

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



Projet de Fin d'Etudes
Pour l'obtention du diplôme de Master en : Réseau de
Télécommunications
Domaine : sciences et technologie
Filière : Télécommunications
Spécialité :Réseau et Télécommunications
Thème

Conception d'un réseau d'antennes patch pour les applications
satellites en bande C

Présenté Par :

- 1) Melle Sidi Yakoub Wafa
- 2) Melle Khatir BenMeheimda Bochra

Devant le jury composé de :

Dr	Souiki Sihem zineb	MCB	UAT.B. B (Ain Temouchent)	Présidente
Dr	Moulesssehoul Wassila	MCB	UAT.B.B (Ain Temouchent)	Examinatrice
Dr	Ferouani Souheyla	MCA	UAT.B.B (Ain Temouchent)	Encadrante
Dr	Rabah Mohamed Amin	MRA	CDS (Oran)	Co-Encadrant

Année Universitaire 2020/2021

Remerciement

Ce mémoire n'aurait pas été possible sans l'intervention, Consciente, d'un grand nombre de personnes. Nous souhaitons ici les en remercier.

Nous remercions tout d'abord, ALLAH qui nous a donné la force et le courage afin de parvenir à élaborer ce modeste travail

Ce travail s'inscrit dans le cadre d'un projet de fin d'étude mené au niveau du département de Génie Electrique de l'Université de BLHADJ Bouchaib d'Ain Témouchent.

Nous tenons à remercier particulièrement nos parents ; notre succès demeure de loin le fruit de leurs longues années de sacrifices et d'éducation.

Nous tenons à exprimer notre profonde reconnaissance à Dr FEROUANI SOUHEYLA, Maitre de conférences classe A l'université de Belhadj Bouchaib d'Ain Temouchent, pour ses précieux conseils, ses incessants encouragements et surtout sa grande disponibilité et motivation tout au long de la réalisation de ce travail.

Nous remercions chaleureusement Mr RABAH Med Amin Co-encadrant de ce travail, pour ces conseils qu'il nous a prodigués.

Nous remercions vivement les membres du jury Dr Souiki Sihem Zineb et Dr Moulessehoul Wassila, Maitre de conférences classe B à l'université de Belhadj Bouchaib d'Ain Temouchent d'avoir accepté de siéger et de juger notre travail. Nous les remercions aussi pour l'honneur qu'ils nous font en acceptant d'examiner ce mémoire.

Nos remerciements vont également à tous nos enseignants qui Nous ont suivis durant notre formation.

Enfin, nous tenons à remercier tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué au cheminement de ce mémoire.

Dédicaces

Je dédie ce travail

A mes grand-père, ma grand-mère « sidiyakoub ahmed ; Benikhelef Boucif et Cherif Jamila », que Dieu ait pitié d'eux, et à ma grand-mère « sidi yakoub Fatima », que Dieu prolonge sa vie

A mes très chers parents

Mon père, qui peut être fier et trouver ici le résultat de longues années de sacrifices et de privations pour m'aider à avancer dans la vie.

Puisse Dieu faire en sorte que ce travail porte son fruit ; Merci pour les valeurs nobles, l'éducation et le soutien permanent venu de toi.

Ma mère, qui a œuvré pour ma réussite, de par son amour, son soutien, tous les sacrifices consentis et ses précieux conseils, pour toute son assistance et sa présence dans ma vie, reçois à travers ce travail aussi modeste soit-il, l'expression de mes sentiments et de mon éternelle gratitude.

A mon frère

Sidi yakoub Zakaria

A mes cousins et cousines

A ma famille

Famille (sidiyakoub ; benikhelef ; cherif)

A celui qui a participé avec moi à ce mémoire

Khatir ben meheimdabochra

A nos très chers amis

Narjes, Sanaa, Kawtar, Hadjer, Radia, Amina, Imane, Achwak

Wafaa

Je dédie ce mémoire

A mon cher père

Ce travail est le fruit de tes sacrifices que tu as consentis pour mon éducation et ma formation le long de ces années, Je te souhaite une bonne santé et une longue vie « Merci beaucoup papa »

A ma chère Mère

Ta prière et ta bénédiction m'ont été d'un grand secours pour mener à bien mes études.

Je te dédie ce travail en témoignage de mon profond amour. Puisse Dieu, le tout puissant, te préserver et t'accorder santé et longue vie.

A ma sœur

Hassiba.

A mon cher frère

Boubakr.

A mes cousins et cousines

A toute la famille

Khatir Ben Meheimda & Saïd

Celui qui a participé avec moi à ce mémoire

Ma chère amie : Sidî yacoub Wafaa

A tous mes amis

Fatima zohra, Achouak, Amina, Imene, Wahiba, Kawther...

A tous ceux qui m'ont supporté et encouragé.

A tous mes enseignants depuis mes premières années d'études.

A tous les étudiant(e)s de ma promotion.

Bohra.

Un spécial dédicace à :

Errouane Mohamed El Amine, Boudaoud Ehachemi Bouhdjar

Fatmi Achouak, Bentouir Amina

Résumé

L'objectif de ce mémoire est de concevoir un réseau d'antennes patch pour les applications satellitaire en bande C entre [3.6 ; 4.2]GHZ pour le downlink et entre [5.8 ; 6.4] GHZ pour le uplink.

Nous avons utilisé un substrat de type FR4 d'épaisseur 1.5mm et de permittivité 4.3. Les résultats de simulations sont très satisfaisants en termes de paramètre de réflexion S11, de VSWR, de bande passante, de gain et de diagramme de rayonnement. Le réseau d'antennes patch proposé est facile à concevoir et à intégrer dans des satellites pour les applications en bande C.

Mot clé : réseau d'antennes patch, bande C, S11, diagramme de rayonnement, substrat

Abstract

The objective of this manuscript is to design an array patch antenna for C-band satellite applications between [3.6; 4.2] GHZ for the downlink and between [5.8; 6.4] GHZ for the uplink.

We have used an FR4 substrate of 1.5mm thick and 4.3permittivity. The simulation results are very satisfactory in terms of S11 reflection parameter, VSWR, bandwidth, gain and radiation pattern.

The proposed patch antenna network is easy to design and integrate into satellites for C-band applications.

Keyword: microstrip patch antenna network, C band, S11, Radiation pattern, substrate

ملخص

الهدف من هذه الأطروحة هو تصميم شبكة من الهوائيات لتطبيقات في الأقمار الصناعية في النطاق C بين [3.6 ؛ 4.2] جيجا هرتز للوصلة الهابطة وبين [5.8 ؛ 6.4] جيجا هرتز للوصلة الصاعدة. استخدمنا ركيزة من النوع FR4 بسمك 1.5 مم و سماحية 4.3. نتائج المحاكاة مرضية للغاية من حيث معامل الانعكاس S11 و VSWR وعرض النطاق ومخطط الكسب والإشعاع. من السهل تصميم شبكة الهوائيات المقترحة ودمجها في الأقمار الصناعية لتطبيقات النطاق C.

الكلمة الرئيسية:

نمط الإشعاع ، الركيزة S11 ، النطاق C ، شبكة الهوائيات.

Tables des matières

Remerciement	I
Dédicaces	II
Résumé	IV
Tables des matières.....	V
La liste des figures.....	VIII
La liste des tableaux	X
Liste des Acronymes	XI
Introduction générale.....	1
I.1 Introduction	3
I.2 Description des antennes imprimées ou patch	3
I.3 Les caractéristiques des antennes	4
I.3.1 Le coefficient de réflexion S11	4
I.3.2 La bande passante.....	4
I.3.3 La Directivité	5
I.3.4 Le Gain	5
I.3.5 Rendement de l'antenne	5
I.3.6 Diagramme de rayonnement	6
I.3.7 Impédance d'entrée de l'antenne	6
I.3.8 Le VSWR (Voltage Standing Wave Ratio)	7
I.4 Les techniques d'alimentations	7
I.4.1 Alimentation avec contact	8
I.4.1.1 Sonde coaxiale	8
I.4.1.2 Ligne micro ruban.....	9
I.4.2 Alimentation sans contact (par proximité)	9
I.4.2.1 Ligne microbande en sandwich	9
I.4.2.2 Guide d'onde coplanaire	10

I.4.2.3 Couplage par fente	10
I.5 Techniques d'adaptation des antennes imprimées.....	10
I.5.1 Adaptation par ligne quart d'onde.....	10
I.5.2 Adaptation par stub	11
I.5.3 Adaptation avec encoches.....	11
I.6 Avantages et limites des antennes imprimées	12
I.7 Les domaines d'applications des antennes imprimées	12
I.8 Réseau d'antennes	13
I.8.1 Définition	13
I.8.2 Alimentation d'un réseau d'antennes	13
I.8.3 Les types de réseaux d'antenne.....	14
I.9 Conclusion.....	15
II.1 Introduction.....	17
II.2 Les bandes de fréquences pour les communications par satellitaires.....	17
II.3 Principales bandes de fréquences Satellite (Downlink et Uplink)	18
II.4 Les services de la bande C	19
II.5 Les divers types d'antennes existantes dans les satellites.....	19
II.5.1 Les Antennes à très Faible Gain	19
II.5.2 Les Antennes à Faible Gain.....	20
II.5.3 Les antennes élémentaires	21
II.5.4 Les Antennes à Gain moyen	22
II.5.5 Les Antennes à Gain élevé	22
II.5.6 Les Antennes à Gain très élevé.....	23
II.6 Conclusion	23
III.1 Introduction.....	26
III.2 Description du logiciel de simulation CST Studio Suite.....	26
III.3 Simulations d'une antenne patch rectangulaire	27
III.3.1 Calcul des paramètres géométrique de l'antenne	27
III.3.2 Structure de l'antenne patch.....	29
III.3.3 Simulation du paramètre S11	29

III.3.4 Antenne patch adapté avec encoche à la bande C [4,8] GHz.....	30
III.3.5 Résultat final	31
III.3.6 Simulation de paramètre S11	31
III.3.7 Le diagramme de rayonnement.....	32
III.3.8 Le gain	33
III.3.9 Le VSWR.....	33
III.3.10 La densité de courant.....	34
III.4 Augmentation du gain avec réseaux d'antenne à 2 éléments.....	34
III.4.1 Simulation de paramètre S11	35
III.4.2 Diagramme de rayonnement.....	35
III.4.3 Le gain	36
III.4.4 Le VSWR.....	36
III.4.5 La densité de courant.....	37
III.5 Augmentation du gain avec réseaux d'antenne à 4 éléments.....	37
III.5.1 Simulation de paramètre S11	38
III.5.2 Le diagramme de rayonnement.....	38
III.5.3 Le gain	39
III.5.4 Le VSWR.....	39
III.5.5 La densité de courant.....	40
III.6 Augmentation du gain avec réseaux d'antenne à 6 éléments.....	40
III.6.1 Simulation de paramètre S11	41
III.6.2 Le diagramme de rayonnement.....	41
III.6.3 Le gain	42
III.6.4 Le VSWR.....	42
III.6.5 La densité de courant.....	43
III.7 Prototype et mesures du réseau d'antennes patch proposé.....	43
III.7.1 Résultats de Mesures.....	44
1) Le S11	44
2) VSWR.....	45
III.8 Conclusion	45
Conclusion générale	47
REFERENCES.....	48

La liste des figures

Chapitre I

Figure I.1:Présentation d'une antenne patch.	3
Figure I. 2:Les différentes formes du patch	3
Figure I. 3:La Bande passante [24]	4
Figure I. 4 :Diagramme de rayonnement classique d'une antenne directive [3].	6
Figure I. 5 :Antenne en mode d'émission [10]	7
Figure I. 6:Les techniques d'alimentation	8
Figure I. 7: Alimentation par sonde coaxiale [12-18]	9
Figure I. 8:Alimentation par ligne micro ruban	9
Figure I. 9:adaptation par quart d'onde [10], [11].....	11
Figure I. 10:Modélisation de l'antenne à adaptation simple stub [10],[11]	11
Figure I. 11:Patch adapté par encoches de longueur [10], [11]	12
Figure I. 12:alimentation série d'un réseau d'antennes	13
Figure I. 13:alimentation parallèle d'un réseau d'antennes	14
Figure I. 14:Géométries d'un réseau d'antennes.(a)-linéaire (b)-circulaire (c)-planaire (d)- volumique	14

Chapitre II

Figure II. 1:différentes applications pour les satellites de télécommunications, dans la bande 1-30 GHz [25]	17
Figure II. 2:Antennes omnidirectionnelles	20
Figure II. 3:Antennes à faible Gain	20
Figure II. 4:Antennes Élémentaires [25].	21
Figure II. 5:Configurations d'antennes à gain moyen [25].....	22
Figure II. 6: Configurations d'antennes à gain élevées [25].	23
Figure II. 7:Configurations d'antennes à gain très élevé[25]	23

Chapitre III

Figure III. 1:logiciel de simulation CST Studio Suite	27
Figure III. 2: Structure de l'antenne patch sur CST	29
Figure III. 3: Simulation de coefficient de réflexion S11	29
Figure III. 4:(a) et (b) et (c) les différentes géométries de l'antenne patch	30

