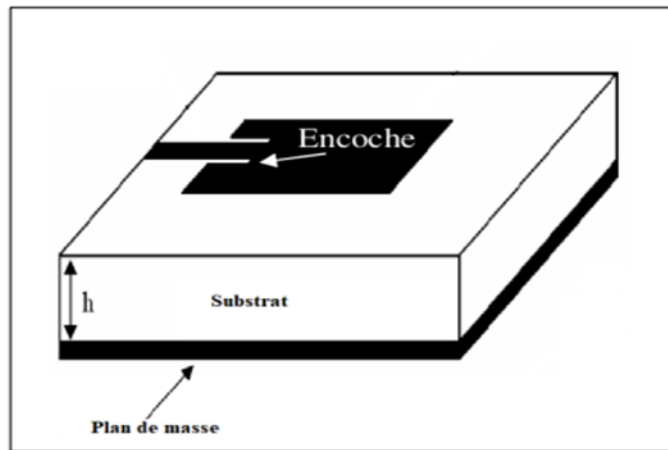


Figure I.11: Adaptation avec encoches [I.20].

I.7. Caractéristiques radioélectriques de l'antenne

I.7.1. Impédance d'entrée

L'impédance d'entrée Z_e est une fonction complexe qui dépend de la fréquence vue depuis la ligne d'alimentation à l'entrée de l'antenne. L'expression de cette impédance est donnée par l'équation suivante [I.16], [I.21] :

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

Avec :

Z_c : Impédance caractéristique de la ligne d'alimentation.

S_{11} : Coefficient de réflexion à l'entrée de l'antenne.

I.7.2. Coefficient de réflexion

Le coefficient de réflexion en tension S_{11} , à l'entrée de l'antenne, est donné par la formule (I.2). C'est le rapport entre la puissance réfléchie et la puissance transmise, et sa

Chapitre I : Notion de base sur les antennes imprimées et les réseaux d'antennes

valeur varie entre 0 (aucune réflexion) et 1 (réflexion totale). Il est exprimé par la formule (I.3) suivante :

$$S_{11} = \frac{Z_e - Z_c}{Z_e + Z_c} \quad (I.2)$$

$$S_{11} = \frac{P_r}{P_e} \quad (I.3)$$

Le paramètre S11 est exprimé en décibels, indiquant la transmission énergétique de l'antenne. La valeur de ce paramètre change en fonction de la fréquence. Pour assurer une bonne adaptation dans la bande de fréquence requise, nous imposons le critère suivant : $S_{11} \leq -10$ dB [I.22].

$$S_{11}(dB) = 20 \log_{10}(S_{11}) \quad (I.4)$$

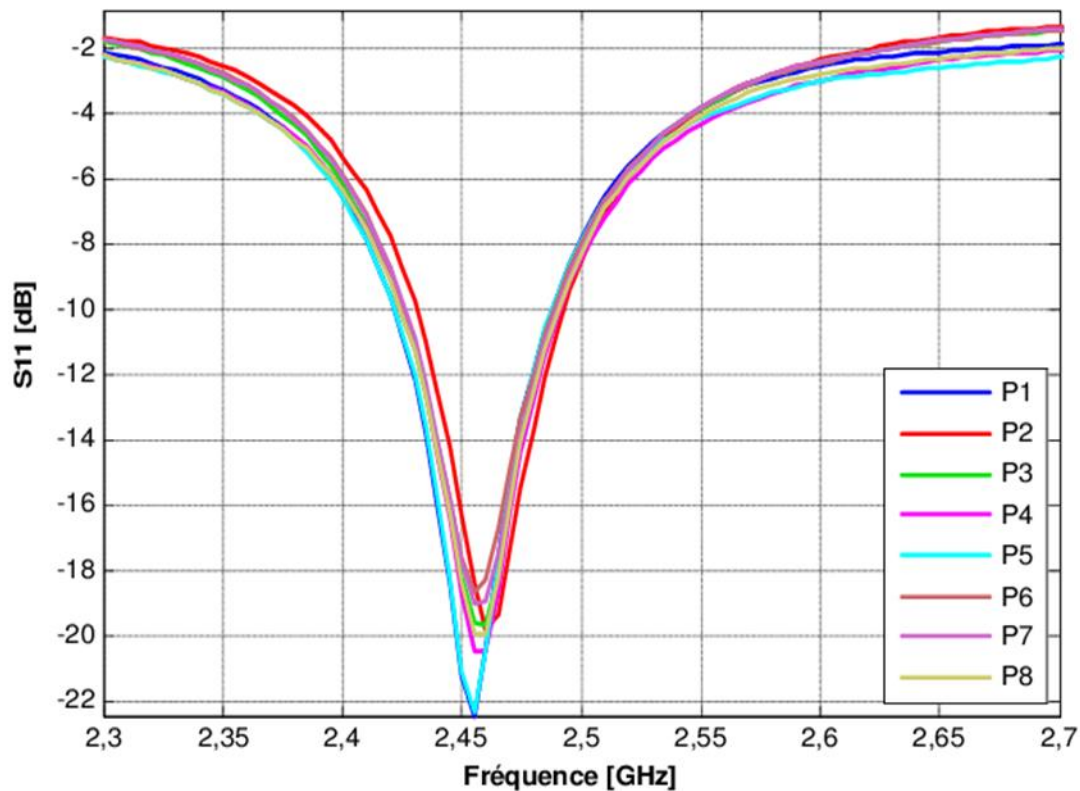


Figure I.12: Exemple de coefficient de réflexion

Chapitre I : Notion de base sur les antennes imprimées et les réseaux d'antennes

I.7.3. Bande passante

On définit la plage de fréquence sur laquelle le coefficient de réflexion est inférieur à -10 dB. Elle correspond à la gamme de fréquence où le transfert d'énergie de l'alimentation vers l'antenne ou de l'antenne vers le récepteur est maximale [I.8], [I.23], [I.24].

$$BP = f_{max} - f_{min} \quad (I.5)$$

Pour les antennes à bande passante étroite, la bande passante est généralement exprimée par rapport à la fréquence centrale par l'équation (I.6) [I.25], [I.26] :

$$BP (\%) = \left[\frac{f_{max} - f_{min}}{f_{res}} \right] \cdot 100 \quad (I.6)$$

Où :

f_{max} : la fréquence maximale.

f_{min} : la fréquence minimale.

f_{res} : la fréquence centrale ou de résonance

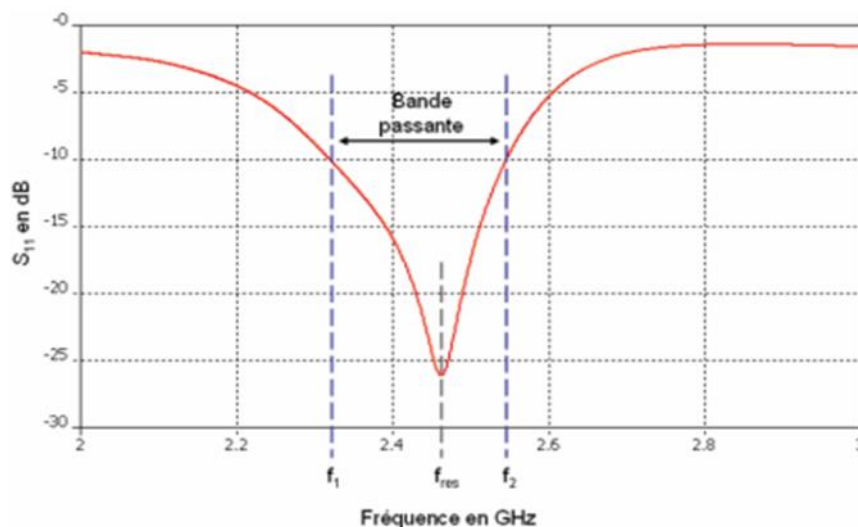


Figure I.13: Illustration de la bande passante à -10 dB d'une antenne [I.8].

Chapitre I : Notion de base sur les antennes imprimées et les réseaux d'antennes

I.7.4. VSWR

S'exprime aussi par le rapport entre les valeurs max et min de l'amplitude de l'onde stationnaire comme suite (équation I.8) , [I.27].

$$ROS = \frac{1+|S_{11}|}{1-|S_{11}|} \quad (I.7)$$

$$ROS = \frac{V_{max}}{V_{min}} \quad (I.8)$$

I.7.5. Gain

Le gain d'une antenne est le rapport entre la densité de puissance d'une antenne dans une direction particulière et la densité de puissance rayonnée par une antenne isotrope P_{ri} (sans perte).

$$G(\theta, \Phi) = \frac{P(\theta, \Phi)}{P_{ri}} \quad (I.9)$$

La puissance d'une antenne isotrope sans perte est égale à sa densité de puissance rayonnée divisée par un angle solide de 4π , il est donné par l'équation suivante : [I.6].

$$G(\theta, \Phi) = 4 * \pi \frac{P(\theta, \Phi)}{P_a} \quad (I.10)$$

Avec :

G : Le gain de l'antenne.

$P(\theta, \Phi)$: La densité de puissance rayonnée dans une direction donnée.

P_{ri} : La densité de puissance rayonnée d'une antenne isotrope.

P_a : Puissance électrique en entrée (puissance d'alimentation).

θ : Angle d'azimut.

Φ : Angle d'élévation.

Chapitre I : Notion de base sur les antennes imprimées et les réseaux d'antennes

Une antenne à faible gain rayonne une puissance identique dans toutes les directions.

$$G = \eta D \quad (\text{I.11})$$

Où, η est le rendement de l'antenne.

D : directivité de l'antenne.

I.7.6. Directivité

Une antenne de directivité est exprimée en dBi (décibels par rapport à l'antenne isotrope). C'est le rapport entre la puissance rayonnée dans la direction (θ, Φ) et la puissance que rayonnerait la source isotrope de référence par unité d'angle pour une même puissance totale rayonnée [I.28].

$$D(\theta, \varphi) = 4 * \pi \frac{P(\theta, \Phi)}{P_r} \quad (\text{I.12})$$

Avec :

$P(\theta, \varphi)$: puissance rayonnée dans la direction (θ, Φ) .

P_r : puissance totale rayonnée.

I.7.7. Rendement

Le rendement d'une antenne est le rapport entre la puissance rayonnée et la puissance d'alimentation de l'antenne. Il est donné par la relation (I.13) [I.29] [I.30] :

$$\eta = \frac{P_r}{P_a} = \frac{\text{puissance totale rayonné}}{\text{puissance d'alimentation}} \quad (\text{I.13})$$

Il est exprimé aussi par la relation suivante [I.31] :

$$\eta = \frac{\text{Gain}}{\text{Directivité}} \quad (\text{I.14})$$

Si le rendement de l'antenne est égal à 100% ($\eta = 1$), la directivité sera égale au gain de l'antenne [I.32].

Chapitre I : Notion de base sur les antennes imprimées et les réseaux d'antennes

I.7.8. Diagramme de rayonnement

Il existe trois types des diagrammes de rayonnement possibles [I.33] :

- **Le diagramme isotrope** : si le diagramme de rayonnement de l'antenne est une sphère. En pratique, il n'existe pas une antenne isotrope idéale.
- **Les diagrammes omnidirectionnels** : dans les diagrammes omnidirectionnels, le rayonnement se produit de manière isotrope mais uniquement dans un seul plan de l'espace. Généralement, l'antenne rayonne avec moins d'énergie dans certaines directions et dans d'autres directions, il ne rayonne pas. Ces directions sont considérées comme aveugles.
- **Les diagrammes dits directifs** : le lobe principal comporte la majorité de la puissance rayonnée, tandis que le reste est dispersée dans plusieurs lobes.

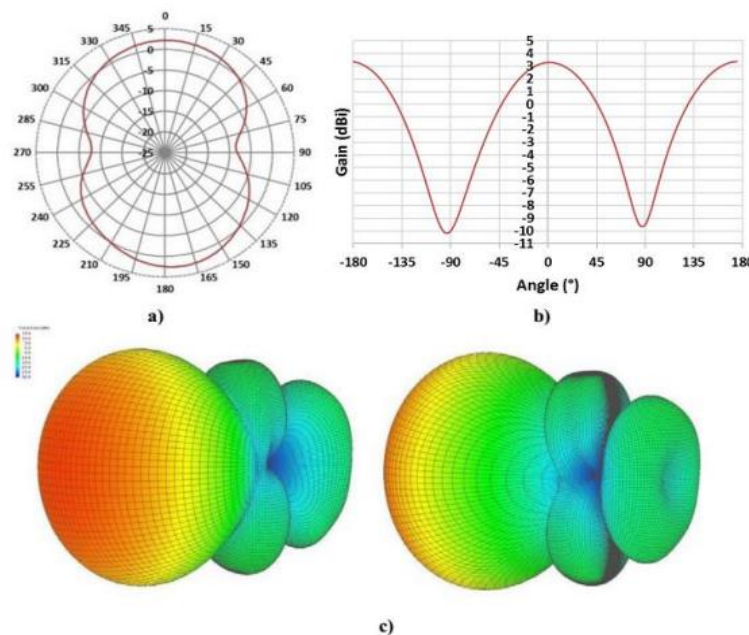


Figure I.14: Diagrammes de rayonnement d'une antenne

a) en 2D (polaire) b) en 2D (cartésien) c) en 3D.

I.7.9. Polarisation

L'état de polarisation des ondes rayonnées par l'antenne peut être [I.8] :

Chapitre I : Notion de base sur les antennes imprimées et les réseaux d'antennes

I.7.9.1. Polarisation linéaire (rectiligne)

Lors de la propagation, le champ E est toujours parallèle à une direction. Il est contenu dans un plan contenant la direction de propagation, appelé plan de polarisation. Elle peut être produite par une combinaison d'ondes polarisées linéairement et d'ondes en phase (ou antiphase) [I.8], [I.34].

I.7.9.2. Polarisation circulaire

Une polarisation est dite circulaire si l'extrémité du vecteur champ électrique en un point de l'espace décrit un cercle au fur et à mesure que l'onde se propage [I.8], [I.34].

I.7.9.3. Polarisation elliptique

Il s'agit d'un cas général et peut être produit par toute autre combinaison d'ondes. Les extrémités du vecteur E décrivent alors une ellipse dans un plan perpendiculaire à la direction de propagation [I.8], [I.34].

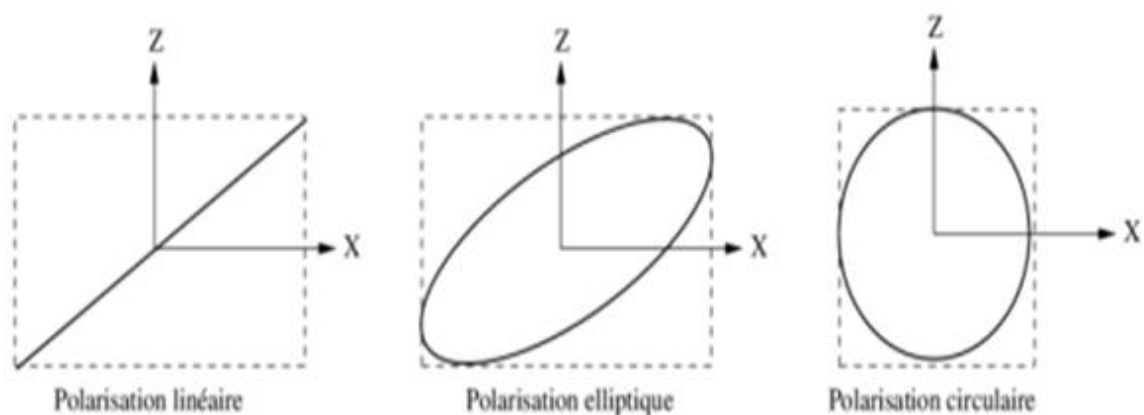


Figure I.15: Types de polarisation [I.8].

I.8. Avantages et Inconvénients des antennes patch

I.8.1. Avantages [I.35] [I.36] [I.37] [I.33]

- Faible coût et poids.
- Facilité de fabrication.
- Adaptable aux surfaces planes et non planes.

Chapitre I : Notion de base sur les antennes imprimées et les réseaux d'antennes

- Possibilité d'être intégré dans des appareils électroniques transportables.
- Simple robustes et non encombrantes.
- Possibilité d'émettre à deux ou trois fréquences.

I.8.1. Inconvénients [I.35] [I.36] [I.37] [I.33]

- L'efficacité de rayonnement est faible.
- Pureté de polarisation est faible et le facteur de qualité Q est très élevé.
- Bande passante étroite et faible gain.

I.9. Domaine d'application des antenne patch

Les applications principales sont [I.35] [I.33]

- Les télécommunications satellitaires.
- La téléphonie mobile.
- Les radars.
- Domaine militaire tel que : guidage des missiles, la télésurveillance et télédétection.
- Domaine médical tel que : Problèmes cardiaques et maladies chroniques.
- Radio diffusion FM et télévision.

I.10. Réseaux d'antennes imprimées [I.38]

Un réseau d'antennes est un groupe d'antennes espacées d'une certaine distance (d) nommée 'pas de réseau' et alimenté de manière synchrone par un dispositif d'excitation comme les diviseurs de puissance [I.39].

I.10.1. Type de réseaux d'antennes imprimées

Pour produire un réseau d'antennes performant nous prenons en compte plusieurs facteurs tels que : taille maximale de l'antenne, distance entre deux éléments rayonnants, nombre d'éléments rayonnants et les différentes configurations géométriques des antennes réseau [I.40] :

Chapitre I : Notion de base sur les antennes imprimées et les réseaux d'antennes

I.10.1.1. Réseau planaire

Les réseaux planaires sont des généralisations aux plans des réseaux linéaires qui peuvent adapter des formes de grille rectangulaires, triangulaires ou circulaires, comme le montre la figure I.16 [I.41].

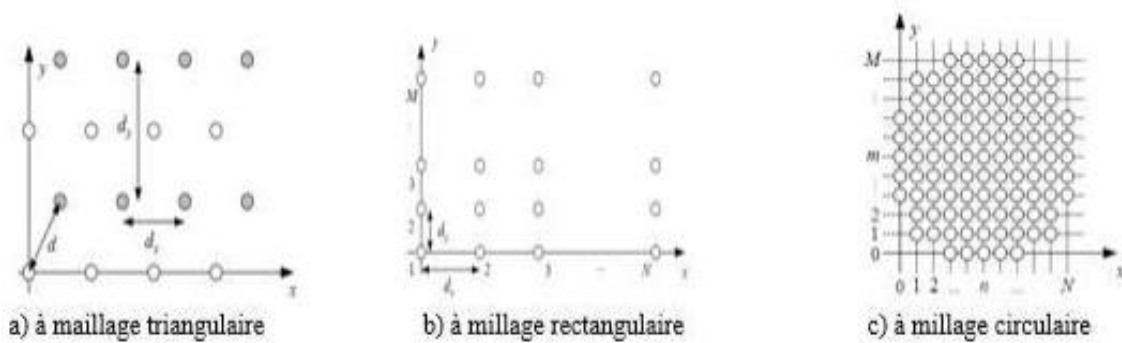


Figure I.16: Géométrie d'un réseau planaire [I.38].

I.10.1.2 Réseau circulaire

Les éléments rayonnants dans ces réseaux sont répartis autour d'un cerclé de rayon 'a' comme le montre la figure I.17 [I.41].

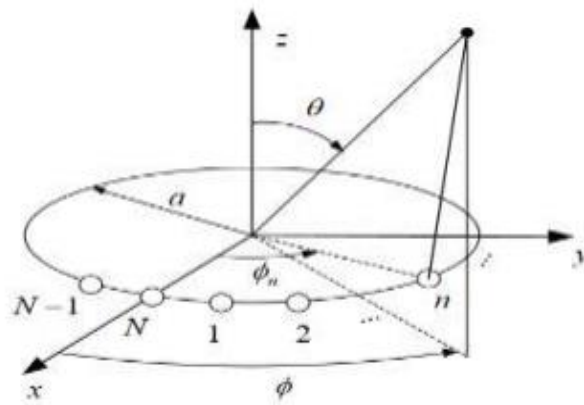


Figure I.17: Géométrie d'un réseau circulaire [I.38].

Chapitre I : Notion de base sur les antennes imprimées et les réseaux d'antennes

I.10.1.3. Réseau cylindrique

Un réseau cylindrique est un ensemble de plusieurs réseaux circulaires le long d'un axe (X, Y ou Z) comme le montre la figure I.18 [I.42].

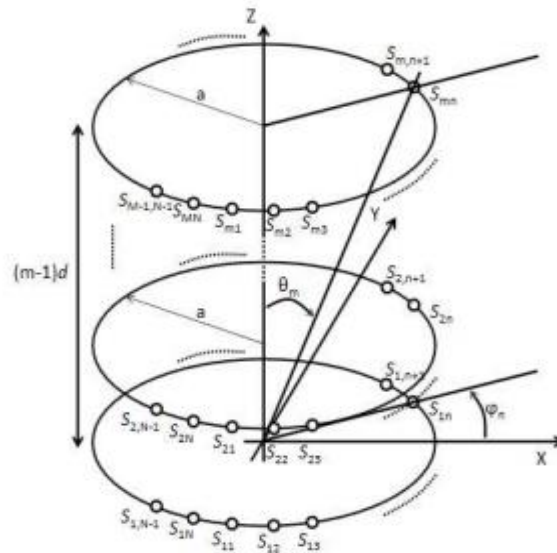


Figure I.18: Géométrie d'un réseau cylindrique de M anneaux de rayon a espacés d'une distance d suivant l'axe z et composés de N éléments [I.38].

I.10.1.4. Réseau conique

Il s'agit d'une généralisation des réseaux circulaires avec des anneaux de (N) éléments ayant des rayons différents séparés par la même distance 'd'. Ils ont presque les propriétés des réseaux cylindriques. La géométrie d'un réseau conique est montrée par la figure I.19 [I.42].

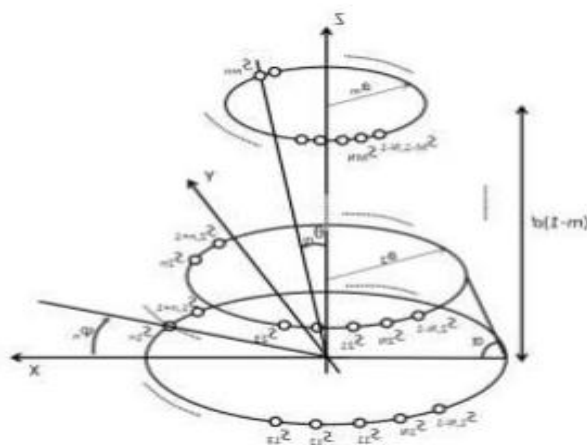


Figure I.19: Géométrie d'un réseau conique de M anneaux espacés d'une distance de composés de N éléments [I.38].

Chapitre I : Notion de base sur les antennes imprimées et les réseaux d'antennes

I.10.2. Technique d'alimentation du réseaux d'antennes

Il existe deux types d'alimentation pour distribuer la puissance d'entrée au réseau d'antennes. Les deux types d'alimentation les plus courants sont :

I.10.2.1. Alimentation série

Les éléments rayonnants sont disposés linéairement et reliés entre eux par un tronçon de ligne micro-ruban avec un déphaseur à l'entrée de chaque ligne. Ce type d'alimentation est illustré à la figure I.20 [I.43], [I.44].



Figure I.20: Alimentation en série [I.38].

I.10.2.2. Alimentation parallèle

Dans ce type d'alimentation, N éléments rayonnants sont alimentés par $(N-1)$ diviseurs de puissance qui sont répartis équitablement à chaque liaison. Nous avons quelques pertes par rayonnement dues à des discontinuités de la configuration parallèle. Ce type d'alimentation est illustré sur la figure I.21 [I.43], [I.44].

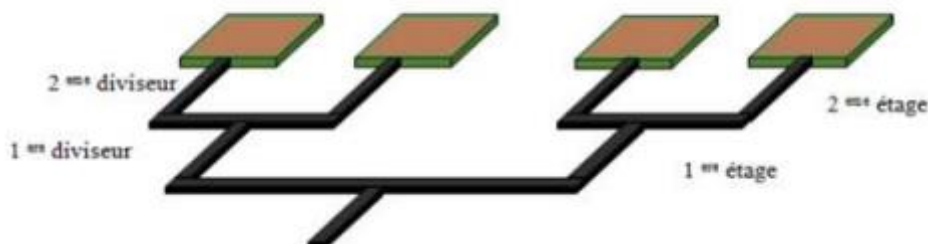


Figure I.21: Alimentation en parallèle [I.38].

I.10.3. Domaines d'applications

Les réseaux d'antennes sont utilisés dans plusieurs domaines d'applications comme [I.39], [I.45] :

Chapitre I : Notion de base sur les antennes imprimées et les réseaux d'antennes

- **Satellite** : télévision, maison ou voiture, réseaux commutés à couverture reconfigurable, système de positionnement radio GPS, Galileo.
- **Aviation** : communication, navigation, altimètre, système d'atterrissage et radar de suivi mono-pulsé ou simultané.
- **Télécommunications** : téléphones mobiles (GSM, DGS, PCS, antennes de station de base).

I.10.4. Avantages des réseaux d'antennes

Les avantages des réseaux d'antennes sont citées ci-dessous [I.46] :

- Directivité plus forte que l'antenne de base.
- Gain élevé par rapport à l'antenne de base.
- La bande passante du réseau d'antennes est supérieure à la bande passante de l'antenne de base.
- Complexité de mise en œuvre.

I.11. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté un état de l'art sur les antennes imprimées. Nous avons exposé par la suite les différentes formes géométriques des antennes patch et les diverses techniques d'alimentation utilisées pour exciter ces types d'antennes. Puis, nous avons intéressé aussi aux caractéristiques radioélectriques de l'antenne imprimée telles que le coefficient de réflexion, la bande passante, le gain, la directivité, la polarisation...etc. Finalement, nous avons cité les inconvénients, les avantages et les domaines d'applications de ces structures.

Le deuxième chapitre sera consacré et dédié entièrement aux antennes fractales et les systèmes satellitaires.

Chapitre II :

Antennes fractales et les systèmes satellitaires

II.1. Introduction

Depuis l'Antiquité, on utilise la géométrie euclidienne pour décrire le monde. Plusieurs objets de la nature tels que les cercles, les carrés, les triangles, les rectangles, les cônes de sphères ou de cubes sont facilement décrits par cette géométrie. Cependant, il est facile de constater qu'il existe dans la nature des formes et des objets que nous pouvons observer. De telle façon, il est impossible de définir ces figures géométriques traditionnelles et dès que nous décrivons des objets extrêmement irréguliers, cette géométrie atteint ses limites. Les scientifiques ont créé de nouveaux modèles afin de chercher à expliquer cette irrégularité de la nature. Cela a conduit à l'apparition d'une nouvelle forme géométrique, connue sous le nom de « géométrie fractale », qui permet de représenter un grand nombre de formes naturelles.

Le fractale trouve son origine dans le mot latin Fractus, qui signifie irrégulier ou brisé [II.47]. Il s'agit des objets infinis qui ont une structure géométrique unique, semblable et répétitive.

Ces fractales sont obtenues de manière itérative, peuvent être déterministes ou aléatoires :

- Déterministe : si les paramètres de la fractale restent inchangés à chaque fois qu'une itération est effectuée.
- Aléatoire : lorsque l'un de ces paramètres évolue de manière aléatoire tout au long de l'opération de génération.

Ceux-ci sont les plus couramment employés et peuvent être utilisés pour décrire de nombreux objets très irréguliers du monde réel (montagnes, lignes des côtes, nuages...) [II.47].

II.2. Définition d'une antenne fractale

Une technique itérative de géométrie mathématique appelée fractale présente des caractéristiques similaires. Les fractales sont utilisées dans différentes structures mathématiques, telles que les triangles de Sierpinsky, les fractales de Von Koch, les fractales de Hilbert et les fractales de Mandelbrot. etc. Mandelbrot a créé le concept de fractal. Les propriétés uniques des fractales peuvent séduire les concepteurs d'antennes, car elles permettent de remplir l'espace et de réduire l'encombrement des antennes. Différentes recherches ont été menées dans le domaine des antennes fractales large bande afin de diminuer la taille des antennes et d'élargir leur portée. La création de l'antenne proposée présenter ci-dessous repose sur la fusion de fractale de Koch et la géométrie hexagonale.

La figure II.1 illustre la méthode récursive utilisée pour générer la géométrie fractale de Koch. Dans cette conception, on applique la géométrie Koch aux bords du monopôle hexagonal ainsi qu'au plan Masse. Dans la conception d'antennes, l'utilisation de la géométrie Koch permet d'obtenir des phénomènes de miniaturisation et de large bande [II.48]

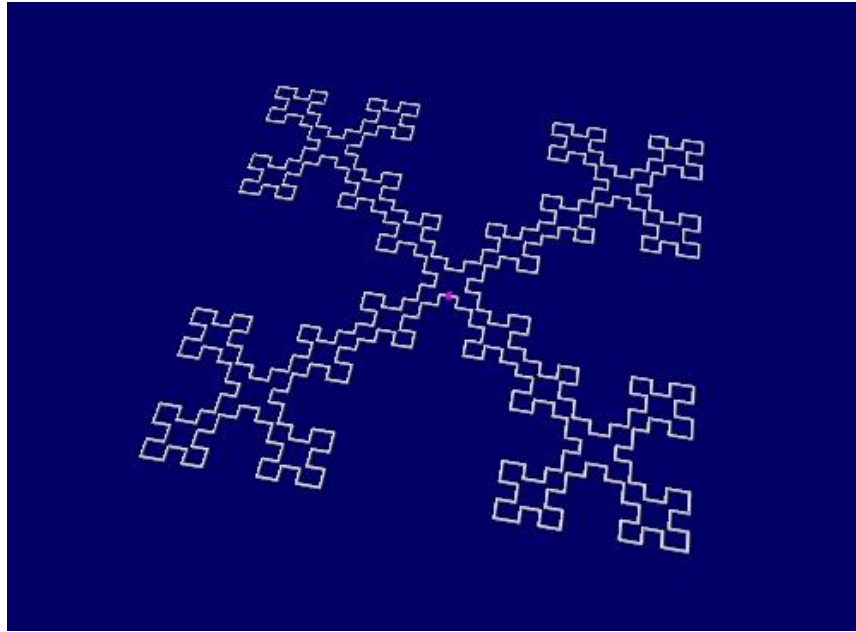


Figure II. 1: Exemple d'antenne fractale.

II.3. Différentes formes fractales [II.49]

II.3.1. Courbe de koch

Il est relativement facile de construire géométriquement la courbe standard de Koch. Il débute par une ligne droite, connue sous le nom d'initiateur. Il est réparti en trois parties égales et le segment central est également remplacé par deux autres de la même longueur.

Le processus est répété pour chaque segment de ces quatre nouveaux segments, et ainsi de suite [II.50] [II.51].

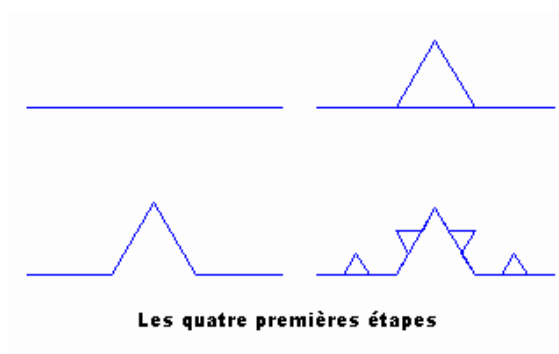


Figure II. 2: Courbe de koch

II.3.2. Triangle de Sierpinsky

La fractale de Sierpinsky est une des formes fractales les plus couramment employées, née en 1915. Elle est nommée en l'honneur du mathématicien polonais Waclaw Sierpinsky qui l'a étudiée. Deux méthodes sont utilisées pour générer le triangle : l'approche de copie multiple, ou la méthode de décomposition. Au début, on débute par un petit triangle. Puis, on fabrique deux autres copies de ce triangle de la même taille et on les colle au triangle original. Il est possible de répéter ce processus n fois, « n » étant l'ordre de l'itération fractale.

La méthode de décomposition débute par un vaste triangle qui entoure la géométrie entière. Les points centraux des côtés sont reliés entre eux. Et un espace vide au centre est formé. Le triangle initial est divisé en trois versions réduites du plus grand triangle grâce à ce processus. On peut effectuer le même processus de division sur chaque copie [II.50] [II.52].

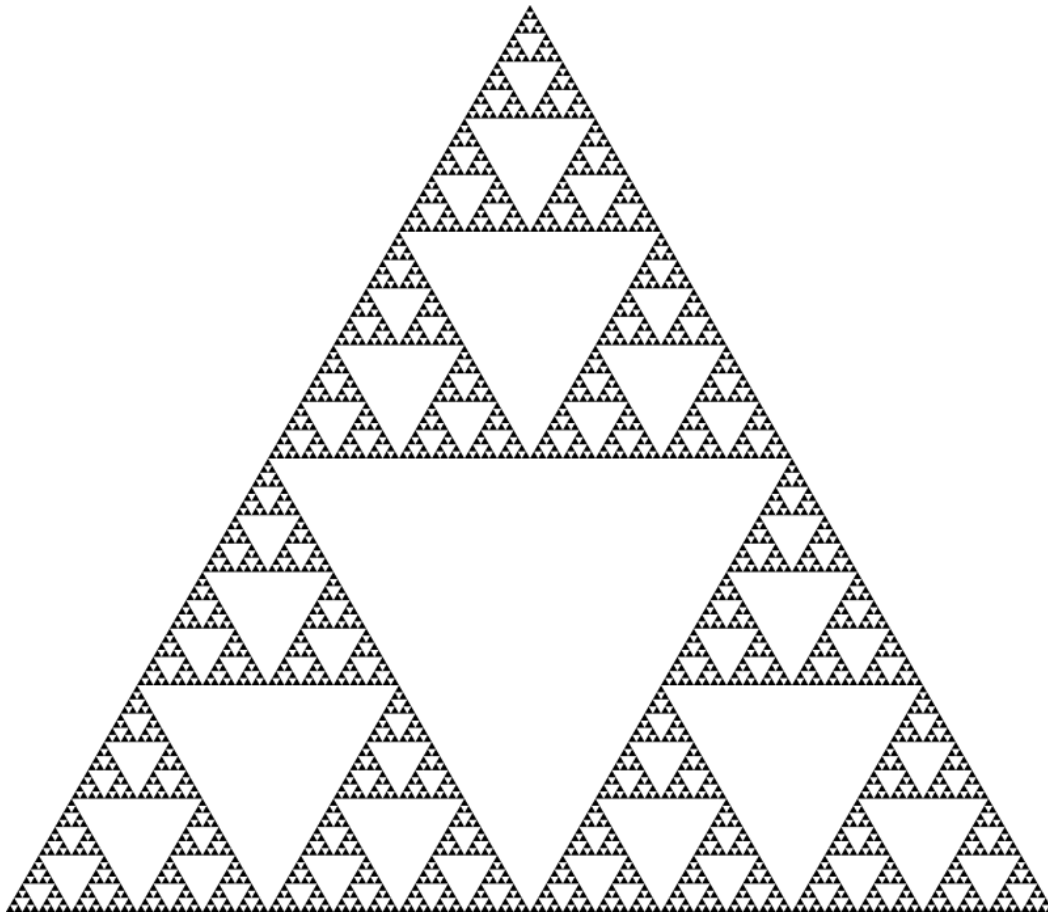


Figure II. 3: Triangle de Sierpinsky.

II.3.3. Tapis Sierpinsky [II.53] [II.54]

La structure du tapis Sierpinsky est conçue à partir d'un carré complet en appliquant récursivement étapes suivantes :

1. On découpe le carré en neuf carrés égaux avec une grille de trois par trois.
2. On enlève la partie centrale.
3. On applique ce procédé indéfiniment aux huit carrés restants.