Figure III. 5: Le coefficient de réflexion S11 des différents essais d'antenne patch	30
Figure III. 6: Antenne adaptée avec encoche	31
Figure III. 7: Le coefficient de réflexion S11	31
Figure III. 8: (a) et (b) le diagramme de rayonnement des deux fréquences en (3D) et polaire.	32
Figure III. 9: Le gain de l'antenne patch en fonction de la fréquence	33
Figure III. 10: Le VSWR de l'antenne patch en fonction de la fréquence.	33
Figure III. 11: La densité de courant dans l'antenne patch proposée pour les fréquences 3.722 et 6.17	34
Figure III. 12: Réseaux d'antenne à 2 éléments	34
Figure III. 13: Le coefficient de réflexion S11 des essais.	35
Figure III. 14: Le coefficient de réflexion S11	35
Figure III. 15: (e) et (f) les diagrammes de rayonnement des deux fréquences [3.668 ; 6.08] en (3D) et polaire	36
Figure III. 16: Le VSWR du réseau à 2 éléments.	36
Figure III. 17: (g) est la densité de courant pour la fréquence 6.08 et (h) pour la fréquence 3.688	37
Figure III. 18: Réseaux d'antenne à 4 éléments	37
Figure III. 19: Le coefficient de réflexion S11 des essais.	37
Figure III. 20: Le coefficient de réflexion S11 de résultat final d'une antenne à 4 éléments...38	38
Figure III. 21: (m) et (n) le diagramme de rayonnement des deux fréquences de résultat final d'une antenne à 4 éléments en (3D) et polaire.....	38
Figure III. 22: Le gain des deux fréquences de résultat final d'une antenne à 4 éléments.	39
Figure III. 23: Le VSWR des deux fréquences de résultat finale d'une antenne à 4 éléments.39	39
Figure III. 24: (I) est la densité de courant pour la fréquence 3.6874 et (J) pour la fréquence 6.0193	40
Figure III. 25: Réseaux d'antenne à 6 éléments	40
Figure III. 26: Le coefficient de réflexion S11 des essais	41
Figure III. 27: Le coefficient de réflexion S11 de résultat final d'une antenne à 6 éléments...41	41
Figure III. 28: (x) et (w) le diagramme de rayonnement des deux fréquences de résultat final d'une antenne à 6 éléments en (3D) et polaire.....	42
Figure III. 29: Le gain des deux fréquences de résultat final d'une antenne à 6 éléments.	42
Figure III. 30: Le VSWR des deux fréquences de résultat final	42

Figure III. 31:(K) est la densité de courant pour la fréquence 3.668 et (L) pour la fréquence 5.85243

La liste des tableaux

Tableau III. 1: Equation de calculs des dimensions de l'antenne patch rectangulaire [4]28
Tableau III. 2: Dimension de l'antenne patch rectangulaire29

Liste des Acronymes

VSWR: Voltage Standing Wave Ratio

CST: Computer Simulation Technology

dB: decibel

GHz: Gigahertz

Mhz: Megahertz

FSS : Service fixe par satellite

VSAT : VerySmall Aperture Terminal

2D : Deux dimensions

3D : Trois dimensions

Introduction générale

Introduction générale

Le domaine des télécommunications a connu un progrès technologique dans les dernières années grâce à la forte demande de la population et de l'industrie. Parmi les applications de ce domaine qui ont attiré plus d'attentions sont les antennes. Elles sont des éléments indispensables pour assurer une opération d'émission ou de réception des ondes électromagnétiques dans l'atmosphère terrestre ou dans l'espace. Elles sont présentes dans tous les systèmes de communication sans-fil.

Le travail présenté dans ce manuscrit a pour objectif la conception d'un réseau d'antenne patch pour les applications satellitaires en bande C. Notre travail de mémoire est organisé en trois chapitres :

- Le premier chapitre est consacré à une présentation générale des antennes imprimées, les différentes caractéristiques et les différents mécanismes d'alimentation,
- Dans le deuxième chapitre, nous parlerons sur les différentes bandes de fréquence satellitaires et notamment la bande C
- Dans le troisième chapitre nous présenterons la conception logicielle et les résultats de simulations de l'antenne imprimée étudiée à savoir le paramètre S11, le diagramme de rayonnement, le gain, le VSWR, la distribution de courant, etc...

Chapitre I

Généralités sur les antennes imprimées

I.1 Introduction

Les antennes imprimées ont des nombreux domaines d'utilisation dont les chercheurs s'intéressent beaucoup. Dans ce chapitre , nous parlerons des antennes patch, nous allons d'abord définir les antennes imprimées, puis citer ses différentes caractéristiques, Ensuite nous allons présenter les différents types d'alimentations, Après cela, nous parlerons sur les réseaux d'antennes.

I.2 Description des antennes imprimées ou patch

Une antenne imprimée est constituée d'un plan de masse, d'une ou plusieurs couches de substrat de permittivités ϵ_r égales ou différentes (**Figure I.1**). L'élément rayonnant de géométrie quelconque (rectangulaire, circulaire, carrée,...) est situé sur la surface supérieur. Il existe plusieurs mécanismes d'alimentation pour exciter l'antenne [1].

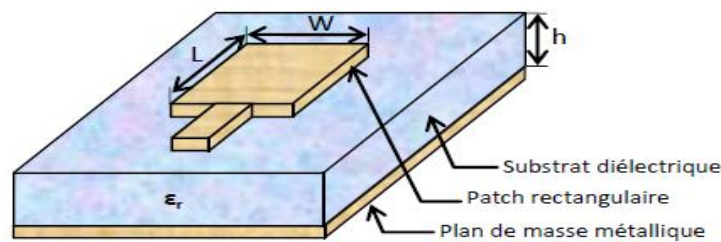


Figure I.1:Présentation d'une antenne patch.

L'antenne patch peut prendre plusieurs formes comme la montre sur la Figure2 :

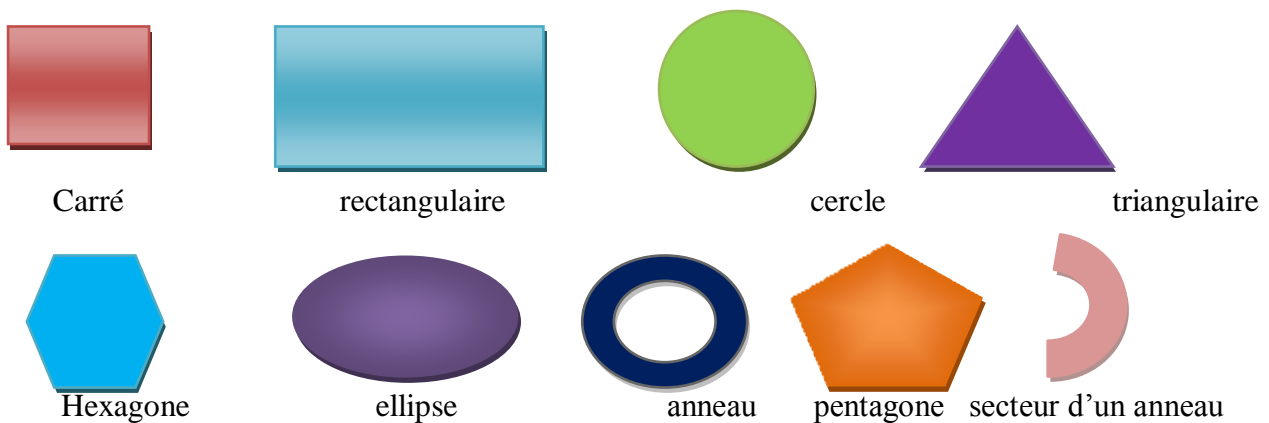


Figure I. 2:Les différentes formes du patch

I.3 Les caractéristiques des antennes

Dans les communications sans fil, chaque application met en relief certaines caractéristiques des antennes. D'une manière générale, une antenne utilisée dans un type d'application ne peut pas l'être dans d'autres. Une antenne peut être caractérisée par [2] :

I.3.1 Le coefficient de réflexion S11

On définit la qualité d'adaptation d'une antenne soit en donnant son impédance Caractéristique (I.1) (souvent 50 ohms), soit en donnant son coefficient de Réflexion S11 (I.2).

$$Z_e = R + j \quad (I.1) \quad \text{I.1}$$

$$|S_{11}|^2 = \frac{P_r}{P_\tau} \quad \text{I.2}$$

$|S_{11}|$ est le coefficient de réflexion en tension, donné par la formule et exprimée en Décibels. C'est le rapport entre la tension réfléchie et la tension transmise.

Le paramètre S11 qui est le coefficient de réflexion à l'entrée de l'antenne exprime le transfert d'énergie par cette antenne. La valeur de ce paramètre varie en fonction de la fréquence. Afin d'assurer une bonne adaptation dans la bande de fréquence désirée, nous imposons le critère suivant $|S_{11}| \leq -10 \text{ dB}$ [2].

I.3.2 La bande passante

La bande passante est une bande où le transfert d'énergie de l'alimentation vers L'antenne (ou de l'antenne vers le récepteur) est maximal. Dans la plupart des cas, la bande passante est définie en fonction du coefficient de réflexion. Il n'y a pas de critères précis pour la limite du coefficient de réflexion. Cependant, un critère typique est d'avoir un coefficient de réflexion inférieur à -10 dB sur toute la bande passante.

Certaines antennes sont très sélectives (bandes passantes très étroites), d'autres peuvent être utilisées sur une très large bande de fréquences [2]

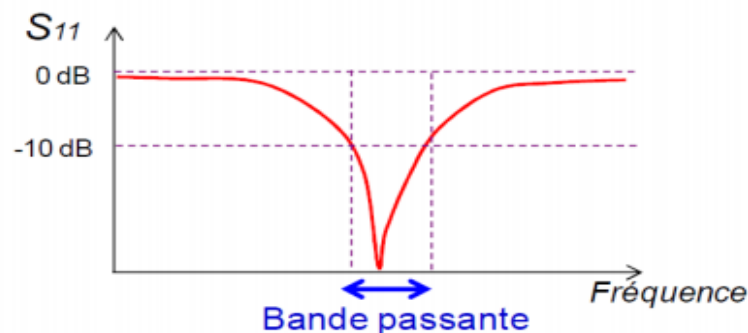


Figure I. 3: La Bande passante [24]

I.3.3 La Directivité

La directivité $D(\theta, \varphi)$ d'une antenne dans une direction (θ, φ) est le rapport entre la puissance rayonnée dans une direction donnée (θ, φ) et la puissance que rayonnerait une antenne isotrope [4] [5]

$$D(\theta, \varphi) = \frac{p(\theta, \varphi)}{p_r/4\pi} = 4\pi \frac{p(\theta, \varphi)}{p_r} \quad \text{I.3}$$

I.3.4 Le Gain

C'est le rapport entre la puissance rayonnée P_r sur la puissance d'alimentation P_a . Il dépend de sa directivité, c'est le rapport entre la puissance rayonnante dans le lobe principal et la puissance rayonnée par une antenne de référence [6] [7]. Il est présenté par l'équation suivante :

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

$P(\theta, \varphi)$: Puissance rayonné dans une direction.

P_a : Puissance rayonnée par l'antenne.

Il peut être exprimé en fonction de rendement et la directivité :

$$G(\theta, \varphi) = \eta \times D(\theta, \varphi) \quad \text{I.5}$$

I.3.5 Rendement de l'antenne

L'efficacité ou le rendement η d'une antenne définit la capacité de transformer la puissance transmise à l'antenne P_t en puissance rayonnée P_{ray} [9]. Elle est définie par :

$$\eta = \frac{P_{ray}}{P_t} \quad \text{I.6}$$

Avec P_{ray} et P_t sont données par :

$$P_{ray} = \iint r^2(\theta, \varphi) d\varphi E_t P_t = 4\pi r^2 S_{ri} \quad \text{I.7}$$

S_{ri} : la surface effective

D'après les équations, l'efficacité peut être exprimée par le rapport entre le gain et la directivité :

$$\eta = \frac{G(\theta,\varphi)}{D(\theta,\varphi)} \quad \mathbf{I.8}$$

I.3.6 Diagramme de rayonnement

Le diagramme de rayonnement d'une antenne est la représentation graphique des champs EM existant dans le champ lointain. Ce diagramme peut être tracé en 2D (cartésienne ou polaire) ou en 3D. Le diagramme est caractérisé par un lobe principal (ouverture à impuissance), des lobes secondaires (niveau de lobes secondaires), les zéros (ses orientations vers les directions non désirées) et les lobes de périodicités (pour les réseaux d'antennes) [8].

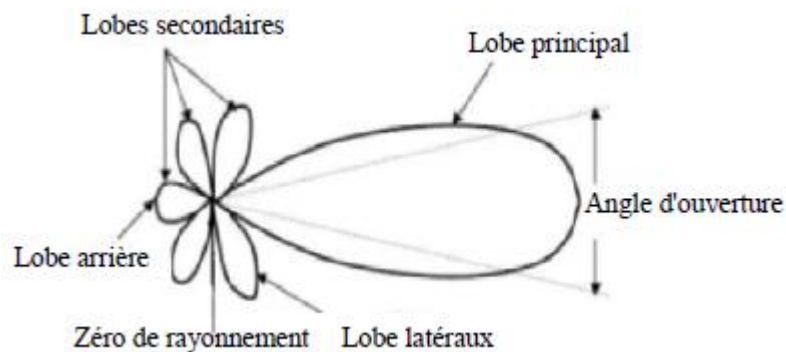


Figure I. 4 :Diagramme de rayonnement classique d'une antenne directive [3].

I.3.7 Impédance d'entrée de l'antenne

Une antenne alimentée par une ligne de transmission d'impédance caractéristique, l'impédance d'antenne peut être considérée comme une impédance complexe :

$$Z_a = R_a + jX_a \quad \mathbf{I.9}$$

L'impédance d'entrée de l'antenne dépend bien évidemment de la géométrie de l'antenne mais aussi du couplage entre la ligne et l'antenne.

L'impédance d'entrée de l'antenne doit être la plus proche possible de 50Ω dans sa partie réelle, et nulle dans sa partie imaginaire. Elle dépend du type d'alimentation [2].

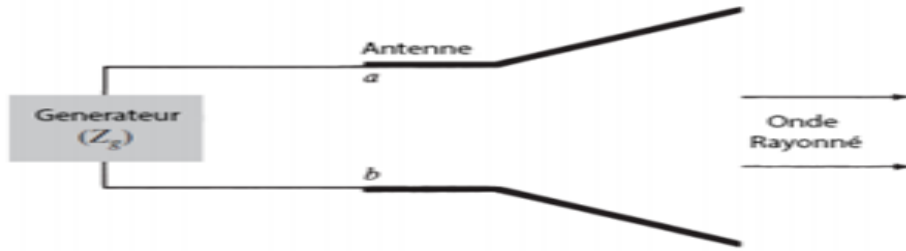


Figure I. 5 :Antenne en mode d'émission [10]

I.3.8 Le VSWR (Voltage Standing Wave Ratio)

Dans les notes d'application d'antennes, l'adaptation de l'antenne est souvent caractérisée par le rapport d'onde stationnaire (ROS) ou Voltage Standing Wave Ratio (VSWR). Lorsqu'il y a désadaptation, la réflexion d'une partie de l'onde incidente et l'addition avec l'onde incidente conduit à l'apparition d'une onde stationnaire dans la ligne qui relie l'antenne à la source (ou au récepteur). [30]

$$\text{Le VSWR est donné par } VSWR = \frac{1+|S_{11}|}{1-|S_{11}|} \quad \mathbf{I.10}$$

$$\text{Avec } S_{11} = \frac{V_r}{V_i} = \frac{Z_{an}-Z_c}{Z_{an}+Z_c} \quad \mathbf{I.11}$$

Avec :

V_r : Amplitude de l'onde réfléchie.

V_i : Amplitude de l'onde incidente.

Le VSWR minimal correspondant à une bonne adaptation. Une bonne conception d'antenne doit avoir une impédance de 50 Ω à 75 Ω .

I.4 Les techniques d'alimentations

L'alimentation des antennes imprimée, repose essentiellement sur deux classes d'excitation :

- Excitation avec contact
- Excitation sans contact.

Dans les méthodes d'excitation avec contact, la puissance est acheminée aux patches rayonnants en utilisant un élément de contact tels le câble coaxial et la ligne micro ruban. Dans la deuxième classe d'excitation, le couplage électromagnétique est utilisé pour transmettre la puissance de la ligne micro ruban au patch rayonnant. Les trois techniques d'alimentation les plus utilisées sont la ligne micro ruban sonde coaxiale, couplage par fente [12], [13].

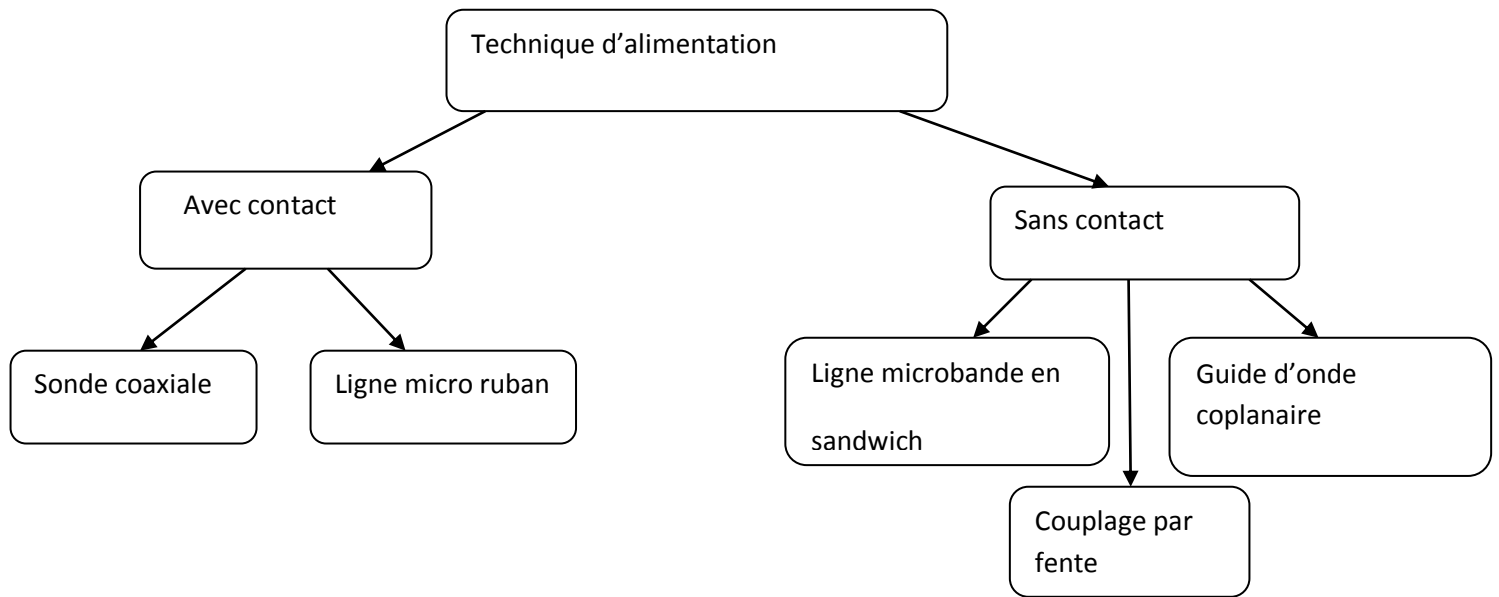


Figure I. 6: Les techniques d'alimentation

Dans le cas de notre travail de simulation, nous avons utilisé la technique d'alimentation avec ligne micro ruban, pour sa simplicité de conception.

I.4.1 Alimentation avec contact

I.4.1.1 Sonde coaxiale

Le câble de la sonde coaxiale traverse le plan de masse et le substrat. Le Conducteur central est connecté sur l'élément rayonnant, et le conducteur extérieur est connecté au plan de masse [13]. Cette alimentation est très utilisée avec les patches de formes circulaire et annulaire.

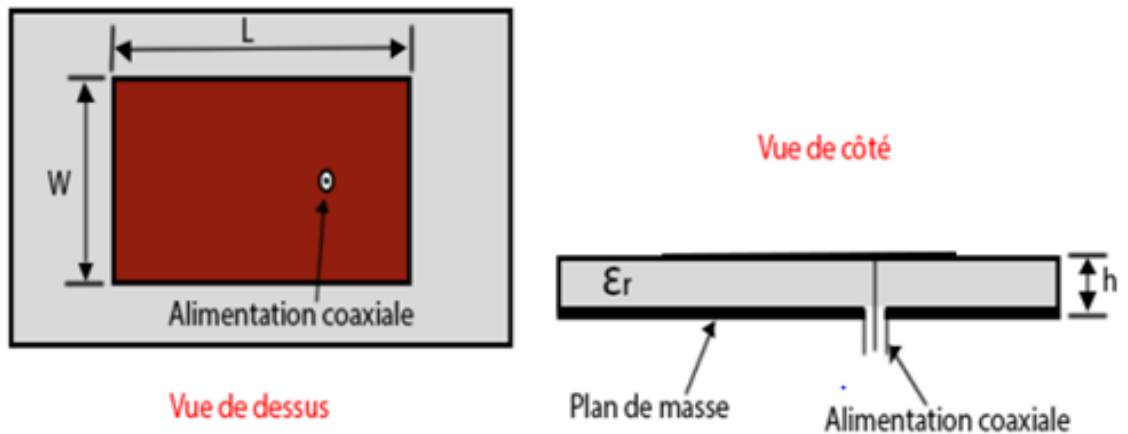


Figure I. 7: Alimention par sonde coaxiale [12-18]

I.4.1.2 Ligne micro ruban

La ligne micro ruban est de largeur plus petite par rapport au patch, elle est gravée avec le patch en même temps. Elle est très utilisée dans les réseaux d'antennes imprimées de différentes formes [14].

L'alimentation peut se faire par la connexion directe à une ligne micro ruban, dont le point de jonction est situé sur l'axe de symétrie de l'élément ou décalé par rapport à cet axe de symétrie, si cela permet une meilleure adaptation d'impédance. L'alimentation axiale avec encoche donne de bons résultats [15], [16]

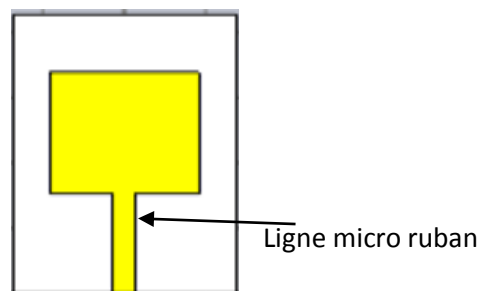


Figure I. 8: Alimention par ligne micro ruban

I.4.2 Alimentation sans contact (par proximité)

I.4.2.1 Ligne microbande en sandwich

Une antenne plaquée peut être aussi alimentée par couplage électromagnétique de la ligne micro-ruban à l'élément rayonnant. Dans ce cas, le résonateur et la ligne d'alimentation

sont situés du même côté du plan de masse. L'antenne est formée de deux substrats, avec une ligne micro-ruban sur le substrat inférieur qui se termine en circuit ouvert sous le patch imprimé sur le substrat supérieur.

Le couplage électromagnétique a l'avantage de permettre la réalisation du patch rayonnant sur un substrat relativement épais, afin d'améliorer la bande passante, pendant que la ligne d'alimentation est imprimée sur un substrat plus mince, afin de Réduire les rayonnements et les couplages parasites [13].

I.4.2.2 Guide d'onde coplanaire

L'élément rayonnant se trouve sur la face supérieure du substrat de fente Rayonnante. La ligne d'alimentation et le plan de masse se trouvent à la même Façade inférieure du substrat [2]

I.4.2.3 Couplage par fente

Une ligne est disposée au- dessus du plan de masse, qui est entaillé d'une Fente sous le patch afin que l'énergie amenée par la ligne soit communiquée à L'antenne [17].

I.5 Techniques d'adaptation des antennes imprimées

Chaque système qui transforme l'énergie sur une ligne de transmission a besoin d'adaptation, car la ligne transforme l'impédance de charge en une autre valeur d'impédance au droit de la source. Ce que voit la source dépend donc de l'impédance de charge, de la longueur électrique de la ligne et de son impédance caractéristique [10], [11].

I.5.1 Adaptation par ligne quart d'onde

Dans la construction de circuits hyperfréquences, on recherche souvent l'adaptation, c'est à dire à se ramener à une impédance différente (qui est souvent l'impédance caractéristique) de celle obtenue en fin de circuit [10], [11].

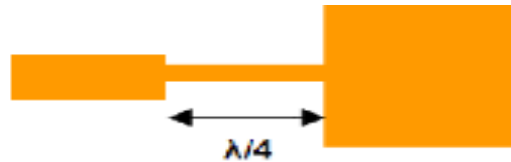


Figure I. 9:adaptation par quart d'onde [10], [11]

I.5.2 Adaptation par stub

Une autre façon de procéder pour arriver à l'adaptation d'une charge quelconque consiste à utiliser un stub. Grâce à un stub en un circuit ouvert (open stub) ou en court-circuit (short stub). La solution retenue est généralement celle présentant le plus faible encombrement. Le raisonnement peut se faire en impédance mais il est plus facile de travailler dès le départ en admittance pour faire la somme des impédances parallèles ramenées [10], [11]. Un stub est un tronçon de ligne de longueur s que l'on branche en dérivation sur la ligne principale à une distance d de la charge [10], [11].

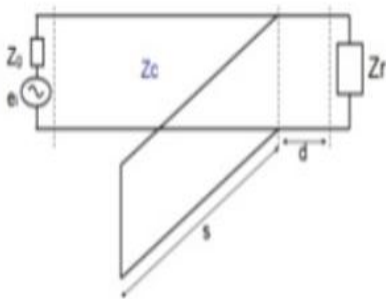


Figure I. 10:Modélisation de l'antenne à adaptation simple stub [10],[11]

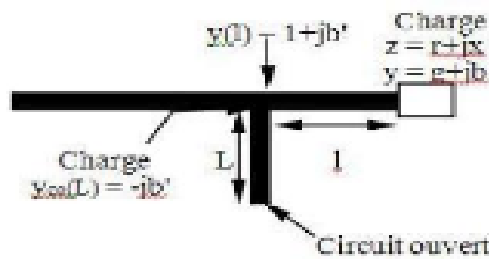


Figure I.11:stub en circuit ouvert [10], [11]

I.5.3 Adaptation avec encoches

Pour adapter l'antenne, on utilise des encoches, il suffit de modifier la géométrie du patch. Les dimensions des encoches [10], [11].

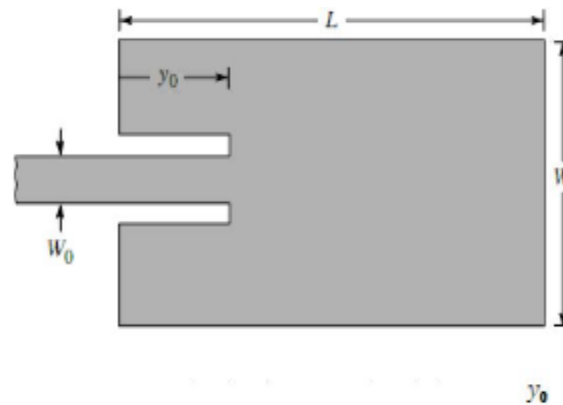


Figure I. 11: Patch adapté par encoches de longueur [10], [11]

I.6 Avantages et limites des antennes imprimées

Les antennes patch micro-ruban ont plusieurs avantages qui les rendent attrayantes pour beaucoup d'applications. Elles couvrent une large gamme de fréquence de 100 MHz à 100 GHz [19].