Figure II. 4: Quatre itérations du tapis de Sierpinsky [II.53].

II.3.4. Fractale de Minkowski

Le modèle de départ pour générer cette fractale est un carré (modèle initial), considéré comme l'itération 0. La première itération consiste à remplacer chaque segment du carré par un générateur qui est composé de 5 segments, et ainsi de suite [II.55].

Il est très important de noter que les segments des extrémités et le segment médian ont la même longueur. Pour les deux segments qui restent, ils sont considérés comme des paramètres de réglage et permettent d'adapter la longueur du périmètre fractal. Voir la figure II.5 [II.55] :

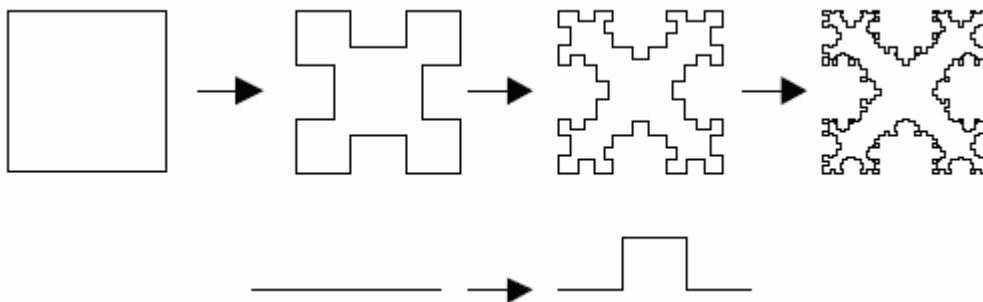


Figure II. 5: Génération de la fractale de Minkowski [II.55] [II.56].

II.3.5. Courbe de Hilbert

La construction géométrique de la courbe de Hilbert est définie par l'algorithme suivant : On divise d'abord le carré initial en 4 petits carrés égaux ; Chaque carré est numéroté de manière à ce que deux carrés consécutifs se touchent sur un côté. Nous commençons par le carré dans le coin inférieur à gauche et nous terminons par le carré dans le coin supérieur à

gauche. On divise ensuite chaque nouveau carré en 4 carrés égaux plus petits jusqu'à l'infini [II.57], [II.58].

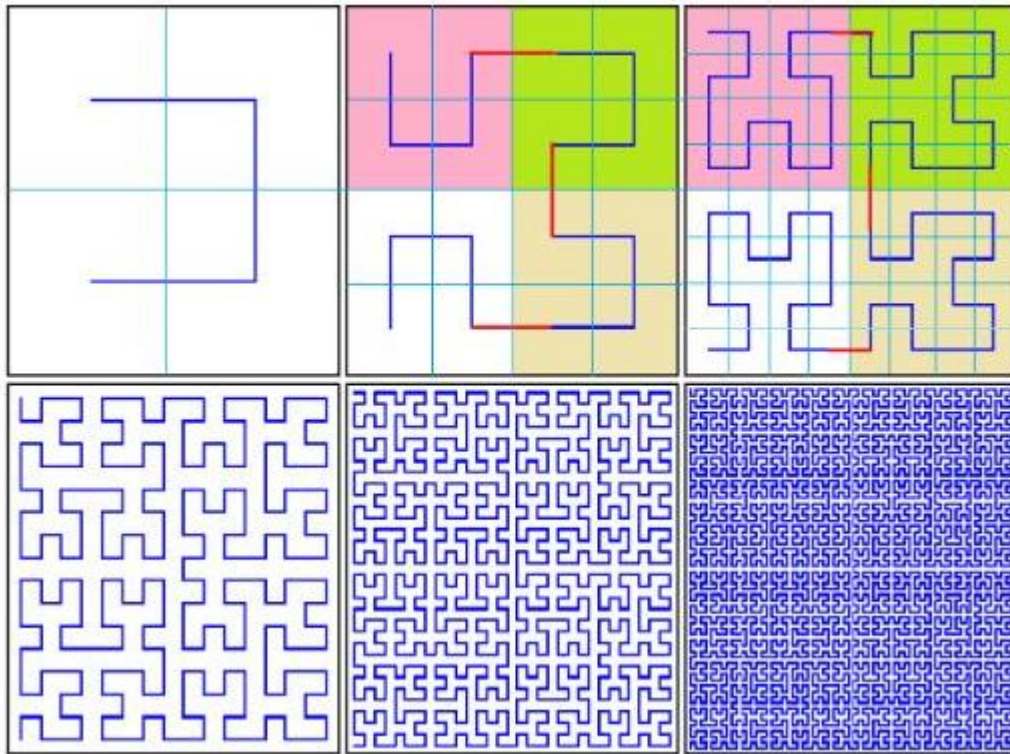


Figure II. 6: Génération de la courbe de Hilbert [II.59].

II.3.6. Courbe de Péano

La construction géométrique de la courbe de Péano la plus célèbre commence par le dessin des diagonales d'un carré. Pour effectuer la deuxième étape, nous divisons le carré initial en neuf petits carrés congruents, puis nous traçons avec un crayon tous les carrés qui croisent l'une des diagonales, comme le montre la figure II.7. Nous subdivisons à nouveau le petit carré et nous traçons le même chemin. L'ensemble des blocs sont réalisés selon un processus itératif jusqu'à l'infini [II.59].

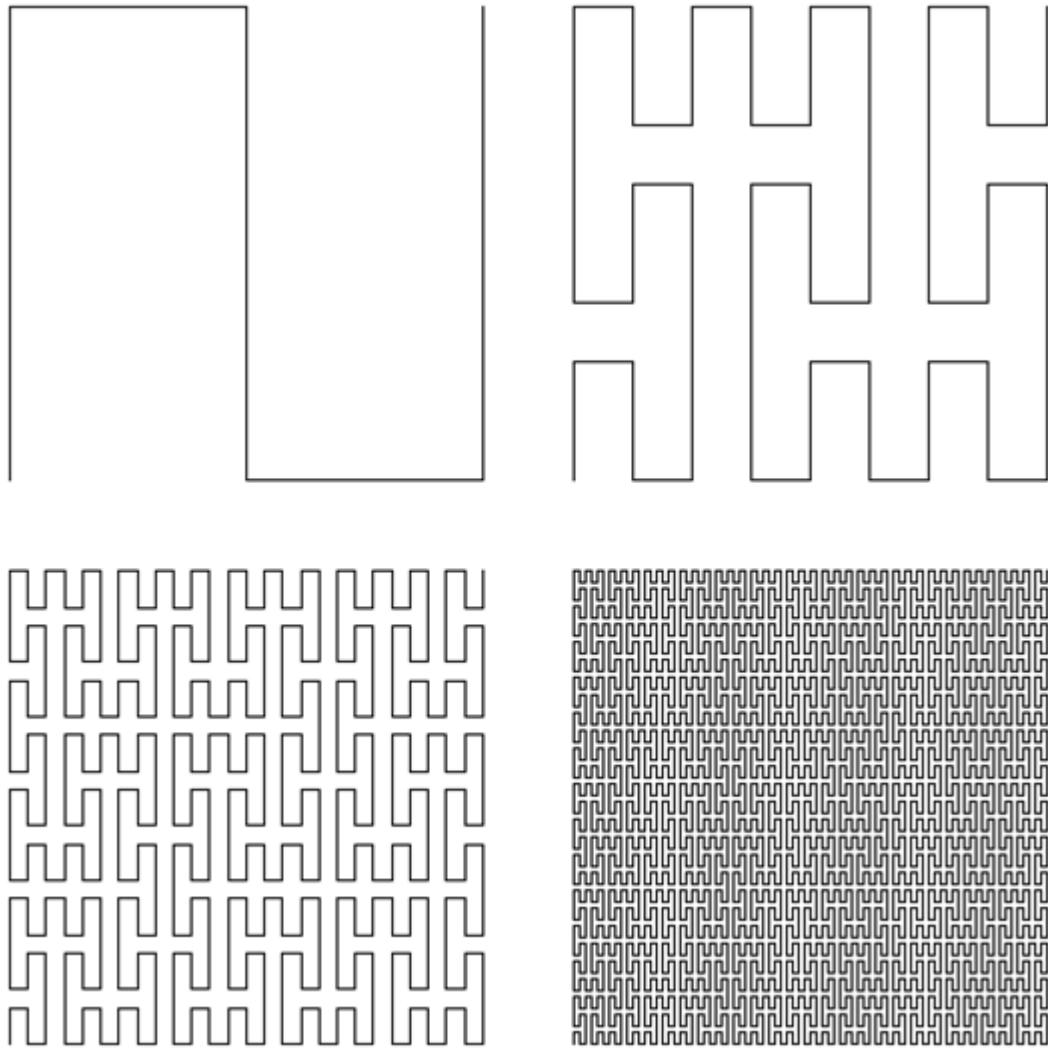


Figure II. 7: Génération de la courbe de Péano

II.4. Avantages et les inconvénients

II.4.1. Avantages

- La superficie utilisée est extrêmement limitée : la compacité provienne de la présence de formes fractales irrégulières.
- La présence de multiples résonances qui résultent du caractère d'autosimilarité.
- Gain très élevé dans certaines structures de formes fractales [II.53].

II.4.2. Inconvénients

- Gain limité dans d'autres cas.
- Réalisation extrêmement complexe en raison de la complexité des formes.
- La bande passante est très faible que des antennes spirales.
- Il est difficile de surveiller la polarisation [II.53].

II.5. Domaines d'applications [II.53] [II.60]

Il existe de nombreux domaines de fractales, on peut notamment citer [II.61] :

- Biologie : répartition structurale des bactéries, plantes, inflorescences, etc.
- Géologie : étude de topographie, des pentes et des cours d'eau, des structures rocheuses...
- Médical : la structure du rythme cardiaque, des poumons, des vaisseaux sanguins, etc.
- Météorologie : éclairs, nuages ...
- Astronomie : la structure de l'univers, la répartition des exoplanètes et des galaxies...
- Volcanologie : éruptions volcaniques, prévision des tremblements de terre.
- Géographie urbaine : utilisée pour l'analyse de la morphologie urbaine.
- Télécommunications : Radiocommunications, Télédiffusion.

II.6. Systèmes satellitaires [II.62]

Le satellite est un élément essentiel dans les systèmes de radiocommunications. Il peut retransmettre différents signaux et créer des liaisons directes. Les différents sous-systèmes du satellite, tels que la charge utile et la plateforme, sont responsables de tous les phénomènes qui se produisent au bord du satellite. En ce qui concerne la charge utile, elle est composée tous les équipements qui permettent la mise en œuvre de la communication, on peut citer les antennes d'émission et de réception, les équipements électroniques et les transpondeurs.



Figure II. 8: Exemple d'un satellite

II.6.1. Composition du satellite [II.62]

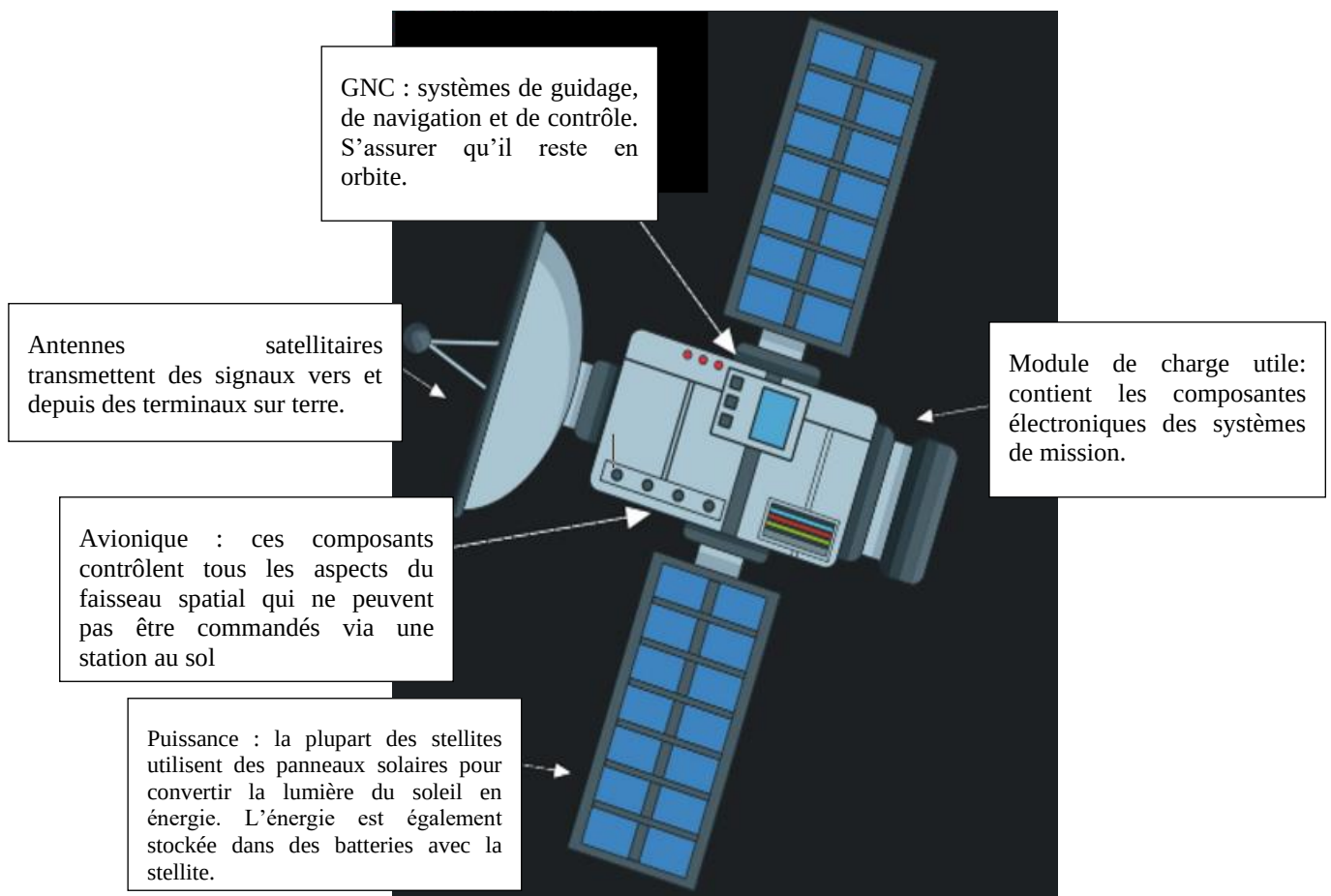


Figure II. 9: Composition du satellite.

Chapitre II : Antennes fractales et les systèmes satellitaires

Il semble qu'il n'y ait pas de configuration standard pour les satellites. Toutefois, il peut être divisé en deux parties distinctes : la "charge utile", qui est utilisée pour observer, communiquer ou accomplir toute autre fonction utile : la "plateforme", ou module de service, qui est utilisée pour fournir des services.

Les principales caractéristiques d'un satellite sont :

- Supporte la charge utile et lui fournit les ressources nécessaires pour son fonctionnement.
- Maintient le satellite sur son orbite selon l'orientation souhaitée.
- Assure la liaison avec les stations à terre.

II.6.2. Bandes de fréquences [II.62]

Les fréquences généralement utilisées pour les communications par satellite sont situées entre 1 et 30 GHz.

La bande de fréquence 1-60 GHz est divisée en sous bandes désignées par des lettres :

Bandes	Fréquences	Services
L	1-2 GHz	Communications avec les mobiles
S	2-3 GHz	Communications avec les mobiles
C	3.4-4.2 GHz (Liaison descendante) 5.925-7.75 (Liaison montante)	Communications civiles internationales et nationales
X	7-8 GHz	Communications militaires
KU	11-14 GHz	Communications civiles internationales et nationales
KA	20-30 GHz	Nouveaux systèmes d'accès au réseau large bande
EHF	21-45 GHz	Communications militaires
V	60 GHz	Liaisons inter satellites

Tableau II.1 : Bandes de fréquences et leurs services.

Chapitre II : Antennes fractales et les systèmes satellitaires

- ❖ **Bande L** : le système INMARSAT utilise actuellement la bande pour les services mobiles aéronautiques par satellite (AMSS). Le débit maximal offert pour les services aéronautiques traditionnels est de 10,5 Kbps/canal.
- ❖ **Bande S** : certaines chaînes de télévision (Arabsat) et les services de communications (Météosat).
- ❖ **Bande C** : le sens de montée (de la terre vers le satellite) se situe entre 5.9 et 6.4 GHz, tandis que le sens de dérive se situe entre 3.7 et 4.2 GHz. Il est nécessaire de coordonner cette bande avec d'autres systèmes (faisceaux hertziens) afin de la partager.
- ❖ **Bandes X, EHF** : gamme spécialement conçue pour les échanges militaires.
- ❖ **Bande Ku** : elle est utilisée principalement pour la radiodiffusion par satellite (BSS : Broadcasting Satellite Service), mais elle est également utilisée pour les systèmes d'accès Internet par satellite. Maintenant, un cas d'utilisation de la bande Ku dans le domaine du système Connexion By Boeing est spécialement conçu pour les services de passagers dans le domaine aéronautique.
- ❖ **Bande Ka** : cette bande bénéficie d'une grande bande passante qui est attribuée en priorité aux services MSS (AMSS). En outre, en comparaison avec la bande Ku, elle autorise l'utilisation d'antennes plus petites pour un débit similaire ou, à taille équivalente, un débit équivalent.

II.6.3. Avantages [II.63]

- Simplicité et gestion pas très compliquée.
- Indépendance vis-à-vis des infrastructures terrestres.
- Immunité aux catastrophes naturelles.
- Caractéristiques uniformes des services.
- Installation facile des stations au sol.
- Flexibilité géographique.
- Large bande passante.
- Propriété de diffusion.

II.6.4. Inconvénient [II.63]

- Coûts élevés car le lancement et maintenance des satellites sont très coûteux
- Pannes et défaillances car les satellites peuvent subir des pannes et des défaillances

- Traînée aérodynamique : les satellites en orbite basse sont soumis à une Traînée aérodynamique qui peut affecter leur altitude et leur vitesse.
- Pression de radiation.
- Limite de la visibilité.
- Nécessité du plusieurs satellites
- Vibration et perturbation.
- Effet d'écho.
- Délai de transmission.

II.7. Conclusion

Le concept fractal est largement utilisé dans de nombreux domaines (traitement d'images, calcul de frontières, etc), apportant une nouvelle vision pour la conception d'antennes à gain élevé. Par conséquent, la géométrie fractale devient une solution prometteuse pour obtenir des caractéristiques de haut débit grâce aux propriétés de remplissage de l'espace et d'autosimilarité sans augmenter la taille de l'antenne

Dans ce chapitre, nous avons présenté les techniques de miniaturisation des antennes imprimées telles que les fentes, les courts-circuits et les antennes fractales. Puis, nous avons donné des explications générales sur les antennes fractales où nous avons cité leurs différentes formes, leurs avantages, leurs inconvénients et les domaines d'applications de ces structures. Enfin, nous avons montré le principe des systèmes satellitaires et les différences bandes adoptées dans les applications spéciales.

Dans le chapitre suivant, nous allons concevoir et réaliser des réseaux d'antennes fractales pour les applications satellitaires dont le but d'augmenter le gain des structures proposées.

Chapitre III :

Conception et réalisation des réseaux d'antennes fractales imprimées

III.1. Introduction

Au sein de notre projet de fin d'études, nous allons élaborer et réaliser des réseaux d'antennes fractales imprimées à gain élevé pour les applications satellitaires.

Tout d'abord, nous allons présenter brièvement le logiciel de conception CST Microwave studio pour concevoir des structures d'antennes à trois dimensions. Il nous faudra d'abord créer une antenne patch rectangulaire initiale en respectant un cahier de charge. Nous avons calculé ses dimensions en utilisant les équations théoriques d'une antenne patch rectangulaire. Ensuite, nous adapterons cette antenne à la fréquence de travail 6 GHz correspondant à la bande C satellitaire, en ajoutant des fentes de forme rectangulaire sur le patch. Cela permettra d'améliorer son adaptation.

L'objectif de la seconde partie de ce chapitre est d'examiner la conception d'une antenne fractale en utilisant la géométrie de Minkowsk.

Par la suite, nous exposerons des réseaux d'antennes fractales à deux, quatre et huit éléments à base de l'antenne fractale conventionnelle à la première itération et à la deuxième itération. Ces réseaux d'antennes sont alimentés par des diviseurs de puissance dans le but d'augmenter le gain et améliorer les performances de ces structures en termes d'adaptation, de bande passante et de diagramme de rayonnement.

Enfin, nous allons mettre en œuvre la méthode de DGS (Detected Ground Structure) et créer des fentes sur le plan de masse du réseau d'antennes fractales à quatre éléments afin d'augmenter le gain du réseau de taille réduite par rapport au réseau d'antennes fractales à huit éléments.

III.2. Présentation de logiciel CST

CST Microwave Studio est un logiciel spécialisé dans la conception et la simulation électromagnétique de structures hyperfréquences complexes telles que des filtres, des coupleurs et tous types d'antennes. Il a été créé en 1992 par la société allemande CST (Computer Simulation Technology). Les techniques d'intégration finie (FIT) déterminent des solutions aux problèmes électromagnétiques, en particulier les fréquences micro-ondes pour l'analyse du temps et de la fréquence.

III.3. Géométrie de l'antenne Patch initiale

L'antenne patch initiale de forme rectangulaire est formée d'un élément rayonnant de longueur L_p et de largeur W_p alimenté par un ligne micro-ruban d'impédance caractéristique $Z_c=50 \Omega$. Il est placé sur un substrat ($W_g \times L_g$) de type FR-4 avec une permittivité relative $\epsilon_r = 4.3$ et d'un épaisseur $H=1.58$ mm. Le plan de masse couvre toute la face arrière du substrat.

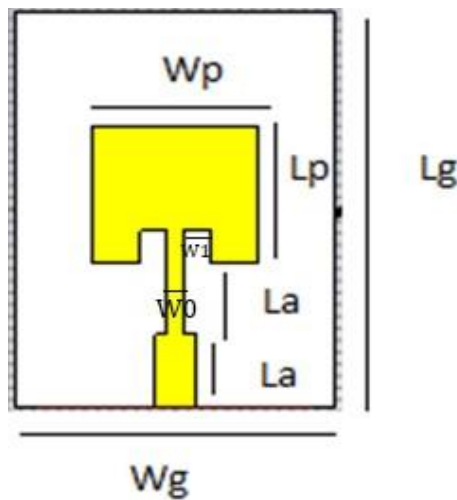


Figure III. 1: Géométrie de l'antenne patch initiale.

Les valeurs des dimensions sont calculer a partir des équations du tableau I.1 [I.8]

Paramètres	W_g	L_g	W_p	L_p	W_f	L_a	H	T	W_1	W_0	L_2
Dimentions (mm)	24.78	33	15	11.46	3.097	6.025	1.58	0.035	2	1.4411	2.66667

Tableau III.1 : Dimensions de l'antenne patch initiale avant les études paramétriques.

III.3.1 Etudes paramétriques

III.3.1.1. Variation de la largeur W_p du patch

D'après la figure III.2, nous avons varié le paramètre W_p (la largeur du patch), en fixant les autres paramètres géométriques de l'antenne. Nous constatons qu'une réduction de ce paramètre W_p améliora l'adaptation de l'antenne à la fréquence de résonnance 6 GHz.

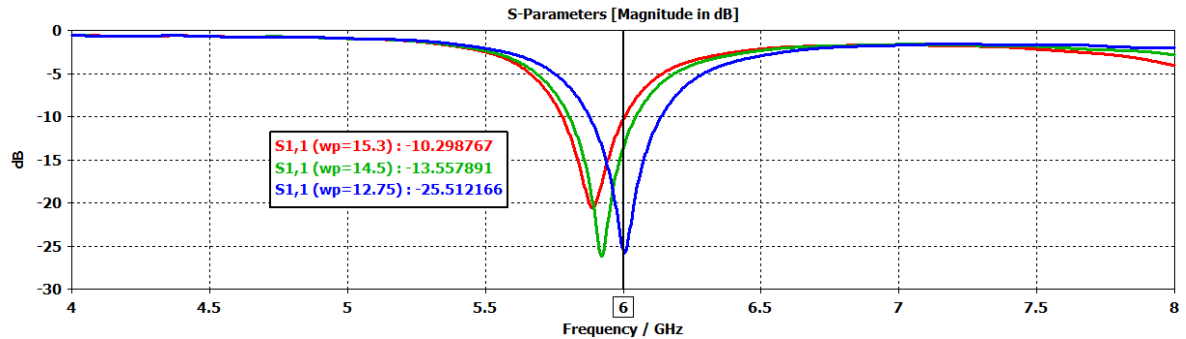


Figure III. 2: Influence de la largeur Wp sur l'adaptation.

III.3.1.2. Variation de largeur de la ligne quart d'onde W0 du patch

Pour cette étude, nous avons varié la largeur W0 tel que Wp est fixé à 12.75 mm et on garde les autres paramètres constants. Nous remarquons que la diminution de la largeur de la ligne quart d'onde W0 entraînera une meilleure adaptation.

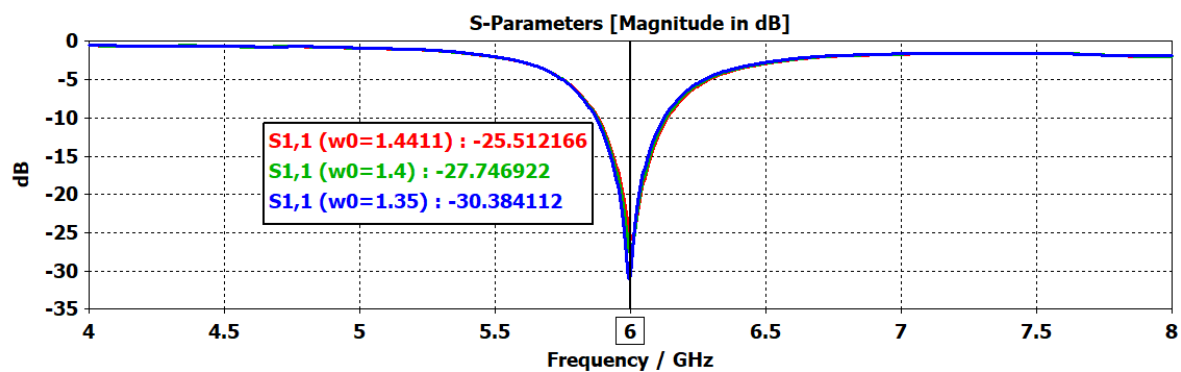


Figure III. 3: Influence de W0 sur l'adaptation.

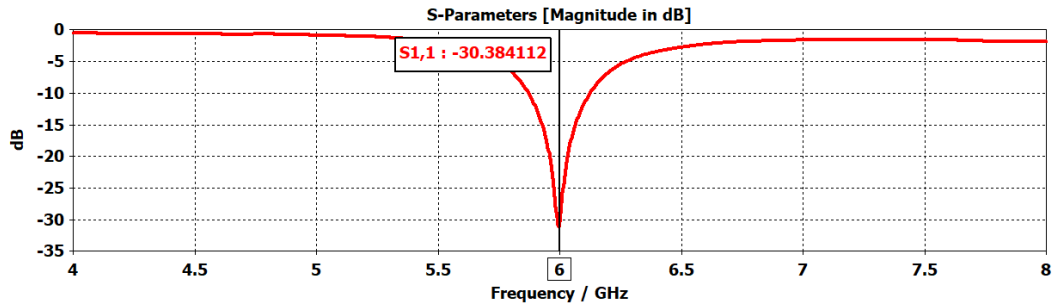
Les dimensions de l'antenne patch initiale sont indiquées sur le tableau III.1.

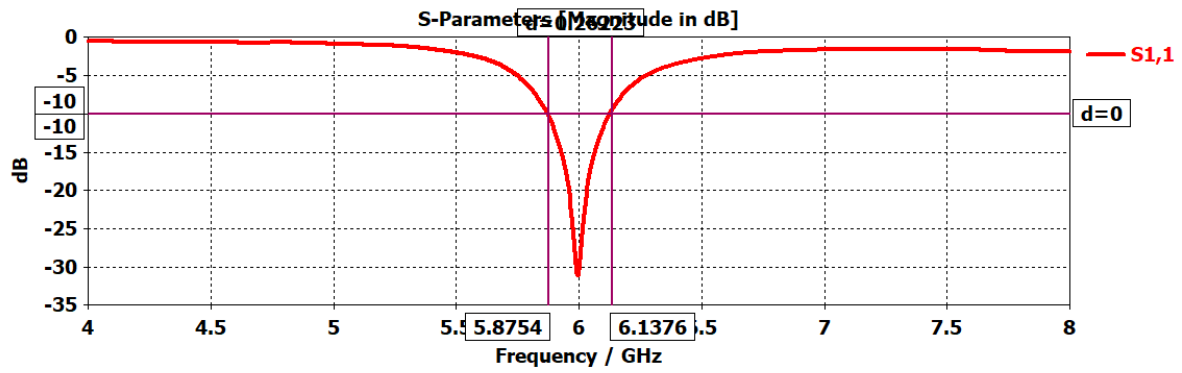
Paramètres	Wg	Lg	Wp	Lp	Wf	La	H	T	W1	W0	L2
Dimensions (mm)	24.78	33	12.75	11.46	3.097	6.025	1.58	0.035	2	1.35	2.66667

Tableau III.2 : Dimensions de l'antenne patch initiale.

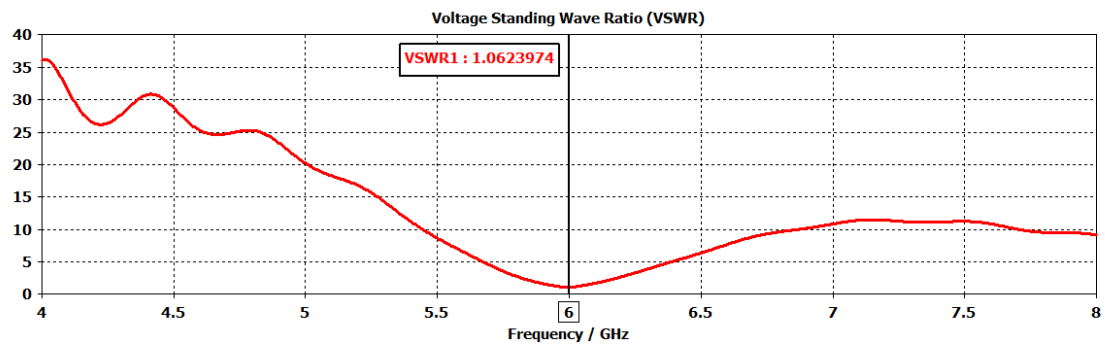
III.3.2. Résultats de simulation

Sur la figure III.4, nous montrons respectivement le coefficient de réflexion, le taux d'onde stationnaire (VSWR), la partie réelle de l'impédance d'entrée et le gain de l'antenne à la fréquence de résonance 6GHz.

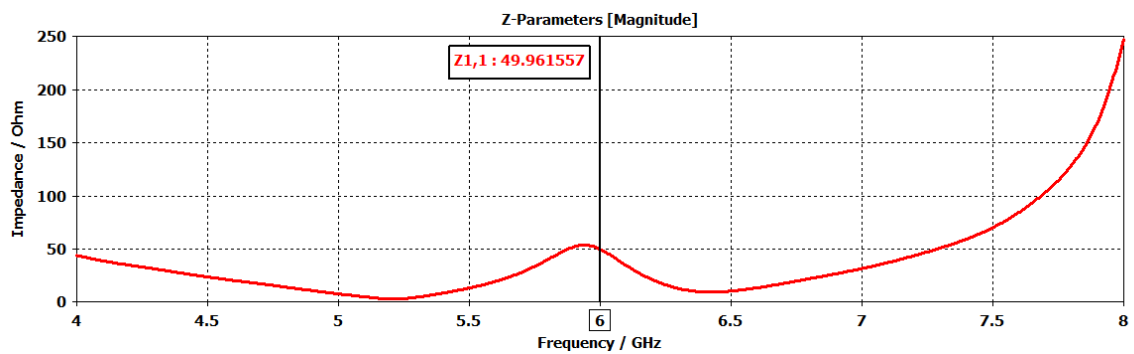




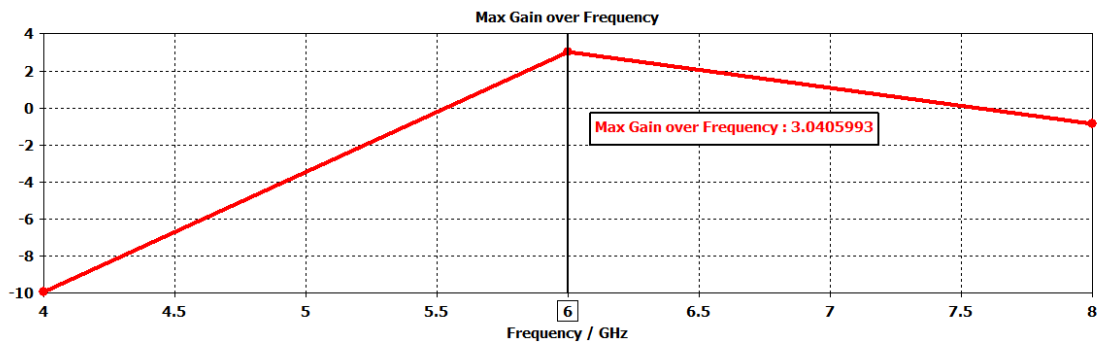
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure III. 4 (a) : Coefficient de réflexion.
 (b) : Rapport d'onde stationnaire.
 (c) : Partie réelle de l'impédance d'entrée de l'antenne.
 (d) : Gain de l'antenne.

D'après la figure III.4, on voit bien qu'il est évident que l'antenne suggérée convient parfaitement à la fréquence de résonance 6 GHz avec un coefficient de réflexion inférieure à -30,38dB et une bande passante égale 260 MHz. Ainsi, le taux d'onde stationnaire démontre une adaptation optimale avec un VSWR inférieur à 2 à la fréquence de fonctionnement. On remarque aussi que la partie réelle de l'impédance d'entrée est autour de 49,96Ohms selon la figure III.4.(c) et le gain de cette antenne pointant vers 3.04dB. Alors, on peut dire que l'antenne est bien adaptée avec bande passante étroite dans la fréquence choisie.