Ces avantages sont :

- Faible poids.
- Conforme sur les surfaces planes et non fabriqué.
- Mécaniquement robuste.
- Souple en termes de fréquence de résonance.
- Facile à intégrer avec les circuits MMICs (monolithic microwave integrated circuit) sur un même substrat.

D'autre part, elles ont quelques **limites** principales :

- Faible efficacité de rayonnement.
- Possibilité de fonctionnement en faible puissance.
- Effet de couplage du rayonnement de l'alimentation.
- Largeur de bande de fréquence très étroite (en général seulement une fraction d'un pour cent ou à la plupart des quelques pour cent).
- Le gain légèrement inférieur comparé aux antennes conventionnelles à micro-ondes.

I.7 Les domaines d'applications des antennes imprimées

Les domaines d'applications des antennes imprimées sont de plus en plus variés, les principales applications sont [20] :

- La téléphonie mobile.
- Les radars.
- Les télécommunications spatiales.
- La télémétrie des missiles et la télésurveillance.
- Guidage des missiles et télédétection.

I.8 Réseau d'antennes

I.8.1 Définition

Un réseau d'antennes est un assemblage d'antennes élémentaires identiques (antennes filaires, cornets, patch ...) avec la même orientation, disposées selon une forme donnée et excitées par un système d'alimentation, afin de créer un rayonnement de forme particulière.

Le rayonnement résultant est la superposition des rayonnements provenant de chaque élément, la puissance rayonnée est donc plus grande. Le diagramme de rayonnement d'un réseau d'antenne est plus étroit que celui d'une antenne élémentaire, sa directivité et son gain sont aussi importants, c'est pour ces avantages que les systèmes de télécommunication récents utilisent les réseaux d'antennes comme dispositifs d'émission et de réception [21,22].

I.8.2 Alimentation d'un réseau d'antennes

Alimentation série : les éléments rayonnants sont excités en série à travers une ligne de transmission. Entre deux éléments rayonnant consécutifs il y a un déphaseur qui permet d'imposer la loi de phase appropriée (Figure 12).

Alimentation parallèle : le circuit d'alimentation possède une entrée et plusieurs sorties égales aux nombres des éléments rayonnants. La synthèse du réseau permet de déterminer les coefficients de pondération et les déphasages des signaux à affecter à chaque élément (Figure 13).



Figure I. 12: alimentation série d'un réseau d'antennes



Figure I. 13: alimentation parallèle d'un réseau d'antennes

I.8.3 Les types de réseaux d'antenne

Le gain et la directivité d'une antenne élémentaire telle que le dipôle ou les antennes imprimées sont assez faibles car le rayonnement est très peu directif, ces antennes ne répondent pas toujours aux exigences de certaines applications. Leur association crée un réseau dont la particularité est d'avoir un gain plus élevé dans une direction privilégiée puisque la taille électrique globale de l'antenne est augmentée. Les réseaux possèdent surtout l'avantage de pouvoir effectuer un balayage électronique du faisceau rayonné. On peut donc, par commande électronique, pointer successivement plusieurs directions ou modeler de manière dynamique le diagramme de rayonnement [21, 22, 23].

Il existe plusieurs configurations géométriques des réseaux d'antennes que l'on peut regrouper comme suit : réseau linéaire, réseau circulaire, réseau planaire (forme rectangulaire ou circulaire) et réseau volumique (**Figure 15**).

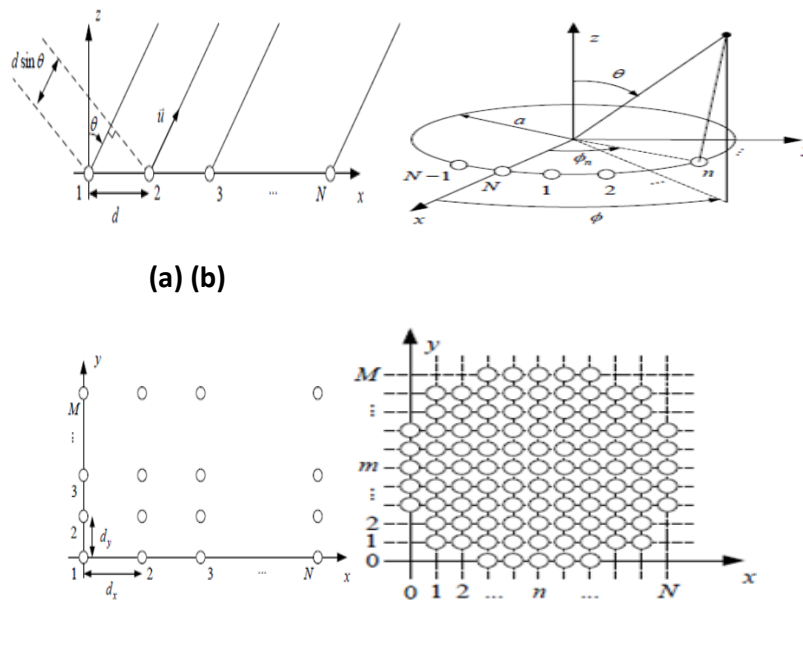


Figure I. 14: Géométries d'un réseau d'antennes. (a)-linéaire (b)-circulaire (c)-planaire (d)-volumique

I.9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté en premier lieu la description des antennes imprimées avec ses caractéristiques, les différentes techniques d'adaptation et d'alimentation. Nous avons cités les différents avantages et inconvénients ainsi que leurs domaines d'applications. En fin, nous avons donné un bref aperçu sur les réseaux d'antenne et leurs propres géométries existantes.

Chapitre II

La bande C

II.1 Introduction

Les systèmes de télécommunications utilisent les satellites depuis longtemps pour les applications de services fixes et mobiles. Dans ce chapitre, nous avons parlé des bandes de fréquences pour les communications satellitaires et surtout la bande C.

II.2 Les bandes de fréquences pour les communications par satellitaires

Les bandes de fréquences mises en œuvre pour les communications par satellite sont le plus souvent comprises entre 1 et 30 GHz. En dessous de 1 GHz les ondes sont principalement réfléchies et diffusées par l'atmosphère. Au dessus de 30 GHz les liaisons satellitaires sont possibles mais l'absorption atmosphérique est importante et la technologie d'amplification plus complexe. Les bandes de fréquences mises en œuvre pour les communications par satellite sont le plus souvent comprises entre 1 et 30 GHz. En dessous de 1 GHz les ondes sont principalement réfléchies et diffusées par l'atmosphère. Au dessus de 30 GHz les liaisons satellitaires sont possibles mais l'absorption atmosphérique est importante et la technologie d'amplification plus complexe [25].

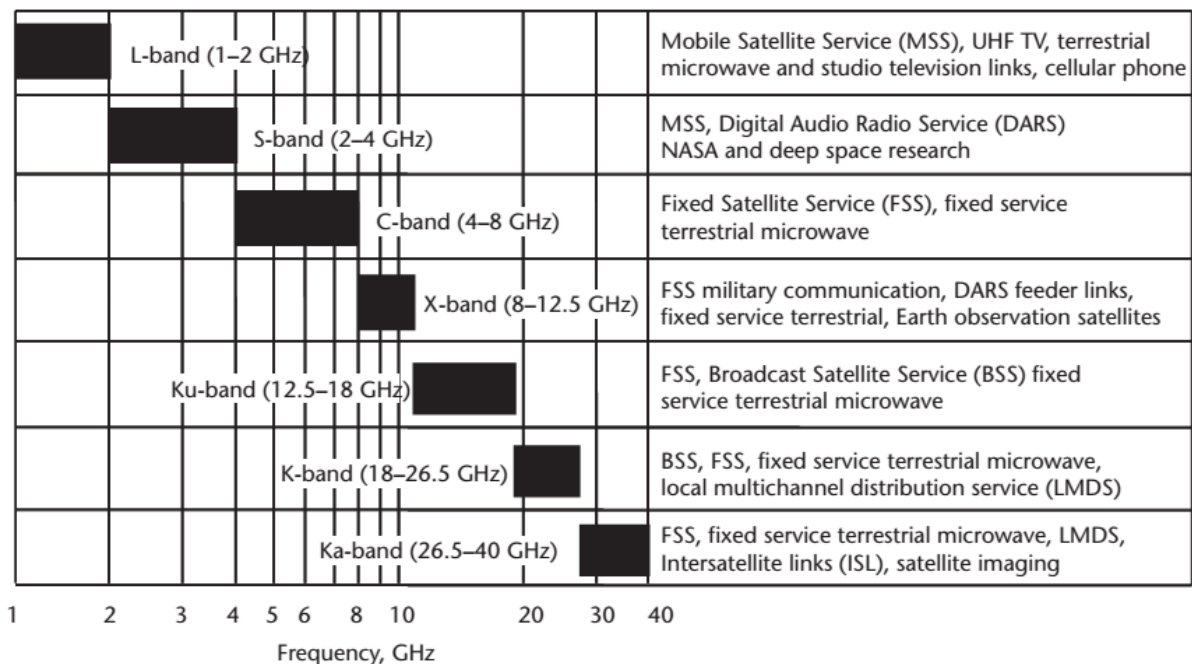


Figure II. 1: différentes applications pour les satellites de télécommunications, dans la bande 1-30 GHz [25]

1. Les Bandes **C** et **Ku** sont les plus utilisées pour les services fixes par satellites (FSS), et les services de radiodiffusion par satellite (BSS) ; tel que la transmission de la vidéo, des données et de la voix.

2. La Bande-**L**, est la bande de fréquence la plus courante pour les services mobiles par Satellite, comme la transmission de la voix et des données.
3. La Bande-**Ka** sera utilisée prochainement pour les services vidéo et de données. La fréquence et la puissance de sortie d'un signal satellitaire déterminent la taille de l'antenne de la station terrienne. Lorsque la fréquence augmente, la longueur d'onde diminue. À mesure que la longueur d'onde augmente, il faut des antennes plus grosses pour capter le signal.
4. **Bande S (2 à 4 GHz)** : Radars météorologiques, radar de navires de surface et certains satellites de communication, en particulier ceux de la NASA pour la communication avec l'ISS et la navette spatiale.
5. **Bande X (8 à 12 GHz)** : Principalement utilisé par les militaires. Utilisé dans les applications radar, y compris le radar à ondes continues, à impulsions, à polarisation unique, à double polarisation, ouverture synthétique et à réseaux phases [26].

II.3 Principales bandes de fréquences Satellite (Downlink et Uplink)

Les bandes de fréquence	Les fréquences
La bande S	2160 – 2690 MHz
La bande C	Downlink 3.4 – 4.2 GHz Uplink 5.85 – 6.65 GHz
La bande X	Downlink 7.25 – 7.75 GHz Uplink 7.9 – 8.4 GHz
La bande Ku	Downlink 10.7 – 12.75 GHz Uplink 13.75 – 14.5 GHz - 17.3- 18.1 GHz
La bande Ka	Downlink 19.7 – 20.2 GHz (civil) / 20.2 – 21.2 GHz (militaire) Uplink 29.5 – 30 GHz (civil) / 30 – 31 GHz (militaire)
La bande Q	Downlink 20.2 – 21.2 GHz Uplink 43.5 – 45 GHz

Tableau II. 1: Les fréquences de différentes bandes des fréquences [28]

II.4 Les services de la bande C

II.4.1 Service fixe par satellite (Fixed Satellite Service FSS) : entre les stations terrestres à positions définies, soit un ou plusieurs satellites ; l'emplacement donné peut être un point fixe déterminé ou tout point fixe dans des zones spécifiées ; dans certains cas, ce service comprend les liens satellites à satellite, qui peuvent également être assurés par les services Inter satellites ; la FSS peut également comprendre les liaisons de connexion pour d'autres services.

II.4.2 VSAT : VSAT est l'acronyme de « **VerySmall Aperture Terminal** ». Ce sont des stations possédant des antennes à petites ouvertures (par rapport à la longueur d'onde), de diamètre allant de 1.2m à 2.4m. Il désigne un terminal terrestre lié à un satellite géostationnaire typiquement par un lien bidirectionnel, utilisé pour la transmission de données, capable de fournir aux utilisateurs des services de communication intégrant voix, données et vidéo. Les stations VSAT ne peuvent pas supporter toutes seules des liaisons satellitaires à grand débit, d'où le besoin d'installation d'un site central appelé Hub [29].

II.5 Les divers types d'antennes existantes dans les satellites

Beaucoup de paramètres caractérisent une antenne, et quelque paramètre sont plus important que d'autre dans une l'application bien spécifiée. À titre d'exemple : les liaisons point à point/pont-multi point nécessitent un Gain élevé directif. Tandis que, les applications GPS ont besoin d'un Gain omnidirectionnel à faible puissance. Il est donc utile d'examiner brièvement les différentes catégories d'antennes trouvées dans les applications spatiales [25].

II.5.1 Les Antennes à très Faible Gain

Ces antennes sont utilisées pour obtenir la diffusion le plus large possible du champ rayonné (couverture de l'antenne). Ce sont généralement des antennes plutôt simples, avec un gain très inférieur (< 0 dB), par suite de pertes ohmiques et des réflexions d'entrée. Ces antennes sont normalement utilisées pour les systèmes de services (TT & C² [**Telemetry, Tracking and Control**] transmission de données et autres), qui présente quelques paramètres dans leurs conceptions est généralement utilisé pour maximiser la couverture et la pureté de polarisation. En général, ils sont les antennes filaires, hélices simples ou multiples, ou des antennes à fente, etc. Leur conception se caractérise principalement à l'utilisation de solutions simples, mais raffinées pour obtenir le diagramme de rayonnement désiré et une bonne adaptation d'entrée sans compromettre leur fiabilité (**Figure II.2**)[25].



(a) Antenne TT & C

(b) antenne spirale conique

Figure II. 2:Antennes omnidirectionnelles

II.5.2 Les Antennes à Faible Gain

Cette catégorie comprend les antennes de dimensions comparables à la longueur d'onde et avec un diagramme de rayonnement directif. Elles sont capables de générer un faisceau à peu près circulaire, éventuellement en deux polarisations différentes. Leur couverture a la forme d'une calotte sphérique avec un angle d'ouverture entre 120° et 40° . Leur gain est en dessous de 10dB.

Notez qu'une ouverture circulaire éclairée de façon uniforme avec un diamètre égal à la longueur d'onde, rayonne un faisceau couvrant un angle d'environ 60° à -3 dB, et le niveau a une directivité maximale de l'ordre de 10 dB. En général, ces paramètres de conception de ces structures sont utilisés pour contrôler les caractéristiques les plus importantes du diagramme de rayonnement (le gain, la largeur du faisceau et de la pureté de polarisation), et pour assurer une bonne adaptation d'entrée[25].

**Figure II. 3:**Antennes à faible Gain

Ces antennes sont typiquement utilisées pour former des matrices ou pour alimenter des réflecteurs, mais elles peuvent également être utilisées séparément, par exemple pour générer un faisceau qui couvre toute la surface visible de satellites en orbite basse.

Cette classe d'antennes comprend une vaste gamme de formes. Par exemple, les corés deguide d'ondes peuvent avoir une forme pyramidale, conique ou profil en escalier ; ils peuvent avoir des sections rectangulaires, circulaires, elliptiques, octogonales et hexagonales ; ils peuvent être lisses ou à parois ondulées, et un linéaire ou autrement en forme de fusée.

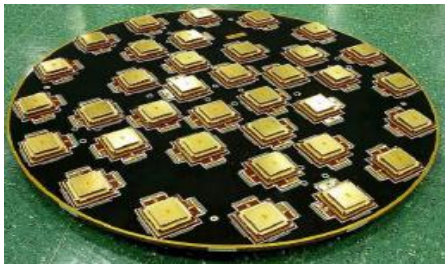
Les Éléments imprimés individuels appartiennent également à cette catégorie. Ici aussi, la variété est énorme : dipôles, antennes patches avec différentes formes, antenne avec fente et de petites spirales. Aussi la possibilité de combiner quelques éléments dans une configuration empilée pour agrandir la bande passante et (légèrement) augmenter le gain.

II.5.3 Les antennes élémentaires

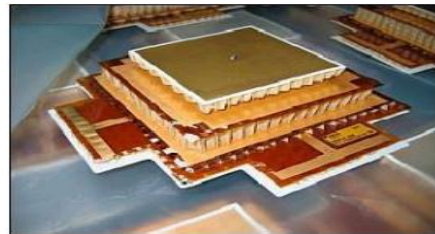
Les antennes élémentaires sont les structures rayonnantes les plus simples, ceux obtenus par une ligne permettant de rayonner, généralement en modifiant sa géométrie vers l'extrémité ouverte.

Elles peuvent être considérées comme les blocs de construction pour la construction de plusieurs antennes complexes (réseau d'antennes réflecteur) (Figure II.4. (d)).

Les antennes Monopôles, dipôles, antennes Vivaldi et guides d'ondes tronqués appartiennent à cette catégorie.



(c) Antenne élémentaire



(d) Réseau d'antennes réflecteur

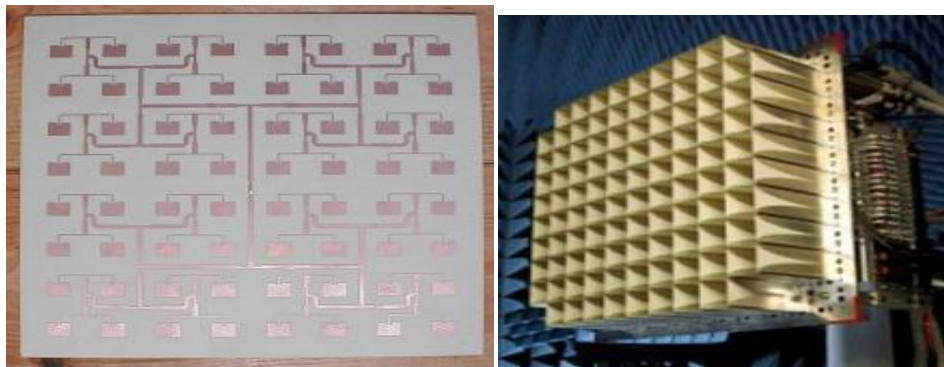
Figure II. 4:Antennes Élémentaires [25].

D'autres types d'antennes élémentaires sont obtenues perturbent une autre ligne de transmission non-rayonnante, par exemple d'une fente dans un guide d'onde, un micro ruban chargé périodiquement ou un réseau de diffraction (bandes métalliques ou les plantations) sur un guide d'ondes diélectrique. Tous ces radiateurs sont caractérisés par un diagramme de rayonnement assez large, un gain faible ($< 10\text{dBi}$) et de l'impossibilité de les considérer comme isolés de l'environnement. Tout objet de diffusion présente dans leur voisinage immédiat modifie leur comportement (ex. : effet de couplage). Par conséquent, dans tous les cas pratiques, l'évaluation de la performance d'un radiateur primaire doit tenir compte de la présence des objets extérieurs[25].

II.5.4 Les Antennes à Gain moyen

Il existe une gamme de tailles intermédiaires dans lesquelles le comportement de fils et de l'ouverture des antennes est difficile à contrôler, tandis que l'utilisation de lentilles et de réflecteur n'est pas pratique. Il s'étend d'environ 3 à 10 fois la longueur d'onde.

Dans cette gamme de dimensions (c'est à dire d'obtenir un gain d'environ 10 à 20dBi), les antennes réseaux sont généralement préférées, car le nombre constant d'éléments permet un meilleur contrôle de leurs caractéristiques cette classe d'antennes est utilisée pour les applications nécessitant une couverture angulaire relativement large et un gain limité. Des exemples sont les faisceaux mondiaux de systèmes de satellites de communication, qui sont utilisés pour collecter les signaux en provenance des utilisateurs dispersés sur de vastes zones géographiques (par exemple, la surface de toute la terre visible) [25].



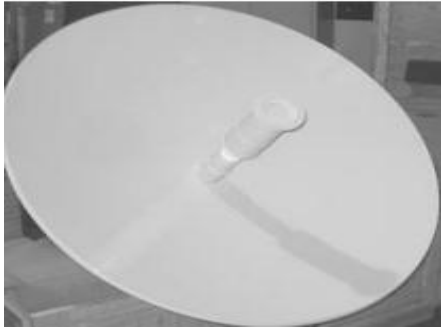
(a) Réseau d'antenne Patch (b) Réseau d'antennes Vivaldi

Figure II. 5: Configurations d'antennes à gain moyen [25].

II.5.5 Les Antennes à Gain élevé

Pour des niveaux de gain allant de 20dBi à 45dBi, il est possible d'utiliser des réflecteurs ou réseaux d'antennes ; ces derniers sont plus souples, tandis que le premier type est plus simple. Le choix entre les deux se fait en fonction des exigences particulières (Figure II.7) :

- Antennes à réflecteur sont généralement avantageuses lorsque plusieurs couvertures sont nécessaires ou lorsque l'efficacité de l'antenne est d'une importance primordiale
- Le réseau d'antennes est préféré lors d'un balayage, reconfiguration de la forme du faisceau ou un contrôle strict des lobes secondaires. Cependant, il n'y a pas des arguments généraux impérieuses de préférer une solution à l'autre et parfois le choix est fait sur la base de mécanique, thermique ou des considérations de fabrication plutôt que purement électromagnétiques[25].



(c) Antenne réflecteur



(d) Réseau d'antennes réflecteur

Figure II. 6: Configurations d'antennes à gain élevées [25].

II.5.6 Les Antennes à Gain très élevé

Pour certaines applications, y compris les systèmes de communication les plus avancés, les antennes d'un gain encore plus élevé sont utilisées (au de la de 45dBi). Ces antennes utilisent généralement des systèmes à réflecteur pour augmenter la taille de l'ouverture rayonnante équivalente. Il y a deux raisons principales à cela. Tout d'abord, pour les grandes dimensions physiques : une antenne à 100de longueur d'onde ($100 \times \lambda$) à une directivité du Gain maximal de 50 dB et un diamètre d'environ 3 mètres à 10 GHz les problèmes de production liés à la fabrication et aux essais de grands réseaux : l'antenne à 100 de longueur d'onde ci-dessus aurait 15000-20000 éléments[25].

**Figure II. 7:**Configurations d'antennes à gain très élevé[25]

II.6 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre les différents types de bandes des fréquences satellitaires en générale et les services satellitaires dans la bande C par ce que notre travail se concentre dessus et nous avons parlé aussi sur les divers types d'antennes existantes dans les satellites.

Dans le chapitre suivant on va donner un aperçu sur le logiciel de conception CST Microwave studio, et Nous allons discuté des résultats d'augmentation de gain avec réseau d'antenne.

Chapitre III

Simulations et résultats

III.1 Introduction

Dans ce chapitre nous allons concevoir avec le logiciel CST microwave une antenne patch rectangulaire pour les applications satellitaires en bande C [4-8] GHz. Nous allons tout d'abord donner un bref aperçu sur le logiciel de conception CST Microwave studio, puis nous allons détailler les étapes de simulations pour arriver à notre objectif principal.

III.2 Description du logiciel de simulation CST Studio Suite

Fondé en 1992, le logiciel de simulation électromagnétique CST STUDIO SUITE est l'aboutissement de nombreuses années de recherche et de développement dans les solutions les plus efficaces et précises de calcul pour la conception électromagnétique.

CST Microwave Studio est un logiciel de simulation électromagnétique de structure passives en 3 Dimensions basé sur la résolution des équations de Maxwell suivant la technique des équations intégrales (FIT, FiniteIntegrationTechnic). Cette méthode numérique offre une discrétisation de l'espace permettant la description directement en 3D de tous les composants des systèmes décrits, ce qui lui permet d'être appliqué à de nombreux problèmes électromagnétiques allant de la statique aux hyperfréquences en analyses temporelle et fréquentielle. De plus, contrairement à la plupart des logiciels de simulation électromagnétique, CST discrétise la forme intégrale des équations de Maxwell plutôt que leurs formes différentielles, et ce qui est l'une de ses caractéristiques clé de ce simulateur. CST Microwave Studio fait partie de CST DESIGN STUDIO suite, et offre un certain nombre de solveurs différents selon le type d'application et du problème rencontré [1].

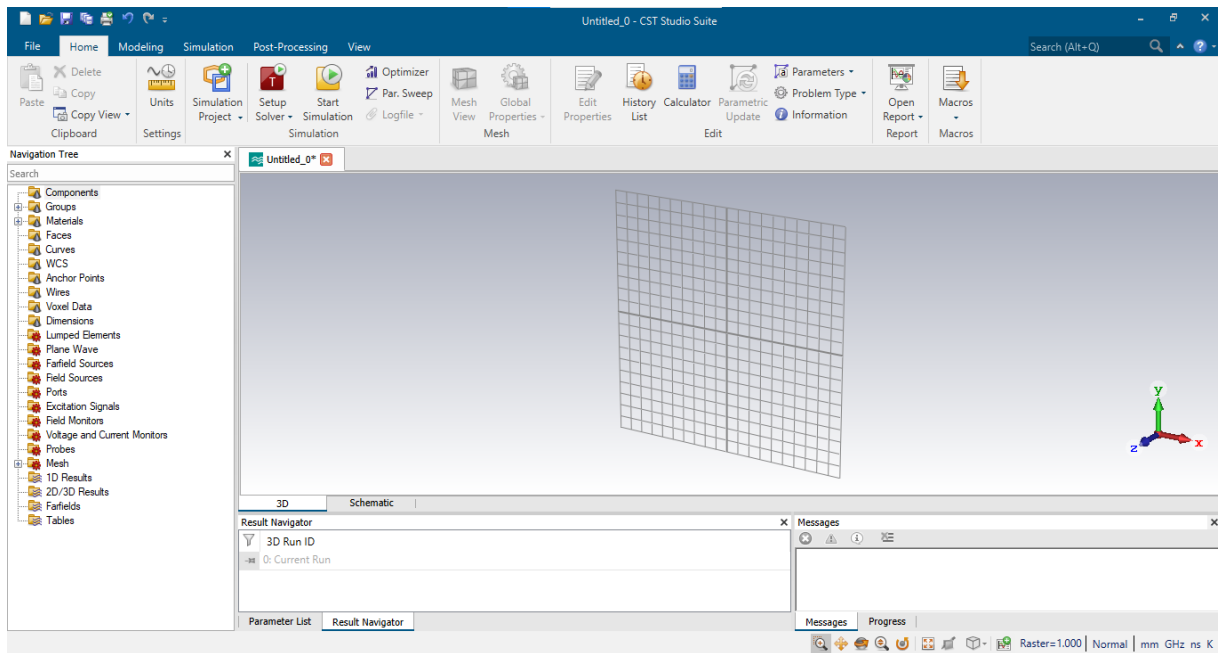


Figure III. 1: logiciel de simulation CST Studio Suite

III.3 Simulations d'une antenne patch rectangulaire

III.3.1 Calcul des paramètres géométrique de l'antenne

Dans notre travail, nous avons choisi un patch rectangulaire avec un substrat type Fr4 de permittivité relative $\epsilon_r=4.3$ et une hauteur de $h=1.5$ mm. Nous avons conçu la géométrie de base à une fréquence $f=5$ GHz comprise entre [4-8] GHz. Les paramètres de cette antenne ont été calculés en utilisant les équations du **Tableau III.1** :