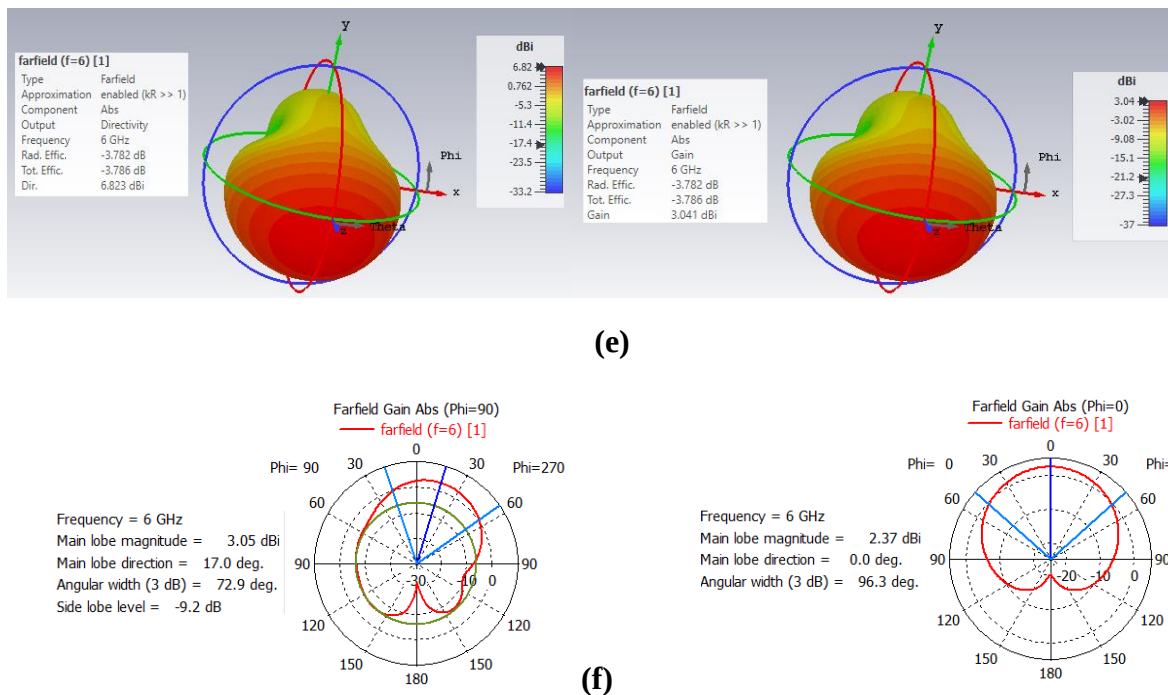


Figure III. 5 (e) : Diagrammes de rayonnement en 3D (Gain + Directivité).
(f) : Diagrammes de rayonnement polaires en 2D

Les diagrammes de rayonnement de cette antenne en termes de gain et de directivité ont été visualisé à l'aide du logiciel CST Microwave Studio, ce qui nous permet de déterminer l'angle d'ouverture de cette antenne.

La figure III.5.(f) représente les diagrammes de rayonnement en 2D à la fréquence souhaitée 6 GHz qui sont constitués des lobes avec des ouvertures distinctes. Cela crée un diagramme de rayonnement omnidirectionnel pour le plan H (Phi =90°) et quasi omnidirectionnel pour le plan E (Phi=0°).

La figure III.5. (e) montre les diagrammes de rayonnement en 3D simulés par le logiciel CST pour mieux comprendre le comportement du rayonnement de l'antenne dans l'espace. Le gain de l'antenne est d'environ 3.04 dB et la directivité 6.02 dBi.

III.4. Géométrie de l'antenne patch fractale à la première itération

Pour obtenir la géométrie du patch fractal à la première itération, nous avons inséré des fentes rectangulaires sur l'élément rayonnant de l'antenne initiale avec les dimensions suivantes : $(W_p/3 \times 2L_p/9)$ $(2W_p/9 \times L_p/3)$ indiquées sur la figure III.6.

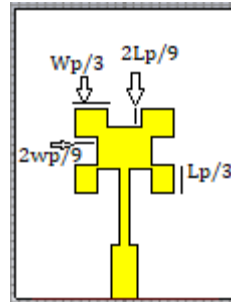


Figure III. 6: Géométrie de l'antenne patch fractale à la première itération.

III.4.1. Etudes paramétriques

III.4.1.1. Variation de la largeur W_p du patch

Pour étudier l'effet de la largeur du patch sur l'adaptation de l'antenne fractale à la première itération, nous modifions la largeur W_p de 12.75 mm à 11.1 mm. Nous observons que la réduction de la largeur du patch conduit à une meilleure adaptation.

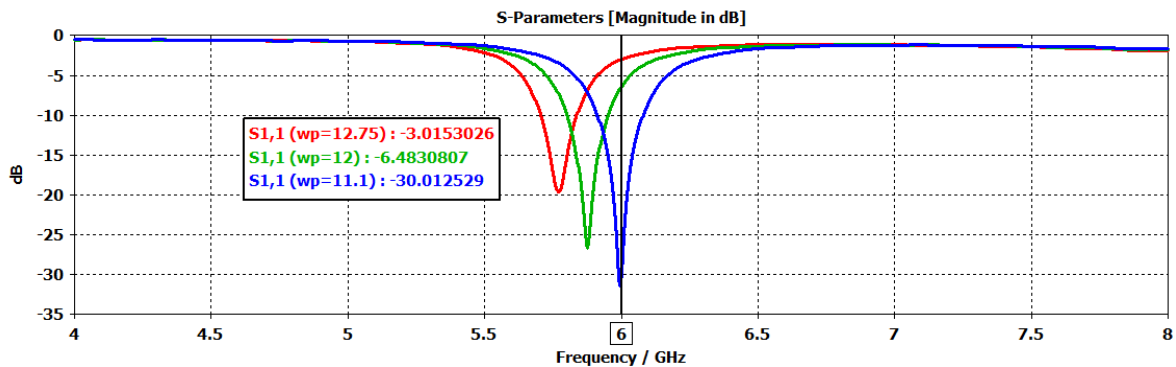


Figure III. 7: Influence de la longueur W_p sur l'adaptation.

III.4.1.2. Variation de la longueur L_p du patch

Dans cette étude, le paramètre (L_p) varie de 9.54 mm à 11.46 mm en fixant les autres paramètres géométriques de l'antenne avec $W_p = 11.1$ mm. Ce paramètre (L_p) a un impact plus important sur la fréquence de résonance de l'antenne. La réduction de ce paramètre améliorera l'adaptation de l'antenne à la fréquence de résonance 6 GHz.

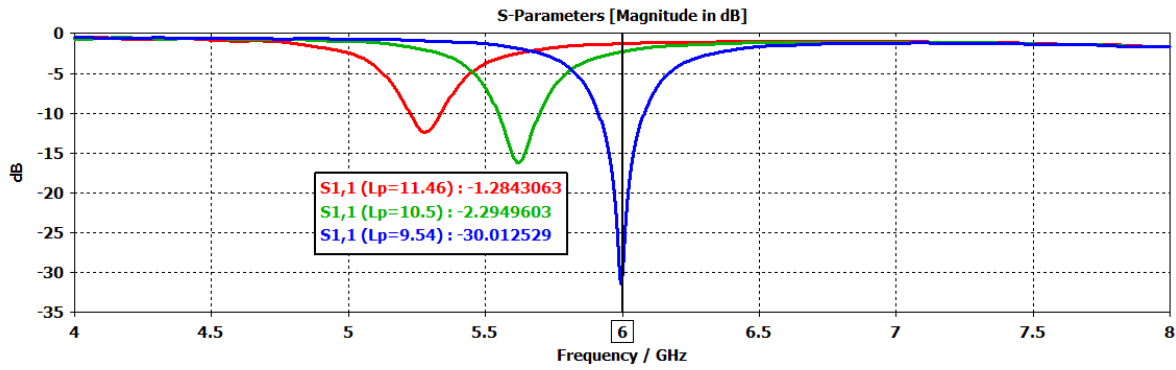


Figure III. 8: Influence de la longueur L_p sur l'adaptation.

III.4.1.3. Variation de la largeur de l'encoche W_1

Pour étudier l'effet du paramètre W_1 sur l'adaptation de l'antenne nous faisons varier ce paramètre de 2 mm à 2.3 mm en fixant L_p à 9.54mm. L'augmentation de ce paramètre conduira à une adaptation parfaite à 6GHz.

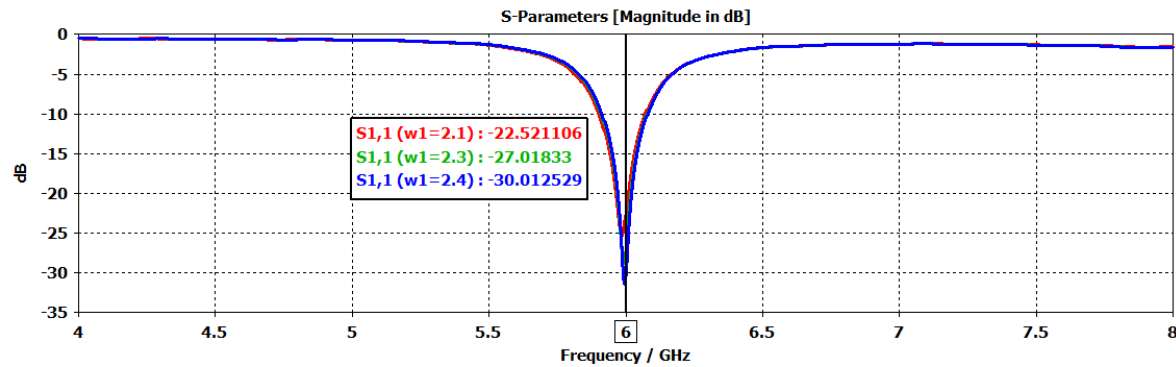


Figure III. 9: Influence de W_1 sur l'adaptation.

III.4.1.4. Variation de la largeur de ligne quart d'onde (W_0) du patch

On fait varier le paramètre W_0 de 1.25 mm à 1.35 mm et on garde les autres paramètres constants, la diminution de ce paramètre conduit à une amélioration de l'adaptation.

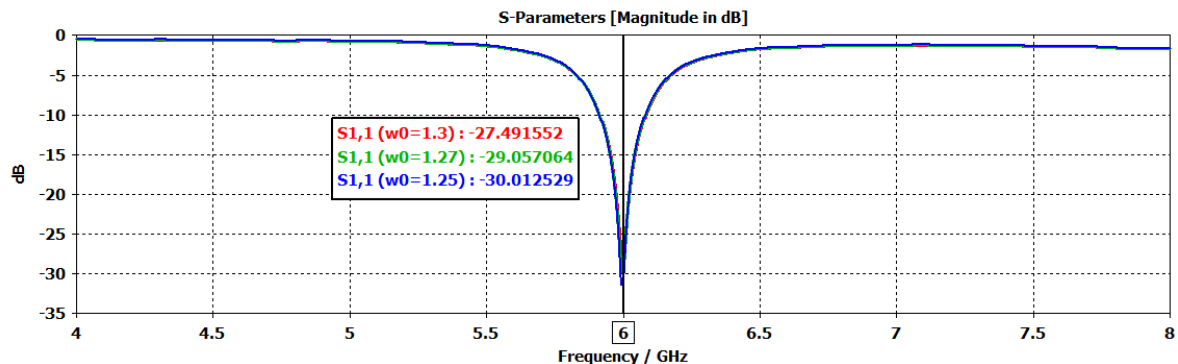


Figure III. 10: Influence de la largeur de la ligne quart d'onde W_0 sur l'adaptation.

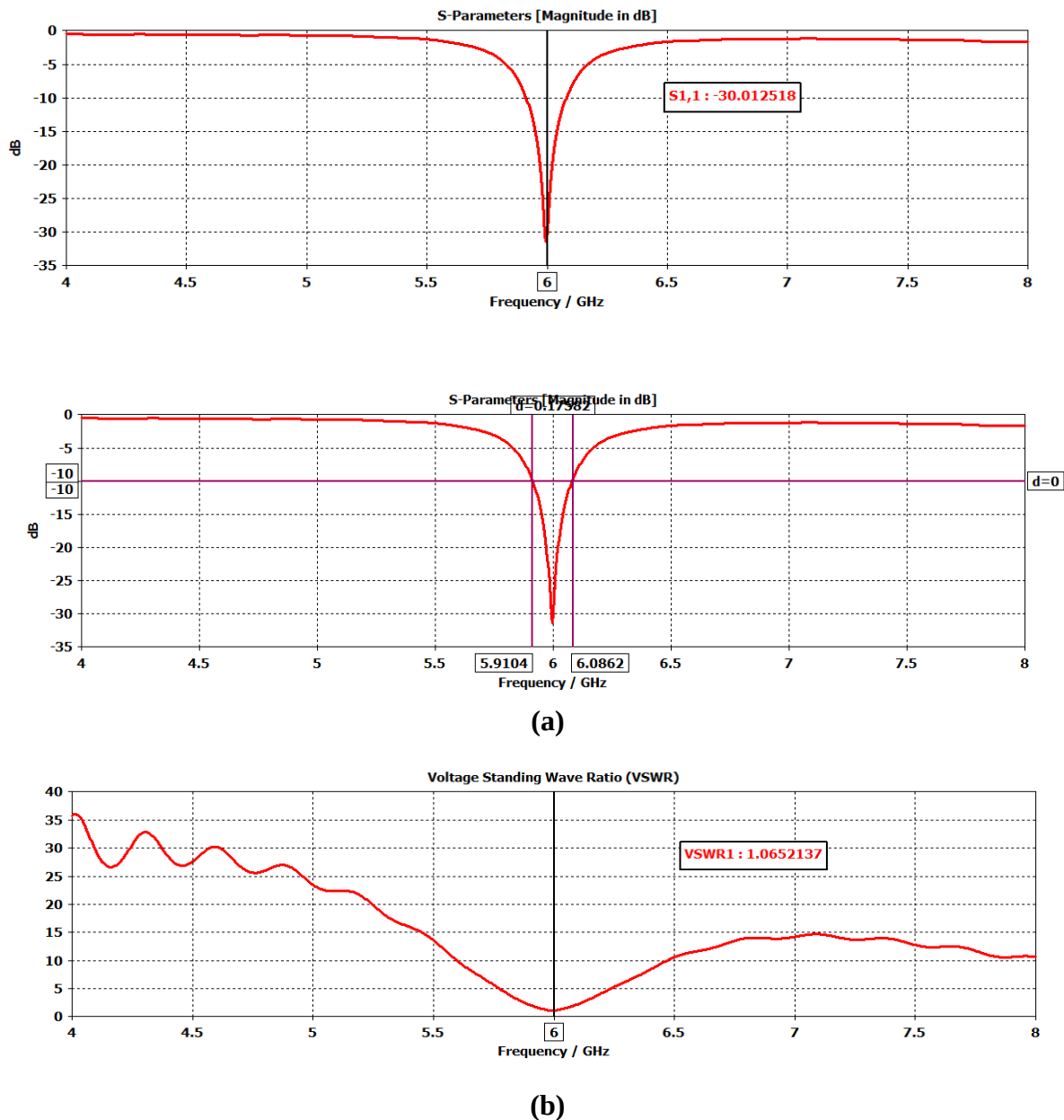
Le tableau III.2 présente les dimensions de l'antenne fractale à la première itération à la fréquence de travail 6 GHz.

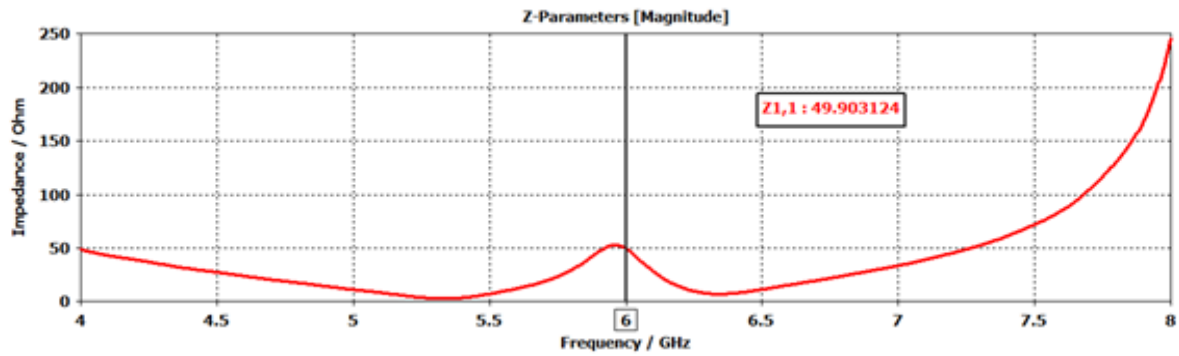
Paramètres	Wg	Lg	Wp	Lp	Wf	La	H	T	W1	W0	L2
Dimensions (mm)	24.78	33	11.1	9.54	3.097	6.025	1.58	0.035	2.4	1.25	2.66667

Tableau III.3 : Dimensions de l'antenne patch fractale à la première itération.

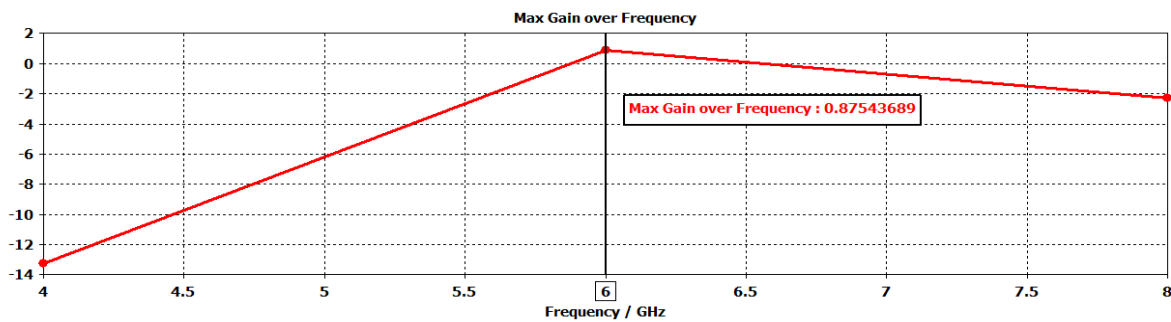
III.4.2. Résultats de simulation

Le coefficient de réflexion, le VSWR, la partie réelle de l'impédance d'entrée et le gain de l'antenne fractale à la 1^{ière} itération sont illustrés sur la figure III.11.





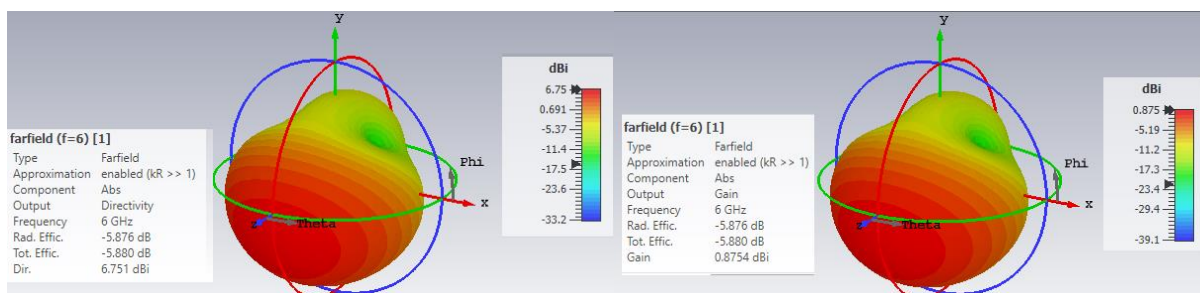
(c)



(d)

Figure III. 11. (a) : Coefficient de réflexion de l'antenne fractale à la 1ère itération. (b) : Rapport d'onde stationnaire. (c) : Partie réelle de l'impédance d'entrée de l'antenne. (d): Gain de l'antenne.

Selon les données de simulation obtenues grâce au logiciel CST, on remarque que le coefficient de réflexion est inférieur à -30,01dB, ce qui signifie que l'antenne fractale à la première itération est bien adaptée avec une bande passante de l'ordre de 176 MHz et un rapport d'onde stationnaire de valeur égale à 1.06. La partie réelle de l'impédance d'entrée est égale à 49,90 Ohms et le gain de l'antenne est autour de 0.875dB. On peut conclure alors que l'antenne est parfaitement adaptée avec un faible gain.



(e)

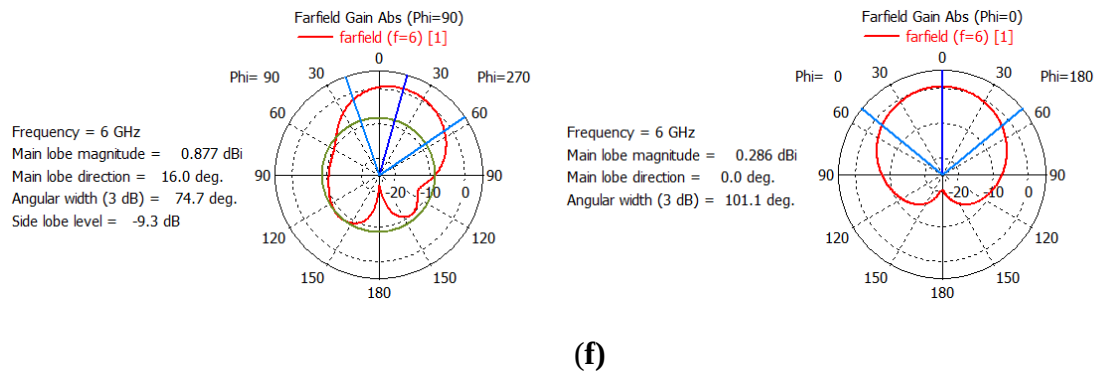


Figure III. 12 . (e) : Diagrammes de rayonnement en 3D (Gain + Directivité). (f) : Diagrammes de rayonnement polaires en 2D.

D'après la figure III.12. (f), on observe que le diagramme de rayonnement en 2D à la fréquence désirée 6 GHz a un rayonnement omnidirectionnelle pour le plan H ($\Phi = 90^\circ$) et un rayonnement quasi omnidirectionnelle pour le plan E ($\Phi = 0^\circ$). On note suivant les diagrammes de rayonnement en 3D que le maximum du gain est proche de 0.875dB et la directivité est de 6.75dBi à la fréquence 6GHz de l'antenne fractale proposée.

III.5. Géométrie de l'antenne patch fractale à la deuxième itération

Pour obtenir la structure de l'antenne fractale de type Minkowsk à la deuxième itération, nous insérons des fentes de forme rectangulaire sur l'élément rayonnant de l'antenne précédente (Figure III.6) dont leurs dimensions sont les suivantes :

- La fente numéro 1 de dimensions ($W_p/9 \times L_p/18$).
- La fente numéro 2 de dimensions ($W_p/18 \times L_p/9$).
- La fente numéro 3 de dimensions ($W_p/9 \times L_p/18$).
- La fente numéro 4 de dimensions ($2W_p/27 \times L_p/18$).

Et ainsi de suite pour le reste des fentes.

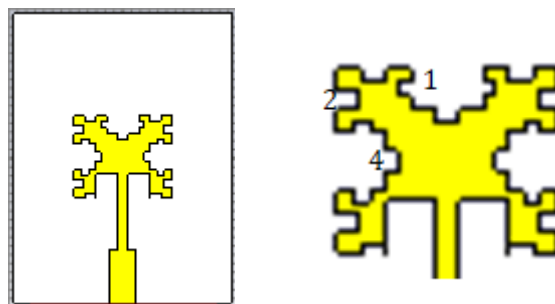


Figure III. 13: Géométrie de l'antenne Patch fractale à la deuxième itération.

III.5.1. Etudes paramétriques

III.5.1.1. Variation de la longueur L_p du patch

Après avoir varier la longueur du patch (L_p) de 9.25 mm à 9.54 mm, on observe une influence sur l'adaptation de l'antenne. La diminution de ce paramètre induit à une bonne adaptation de l'antenne à la fréquence de résonance de 6 GHz.

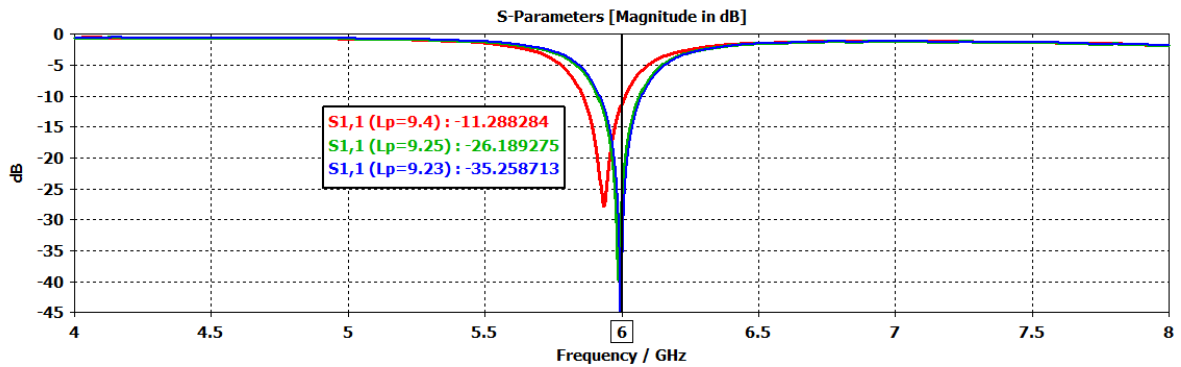


Figure III. 14: Influence de la longueur L_p sur l'adaptation.

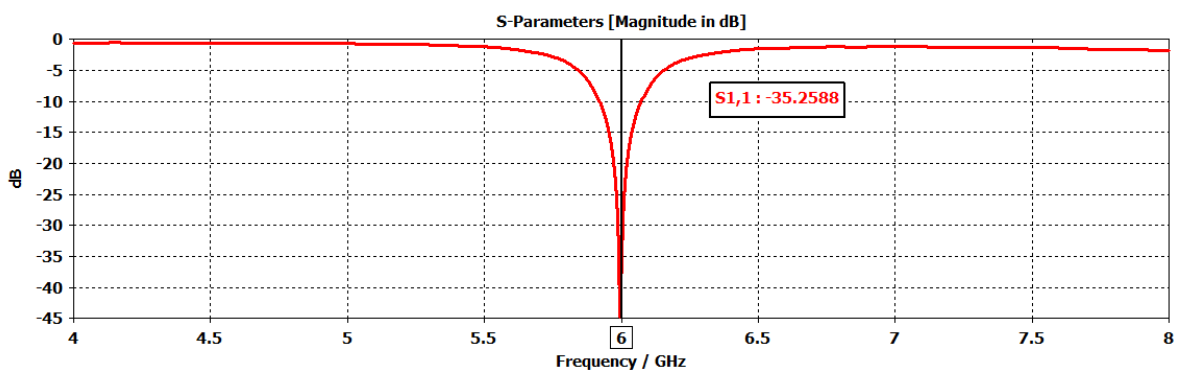
Les dimensions de l'antenne fractale à la 2^{ème} itération sont indiquées sur le tableaux III.3.

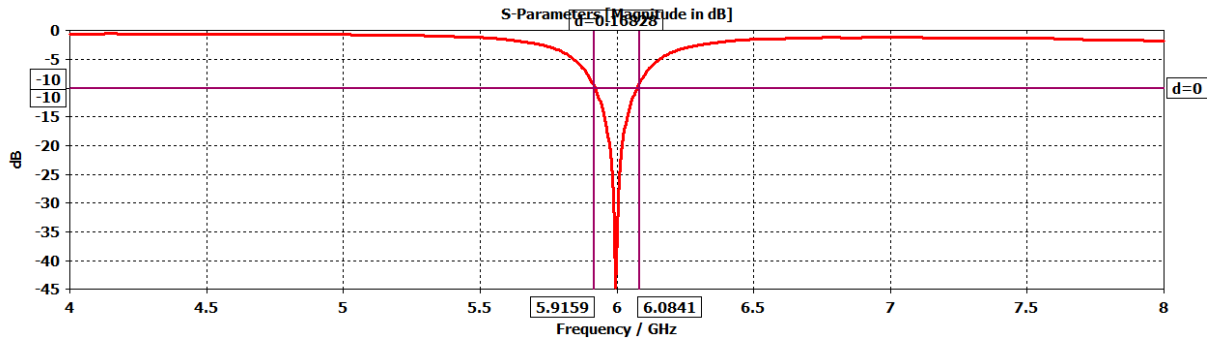
Paramètres	W_g	L_g	W_p	L_p	W_f	L_a	H	t	W_1	W_0	L_2
Dimensions(mm)	24.78	33	11.1	9.23	3.097	6.025	1.58	0.035	2.4	1.25	2.66667

Tableau III.4: Dimensions de l'antenne patch fractale à la 2^{ème} itération.

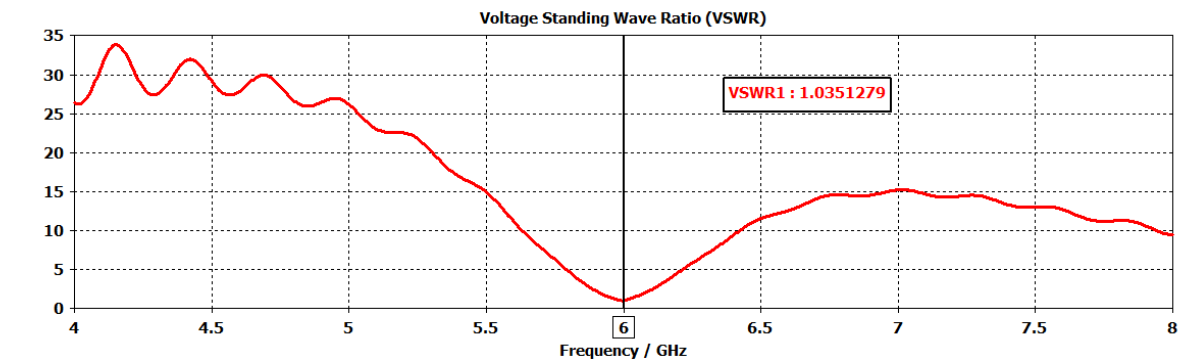
III.5.2. Résultats de simulation

Le coefficient de réflexion, le VSWR, la partie réelle de l'impédance d'entrée et le gain de l'antenne fractale à la 2^{ième} itération sont montrés sur la figure III.15.

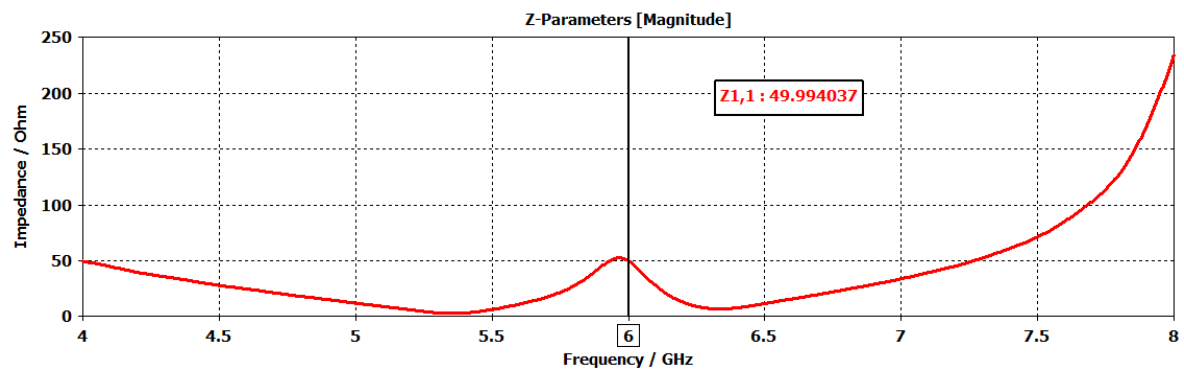




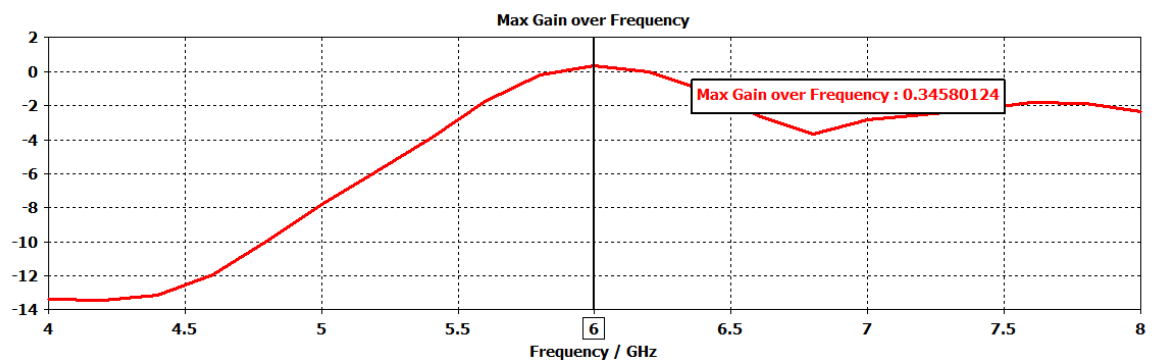
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure III. 15. (a) : Coefficient de réflexion de l'antenne fractale à la 2ième itération. (b) : Rapport d'onde stationnaire. (c) : Partie réelle de l'impédance d'entrée de l'antenne. (d) : Gain de l'antenne.

Les résultats de simulation obtenus montrent que l'antenne fractale à la 2^{ème} itération est bien adaptée où la puissance réfléchie est nulle avec un pic inférieur à -35,25dB et le rapport d'onde stationnaire est autour de 1.03 à la fréquence désirée avec une bande passante égale à 160MHz. L'impédance d'entrée est proche de 50 Ohms et le gain de l'antenne est de l'ordre de 0,346 dB. D'après ces résultats, on voit que l'antenne est parfaitement adaptée avec un gain très faible. La taille globale de cette antenne est $11.1 \times 9.23 \text{ mm}^2$, ce qui donne un taux de miniaturisation autour de 29.88% par rapport à l'antenne initiale.

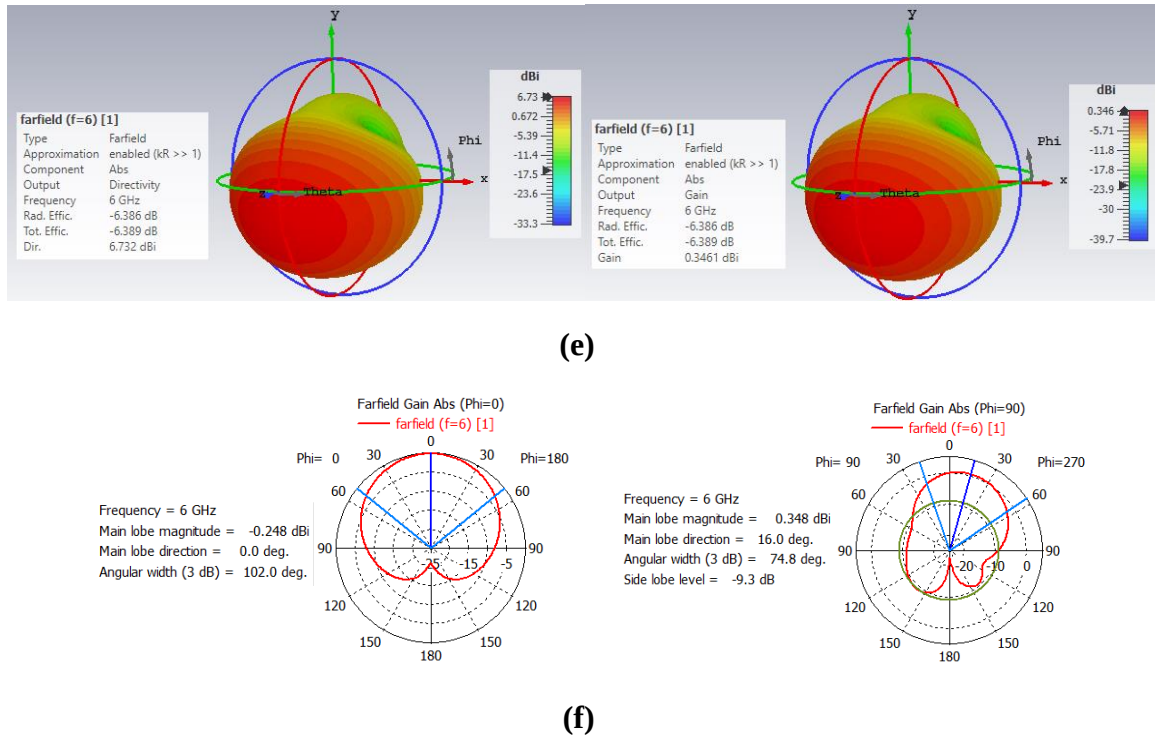


Figure III. 16 (e) : Diagrammes de rayonnement en 3D (Gain + Directivité). (f) : Diagrammes de rayonnement polaires en 2D.