	Paramètre d'antenne	Equations
patch	Longueur(L)	$L = L_{eff} - 2\Delta L$
	Longueur effective (l_{eff})	$l_{eff} = \frac{c}{2f\sqrt{\epsilon_{reff}}}$
	L'extension de la longueur (ΔL)	$\Delta L = 0.412h \frac{(\epsilon_{reff} + 0.3)(\frac{w}{h} + 0.264)}{(\epsilon_{reff} + 0.258)(\frac{w}{h} + 0.8)}$
	Constante diélectrique (ϵ_{reff})	$\epsilon_{reff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + \frac{12h}{w}\right)^{-1/2}$
	Largeur(W)	$W = \frac{c}{2f\sqrt{\frac{(\epsilon_r + 1)}{2}}}$
Substrat et plan de masse	Longueur de substrat et plan de masse(L_g)	$L_g = L + L_1 + 6h$
	Largeur du substrat et plan de masse(W_g)	$W_g = W + 6h$
La ligne d'alimentation	La largeur(W_1)	$W_1 = \frac{8e^A}{e^{2A} - 2}$ $A = \frac{z\sqrt{2(\epsilon_r + 1)}}{120} + \frac{1}{2} \frac{(\epsilon_r - 1)}{(\epsilon_r + 1)}$ $* \left[\ln \frac{\pi}{2} + \frac{1}{\epsilon_r} * \ln \frac{4}{\pi} \right]$
	La longueur(L_1)	$L_1 = \frac{c}{2f\sqrt{\epsilon_{reff}}}$

Tableau III. 1: Equation de calculs des dimensions de l'antenne patch rectangulaire [4]

III.3.2 Structure de l'antenne patch

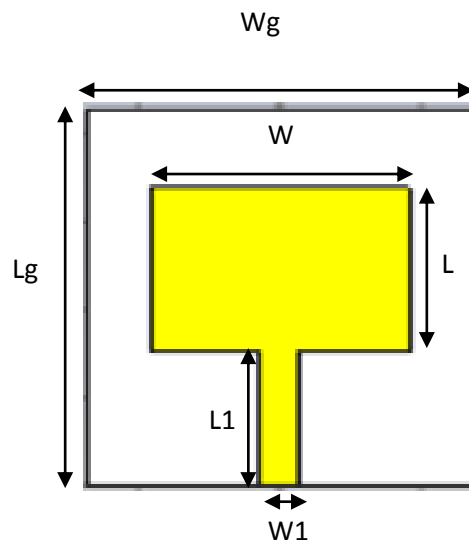


Figure III. 2: Structure de l'antenne patch sur CST

	La longueur	La largeur
Substrat et plan de masse	$L_g=42.8\text{mm}$	$W_g=27.42\text{mm}$
Patch	$L=18.46\text{mm}$	$W=18.42\text{mm}$
La ligne	$L_1=15.34\text{mm}$	$W_1=2.92\text{mm}$

Tableau III. 2: Dimension de l'antenne patch rectangulaire

III.3.3 Simulation du paramètre S11

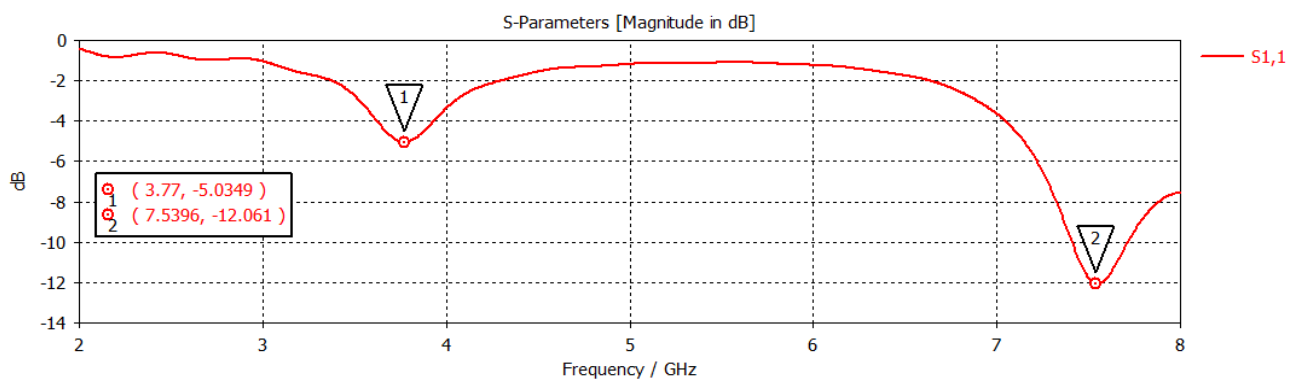


Figure III. 3: Simulation de coefficient de réflexion S11

La Figure III.3 donne un paramètre de réflexion de -5 dB à la fréquence 3.77GHz et -12 à la fréquence 7.53 GHz. Sachant que la bande C est comprise entre [3.6 ; 4.2] GHz pour la liaison du downlink et [5.8 ; 6.4] GHz pour le uplink, nous devons alors adapter le S11 entre ces deux plages de fréquences pour atteindre notre objectif.

III.3.4 Antenne patch adapté avec encoche à la bande C [4,8] GHz

Nous avons créé des fentes et des encoches sur le patch, pour l'adaptation des fréquences :

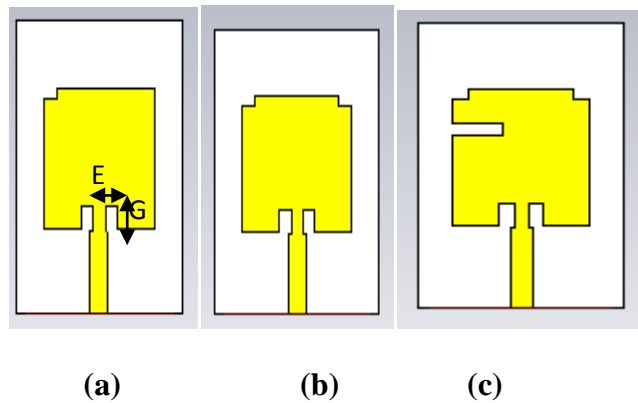


Figure III. 4:(a) et (b) et (c) les différentes géométries de l'antenne patch

	E	G
1	-7mm	16mm
2	-3mm	14mm
3	-5mm	16mm

Tableau III. 3:Tableau de différente valeur des trois schémas

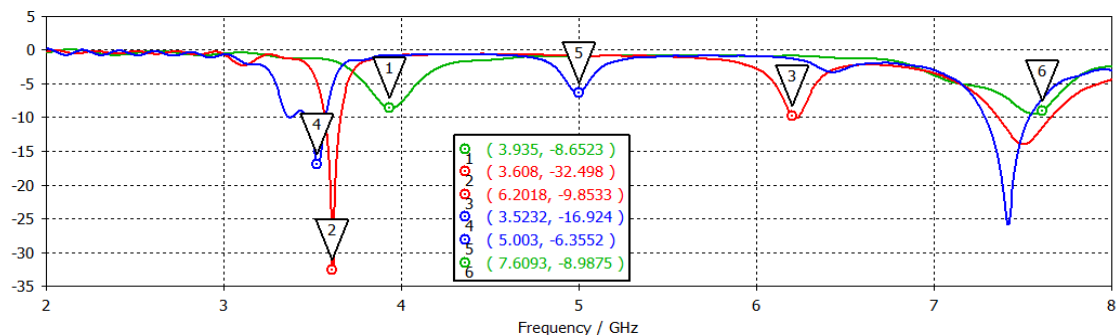


Figure III. 5: Le coefficient de réflexion S11 des différents essais d'antenne patch

III.3.5 Résultat final

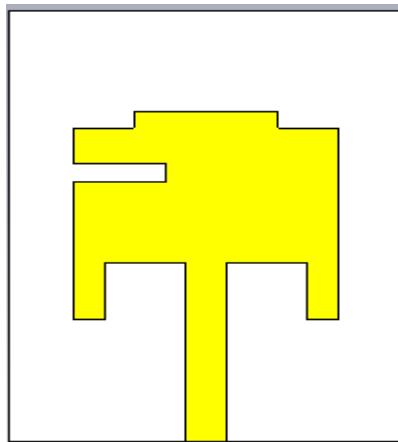


Figure III. 6:Antenne adaptée avec encoche

La **Figure III.6** montre la géométrie finale obtenue dans la bande C [4-8] GHz, avec un uplink de [5.8 ; 6.4] et un downlink [3.6 ; 4.2] GHz

III.3.6 Simulation de paramètre S11

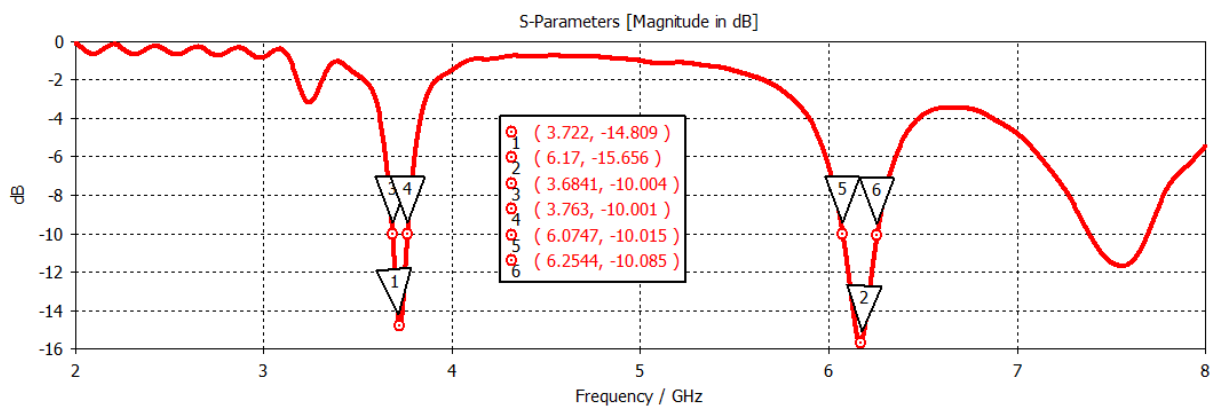
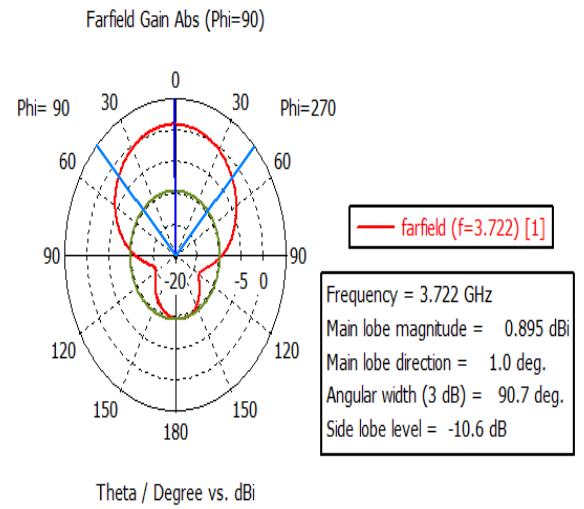
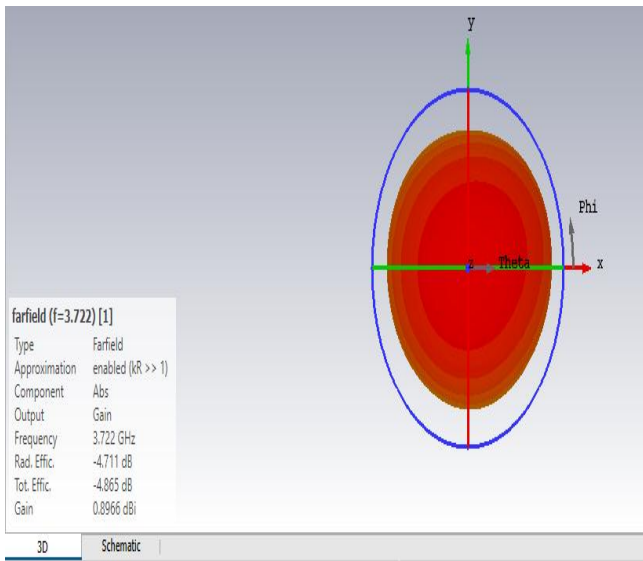


Figure III. 7: Le coefficient de réflexion S11

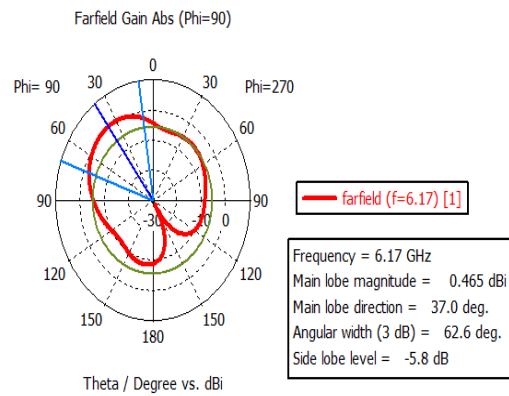
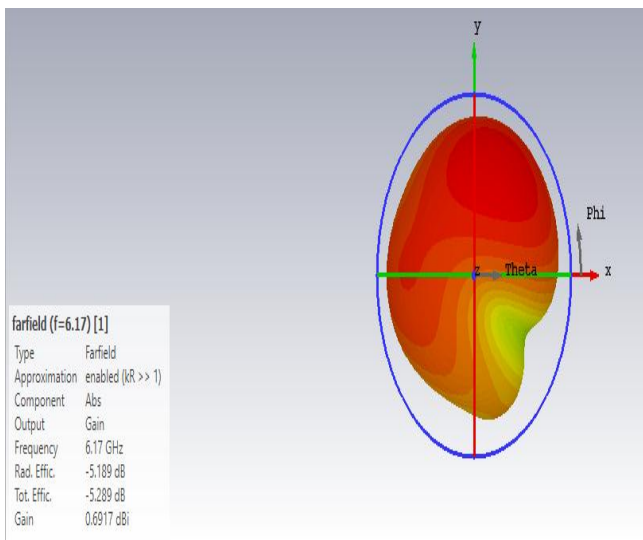
Nous avons obtenu une fréquence de 3.722 GHz avec un coefficient de réflexion de -14.592 dB et une deuxième fréquence de 6.17GHz avec un coefficient de réflexion de -16.431 dB.

Les deux fréquences obtenues sont bien comprise entre l'uplink et le downlink de la bande C.

III.3.7 Le diagramme de rayonnement



(a)



(b)

Figure III. 8:(a) et (b) le diagramme de rayonnement des deux fréquences en (3D) et polaire.

III.3.8 Le gain

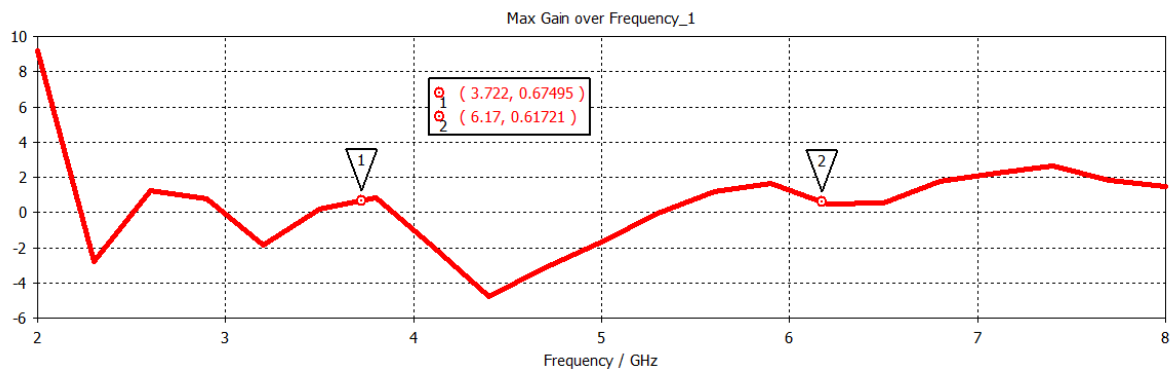


Figure III. 9: Le gain de l'antenne patchen fonction de la fréquence

Dans la **Figure III.9** on observe que le gain aux les fréquences 3.722GHz est 0.67dB et a 6.17GHZ est 0.61dB est plus faible par rapport le gain de la bande c qui est entre [7,10]dB.

III.3.9 Le VSWR

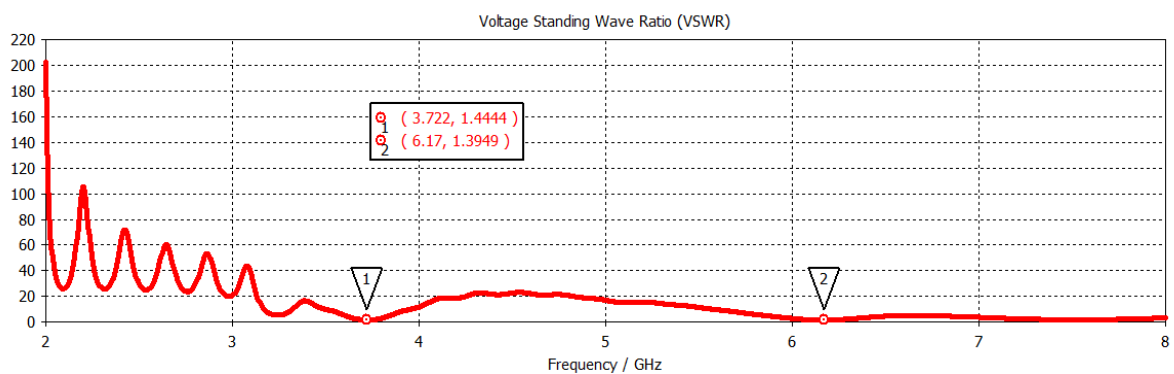


Figure III. 10: Le VSWR de l'antenne patch en fonction de la fréquence.

Dans la **Figure III.10** on remarque des bonne résultats dans les fréquences [3.722 et 6.17] GHz [1.444, 1.3949] puisque le VSWR est inferieure à 2

III.3.10 La densité de courant

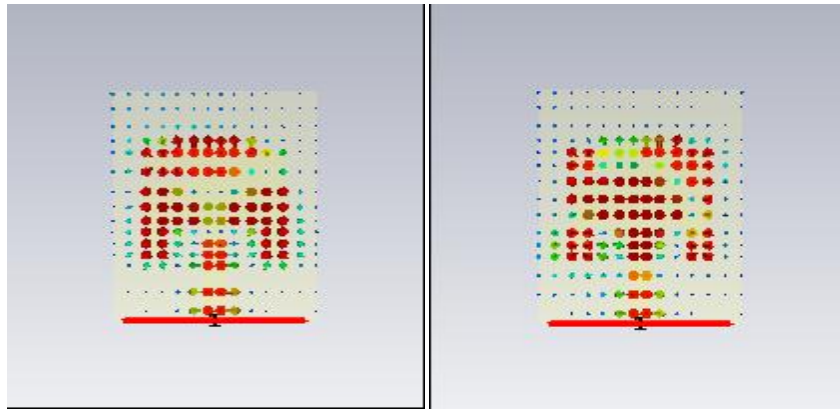


Figure III. 11: La densité de courant dans l'antenne patch proposée pour les fréquences 3.722 et 6.17

Amélioration du gain de l'antenne patch proposée

Le gain obtenu de notre antenne patch est de 0.68 et 0.86 dB pour les fréquences 3.72 et 6.17 GHz respectivement. La bande C nécessite un moyen gain compris entre [7-10] dB, nous allons utiliser la technique du réseau d'antenne pour augmenter le gain.

III.4 Augmentation du gain avec réseaux d'antenne à 2 éléments

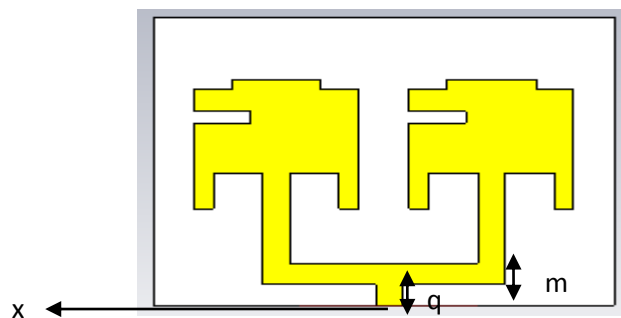


Figure III. 12: Réseaux d'antenne à 2 éléments

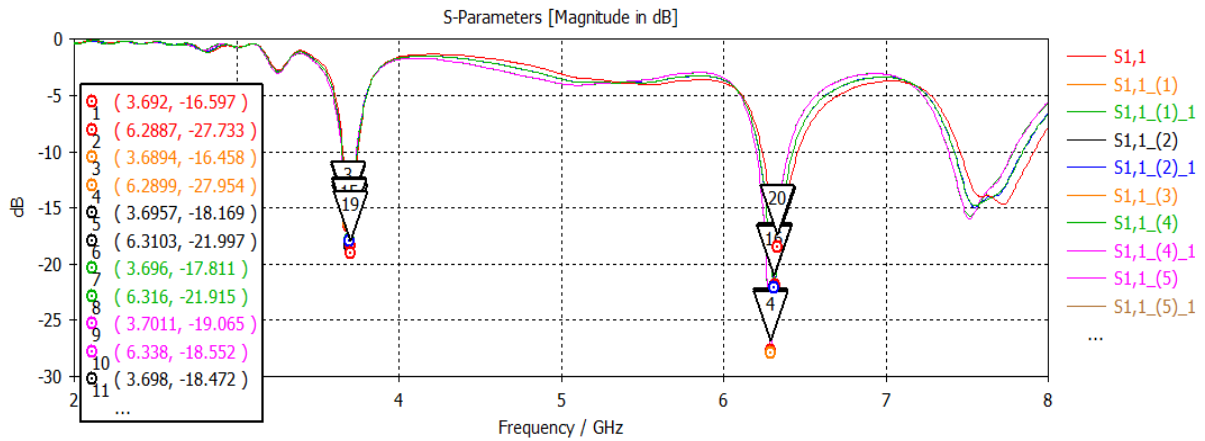


Figure III. 13: Le coefficient de réflexion S11 des essais.

Résultat finale :

III.4.1 Simulation de paramètre S11

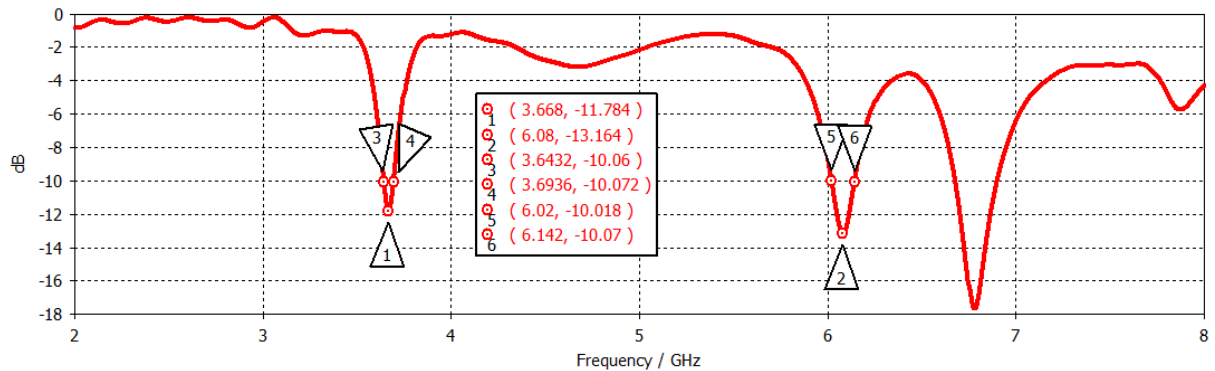
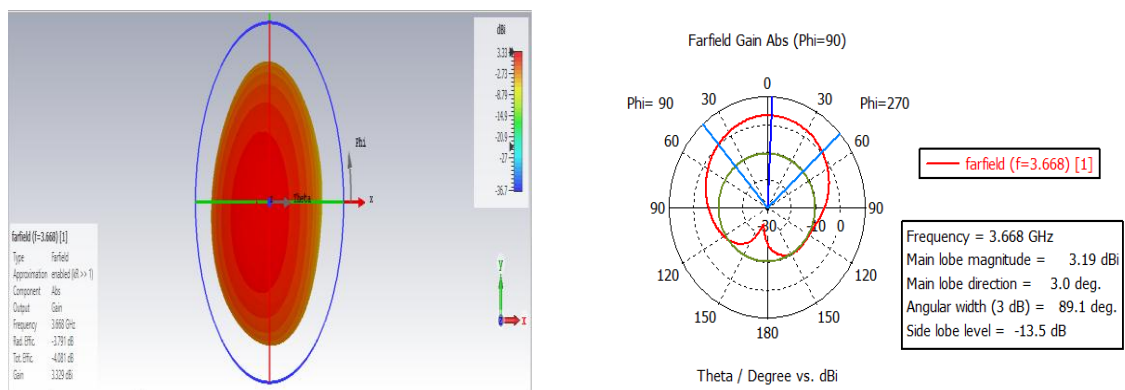


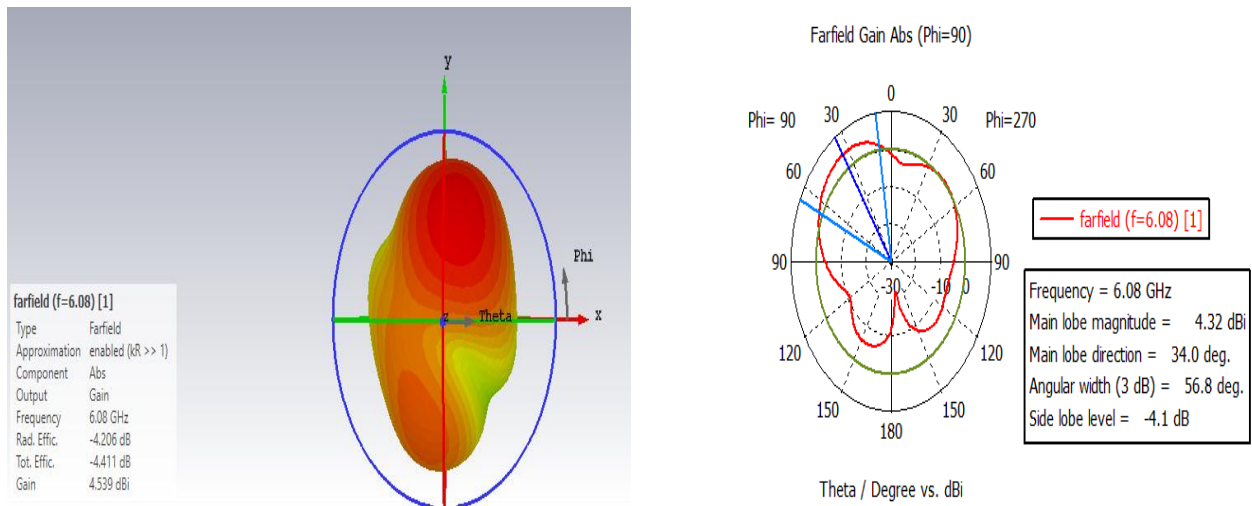
Figure III. 14: Le coefficient de réflexion S11

Le coefficient de réflexion S11 obtenu au réseau d'antenne à 2 éléments est [3.668GHz ; -11.784 dB] et [6.08GHz ; -13.164dB] et bien adaptée sur les deux plages de la bande de fréquence C

III.4.2 Diagramme de rayonnement



(e)



(f)

Figure III. 15: (e) et (f) les diagrammes de rayonnement des deux fréquences [3.668 ; 6.08] en (3D) et polaire .