Les diagrammes de rayonnement polaires en 2D ou 3D de l'antenne fractale à la 2^{ème} itération génèrent presque le même comportement du rayonnement que l'antenne fractale antécédente mais avec un gain de 0.346 dB et une directivité de 6.73dBi.

III.6. Réseau d'antennes à deux éléments de la première itération

La géométrie du réseau d'antennes à deux éléments est représentée sur la figure III.17.

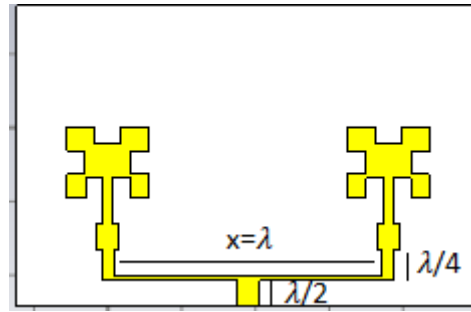


Figure III. 17 : Géométrie de réseau d'antennes à deux éléments.

Nous déterminons la longueur et la largeur du diviseur de puissance en jonction T comme suit [III.71]:

- Nous employons une ligne demi-onde à l'entrée de la ligne d'alimentation principale d'impédance caractéristique $Z_c=50\Omega$.
- Ensuite on superpose horizontalement une ligne d'onde λ d'impédance caractéristique égale à 100Ω .
- Enfin, pour relier la ligne 100Ω avec la ligne d'alimentation 50Ω de l'antenne patch élémentaire, nous prenons une ligne quart d'onde d'impédance $Z_c=70.71\Omega$.
- L'impédance de la ligne quart d'onde (Z_c) est déterminée par la formule suivante :

$$Z_c = \sqrt{Z_{in} * Z_{out}} \quad (III.1)$$

Avec :

Z_c : Impédance caractéristique de la ligne quart d'onde.

Z_{in} : Impédance d'entrée.

Z_{out} : Impédance de sortie.

La largeur (W) de la jonction T est calculée par logiciel CST MWS comme montre le tableau suivant :

Impédance caractéristique (Ω)	La largeur de la jonction T (mm)
50	3.097
70.71	1.6205
100	0.7146

Tableau III.5: Dimensions du diviseur de puissance en jonction T.

III.6.1. Etude Paramétrique

III.6.1.1. Variation de la longueur x du réseau d'antenne à 2 éléments

Le paramètre x varie de 16 mm à 18.9989 mm a une influence importante sur l'adaptation. L'augmentation de ce paramètre conduira à une adaptation parfaite.

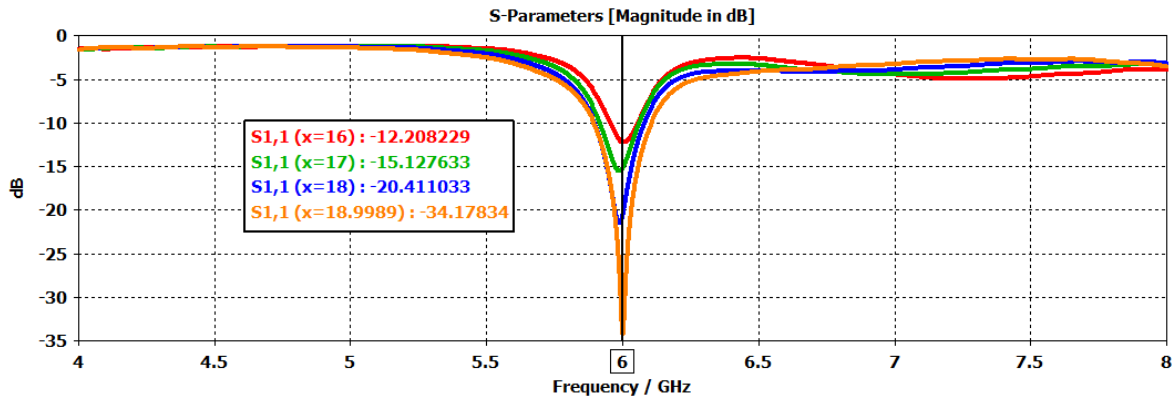


Figure III. 18: Variation de la longueur x.

III.6.1.2. Variation de la longueur d'alimentation La

Dans cette étude, le paramètre (La) varie de 3.5 mm à 6.025 mm. La réduction de ce paramètre amènera à une bonne adaptation à la fréquence souhaitée.

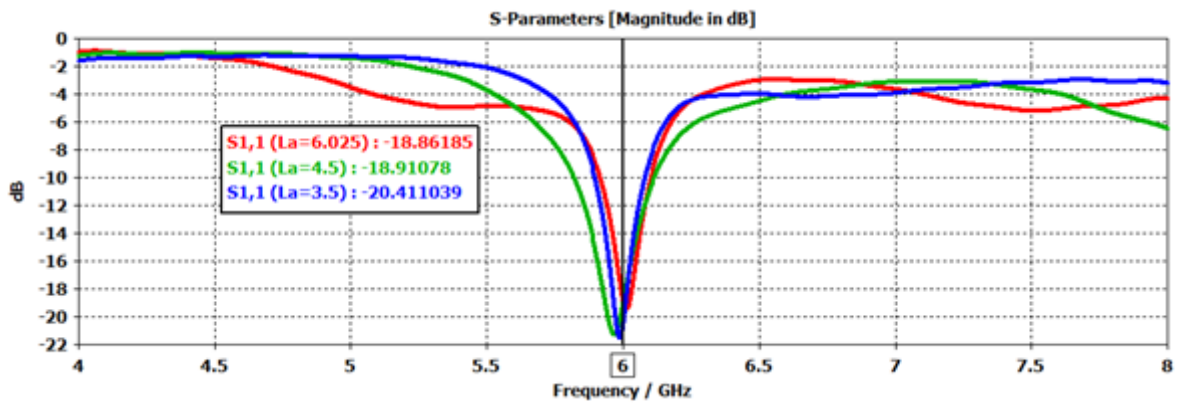


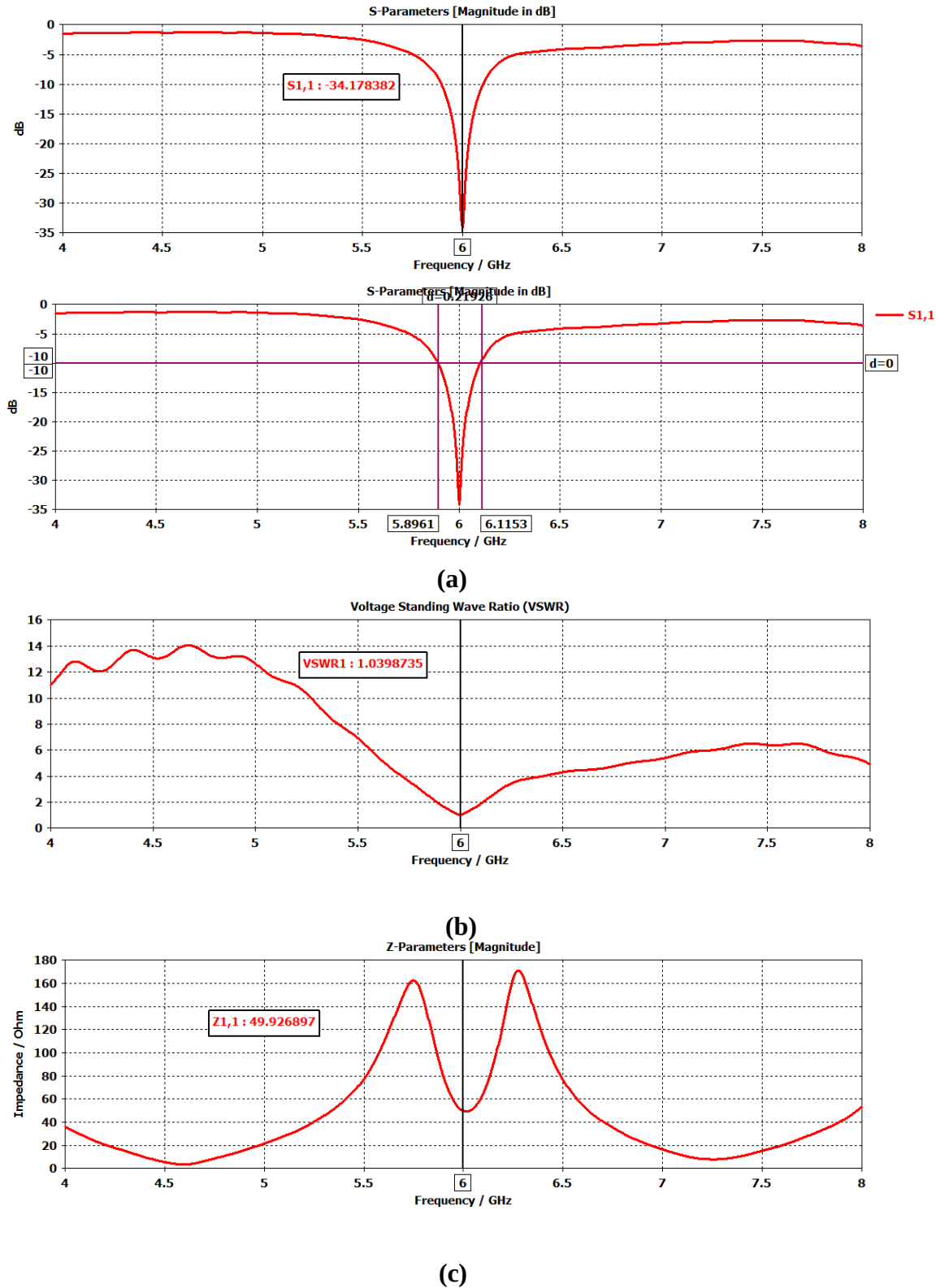
Figure III. 19: Variation de la longueur d'alimentation La.

Paramètres	Wg	Lg	Wp	Lp	Wf	La	H	t	W1	W0	L2	x
Dimensions (mm)	24.78	33	11.1	9.54	3.097	3.5	1.58	0.035	2.4	1.25	2.6667	18.9989

Tableau III.6 : Dimensions du réseau d'antennes à deux éléments de la 1^{ère} itération.

III.6.2. Résultats de simulation

Les résultats de simulation du réseau d'antennes à deux éléments à base de l'antenne fractale à la première itération sont illustrés sur la figure III.20. ((a), (b), (c) et (d)).



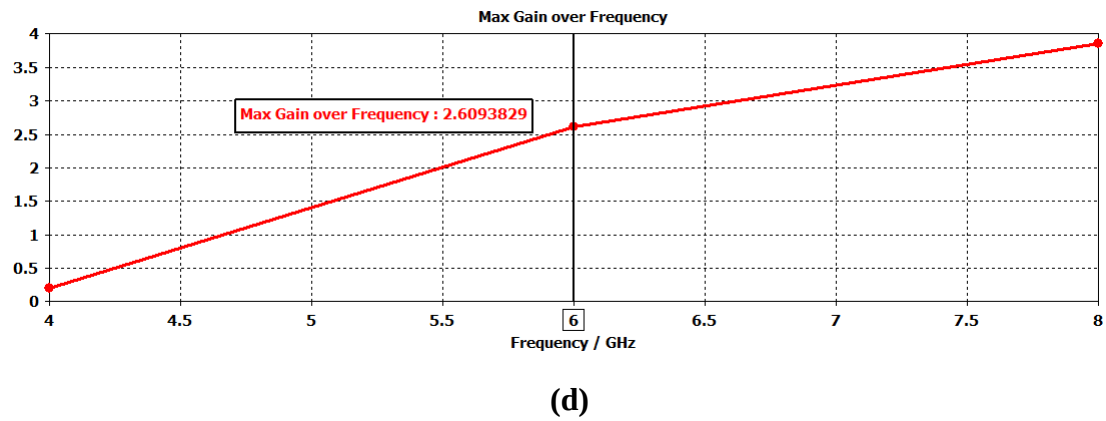


Figure III. 20 . (a) : Coefficient de réflexion du réseau d'antennes à 2 éléments de la 1^{ère} itération. (b) : Rapport d'onde stationnaire. (c) : Partie réelle de l'impédance d'entrée de l'antenne. (d) : Gain de l'antenne.

Nous observons d'après la figure III.20 que le coefficient de réflexion est inférieur à -34,17 à la fréquence de résonance 6 GHz avec une largeur de bande passante autour de 210 MHz. De même, la représentation du taux d'onde stationnaire VSWR montre que l'adaptation est bien réalisée où sa valeur atteint 1,03, qui reste une valeur inférieure à 2.

Nous remarquons aussi que l'impédance d'entrée est de 49,92 Ohms et le gain est de 2,60dB. Donc, il est évident que l'antenne est parfaitement adaptée avec une augmentation légère du gain et de la bande passante par rapport aux antennes fractale conventionnelles.

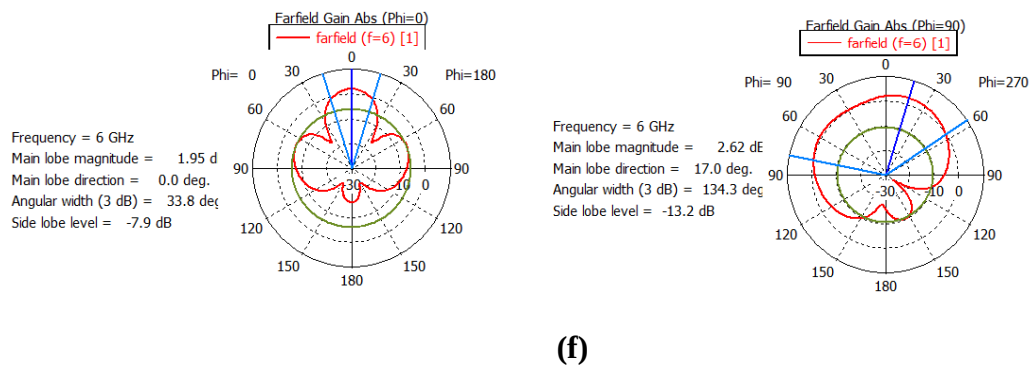
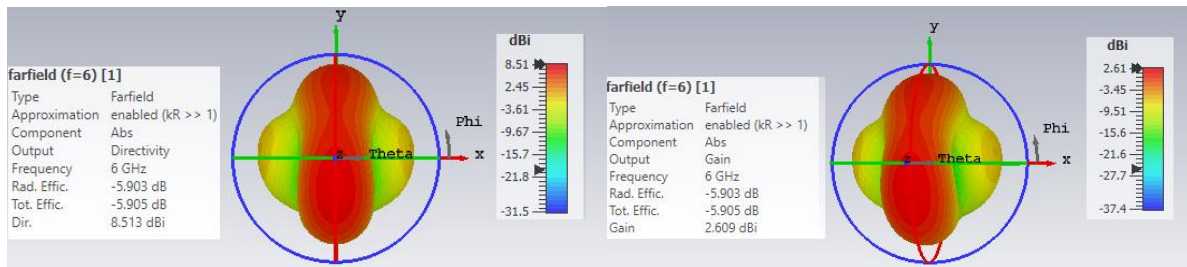


Figure III. 21 (e) : Diagrammes de rayonnement en 3D (Gain + Directivité). (f) : Diagrammes de rayonnement polaires en 2D.

Pour le plan H ($\Phi = 90^\circ$), le diagramme de rayonnement en 2D à la fréquence de résonance 6 GHz est composé d'un seul lobe d'ouverture importante. Donc, le rayonnement est omnidirectionnel dans le plan H. Le diagramme de rayonnement pour le plan E ($\Phi = 0$) est composé de trois lobes d'ouverture presque égaux où la largeur angulaire à 3 dB du lobe principale est 33.8° , ce qui donne un rayonnement directif. Dans ce cas, l'antenne concentre la puissance dans une plage angulaire plus ou moins étendue. Ces types d'antennes sont présents sur les satellites ainsi qu'au sol. Il est essentiel de les diriger précisément vers le destinataire de la liaison.

Les diagrammes de rayonnement en 3D sont présentés par la figure III.21.(f) pour une meilleure vision de l'antenne dans l'espace. On remarque que le gain est égal à 2,61 dB et la directivité est de 8,51dBi.

III.7. Réseau d'antennes à quatre éléments de la première itération

La structure du réseau d'antennes à quatre éléments est représentée sur la figure III.22.

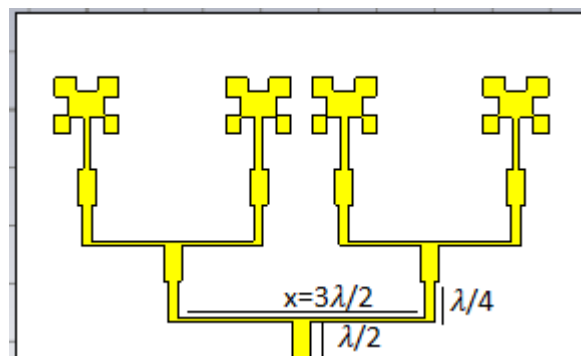


Figure III. 22: Géométrie du réseau d'antennes à quart éléments de la 1^{ère} itération.

Le principe de calcul d'un diviseur de puissance à quatre d'éléments est le même que celui d'un diviseur de puissance à deux éléments. Nous avons employé une ligne micro-ruban de longueur x égale à $3\lambda/2$ et d'impédance caractéristique de 100Ω .

III.7.1. Etude Paramétrique

III.7.1.1. Variation de la longueur x

En variant la longueur x de la jonction T du diviseur de puissance, on observe que l'augmentation de ce paramètre induit à une meilleure adaptation à la fréquence de fonctionnement.

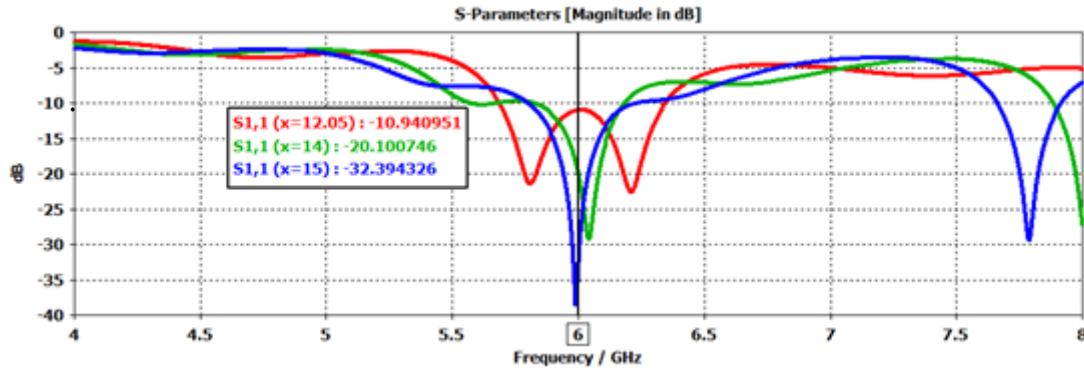


Figure III. 23: Variation de la longueur x de la jonction T.

III.7.1.2. Variation de la longueur d'alimentation L_a

On fait modifier la longueur d'alimentation L_a de 6.025 mm à 6.3 mm. On constate que la diminution de ce paramètre conduira à une bonne adaptation.

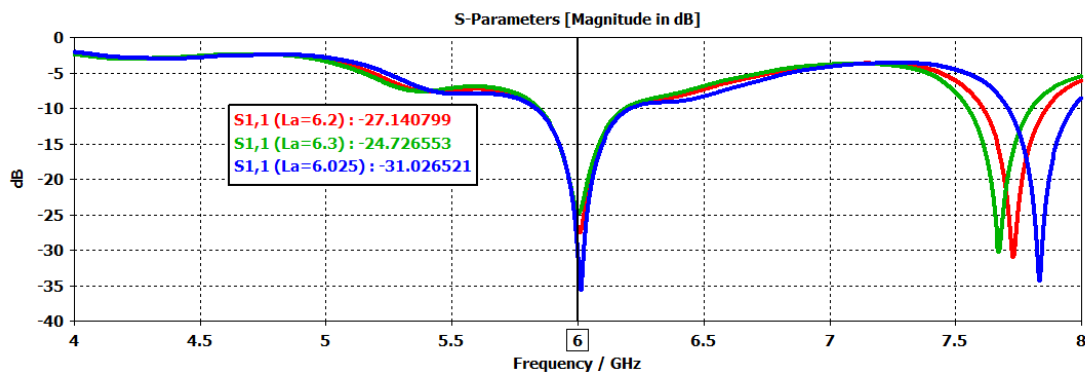


Figure III. 24: Variation de la longueur d'alimentation L_a .

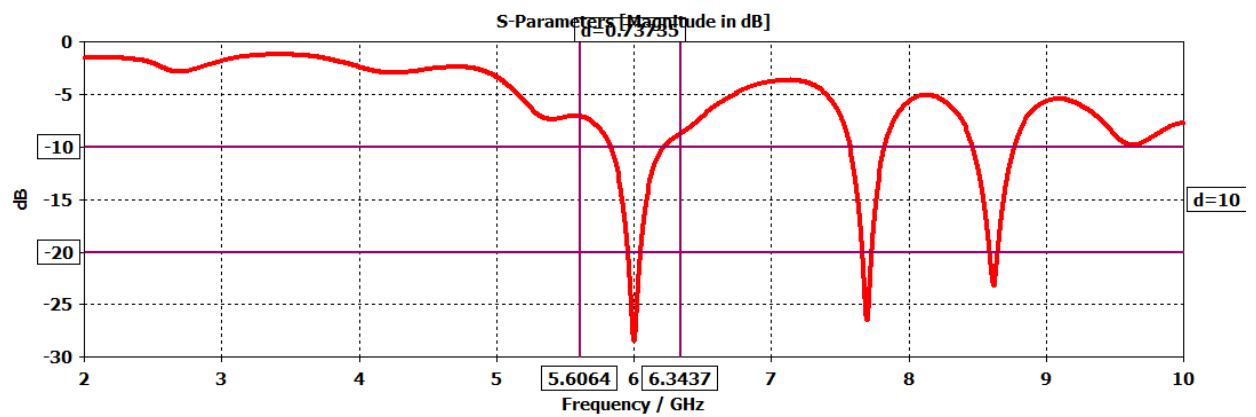
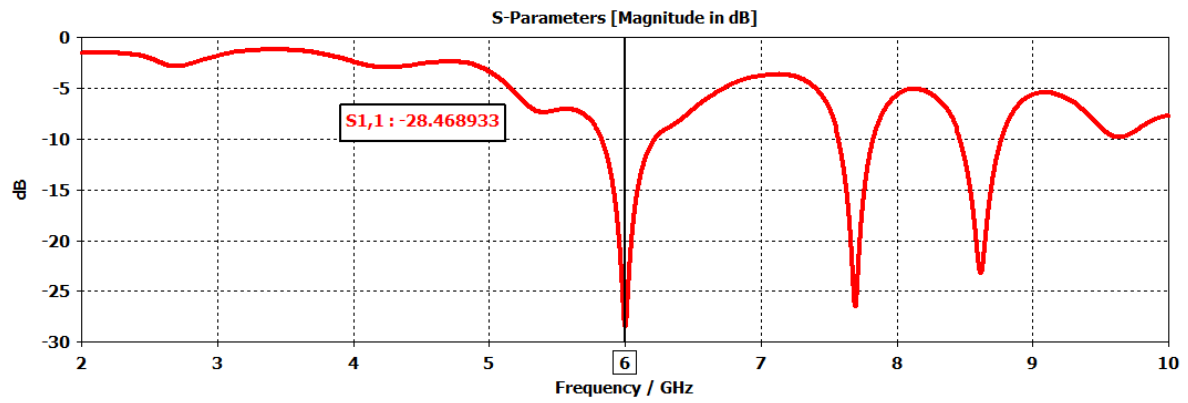
Les dimensions du réseau d'antennes à quatre éléments à base de l'antenne fractale à la première itération sont introduites dans le tableau suivant :

Paramètres	Wg	Lg	Wp	Lp	Wf	La	H	t	W1	W0	L2	X
Dimensions (mm)	24.78	33	11.1	9.54	3.097	6.2	1.58	0.035	2.4	1.25	2.66667	15

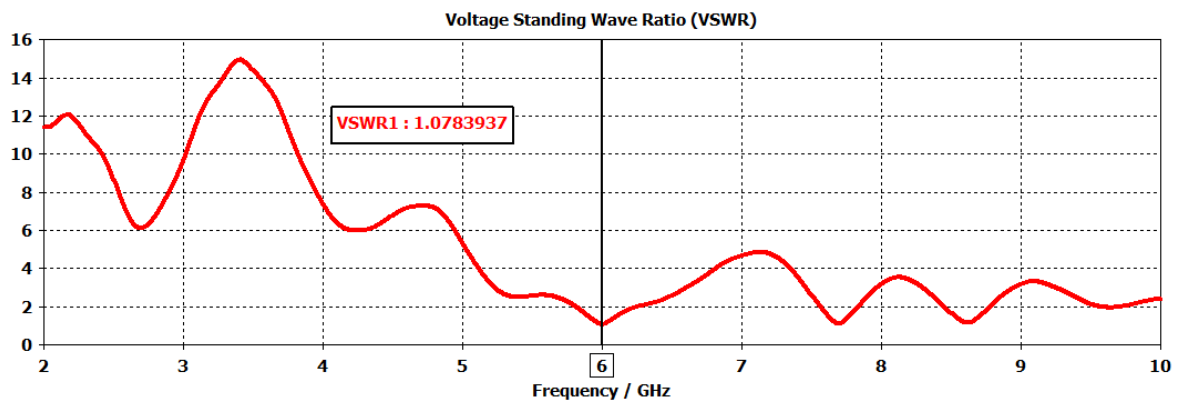
Tableau III.7 : Dimensions du réseau d'antennes à quatre éléments de la première itération.

III.7.2. Résultats de simulation

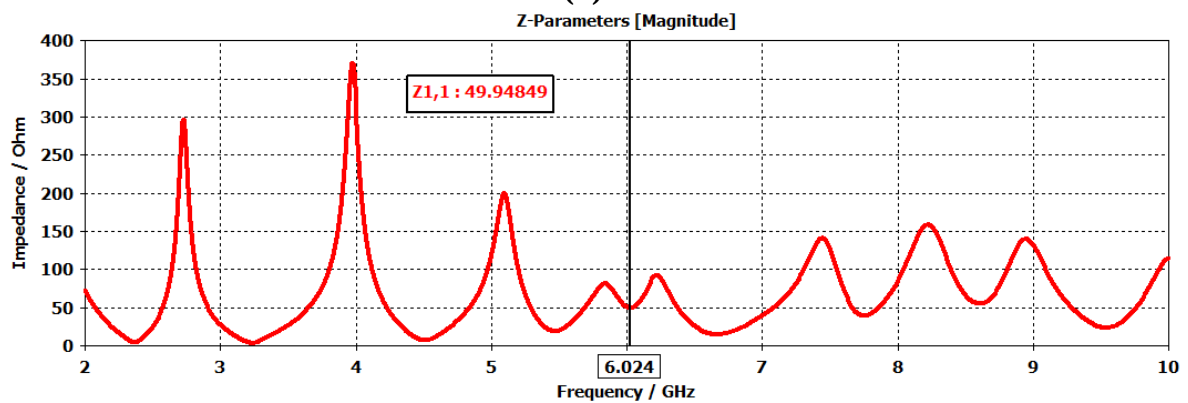
Les résultats de simulation du réseau d'antennes à quatre éléments à base de l'antenne fractale à la première itération sont illustrés dans la figure III.25. ((a), (b), (c) et (d))



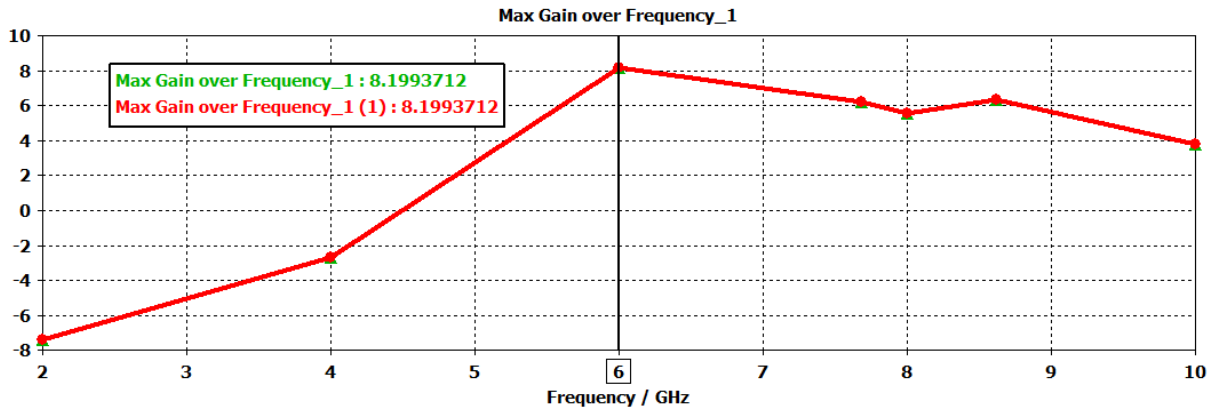
(a)



(b)



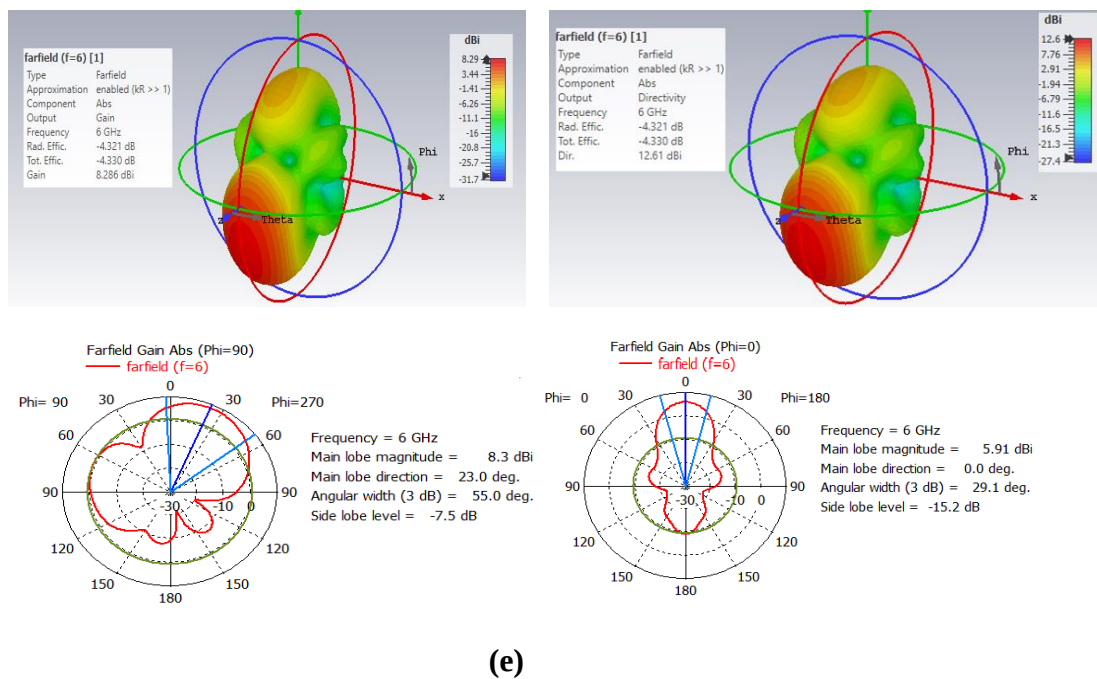
(c)



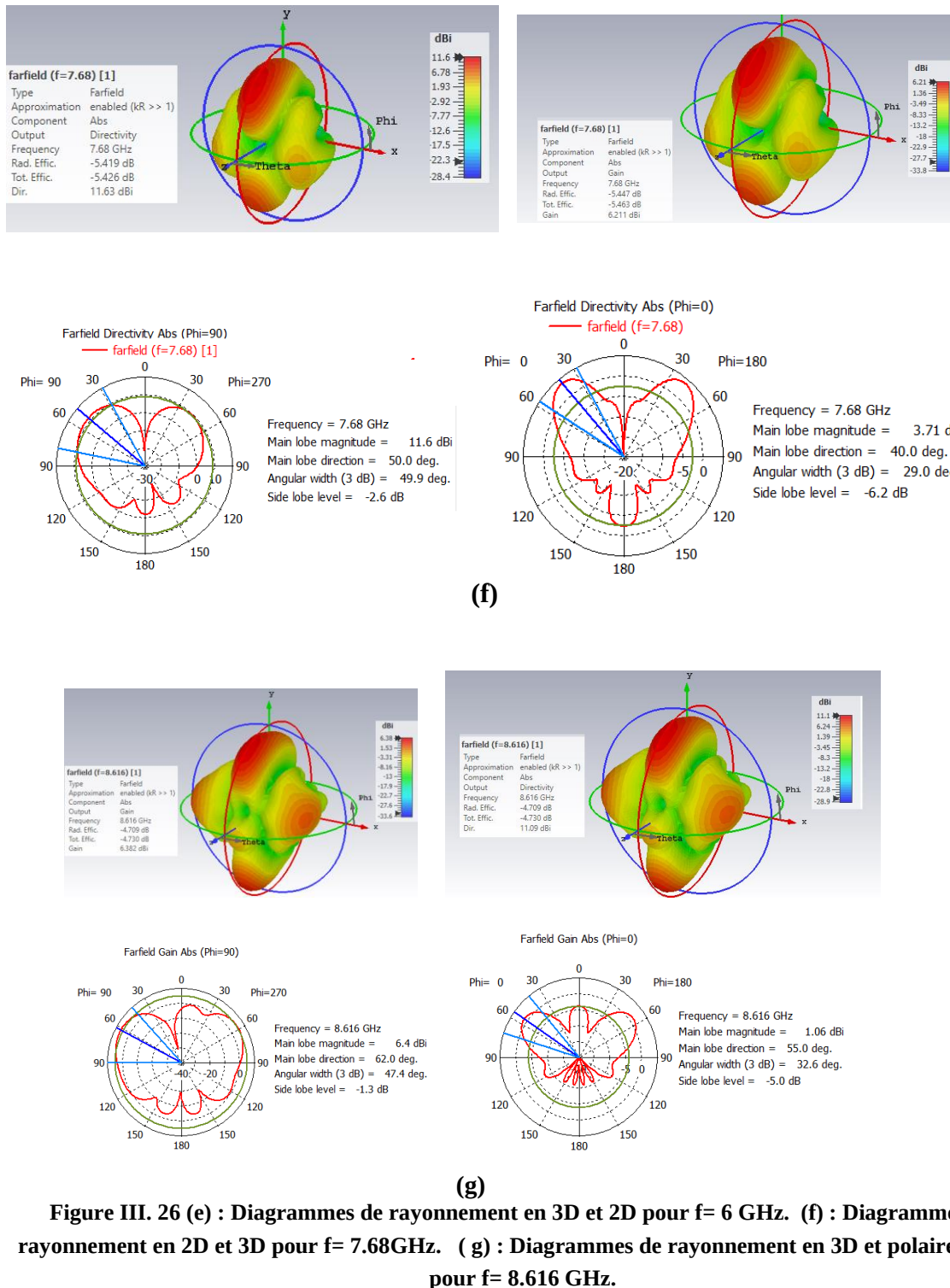
(d)

Figure III. 25 . (a) : Coefficient de réflexion du réseau d'antennes à 4 éléments de la 1ière itération. (b) : Rapport d'onde stationnaire. (c) : Partie réelle de l'impédance d'entrée de l'antenne. (d) : Gain de l'antenne.

Les résultats obtenus montrent que le réseau d'antennes à un fonctionnement multi-bandes avec trois pics de coefficients de réflexion inférieurs aux -28.46 dB et -28.87dB et -23.21dB aux fréquences de résonances 6 GHz et 7.68GHz et 8,616GHz selon les trois bandes satellitaires C et X. Les largeurs de bandes passantes sont autours de 737 MHz et 614 MHz et 715MHz. Le taux d'onde stationnaire VSWR est inférieur à 2 et l'impédance d'entrée est autour de 50 Ohms aux deux fréquences de résonances, ce qui montre que la structure est bien adaptée aux fréquences désirées. Le gain de l'antenne est de l'ordre de 8.29dB et 6.21dB et 6.4 dB respectivement.



(e)



Les diagrammes de rayonnement en présentation polaires sont illustrés dans les figures ci-dessus. Nous remarquons que le rayonnement est quasi omnidirectionnel pour le plan H ($\Phi = 90^\circ$) et presque directif pour le plan E ($\Phi = 0^\circ$) pour les trois fréquences de résonances 6 GHz, 7.68 GHz et 8,616GHz. Ces diagrammes en 2D sont vérifiés sur les diagrammes de rayonnement en 3D pour chaque fréquence.

III.8. Réseau d'antenne à huit éléments de la première itération

Pour le réseau d'antennes à huit éléments, le principe de calcul du dispositif d'alimentation du diviseur de puissance est le même que celui des réseaux à 2 et 4 éléments. La figure III.27 montre la structure du réseau d'antennes à 8 éléments.

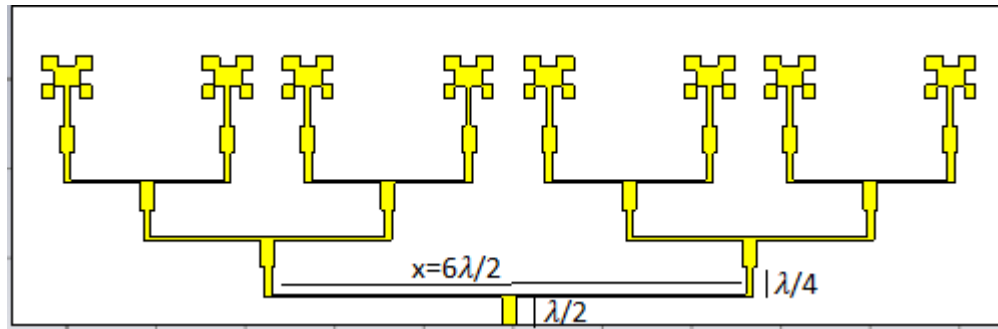


Figure III. 27: Géométrie du réseau d'antennes à huit éléments.

III.8.1. Etude Paramétrique

III.8.1.1. Variation de la longueur x

Le meilleur résultat obtenu c'est pour $x=17\text{mm}$ d'après la figure III.28, tel que le coefficient de réflexion est inférieur à -26 dB à la fréquence choisie 6 GHz.

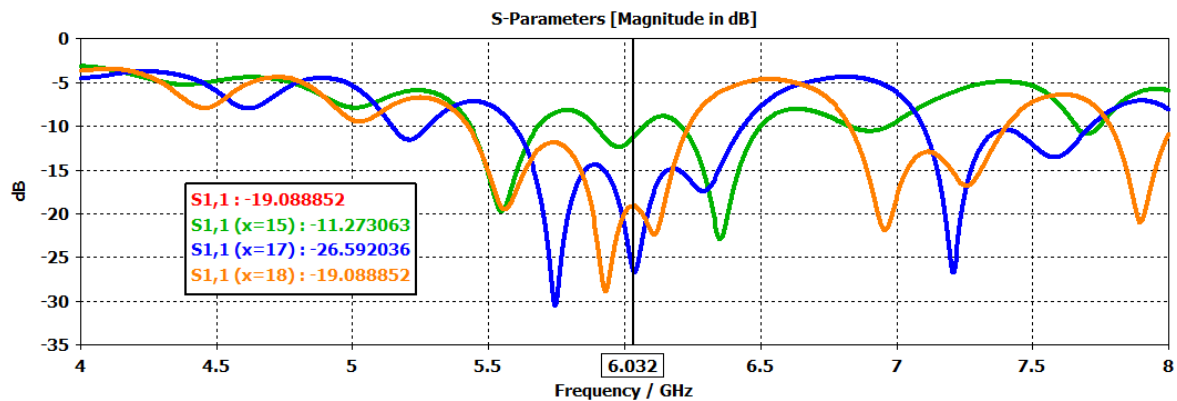
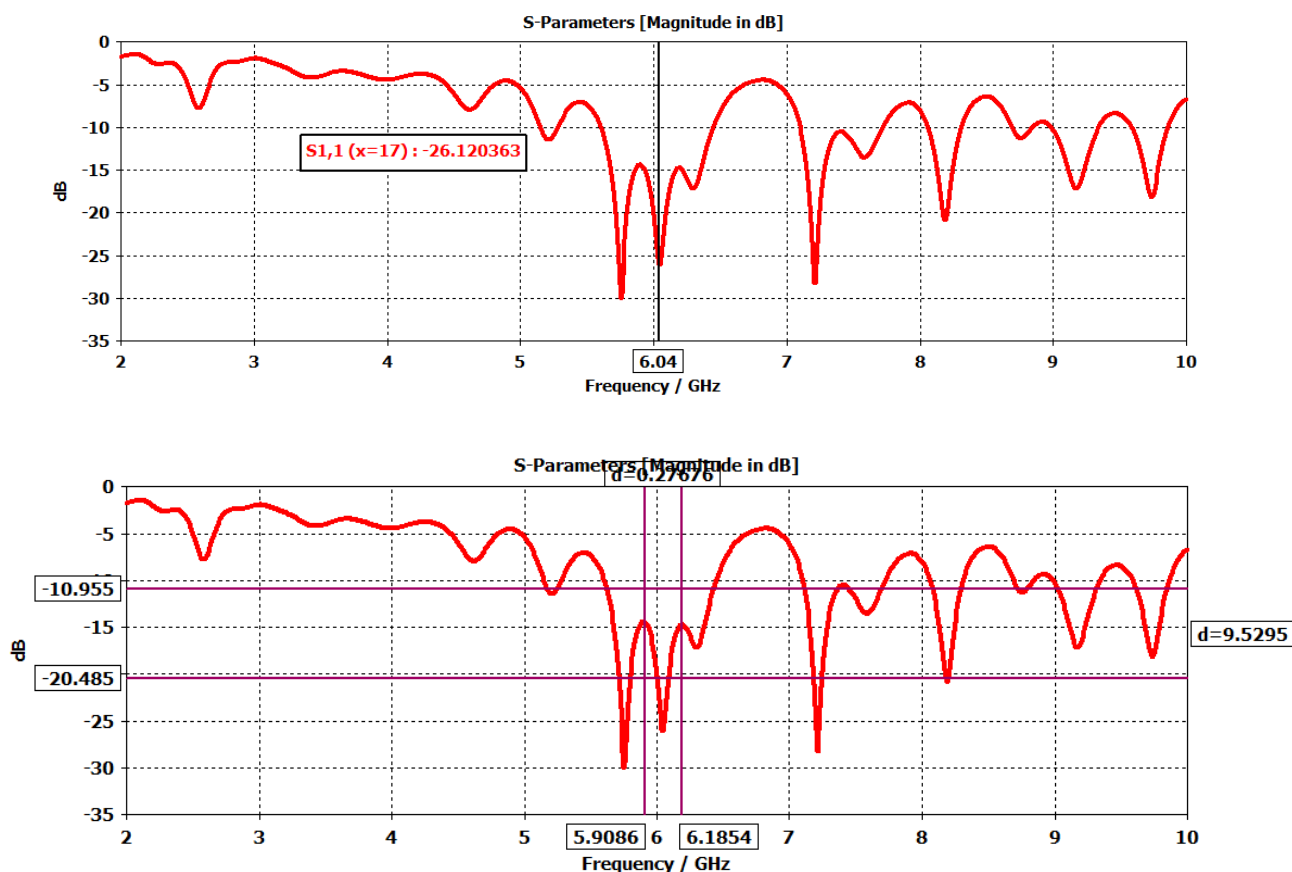


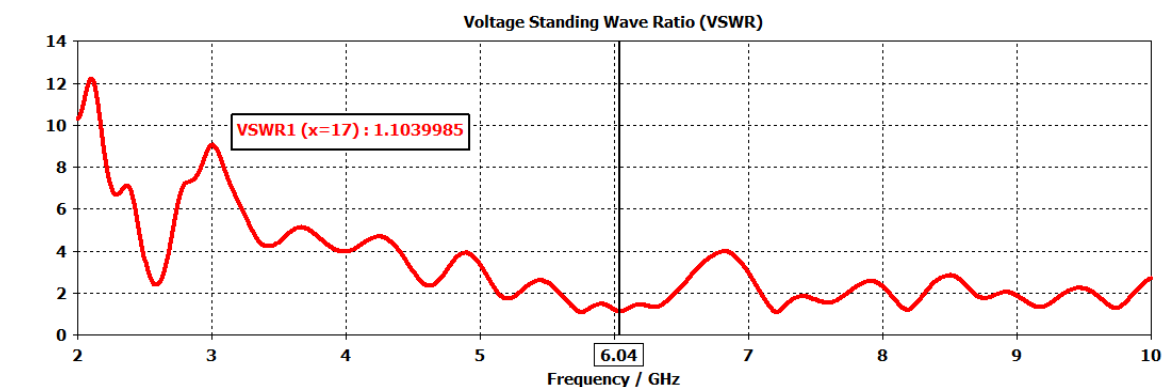
Figure III. 28: Variation de la longueur x du diviseur de puissance.

III.8.2. Résultats de simulation

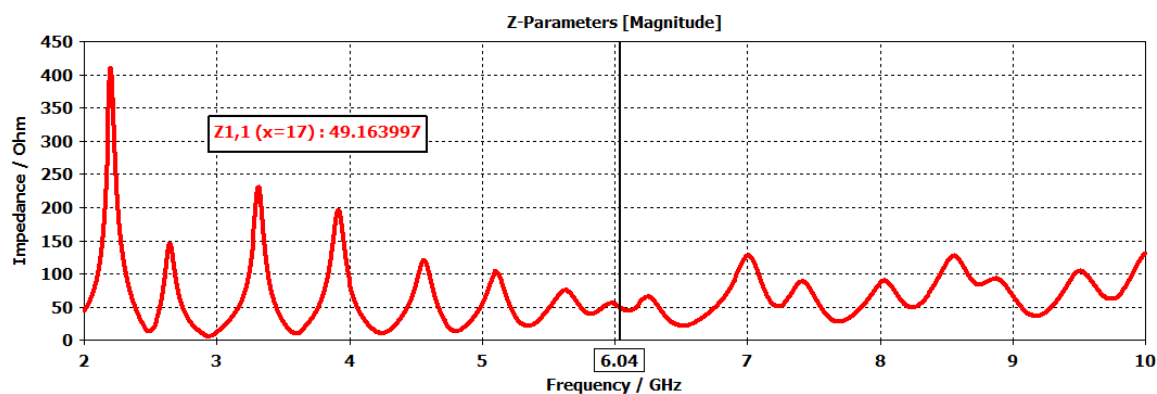
Les résultats obtenus du réseau d'antennes à 8 éléments à base de l'antenne fractale à la 1^{ère} itération sont donnés par la figure III.29. ((a), (b), (c) et (d)).



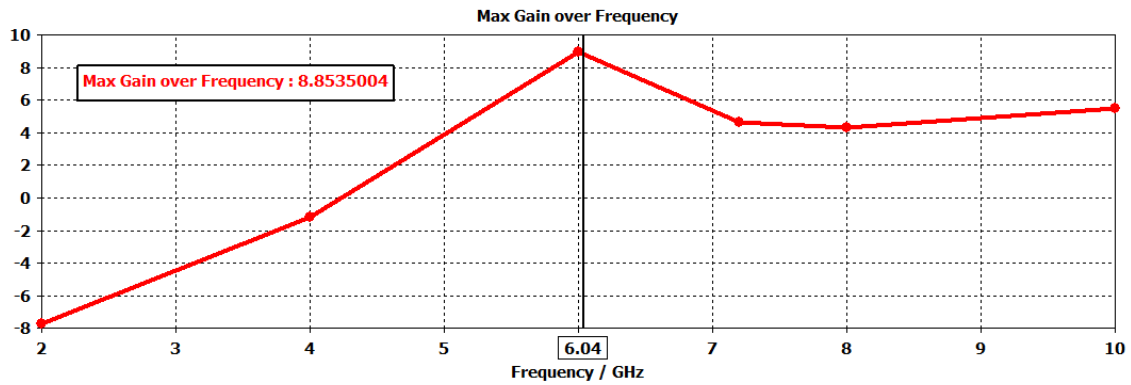
(a)



(b)



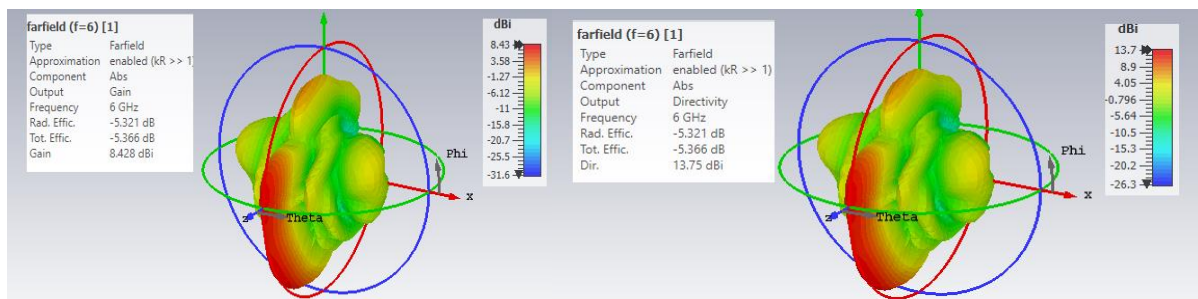
(c)

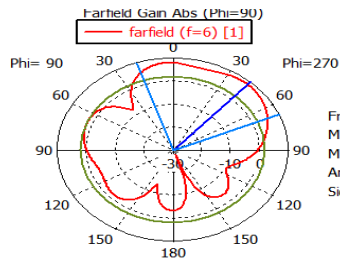


(d)

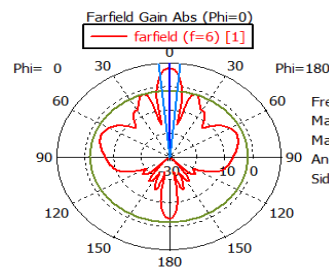
Figure III. 29 (a) : Coefficient de réflexion du réseau d'antennes à 8 éléments de la 1ière itération. (b) : Rapport d'onde stationnaire. (c) : Partie réelle de l'impédance d'entrée de l'antenne. (d) : Gain de l'antenne.

Nous remarquons que le réseau d'antennes à 8 éléments couvre deux cinq bandes de fréquences différentes autour de 6 GHz, 7.2 GHz, 8.19 GHz, 9.17GHz et 9.73 GHz avec des puissances réfléchies nulles inférieurs à -26.12 dB, -20.82dB, -17.15dB et -18.17dB pour les cinq pics et des bandes passantes d'environ 276 MHz, 423 MHz, 535MHz, 526 MHz et 507MHz respectivement. Nous pouvons de même observer cette adaptation sur le taux d'onde stationnaire où le VSWR est au-dessous de 2 et la partie réelle de l'impédance d'entrée est au voisinage de 50 Ohms pour les cinq fréquences de résonances. Les gains de cette structure multi-bandes sont généralement élevés qui sont de l'ordre de 9.20dB et 3.92 dB et 4.08dB et 5.78 dB et 6.08dB respectivement suivant les deux applications satellitaires.



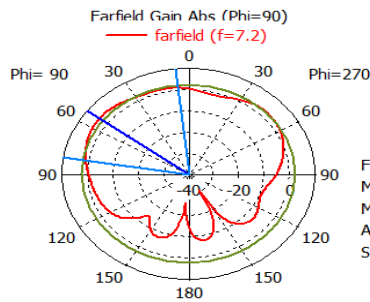
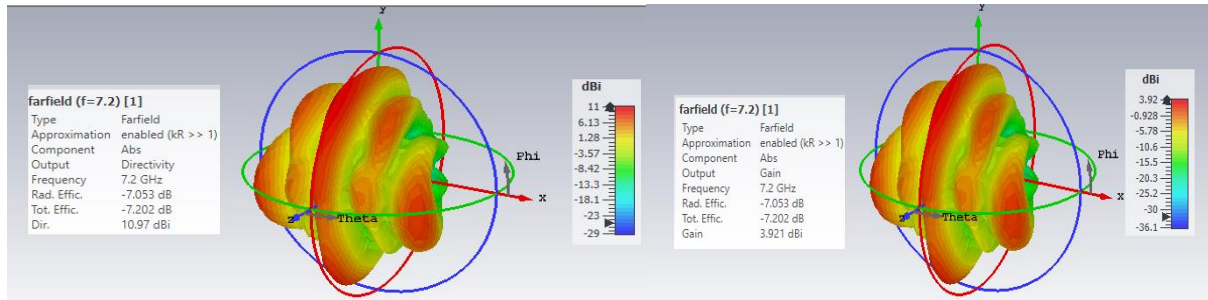


Frequency = 6 GHz
Main lobe magnitude = 8.44 dBi
Main lobe direction = 42.0 deg.
Angular width (3 dB) = 85.5 deg.
Side lobe level = -6.6 dB

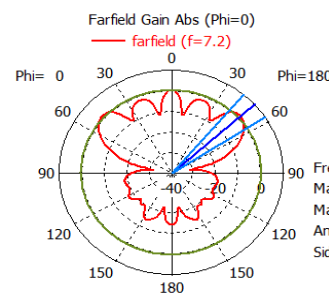


Frequency = 6 GHz
Main lobe magnitude = 7.9 dBi
Main lobe direction = 0.0 deg.
Angular width (3 dB) = 11.1 deg.
Side lobe level = -9.6 dB

(e)

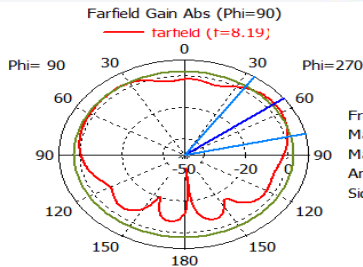
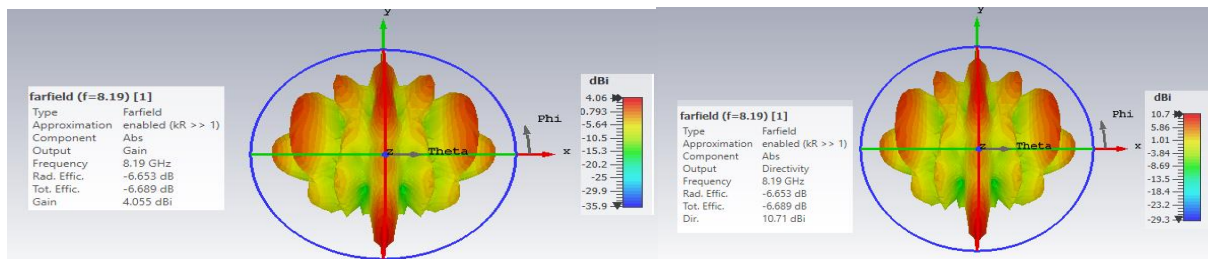


Frequency = 7.2 GHz
Main lobe magnitude = 3.95 dBi
Main lobe direction = 53.0 deg.
Angular width (3 dB) = 74.6 deg.
Side lobe level = -1.6 dB

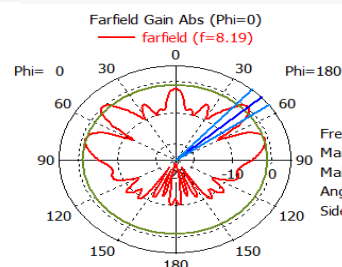


Frequency = 7.2 GHz
Main lobe magnitude = 1.32 dBi
Main lobe direction = 48.0 deg.
Angular width (3 dB) = 16.7 deg.
Side lobe level = -1.1 dB

(f)



Frequency = 8.19 GHz
Main lobe magnitude = 4.08 dBi
Main lobe direction = 53.0 deg.
Angular width (3 dB) = 43.4 deg.
Side lobe level = -1.1 dB



Frequency = 8.19 GHz
Main lobe magnitude = 0.235 dBi
Main lobe direction = 48.0 deg.
Angular width (3 dB) = 12.8 deg.
Side lobe level = -1.2 dB

(g)

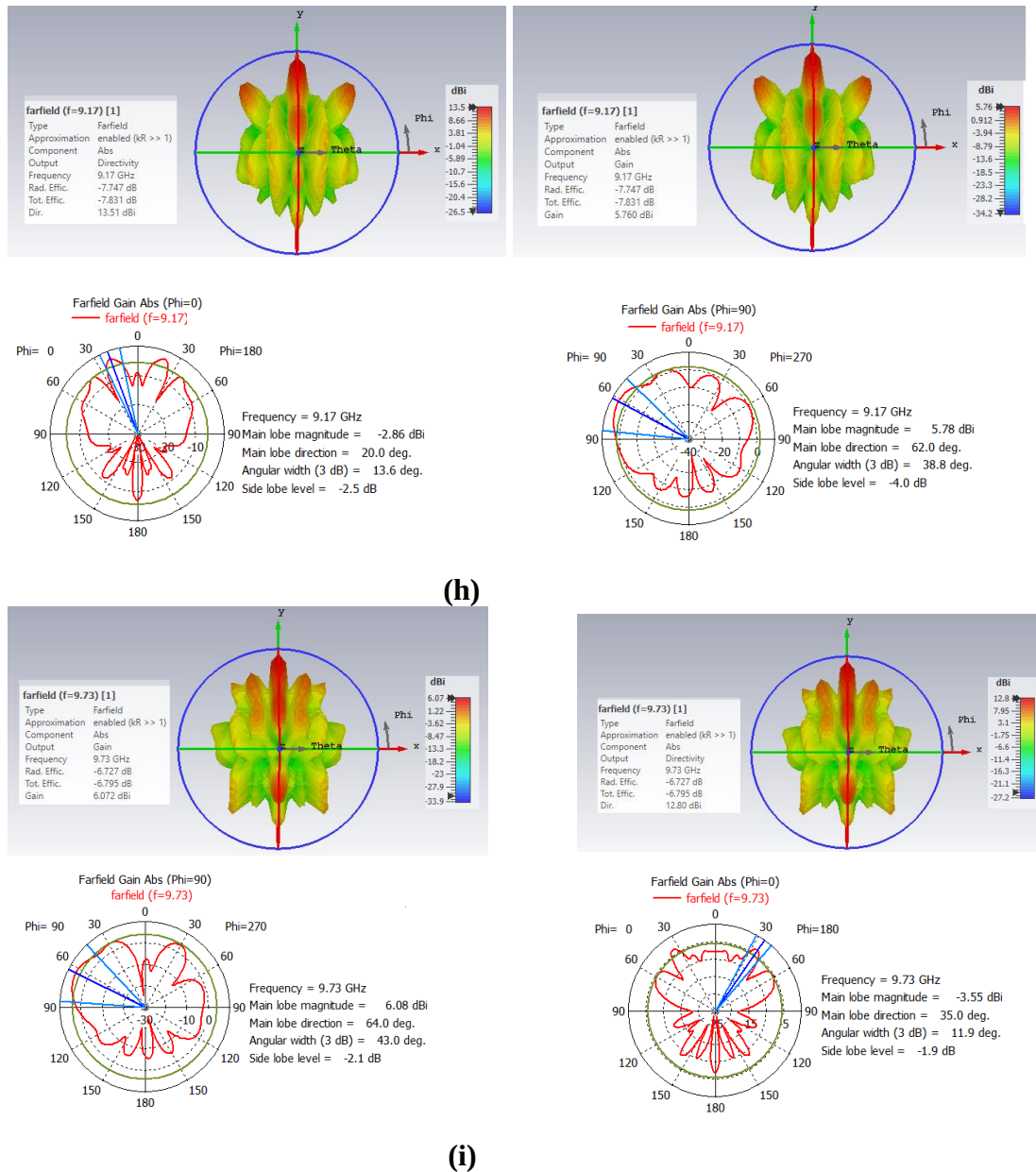


Figure III. 30 : Diagrammes de rayonnement en 3D (Gain + Directivité) et en 2D (e) pour $f=6$ GHz, (f) pour $f=7.2$ GHz, (g) pour $f=8.19$ GHz, (h) pour $f=9.17$ GHz et (i) pour $f=9.73$ GHz.

Selon les figures des diagrammes de rayonnement en deux dimensions pour le plan H ($\Phi = 90^\circ$) sont presque identiques avec un rayonnement omnidirectionnel. Pour le plan H ($\Phi = 0^\circ$), les diagrammes de rayonnements sont composés de plusieurs lobes d'ouvertures différentes, ce qui donne un rayonnement presque directif pour les cinq fréquences de résonances 6GHz, 7.2GHz, 8.19GHz, 9.17GHz et 9.73 GHz.

Les diagrammes de rayonnement en 3D réalisés par le logiciel CST sont présentés ci-dessus afin de mieux comprendre le comportement du rayonnement de l'antenne dans l'espace.

L'antenne offre une directivité de 13.7 dBi, 11 dBi, 10.7dBi, 13.5dBi et 12.8dBi, pour les fréquences 6 GHz, 7.2GHz, 8.19GHz, 9.17GHz et 9.73 GHz respectivement.

III.9. Réseau d'antennes à deux éléments de la deuxième itération

La structure du réseau d'antennes à deux éléments à base de l'antenne conventionnelle à la 2^{ème} itération est représentée sur la figure III.31.

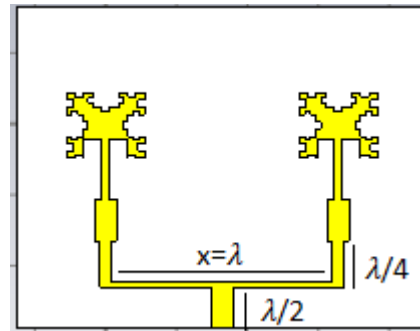


Figure III. 31: Géométrie du réseau d'antennes à deux éléments.

III.9.1. Etudes paramétriques

III.9.1.1. Variation de la longueur x du diviseur de puissance

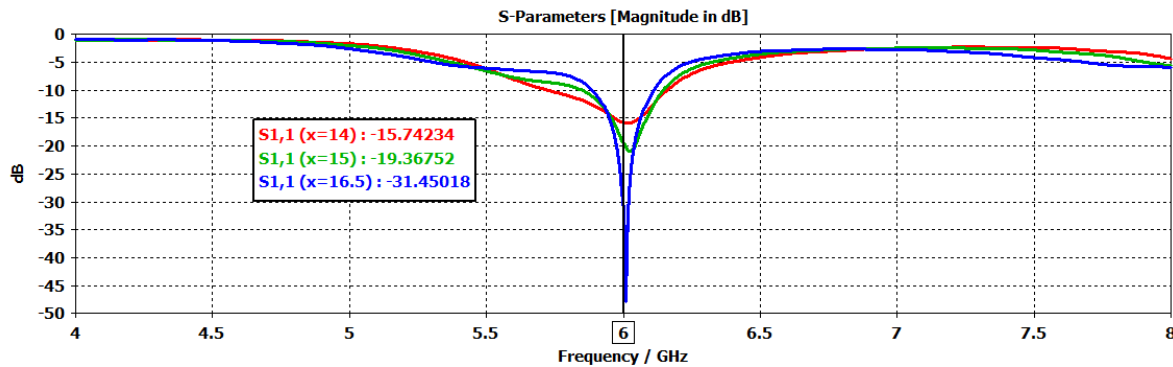


Figure III. 32: Variation de la longueur x du réseau à deux éléments.

On observe d'après le graphe ci-dessus que l'augmentation de la longueur x ramène à une meilleure adaptation. Le coefficient de réflexion atteint une valeur inférieure à -31.45 dB pour x=16.5mm à la fréquence de travail.

III.9.1.2. Variation de longueur d'alimentation L_a

La diminution de la longueur d'alimentation « L_a » engendre une réduction importante de la puissance réfléchie selon la figure III.33.

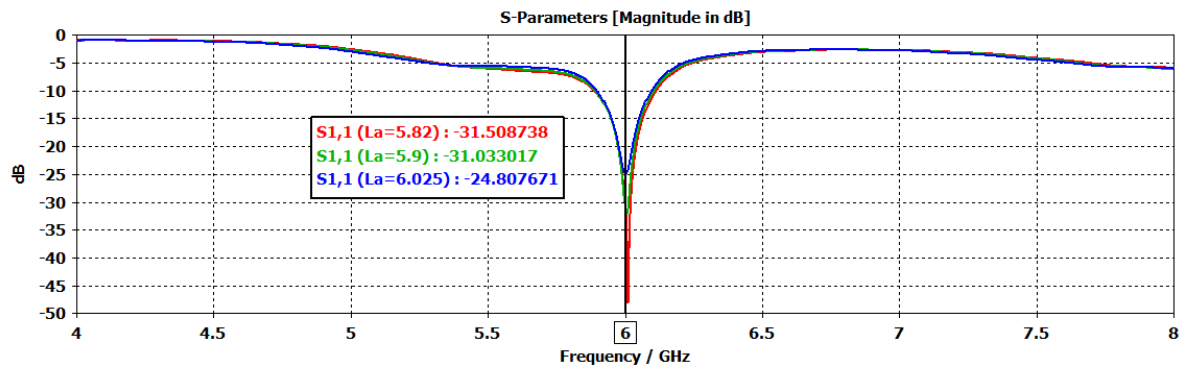
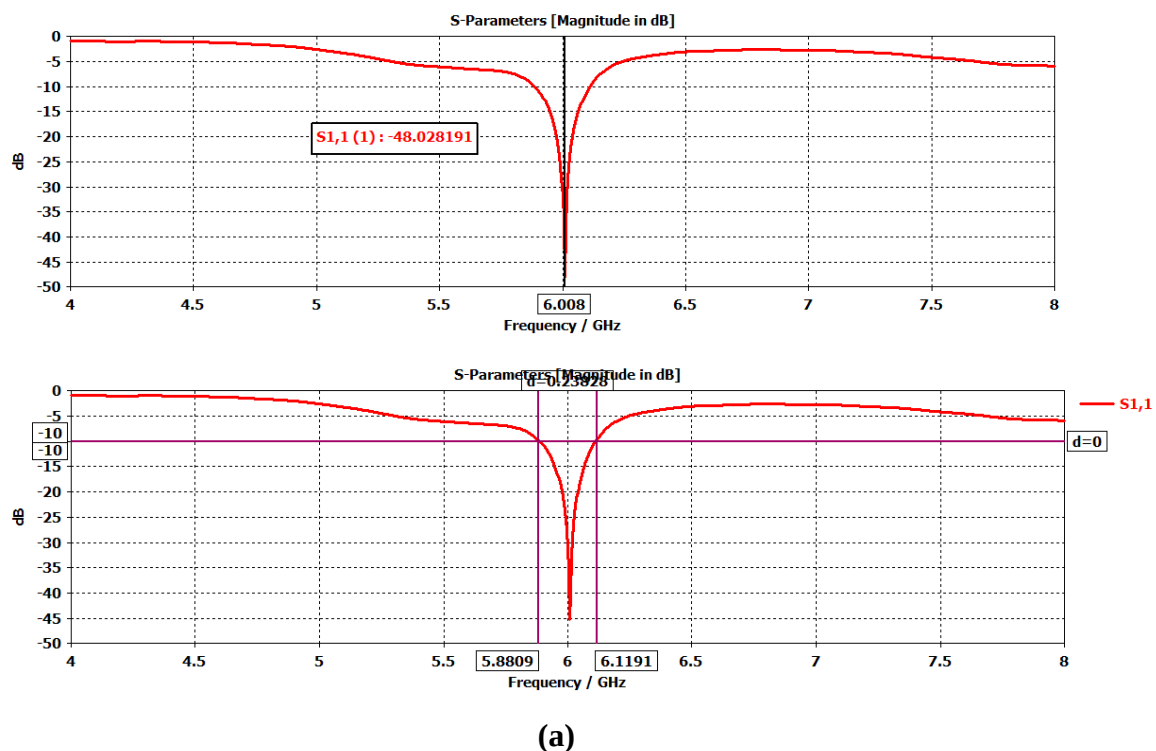


Figure III. 33: Variation de longueur d'alimentation L_a du réseau à deux éléments.

III.9.2. Résultats de simulation

Sur les figures III.34. ((a), (b), (c) et (d)), on représente le coefficient de réflexion, le rapport d'onde stationnaire, l'impédance d'entrée et le gain du réseau d'antennes à 2 éléments à base de la géométrie fractale à la 2^{ème} itération.



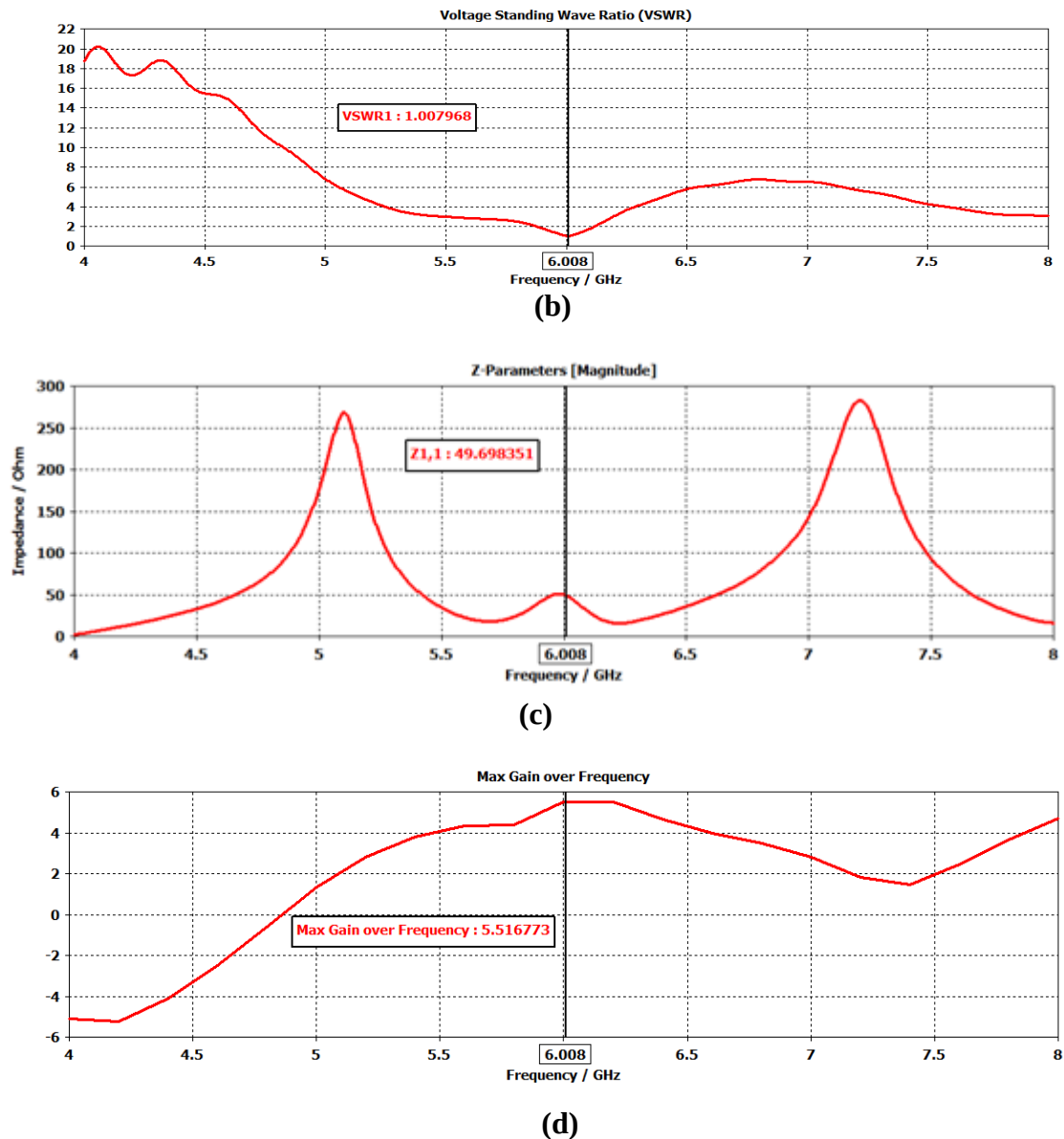
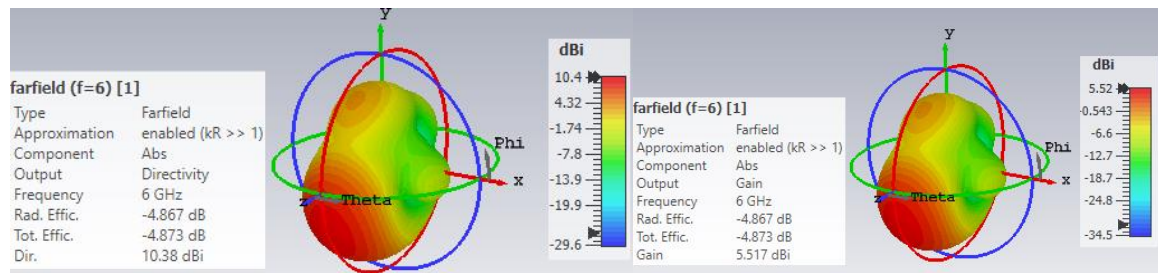
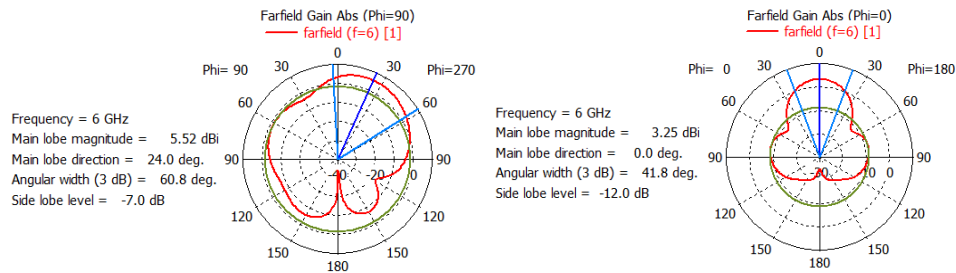


Figure III. 34 (a) : Coefficient de réflexion du réseau d'antennes à 8 éléments de la 1ère itération. (b) : Rapport d'onde stationnaire. (c) : Partie réelle de l'impédance d'entrée de l'antenne. (d) : Gain de l'antenne.

On note d'après la figure III.34. (a) que le coefficient de réflexion est inférieur à $-45,25\text{dB}$ et la bande passante est de l'ordre de 230MHz à la fréquence désirée 6GHz . On remarque aussi que le taux d'onde stationnaire est égale à $1,01$ et la partie réelle de l'impédance d'entrée est d'environ $49,75\text{ Ohms}$. Ce qui implique que le réseau à deux éléments de la deuxième itération est parfaitement adapté. Le gain de ce réseau est autour de $5,54\text{dB}$. Pour augmenter plus le gain, on va créer le réseau d'antennes à 4 éléments.



(e)



(f)

Figure III. 35 (e) : Diagrammes de rayonnement en 3D (Gain + Directivité). (f) : Diagrammes de rayonnement polaires en 2D.

On peut constater que le diagramme de rayonnement en 2D à la fréquence désirée pour le plan E (Phi = 0°) est composé d'un lobe central et deux petits lobes sur les côtés du lobe principal avec des ouvertures différentes, ce qui engendre un rayonnement presque directif. Tandis que, pour le plan H (Phi=90°), le rayonnement est omnidirectionnel.

Les diagrammes de rayonnement polaires en 2D sont généralement vérifiés sur le diagramme de rayonnement en 3D.

III.10. Réseau d'antenne à quarte élément de la deuxième itération

La structure du réseau d'antennes à quarte éléments est représentée sur la figure III.35.

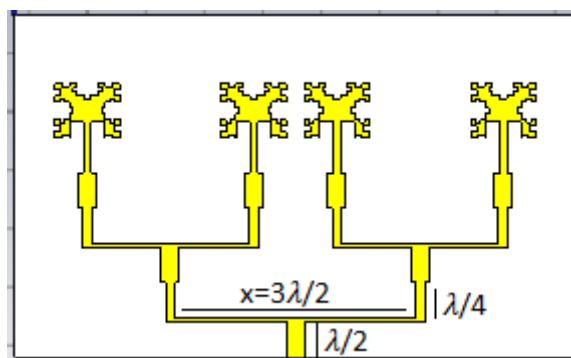


Figure III. 36: Géométrie de réseau d'antennes à quarte éléments.

III.10.1. Etude paramétrique

III.10.1.1. Variation de la longueur x

L'influence de la longueur x sur l'adaptation du réseau est présentée par la figure III.36. Nous remarquons que l'adaptation est réalisée pour une valeur $x=14.22\text{mm}$.

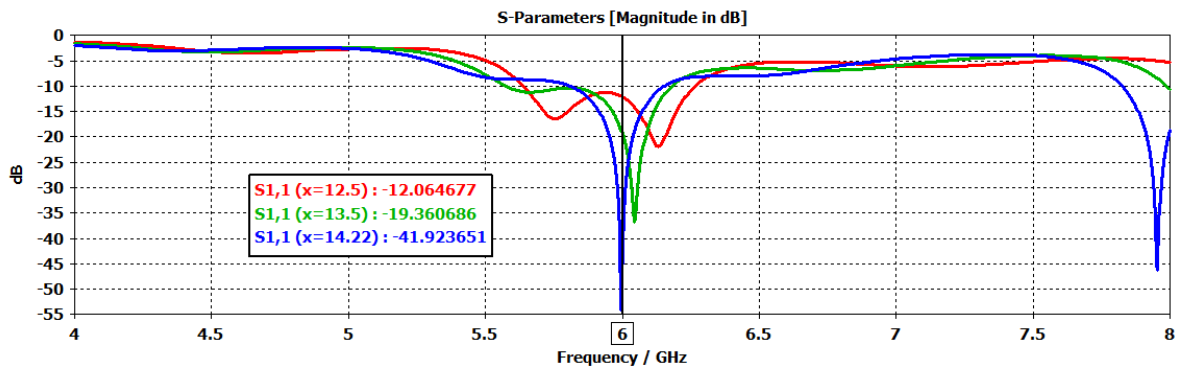
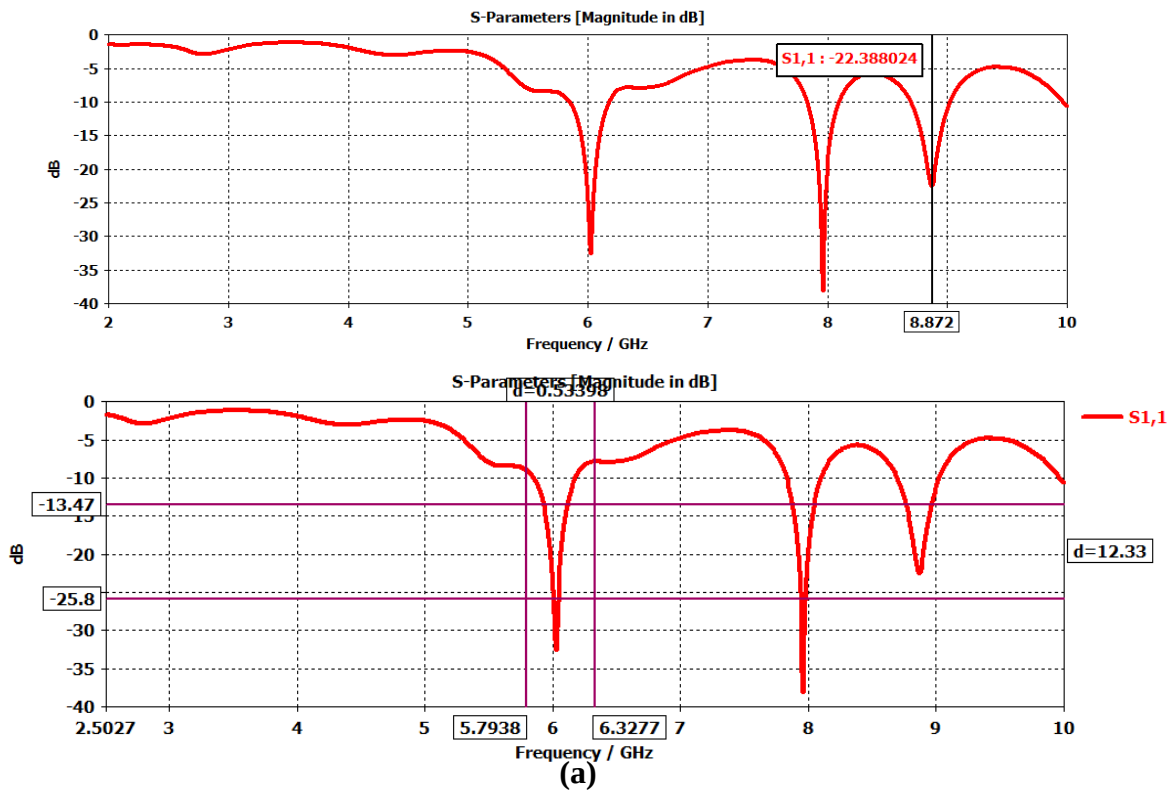


Figure III. 37: Variation de la longueur x du réseau à 4 éléments.

III.10.2. Résultats de simulation

Sur les figures III.37. ((a), (b), (c) et (d)), on représente le coefficient de réflexion, le rapport d'onde stationnaire, l'impédance d'entrée et le gain du réseau d'antennes à 4 éléments à base de la géométrie fractale à la 2^{ème} itération.



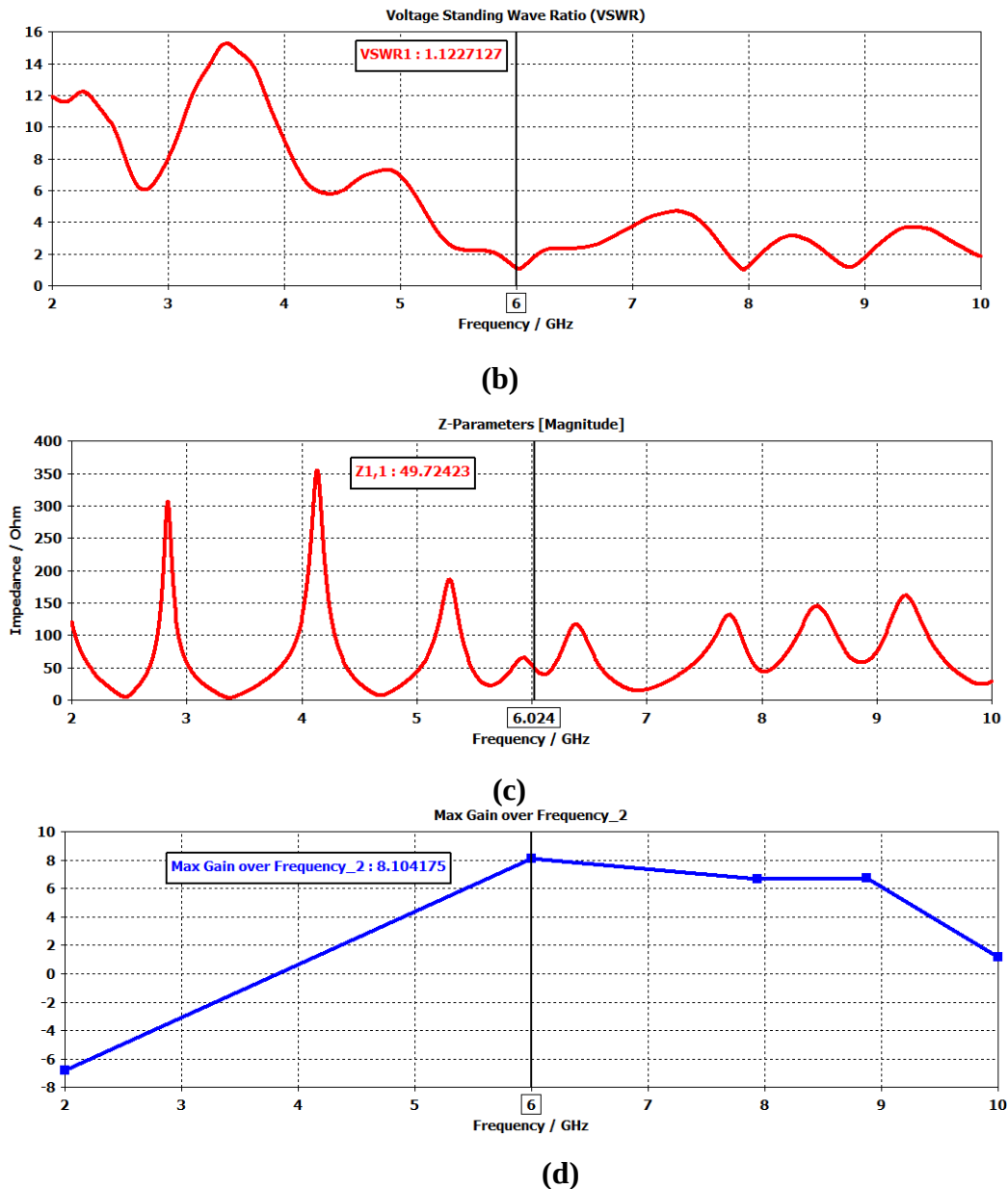
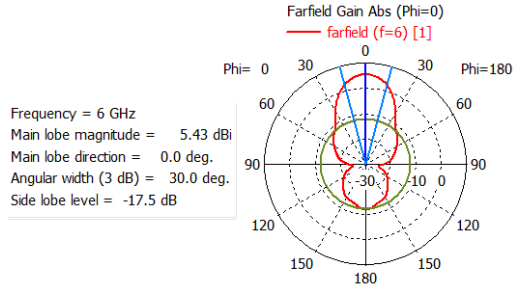
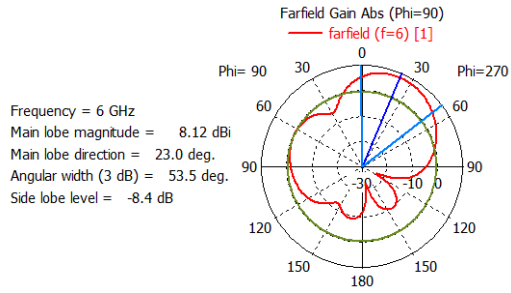
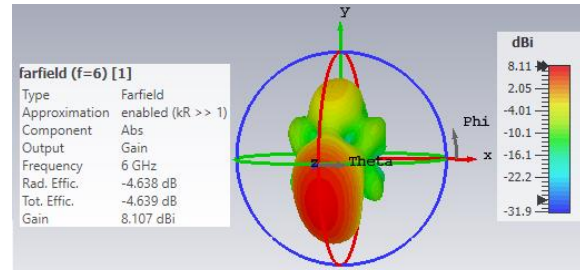
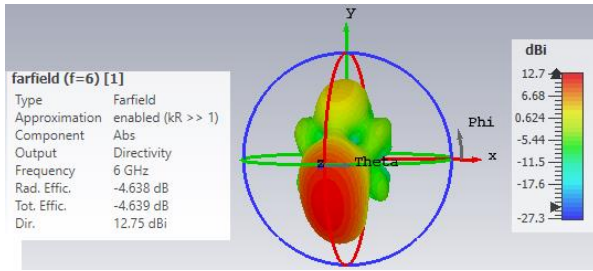
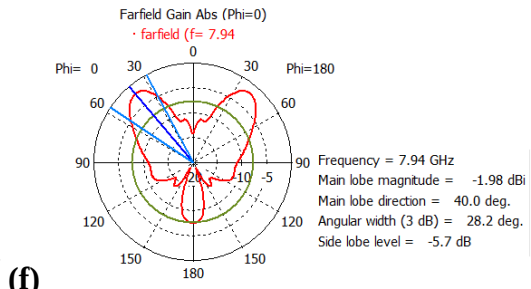
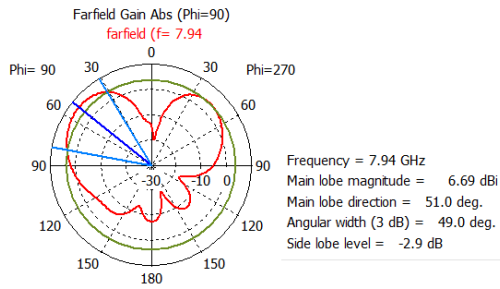
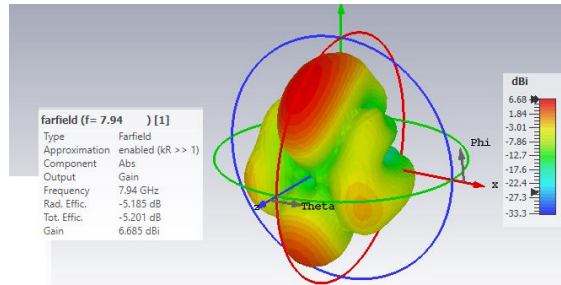
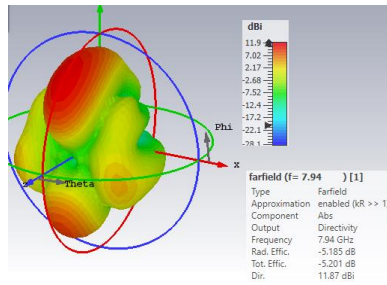


Figure III. 38 (a) : Coefficient de réflexion du réseau d'antennes à 4 éléments de la 2^{ème} itération. (b) : Rapport d'onde stationnaire. (c) : Partie réelle de l'impédance d'entrée de l'antenne. (d) : Gain du réseau d'antennes.

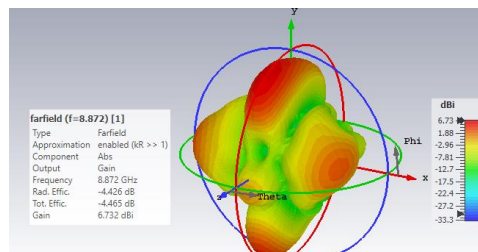
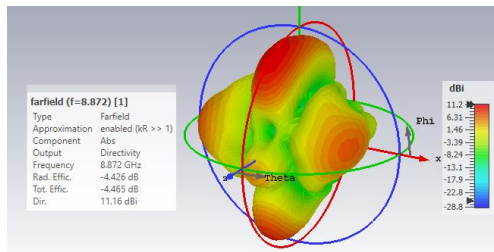
L'adaptation est bien réalisée aux trois fréquences de résonances 6GHz et 7.94 et 8.872 GHz ce qui donne un fonctionnement tri-bandes. Les largeurs de la bande passante sont calculées à -10dB, elles sont de l'ordre de 533MHz et 750MHz et 837MHz respectivement. Notamment, l'adaptation est vérifiée aussi par le taux d'onde stationnaire et l'impédance d'entrée du réseau d'antennes qui sont idéals pour notre cas. Les gains sont autour de 8.11 dB et 6.69 et 6.77dB pour les trois fréquences trouvées respectivement.

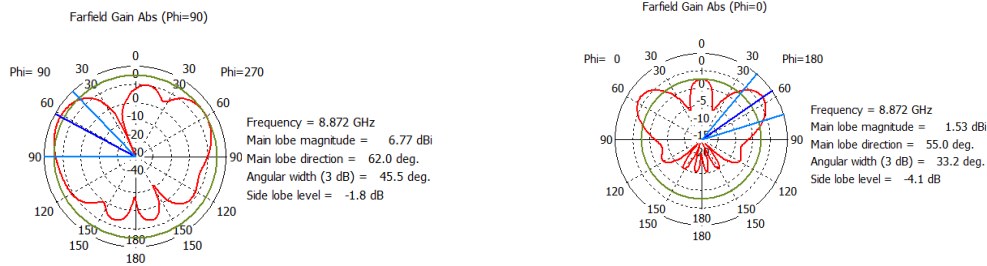


(e)



(f)





(g)

Figure III. 39 : Diagrammes de rayonnement en 3D (Gain +Directivité) et en 2D, (e) pour f=6 GHz, (h) pour f=7.94 GHz et (g) pour f=8.872 GHz.

Les diagrammes de rayonnement en 2D et en 3D du réseau d'antennes fractales à quatre éléments à la 2^{ème} itération sont très semblables aux diagrammes de rayonnement du réseau d'antennes à quatre éléments à la 1^{ière} itération pour les fréquences 6 GHz, 7.94GHz et 8.872 GHz.

Les directivités sont autour de 12.7 dBi, 11.9 et 11.2 dBi pour les trois fréquences désirées respectivement.

III.11. Réseau d'antennes à huit éléments de la deuxième itération

La structure du réseau d'antennes à huit éléments est représentée sur la figure III.39.

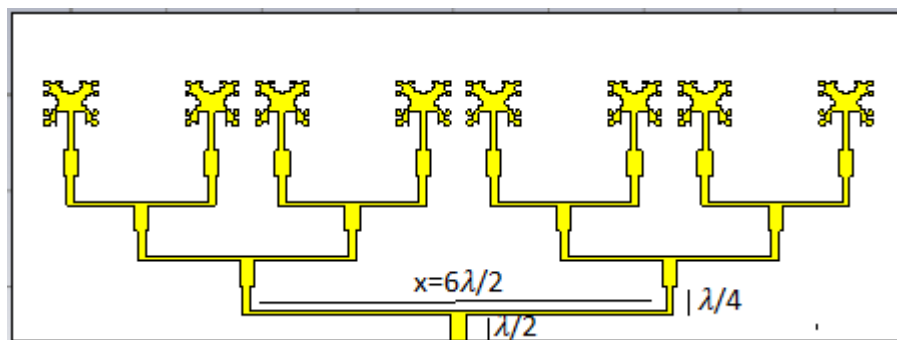


Figure III. 40: Géométrie de réseau d'antennes à huit éléments.

III.11.1. Etude paramétrique

III.11.1.1. Variation de la longueur x du réseau d'antennes à 8 éléments

La bonne adaptation obtenue pour cette étude correspond à la longueur $x=14.75\text{mm}$ où le coefficient de réflexion attient une valeur de -27.71 dB à la fréquence de résonance 6.09 GHz.

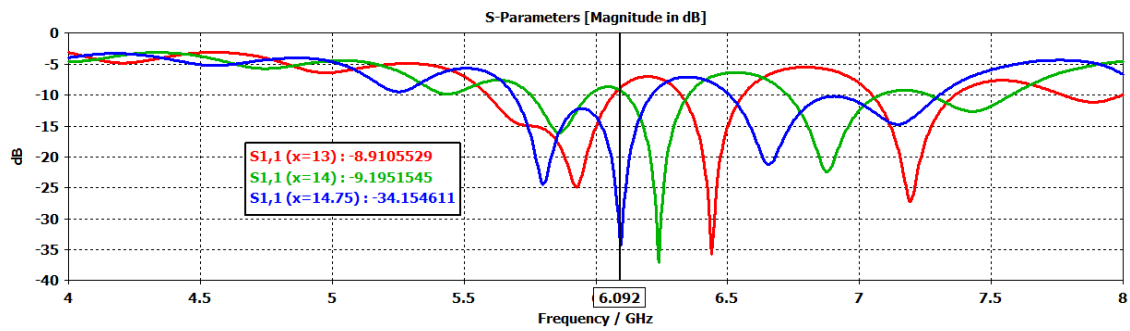
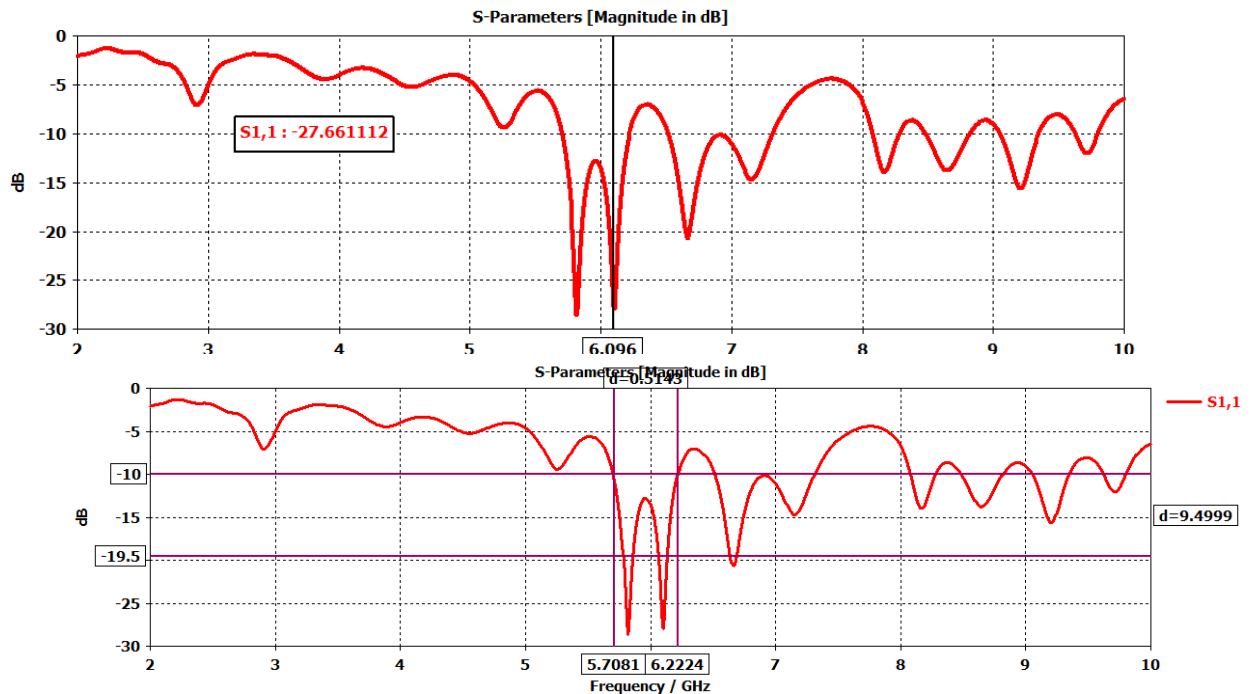


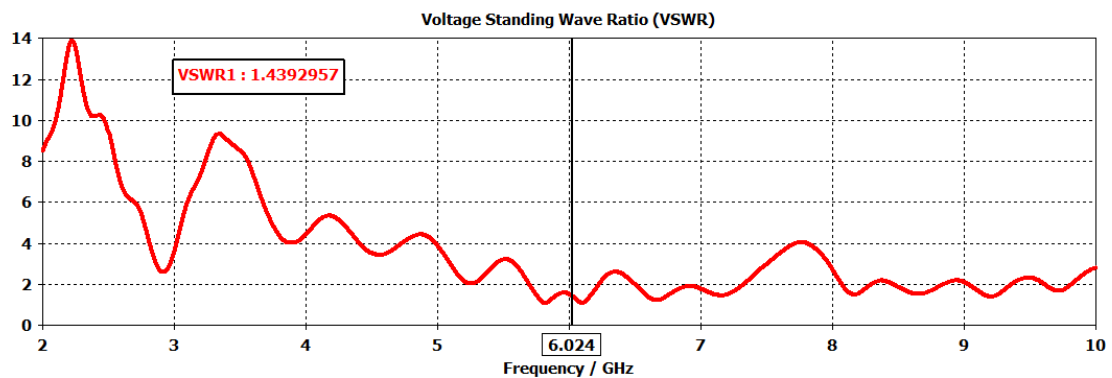
Figure III. 41: Variation de la longueur x du réseau à 8 éléments.

III.11.2. Résultats de simulation

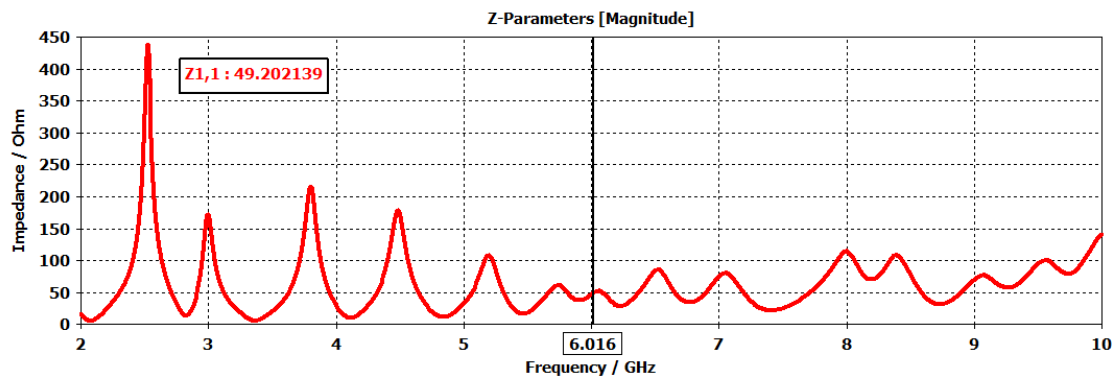
Les résultats obtenus après l'optimisation de la longueur x du réseau d'antennes à 8 éléments sont présentés ci-dessous.



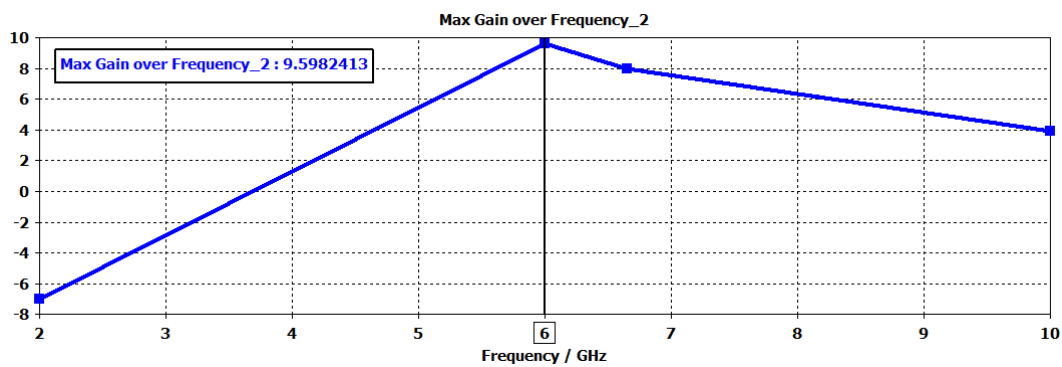
(a)



(b)



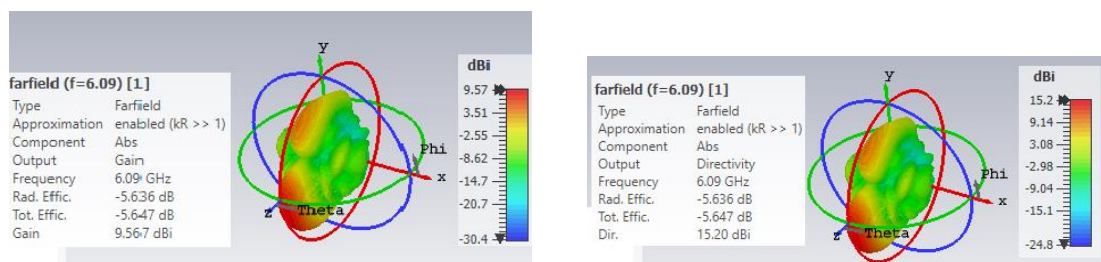
(c)

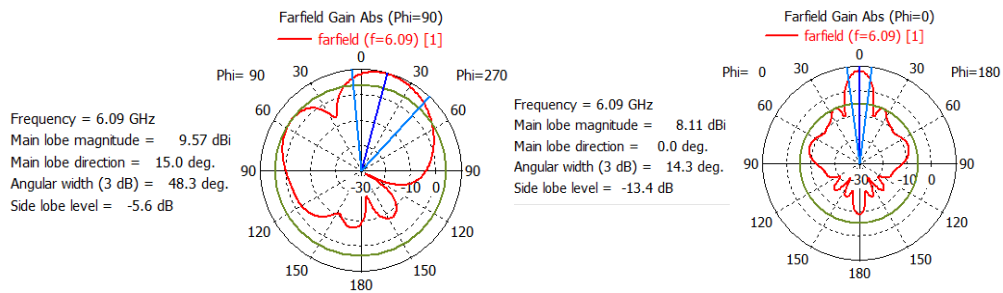


(d)

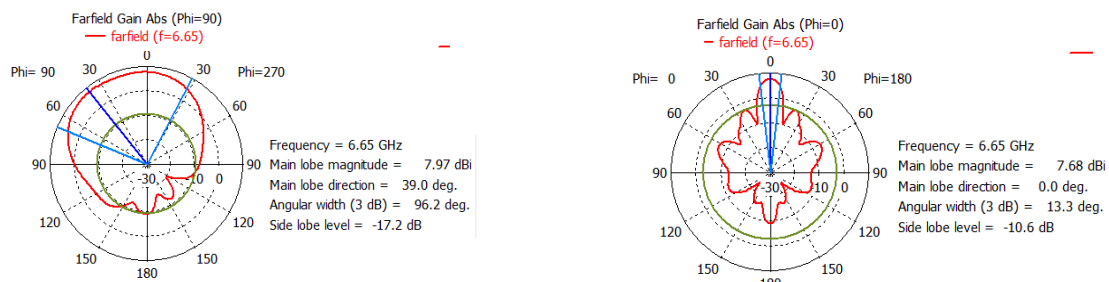
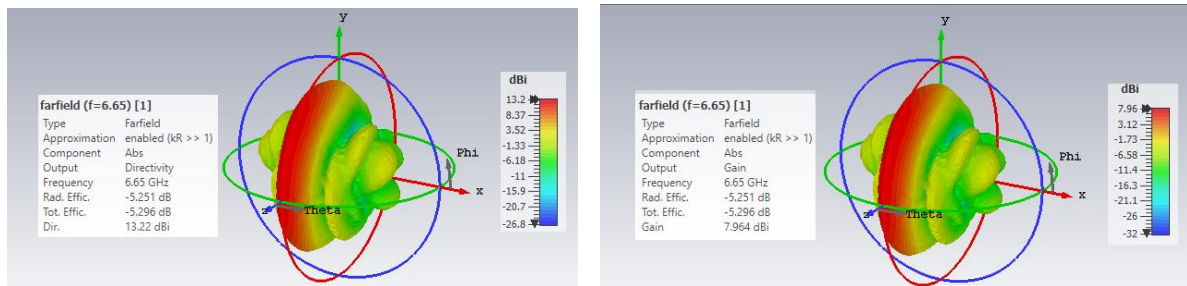
Figure III. 42 (a) : Coefficient de réflexion du réseau d'antennes à 8 éléments de la 2ième itération. (b) : Rapport d'onde stationnaire. (c) : Partie réelle de l'impédance d'entrée de l'antenne. (d) : Gain du réseau d'antennes.

Sur la figure III.41, nous montrons respectivement les pics du coefficient de réflexion qui sont autour de 27.66 dB, -20.58 dB, -13.92dB, -13.73dB et -15.60dB avec des bandes passantes égaux aux 514MHz, 423 MHz, 423 MHz, 517MHz et 573 MHz pour les cinq fréquences souhaitées 6.09 GHz, 6.65GHz, 8.16 GHz, 8.65 GHz et 9.20 GHz respectivement. Les performances du réseau sont aussi vérifiées par le taux d'onde stationnaire (VSWR) et l'impédance d'entrée de l'antenne. Les gains de la structure conçue sont 10.04dB, 7.96dB, 6.05dB, 5.45dB et 5.1dB pour les cinq fréquences trouvées respectivement.

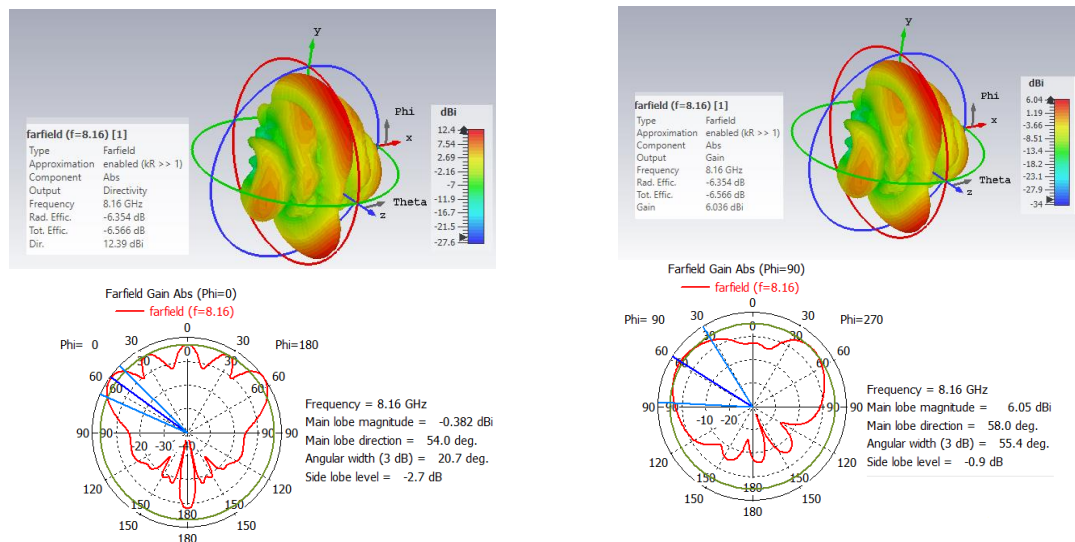




(e)



(f)



(g)

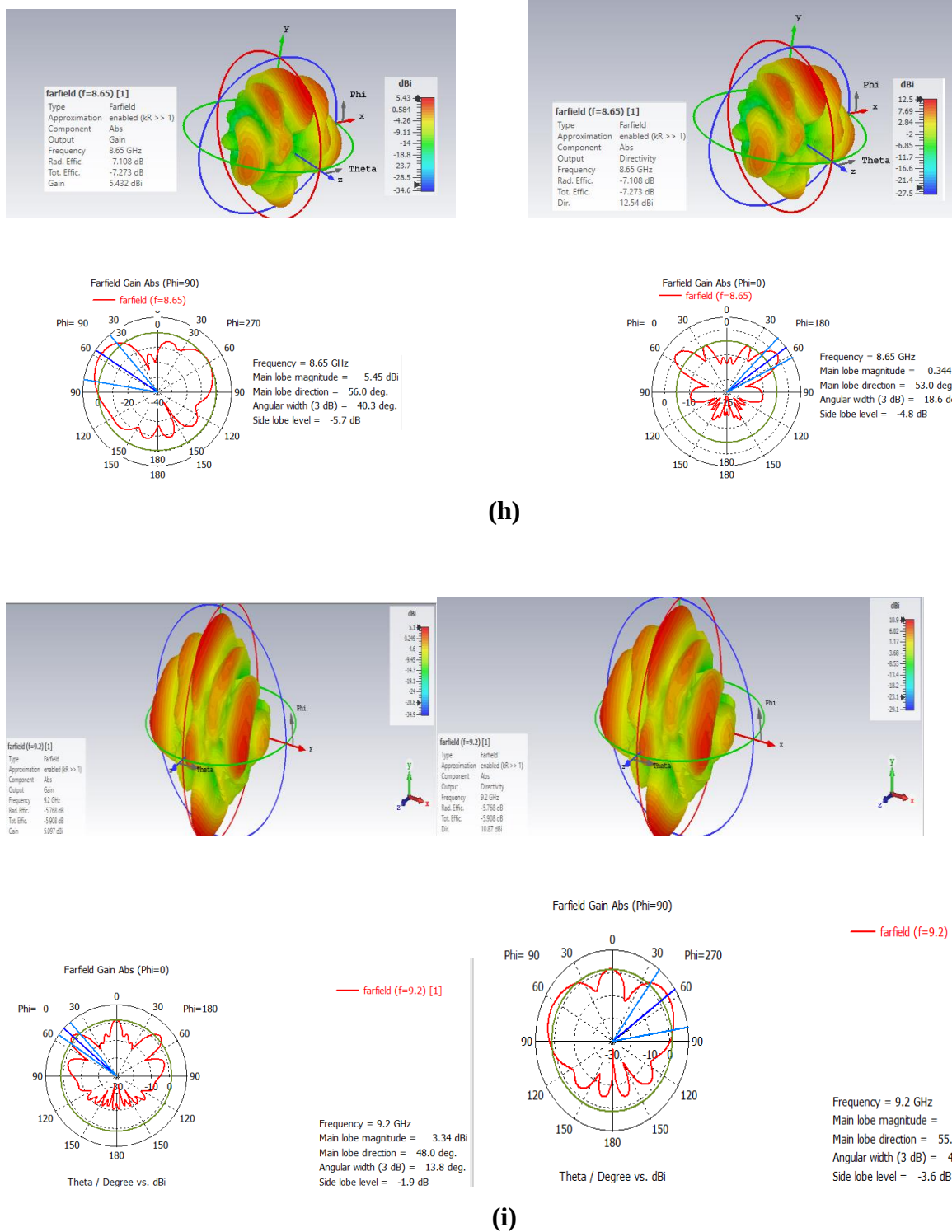


Figure III. 43: Diagrammes de rayonnement en 3D (Gain +Directivité) et en 2D, (e) pour f=6.09 GHz, (f) pour f=6.65 GHz et (g) pour f=8.16 GHz, (h) pour f=8.65 GHz et (i) pour f=9.20 GHz

Les diagrammes de rayonnement en 2D et en 3D du réseau d'antennes fractales à huit éléments à la 2^{ème} itération sont identiques aux diagrammes de rayonnement du réseau

d'antennes à huit éléments à la 1^{ière} itération pour les fréquences 6.09 GHz, 6.65GHz, 8.16 GHz, 8.65 GHz et 9.20 GHz respectivement.

Les directivités sont autours de 14.7 dBi, 13.2 dBi, 12.4dBi, 12.5dBi et 10.9dBi pour les fréquences désirées respectivement.

III.12. Réseau d'antennes à 4 éléments avec la technique DGS pour augmenter le Gain

La figure III.44 montre un réseau d'antennes à quatre éléments avec la technologie DGS dans lequel nous insérons des fentes de formes rectangulaires sur le plan de masse.

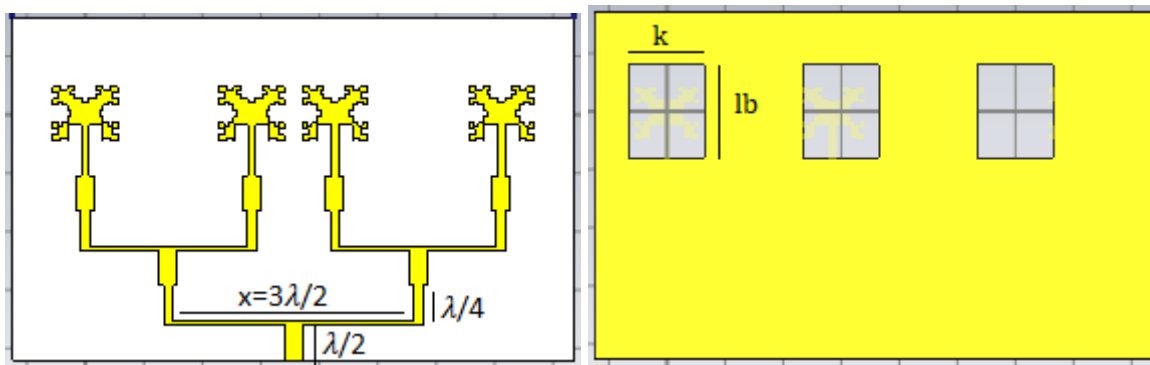


Figure III. 44 : Réseau d'antenne à quatre éléments avec la technique DGS.

III.12.1. Etude paramétrique

III.12.1.1. Variation de la largeur du fente(k)

Le paramètre k varie de 4 mm à 6.5 mm. L'augmentation de ce paramètre conduit à une diminution de l'adaptation.

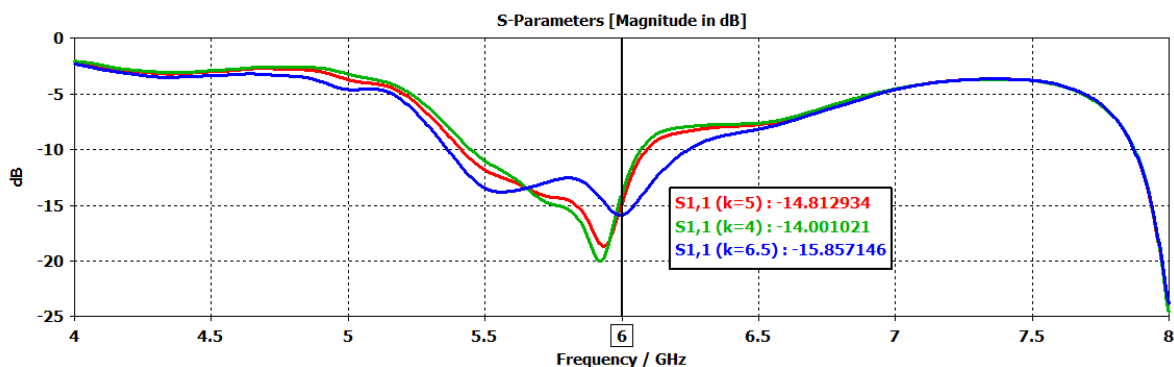


Figure III. 45: Variation de la largeur du fente k.

III.12.1.2. Variation de la longueur du fente (lb)

La longueur du fente (lb) varie entre 5 mm et 8 mm. L'augmentation de ce paramètre induit à une réduction de l'adaptation.

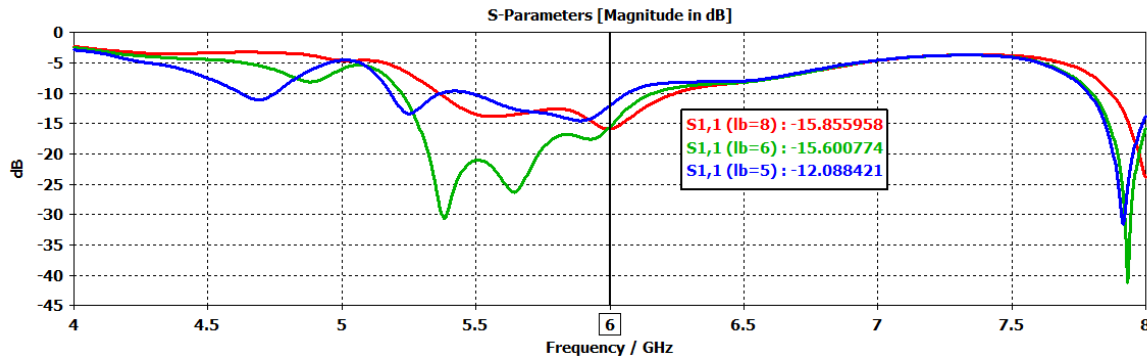
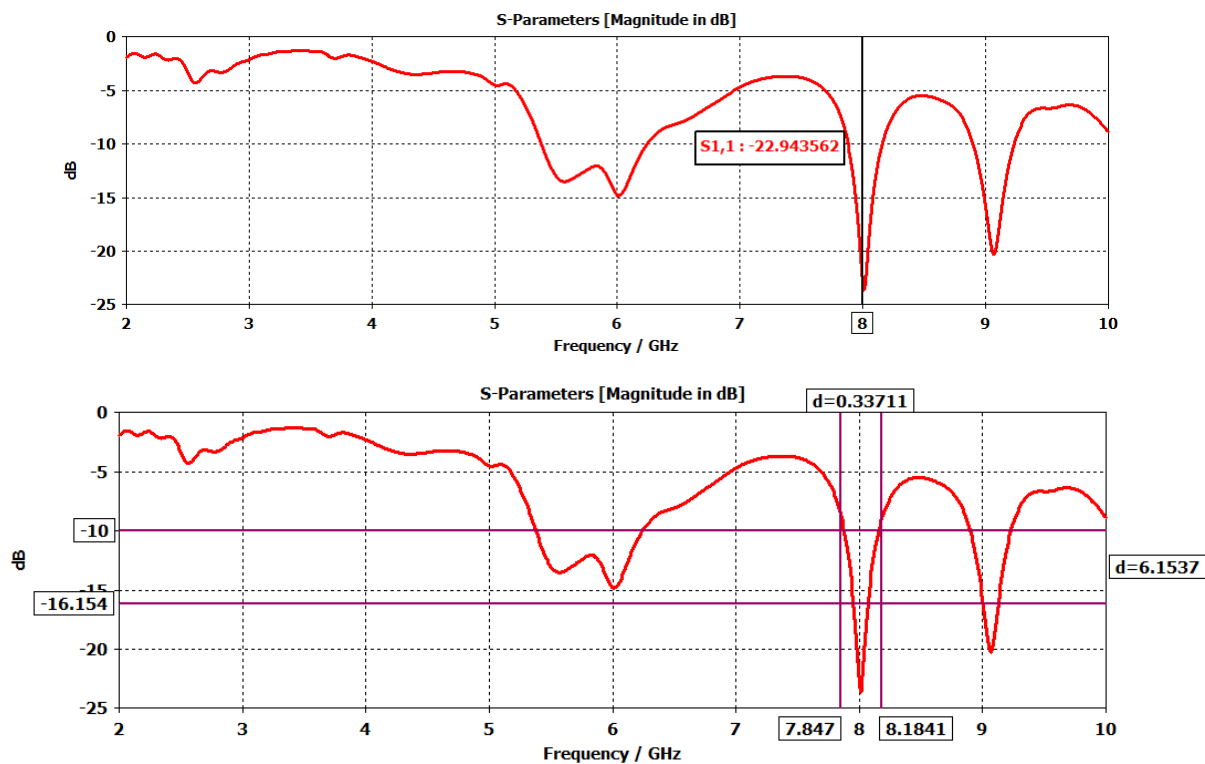


Figure III. 46: Variation de la longueur du fente (lb).

III.12.2. Résultats de simulation

Les résultats trouvés après l'études paramétriques sont illustrés par les figures suivantes :



(a)

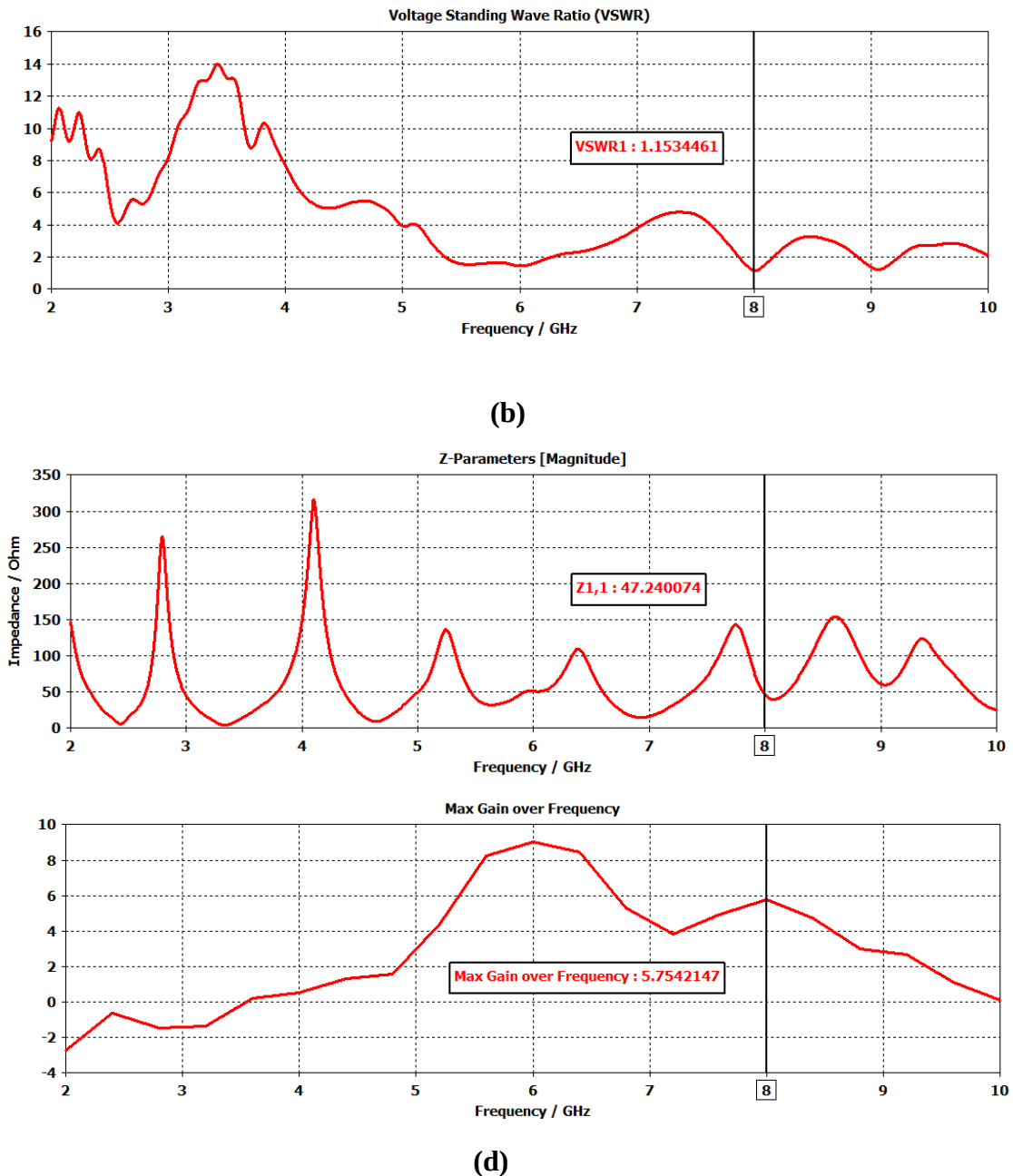
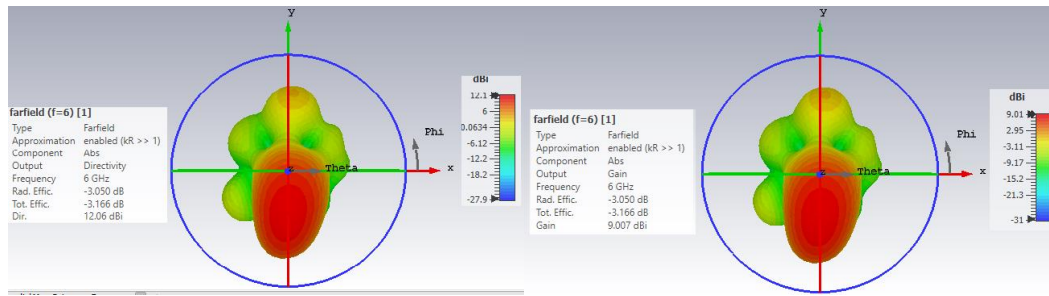
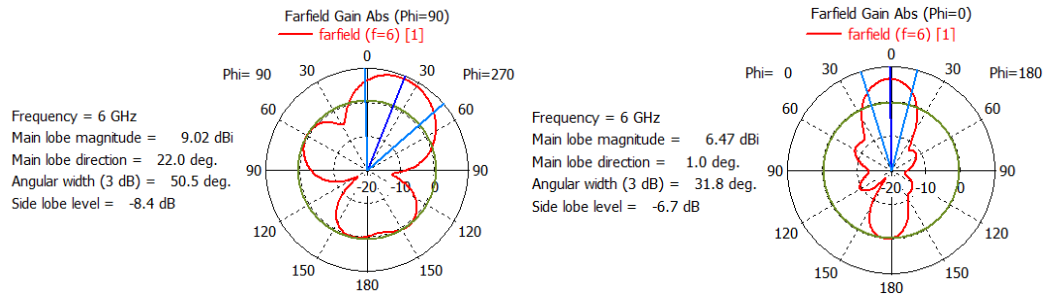


Figure III. 47 (a) : Coefficient de réflexion du réseau d'antennes à 4 éléments avec la technique DGS. (b) : Rapport d'onde stationnaire (c) : Partie réelle de l'impédance d'entrée de l'antenne. (d) : Gain du réseau d'antennes.

L'optimisation du réseau d'antennes à quatre éléments avec la technique DGS a aboutie à une bonne adaptation selon les résultats obtenus avec des bandes passantes autour de 880 MHz, 337 MHz et 361MHz et des gains de l'ordre de 9dB, 5.75dB et 3.3dB pour les fréquences 6GHz, 8GHz et 9.072GHz respectivement. Nous remarquons que la technique DGS a apporté une amélioration acceptable ce qui concerne l'augmentation du gain.

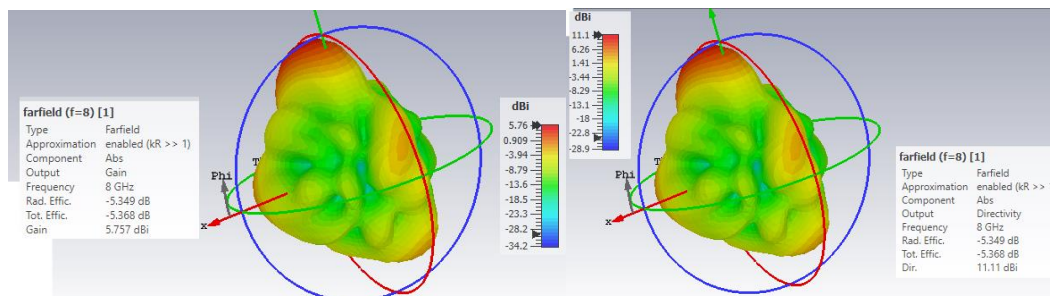


(e)

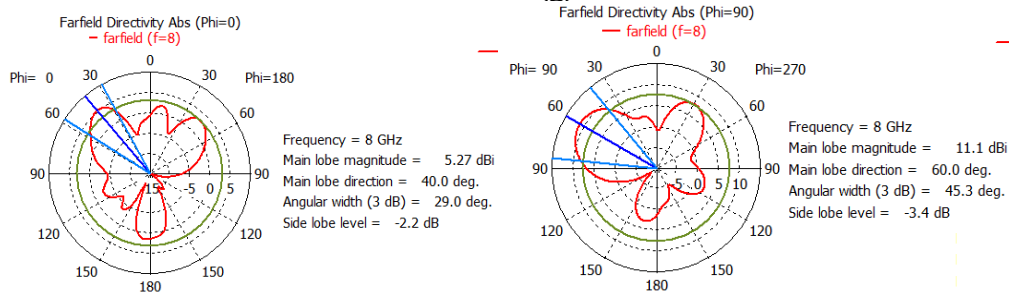


(f)

Figure III. 48 (e) : Diagrammes de rayonnement en 3D (Gain + Directivité) pour f=6GHz. (f) : Diagrammes de rayonnement polaires en 2D pour f=6GHz.



(g)



(h)

Figure III. 49 : Diagrammes de rayonnement en 3D (Gain + Directivité) pour f=8GHz (f) : Diagrammes de rayonnement polaires en 2D pour f=8GHz

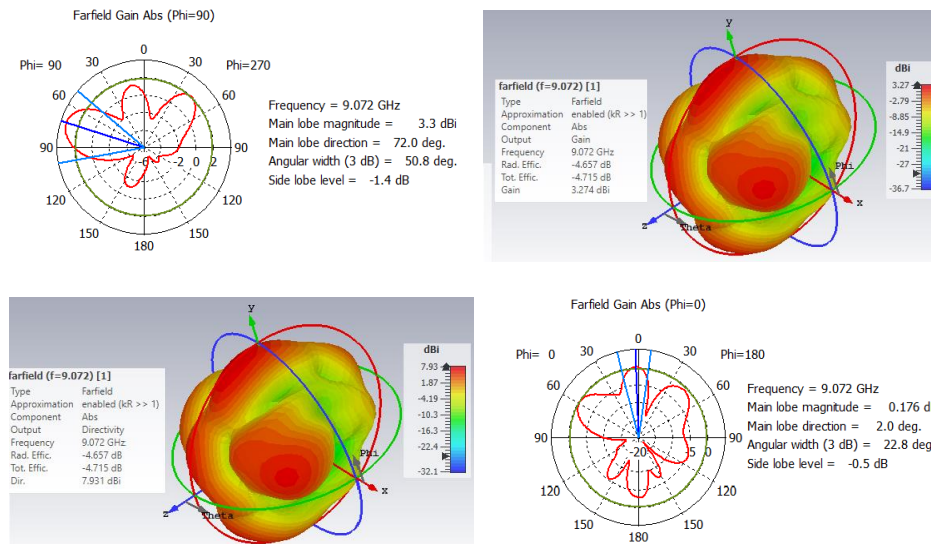


Figure III. 50 : Diagrammes de rayonnement en 3D (Gain + Directivité) pour f=9.072GHz (f) :
Diagrammes de rayonnement polaires en 2D pour f=9.072GHz

Les diagrammes de rayonnement en 2D de cette structure présentent des tracés bipolaires pour la fréquence 6 GHz pour les deux plans E et H. Pour la fréquence 8 GHz et 9.072 GHz, les diagrammes sont constitués de plusieurs lobes d'ouvertures différentes dans les plans E et H,

En observant les graphes de rayonnements en 3D, il est possible de remarquer que la directivité est d'environ 12.1 dBi et 11.1dBi et 7.93dBi pour les trois fréquences respectivement.

III.13. Tableau comparative entre les résultats obtenus

	Taille de l'antenne	Fréq de résonnances (GHz)	S11 (dB)	BP (MHz)	Gain (dB)	Directivité (dBi)	Efficacité (%)
Antenne fractale (1 ^{ière} itération)	24.78*33	6	-30.01	176	0.875	6.75	25
Antenne fractale (2 ^{ière} itération)	24.78*33	6	-35.25	160	0.346	6.73	23
Réseau d'antennes à 2 éléments (1 ^{ière} itération)	62.78*40.71	6	-34.17	210	2.60	8.51	25
Réseau d'antennes à 2 éléments (2 ^{ière} itération)	57*45.35	6	-48.02	230	5.51	10.4	32

Réseau d'antennes à 4 éléments (1 ^{ière} itération)	105.28*46.43	6	-28.46	737	8.29	12.6	37
		7.68	-28.87	616	6.21	11.6	28
		8.616	-23.21	715	6.4	11.1	33
Réseau d'antennes à 4 éléments (2 ^{ière} itération)	95.88*58.33	6	-32.55	533	8.11	12.7	34
		7.94	-28.89	750	6.68	11.9	30
		8.872	-22.38	837	6.77	11.2	36
Réseau d'antennes à 8 éléments (1 ^{ière} itération)	222.78*71.29	6.04	-26.12	276	9.20	13.7	35
		7.2	-26.73	423	3.92	11	19
		8.19	-20.82	535	4.08	10.7	21
		9.17	-17.15	526	5.78	13.5	16
		9.73	-18.17	507	6.08	12.8	21
Réseau d'antennes à 8 éléments (2 ^{ière} itération)	187.03*68.18	6.09	-27.66	514	10.04	14.7	34
		6.65	-20.58	423	7.96	13.2	29
		8.16	-13.92	1475	7.53	12.2	34
		8.65	-13.73	517	5.45	12.6	19
		9.20	-15.60	573	5.1	10.9	26
Réseau d'antennes à 4 éléments avec la technique DGS	95.88*59.53	6	-15.85	880	9.006	12.1	49
		8	-22.94	337	5.75	11.1	29
		9.072	-20.25	361	3.3	7.93	34

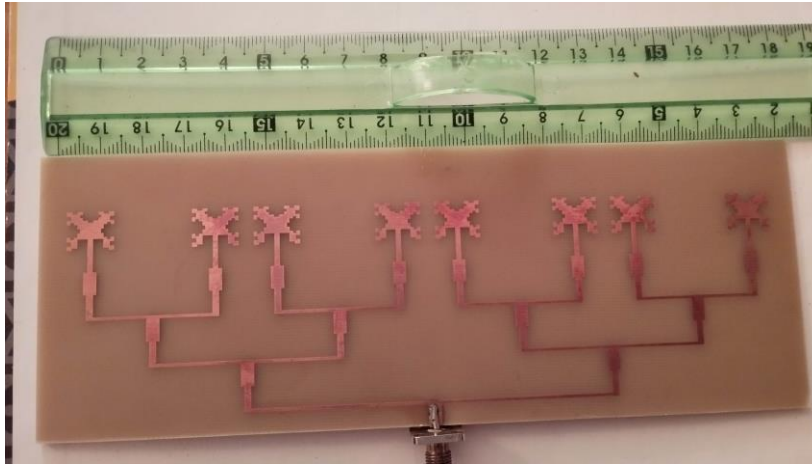
Tableau III.8 : Tableau comparative entre les résultats obtenus.

III.13. Réalisation et mesure

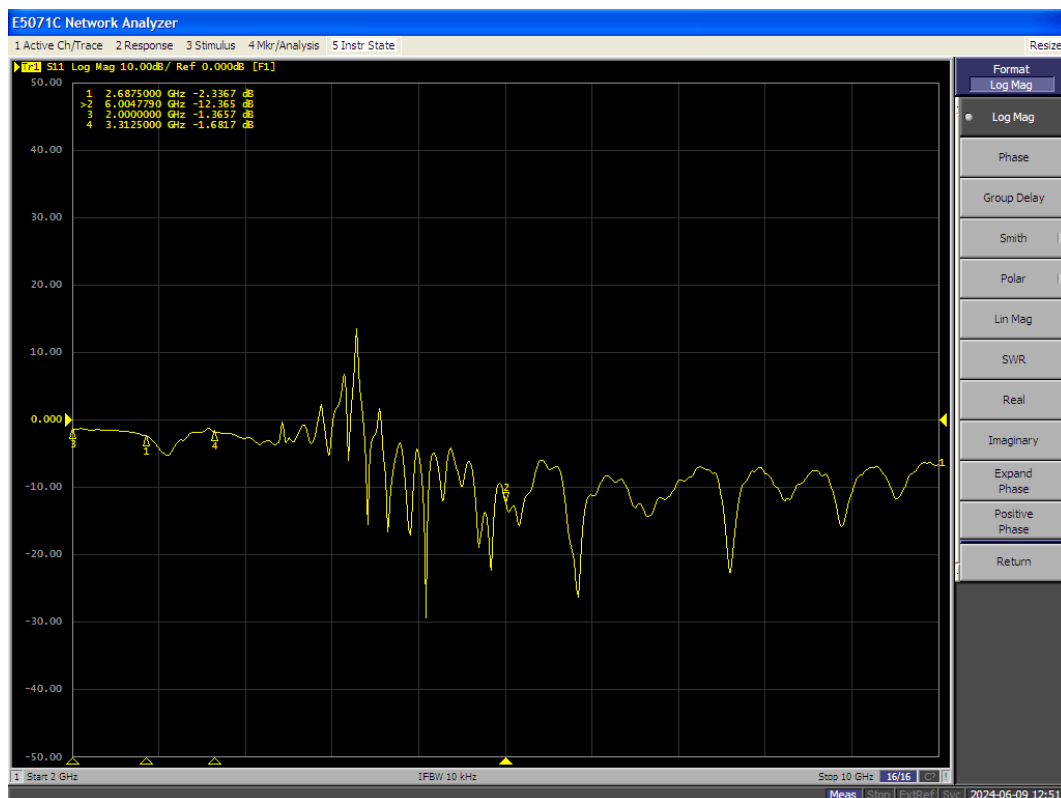
Nous avons réalisé et mesuré deux structures des réseaux d'antennes à 8 éléments à l'itération 2 et à quatre éléments avec la technique DGS, comme il indiqué sur les figures suivantes :

III.3.1. Réseau d'antennes à 8 éléments

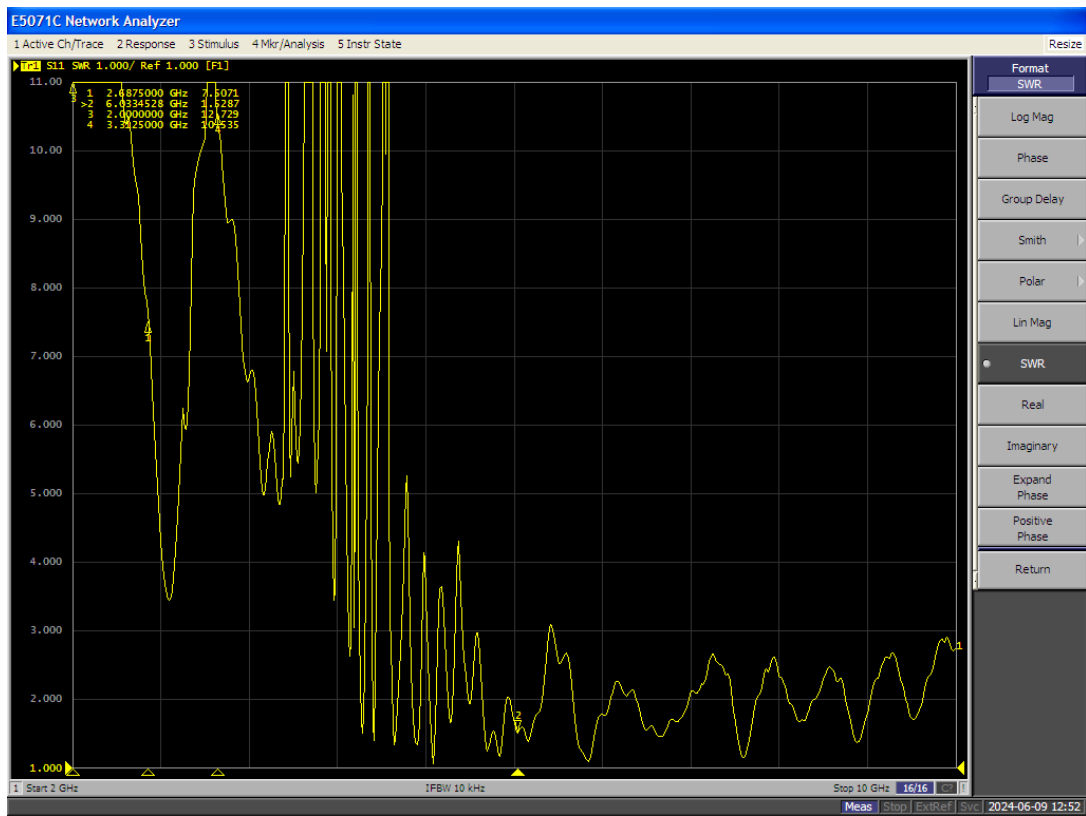
Dans cette partie, nous allons présenter les résultats de la réalisation du réseau d'antennes proposé. Tel que, nous avons utilisé un analyseur de réseau de type Agilent fonctionnant jusqu'à la fréquence 20 GHz.



(a)

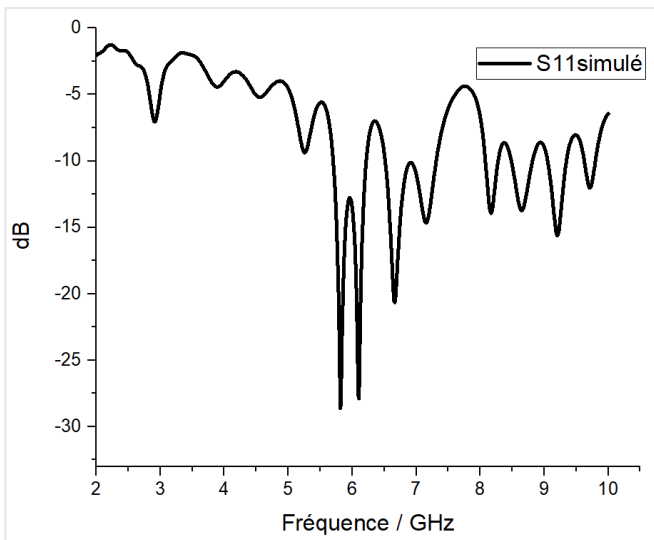


(b)

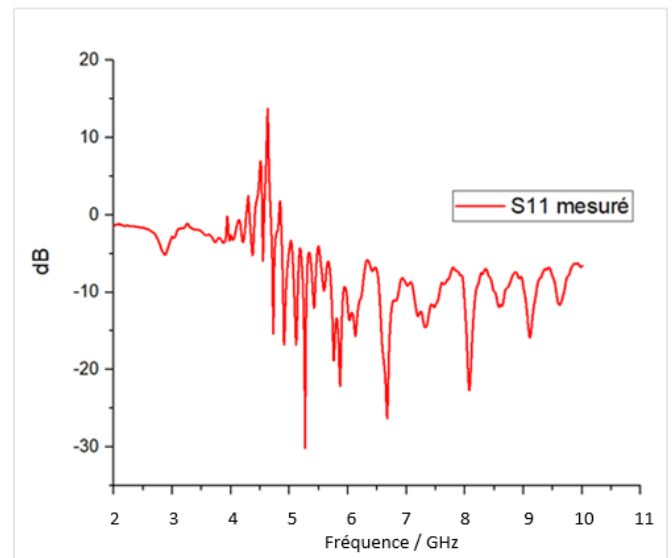


(c)

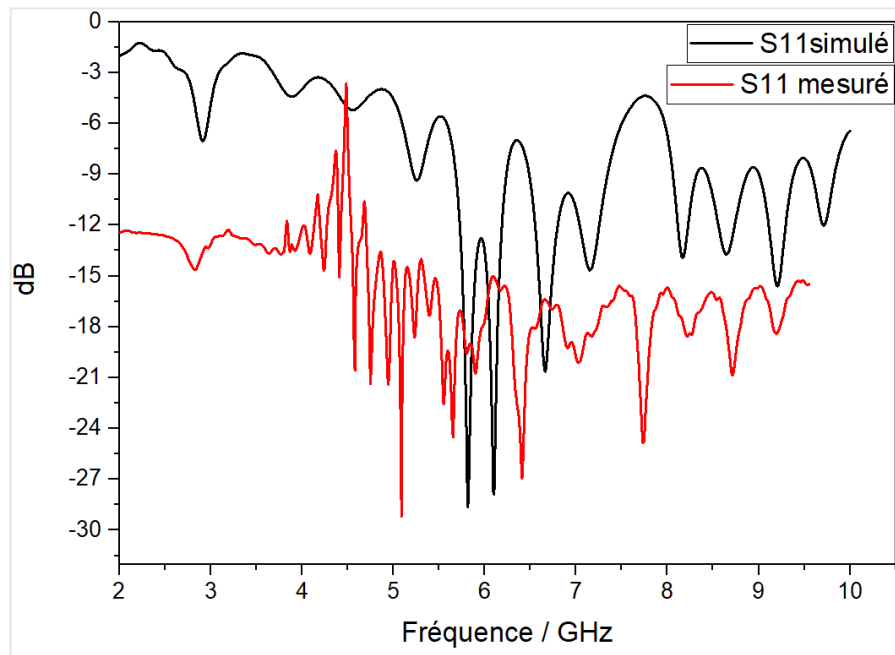
Figure III.51 : Photographie du réseau d'antennes à 8 éléments réalisé, (a) Vue de face, (b) coefficient de réflexion mesuré, (c) taux d'onde stationnaire mesuré.



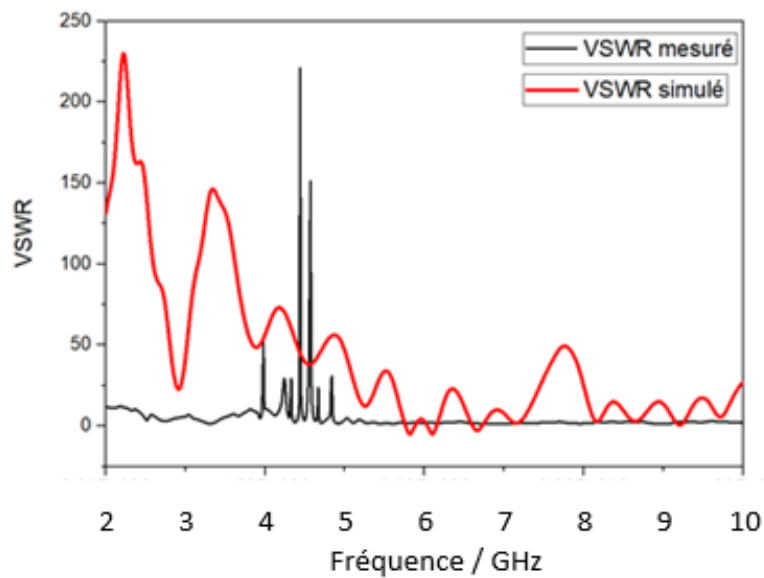
(a)



(b)



(c)



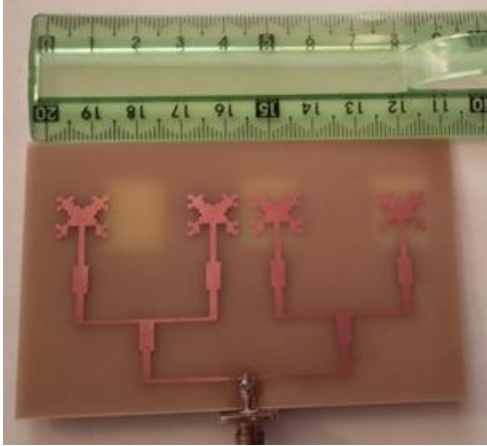
(d)

Figure III.52 : (a) S11 simulé du réseau à 8 éléments, (b) S11 mesuré du réseau d'antenne à 8 éléments, (c) Comparaison de coefficient de réflexion simulé et mesuré du réseau d'antennes à 8 éléments, (d) comparaison de VSWR simulé et mesuré.

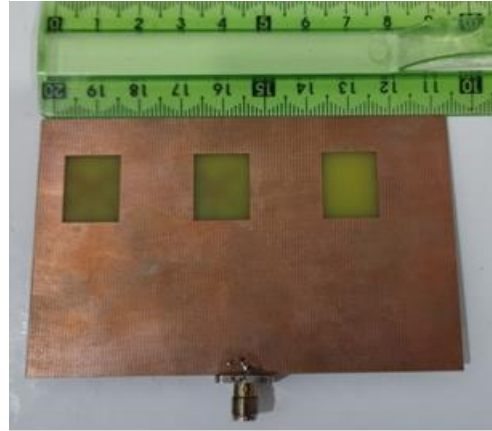
La comparaison entre les résultats de simulation et de mesure de coefficient de réflexion du réseau d'antennes à 8 éléments est illustrée dans la figure III.52. Nous remarquons que les deux graphes sont légèrement en bon accord avec un décalage approximé de 500 MHz et cela est due à la mauvaise soudure de connecteur SMA.

III.3.2. Réseau d'antennes à 4 éléments avec la technique DGS

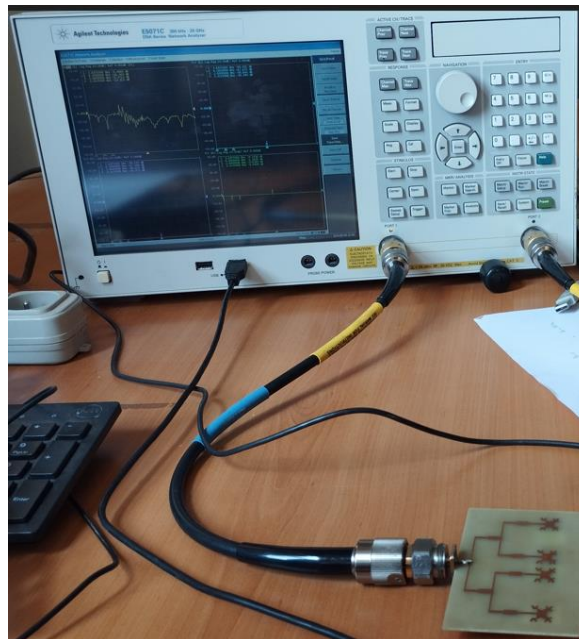
Après avoir effectué la calibration de l'analyseur de spectre dans la plage de fréquences de 2 GHz à 10 GHz, les résultats obtenus sont les suivants :



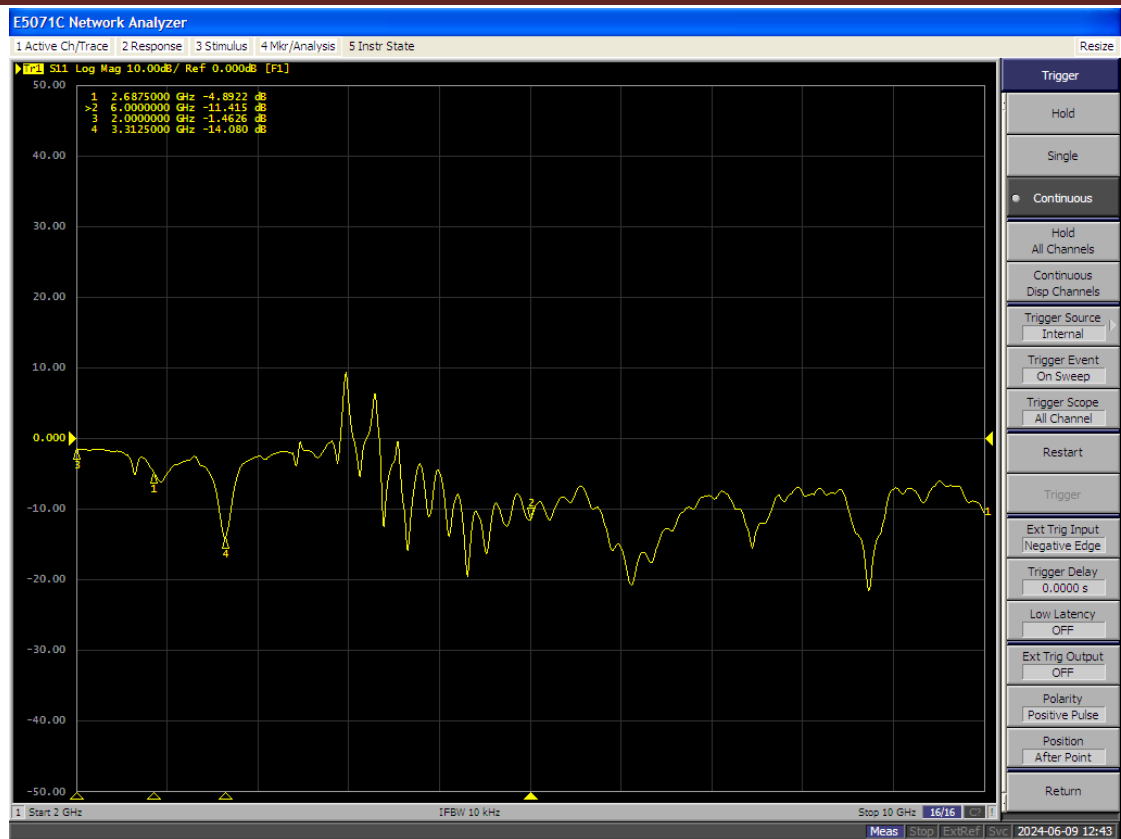
(a)



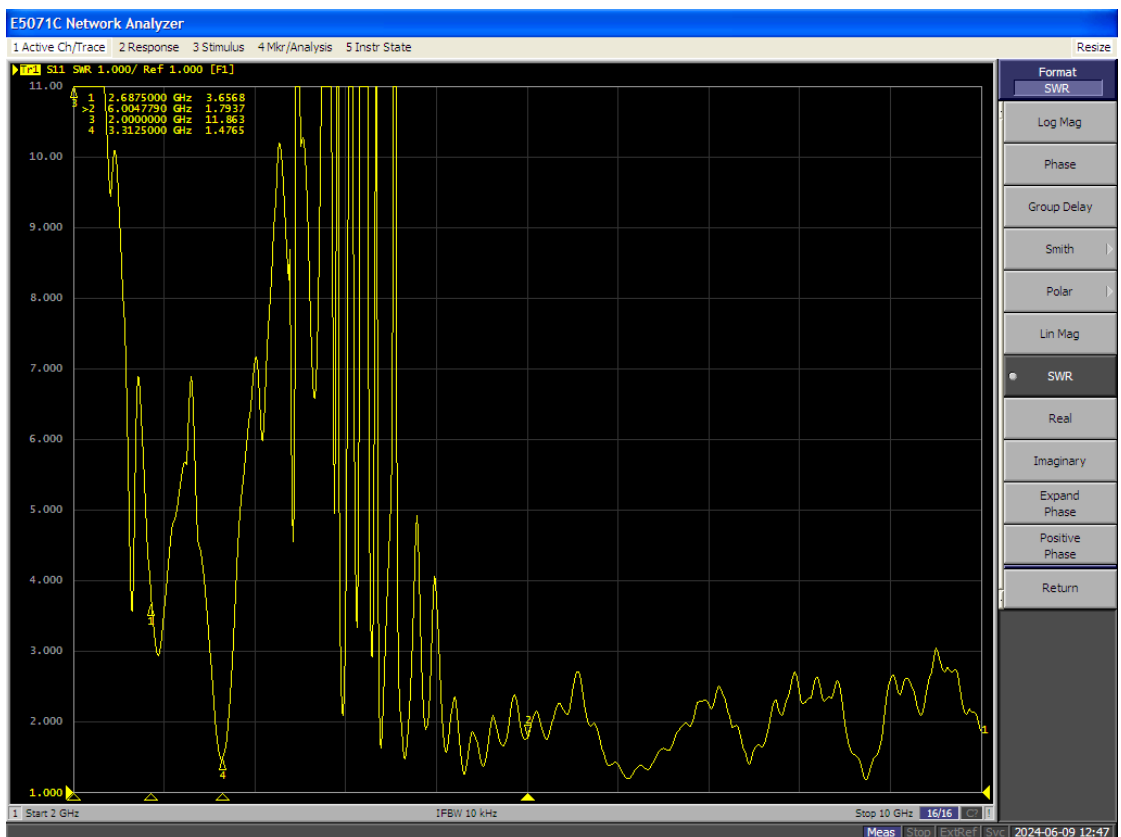
(b)



(c)



(d)



(e)

Figure III.53 : Photographie du réseau d'antennes à 4 éléments avec la technique DGS réalisé, (a) Vue de face, (b), Vue d'arrière, (c) l'antenne sous mesure, (d) S11 mesuré, (e) VSWR mesuré.

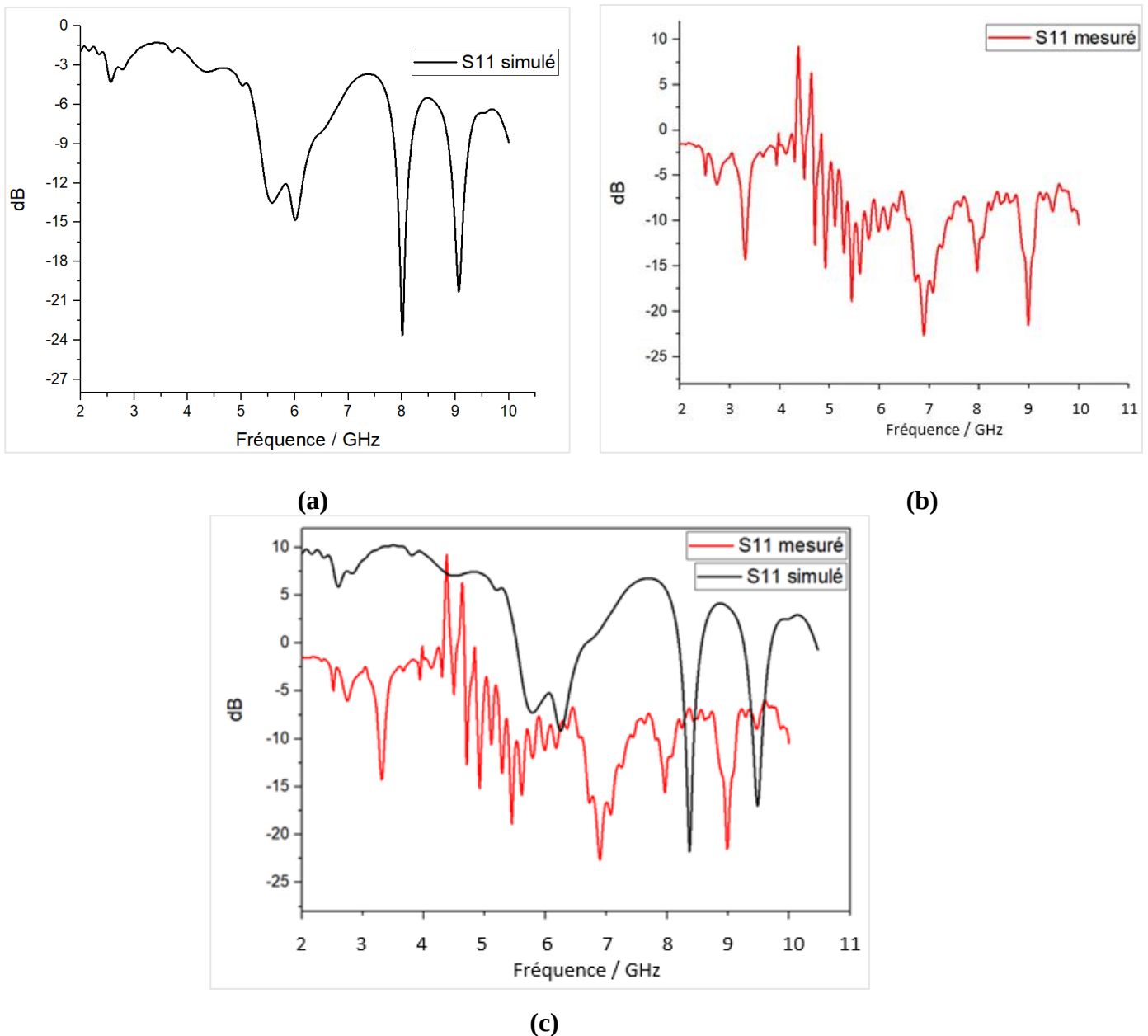


Figure III.54 : Comparaison de coefficient de réflexion simulé et mesuré du réseau d'antennes à 4 éléments avec la technique DGS.

De même, la comparaison entre les résultats de simulation et de mesure de coefficient de réflexion du réseau d'antennes à 4 éléments avec la technique DGS est illustrée dans la figure III.54. Les deux graphes sont un peu proportionnels à part d'un petit décalage approximé de 500 MHz et cela est due à la mauvaise soudure de connecteur SMA.

III.14. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les résultats de simulation des diverses géométries des réseaux d'antennes fractales à deux, quatre et huit éléments alimentés par des

diviseurs de puissance en jonction T. La conception a été effectuée par le logiciel CST MWS. Les performances des structures conçues sont très satisfaisantes avec une augmentation considérable du gain aux fréquences désirées selon les applications. De même, une autre technique a été utilisée pour augmenter le gain du réseau d'antenne à quatre éléments qui est la technique des fentes qui sont insérées sur le plan de masse (DGS). Les résultats obtenus sont alors présentés et commentés.

Conclusion générale

Les connaissances acquises grâce à l'étude approfondie des antennes fractales contribuent à l'avancement des technologies de communication et ouvrent de nouvelles perspectives pour des applications innovantes dans ce domaine en pleine croissance.

Dans le contexte des communications spéciales, les réseaux d'antennes ont prouvé leurs efficacités dans l'augmentation du gain des antennes sans que cela n'intervient pas sur les performances de l'antenne et aussi l'amélioration de l'adaptation.

L'objectif de ce travail porte sur la conception des réseaux d'antennes fractales pour les applications satellitaires à gain élevé et avec des performances acceptables en termes d'adaptation, de la bande passante et de diagramme de rayonnement.

Différentes études paramétriques ont été réalisées à l'aide du logiciel CST Microwave Studio (Computer Simulation Technology) afin d'optimiser les différentes géométries des réseaux d'antennes fractales proposés selon notre cahier de charge.

Dans le premier chapitre, nous avons donné les principes de base des antennes imprimées et leur rôle important dans les systèmes de communications. Nous avons aussi détaillé les techniques d'alimentation des antennes imprimées et leurs caractéristiques principales. Par la suite, nous avons défini les différents types des réseaux d'antennes et les techniques d'alimentation des réseaux.

Dans le second chapitre, nous avons introduit les différentes formes fractales tels que la forme fractale de Minkowski, la courbe de koch et les tapis Sierpinsky...etc. Ces antennes fractales présentent des avantages intéressants comme la miniaturisation, le fonctionnement mutilantes et l'élargissement de la bande passante. Il très important d'introduire aussi la partie des systèmes satellitaires comme un domaine d'application pour notre projet de Fin d'étude.

Le troisième chapitre se concentre sur la conception des antennes fractales et des réseaux d'antennes fractales à deux, quatre et huit éléments dans le but d'augmenter le gain des antennes fractales par le logiciel de simulation CST qui nous permet de découvrir en détail les propriétés radioélectriques des structures conçus. Les résultats de la simulation sont satisfaisants en termes de coefficient de réflexion, de gain, d'impédance d'entrée et de la bande passante. De mêmes, des réalisations ont été effectuées afin de valider les résultats de simulation obtenu.

CONCLUSION GENERALE

En résumé, ce mémoire permet une exploration et une analyse approfondies des antennes fractales et les réseaux d'antennes fractales à la première et à la deuxième itération pour les applications spéciales.

Le développement actuel des communications impose des innovations importantes au niveaux de la conception des antennes imprimées où des réseaux d'antennes dont les formes aujourd'hui sont très diverses. Comme perspective de ce travail, il est très intéressant de concevoir et réaliser d'autres structures fractales de formes différentes à gain très élevé et avec un fonctionnement multibandes et large bande pour d'autres applications de communications.

Références bibliographiques

- [I.1] Mansouri hatem, Guermani salem, et Touil lakhdar, « Conception d'une antenne patch bi bande 28 GHz et 38 GHz pour des applications 5G », Master académique en télécommunication, Université Echahid Hamma Lakdar d'El-Oued, 2023.
- [I.2] Zitouni Ahmed, « Antennes », Université Hassiba Benboualide Chlef, 2018.
- [I.3] Boussaha Somia, « Contribution à l'étude et à la modélisation des antennes imprimées rectangulaires applications aux systèmes de communication », Master en Télécommunications, Université 8 mai 1945-Guelma, 2012.
- [I.4] Kermiche Ferhat, Hamdani elkhier, « Etude et conception d'une antenne bi-bande L1/L2 GPS », Master en Télécommunications, Université de Mohamed El-Bchir –Ibrahimi-Bordj Bou Arreridj, 2022.
- [I.5] Odile Picon et Coll : « Les antennes Théorie, conception et application », Paris, 2009.
- [I.6] Traore Balla Moussa, Traore Rabia, « Influence des parametres geometriques sur les performances de l'antenne patch rectangulaire », Master en Télécommunication, Université Abdelhamaid Ibn Badis Mostaganem, 2023.
- [I.7] H. Mourad, « Modélisation d'une antenne patch réalisée sur substrat à tenseurs de permittivité et de perméabilité diagonaux », Magister en Electronique, Université de Batna, 2009.
- [I.8] Belakhdar Faiza, « Etude et conception des antennes imprimées pour le nouveau standard de la téléphonie mobile 5G », Master en Télécommunications, Université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen, 2021.
- [I.9] Djedid Leila, Hamidi Chaimaa, « Etude et simulation d'une antenne patch pour l'imagerie médicale », Master en Instrumentation Biomédical, Université Dr. Tahar Moulay de saida, 2020.
- [I.10] Melihi Souhila, Fengal Tine –Hinane, « Antenne de téléphonie mobile, caractérisation et optimisation », Master en Télécommunication, Université Abderrahmane Mira-Bejaia, 2016.
- [I.11] S. Zenagui et R. R. Sahraoui, « Influence de substrat sur les performances des antennes imprimées », Master en Télécommunications, université Belhadj Bouchaib d'Ain – Temouchent, 2020.
- [I.12] Tiab Narimane, Moumed Amira, « Conception d'une nouvelle antenne multi-bande a polarisation circulaire », Master en Télécommunication, Université 8 Mai 1945 -Guelma, 2021.
- [I.13] M.A.Bedi, S.Ben Hssine, G.Chaib, « Etude, conception et réalisation d'une antenne planaire HF en technologie micro ruban », mini projet en dispositif micro-ondes et antennes, école nationale d'ingénieur de Tunis, 2015.
- [I.14] Chergui Safa, Djabri Roumaissa, « Conception d'une antenne patch rectangulaire a double bande avec la structure a defaut dans le plan de masse (DGS) », Master en Télécommunication, Université Larbi Tébessi-Tébassa, 2021.
- [I.15] Behéoul Abla, « contribution à l'étude des antennes microstrip supraconducteur de forme triangulaire, 2010.
- [I.16] Taourit Hanane et Moualek Nabila, « Conception et Analyse d'antennes microrubans à polarisation circulaire », Master en télécommunications, Université Aboubakr Belkaid – Tlemcen, 2022.

Références bibliographiques

- [I.17] Guennach Mohamed, « Conception d'une antenne pifa multibandes pour applications sans fil », Master en Systèmes Electroniques & Télécommunications, Université Sidi Moha Med Ben Abdellah, juin 2016.
- [I.18] Bouachra Marwa, Boukhris Chaima, « Conception et performance des réseaux d'antenne patch en bande Ka pour application du satellite », Master en Télécommunication, Université Abou Bekr Belkaid-Tlemcen, 2021-2022
- [I.19] Serir Fatima Zohra, « Conception d'antenne pour les mobiles 5G », Master académique en Télécommunication, Université Abou Bekr Belkaid-Tlemcen, 2020-2021
- [I.20] Khiat Ibtissem, Kaddour Mohammed El-Mehdi, « Conception d'une antenne spirale en technologie micro-ruban pour la détection des tumeurs », Master en Télécommunications, Université Aboubakr Belkaid Tlemcen, 2022
- [I.21] François Grange, « matériaux composites pour antenne miniature intégrée, matière condensée », Université Rennes1, 2010.
- [I.22] Hemmas Mohamed Abdrraouf, Ben Alia Mohamed Amin, Bey Aymen Baha Eddine, « Conception et simulation d'une antenne imprimée », Licence en Electronique, Université de Mohamed EL- Bachir El-Ibrahimi -Bordj Bou Arreridj, 2020-2021.
- [I.23] P. F. Combes, « Micro-ondes tome 2 : Circuits passifs, Propagation, Antennes », Dunod, 1997.
- [I.24] Soltane Samia, « Étude et caractérisation d'antennes imprimée pour les systèmes ULTRA_LARGE_BAND », Master en Génie Electrique, Université de Mohamed Khider-Biskra, en 2015.
- [I.25] Doulat Abdelkader, « Conception des antennes miniatures à base de métamatériaux pour des applications de la cinquième génération », Master en Télécommunication, Université Abou Bekr Belkaid-Tlemcen, 2020
- [I.26] David Bidou, « Contribution à l'étude d'antenne Fort Gain. Application dans Le domaine millimétrique » Thèse de Doctorat, Université de Limoges, Mai 2003.
- [I.27] Hadj Slimane Zahira, « conception D'antenne planaire a haute fréquence pour les applications 5G », Master académique en Télécommunication, Université Abou Bekr Belkaid-Tlemcen, 2020-2021
- [I.28] Chenouf Ahlem, Boughettaya Basma, « Amélioration des performances de l'antenne patch microstrip en utilisant une structure de bande interdite électromagnétique », Master académique en Electronique, Université Mohamed Boudiaf-Msila, 2019-2020
- [I.29] Gherbi Djihene, « Etude et conception d'une antenne reconfigurable en utilisant des composants actifs », Master en Télécommunication, Université 8 Mai 1945 Guelma, 2023
- [I.30] A. Reha, « Les antennes fractales », Editions Universitaires Européennes, 2017 ISBN :978-3-639-54888-4
- [I.31] Z. Barkat, « Conception et analyse d'antennes combinées à polarisation multiples pour différents standards de Telecommunications », Thèse de Doctorat, Université de Tlemcen, 2016.
- [I.32] Cheriet Sid Ali, Toudert Riadh, « Conception, simulation, et réalisation d'antenne patch ultra large bande », Master académique en Electronique, Université Saad Dahlab -Blida, 2018-2019.
- [I.33] Mansouri Mohamed, Ezzeroug El Haithe, « Conception et simulation d'une antenne patch ultra large bande (1-8GHz) », Master en Aéronautique, l'Institut d'Aéronautique et des Etudes Spéciales, 2018-2019.
- [I.34] Abdenour Yassine, « Etude et conception des antennes miniatures pour les application biomédicales », Master en Télécommunication Université de Abou-Bekr Belkaid-Tlemcen, 2018.

Références bibliographiques

- [I.35] Benayad Khaoula, Khezazne Safa, « Simulation des antennes imprimées par le logiciel CST », Master en Télécommunication, Université Badji Mokhtar Annaba, 2021.
- [I.36] S. Bennani, « Antennes imprimées -patch », Ecole Nationale des Sciences Appliquées de Fés, Mars 2020.
- [I.37] A. Brahimi « Etude de la Technologie des antennes Multi –bandes pour les applications spatiales », Thèse de Magister, Université Mohamed Boudiaf d’Oran, 2009.
- [I.38] Toukali Samira, Yaalaoui Khadra, « Conception et simulation d’un réseau linéaire d’antennes imprimées », Master en télécommunication, université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi –Bordj Bou Arreridj, 2021.
- [I.39] Kadri Boufeldja, « Modélisation des Synthèse de Réseaux Périodiques et non périodiques d'antenne micro-rubans par l'application d'un algorithme Génétique-Flou», 2011.
- [I.40] Odile, Picon et Coll, « Les Antennes Théorie, Conception et application», Paris :s.n, 2009.
- [I.41] Nelson Jorge, Gonçalves Fonseca, « Etude de Systèmes Micro-ondes d'Alimentation d'Antennes Réseau pour Application Multifaisceaux », Université de Toulouse, 15/10/2010.
- [I.42] Vincent Jaeck, « Développement d'antennes de communication reconfigurables en bande C pour munition intelligentes », Université Rennes, 2016.
- [I.43] Bouaka Asma et Temmar Louiza, « Simulation d'un réseau d'antenne pour les mobiles 5G avec CST Microwave Studio», 25/062018.
- [I.44] Bahloul Mohamed Salim, « Etude et conception de Réseaux d'Antenne Imprimées larges bandes à polarisation diverse par l'utilisation d'architectures log périodiques», Université Aboubakr Belkaid Tlemcen, 02/2017.
- [I.45] Ben Brahem Séyf El Islam, « Etude et simulation d'une antenne imprimée rectangulaire mise en réseau», Université Saad Dahleb Blida, 2009.
- [I.46] Andrée 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
- [II.47] Bouteldja Houcine, « Méthode de conception de l’antenne dipôle fractales à forme de koch», Master en Electronique, Ecole Nationale Polytechnique, Juin 2015.
- [II.48] Belhadj khaoula, Belhaous Oumaima, « Etude et conception des antennes planaires compactes ultra large bande», Master en Télécommunication, Universités de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi, Bordj Bou Arreridj, 2022-2023.
- [II.49] Gandoura Ibtiham, Lamer Soumia, «Conception et réalisation des antennes fractales imprimées ultra large bande à bande rejetées», Master académique en Télécommunication, Université 8 mai 1945- Guelma, juillet 2019.
- [II.50] Haouzi Amel, Kriche Kawther, « Conception d’antennes imprimées miniatures », Master enTélécommunication, Université Aboubakr Belkaid-Tlemcen, 2020.
- [II.51] Hung Tien Nguyen, Sima Noghianian, Lot Shafai, « Microstrip patch miniaturization by slots loading », International Symposium Antennas and Propagation Society, IEEE, pp.215- 218,2005.
- [II.52] Arab Tarek, «Etude des matériaux composites (Titanate oxyde) : application pour la réalisation des substrats d’antennes miniatures», Diplôme de Magister, Université Sétif 1, Novembre 2014.
- [II.53] Dib Wassila, Younsaoui Yasmina, « conception d’une antenne fractale bi-bandes pour les applications WLAN et WIMAX»,Master en Télécommunication , Université A. Mira-Bejaia, 2022.

Références bibliographiques

- [II.54] A. REHA, « le comportement des antennes fractales de types courbe de Sierpinsky », Méditerranéen Télécommunication journal, vol.6, N^o2, June 2016.
- [II.55] Zekri Merwane, Nehad Soufiane, « Conception des antennes PIFA fractales tribandes pour les systèmes de télécommunications mobiles », Master en Télécommunication, Université Aboubakr Belkaid-Tlemcen, 2021.
- [II.56] Josiane Lajoie, « La géométrie fractale », Mémoire présenté à l'Université du Québec, Juin 2006.
- [II.57] Tedjani Safa, Mohammedi karima, « Etude et conception d'antenne fractale », Master en Télécommunication, Université Echahid Cheikh Larbi Tebessi-Tebessa, 2023.
- [II.58] Krim Khadidja, Abri Mehadj, Badaoui Hadjira, et al. « New Design of a microstrip-fed printed slot UWB Antenna With Hilbert fractal defected ground structure ». In : proceedings of the Third international conference on computing and wireless communication systems, ICCWCS 2019
- [II.59] Gandoura Ibtissem, Lamer Soumia, « Conception et réalisation des antennes fractales imprimées ULTRA large bande (ULB) a bande rejetée », Master en Télécommunication, Université 8 Mai 1945- Guelma, 2019.
- [II.60] Nait Seghir Rachida, Mouna Lilia, « Antenne fractale planaire pour des applications sans fil », Master en Télécommunication, Université de Mohamed El-Bachir El –Ibrahimi – Bordj Bou Arreridj, 2022.
- [II.61] Hafedh Ben Ibrahim Gaha, « Analyse et conception des antennes fractales – applications aux télécommunications large bande », Thèse de doctorat de Institut national polytechnique de toulouse (France)
- [II.62] Mr. Ourahmoune Lounes, « Système télécommunication satellite », Mémoire de fin d'étude En vue d'obtention Du Diplôme de Master En Electronique Option Réseaux et Télécommunications, UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI OUZOU, 2010-2011.
- [II.63] KRIM Khadîdja, « étude comparative des performances accrues de schémas de transmission CDMA et OFDMA pour des communications par satellite », UNIVERSITÉ ABOU BAKR BELKAID – TLEMCEN, 2010.
- [III.64] BELAKHDAR Faiza, « Etude et conception des antennes imprimées pour le nouveau standard de la téléphonie mobile 5G », Mémoire de master, Université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen, 2021