III.4.3 Le gain

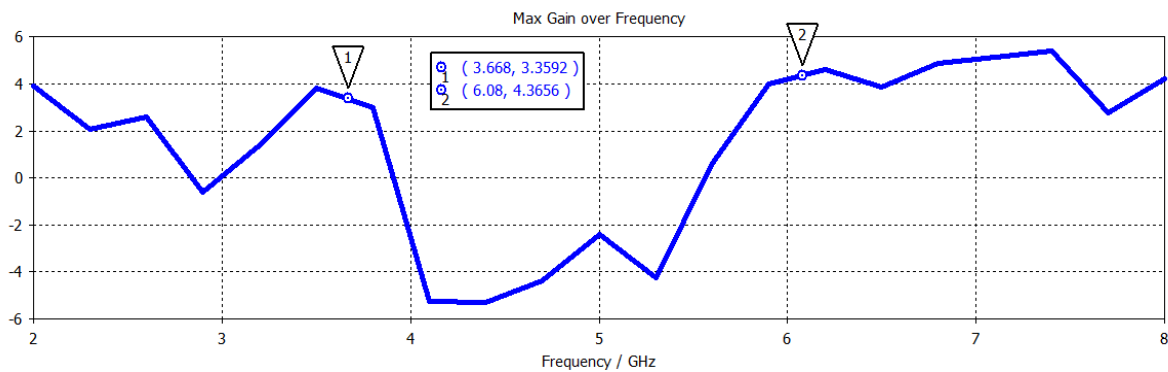


Figure III.15: le gain de l'antenne à 2 éléments.

Dans la Figure III.15, le gain des deux fréquences [3.668 ;6.08]GHz qu'on a trouvé dans les réseaux d'antenne à 2 élément [3.3592 ;4.3656] dB est augmenter par rapport le gain de l'antenne patch adaptée avec l'encoche à la bande C

III.4.4 Le VSWR

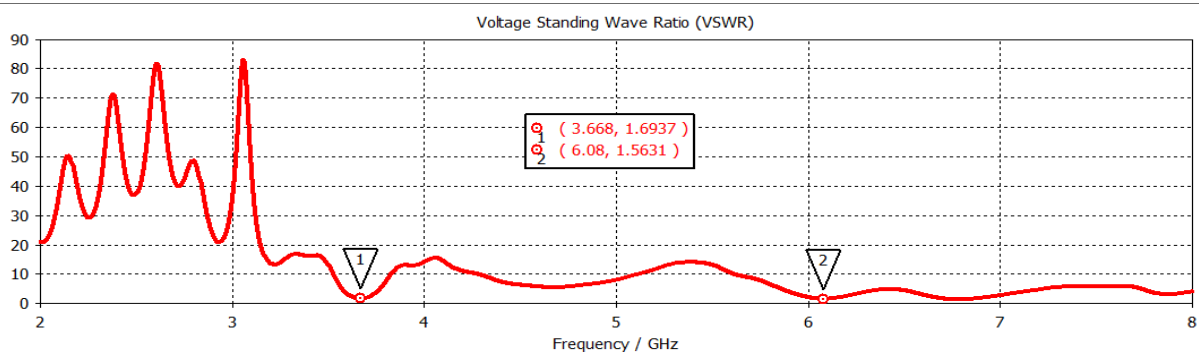


Figure III. 16: Le VSWR du réseau à 2 éléments.

Dans la **Figure III.16**, on remarque des bonne résultats dans les fréquences [3.68,6.08] GHz [1.444, 1.3949] puisque le VSWR est inférieure à 2

III.4.5 La densité de courant

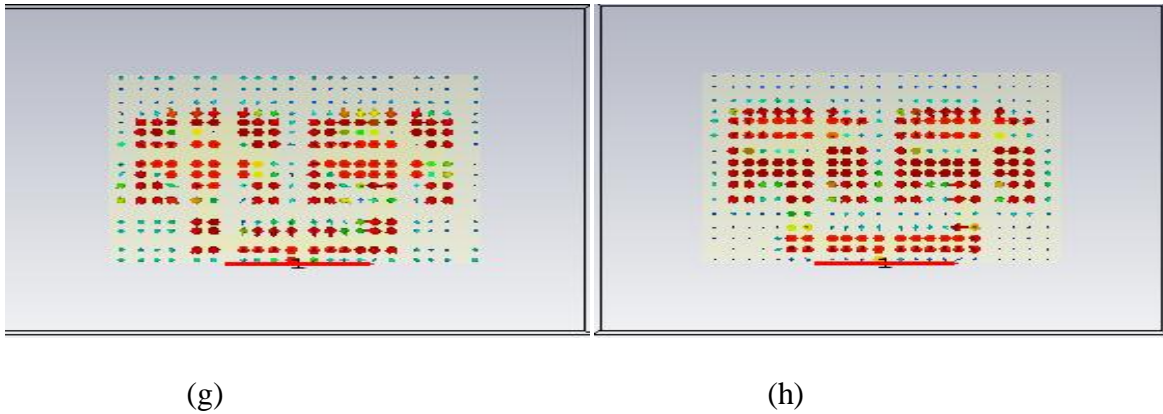


Figure III. 17: (g) est la densité de courant pour la fréquence 6.08 et (h) pour la fréquence 3.688

III.5 Augmentation du gain avec réseaux d'antenne à 4 éléments

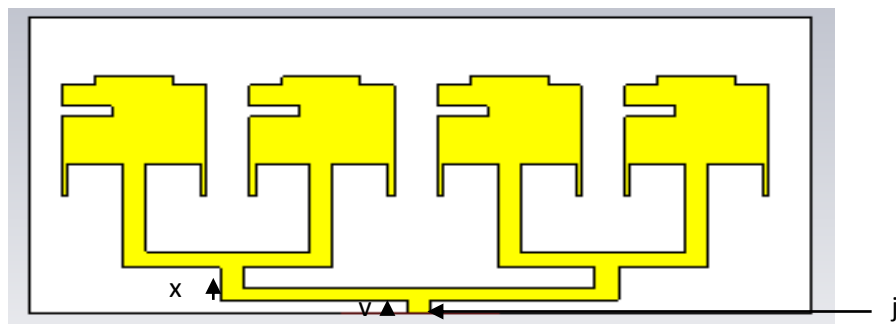


Figure III. 18: Réseaux d'antenne à 4élément

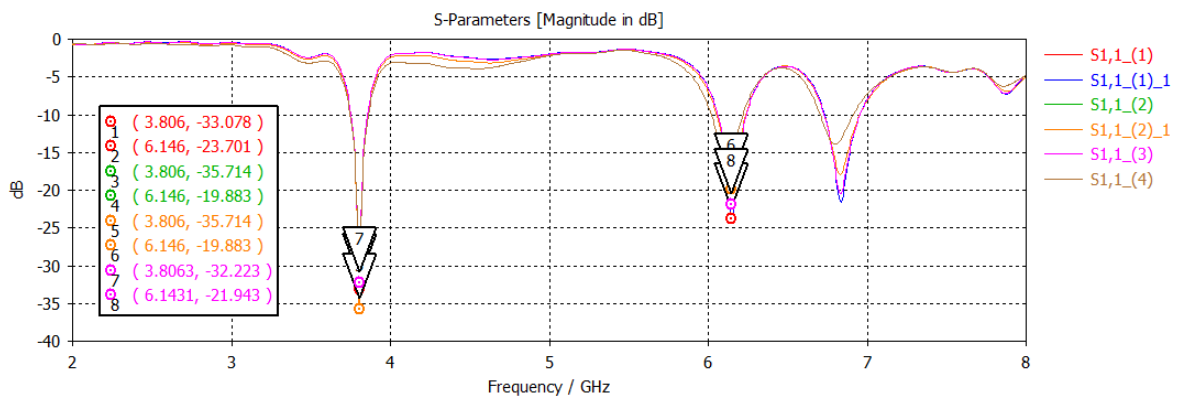


Figure III. 19: Le coefficient de réflexion S11 des essais.

Résultat finale :

III.5.1 Simulation de paramètre S11

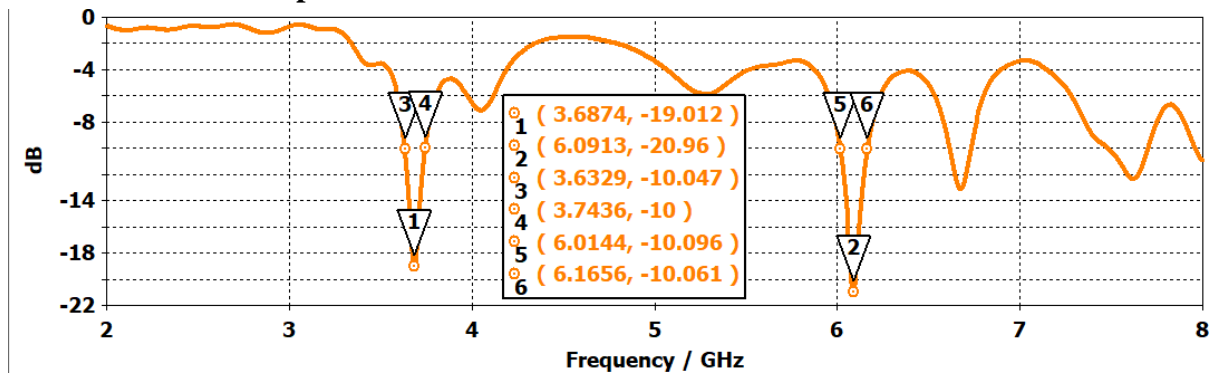
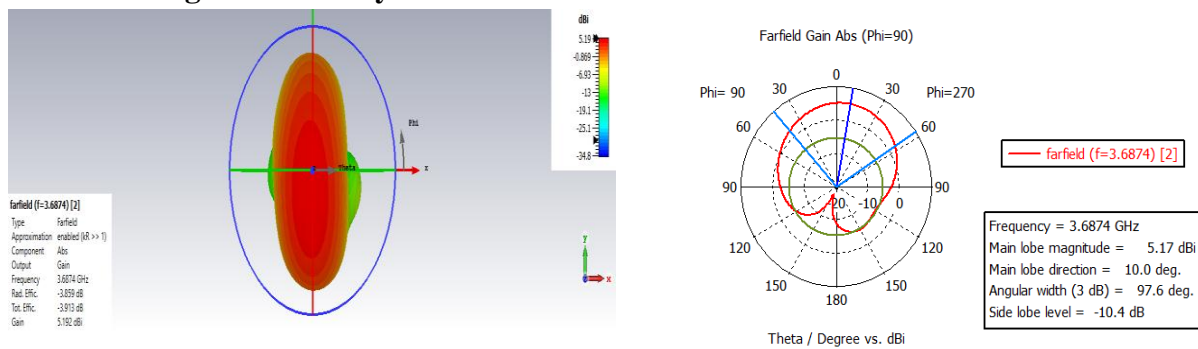


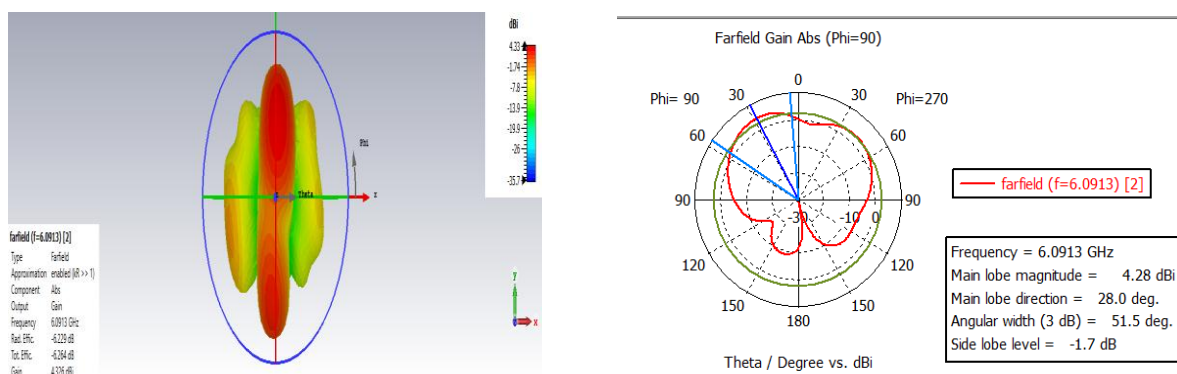
Figure III. 20: Le coefficient de réflexion S11 de résultat final d’une antenne à 4 éléments.

Le coefficient de réflexion S11 obtenu au réseau d’antenne à 4 éléments est [3.6874GHz ; -19.012 dB] et [6.0913GHz ; -20.96dB] est bien adapté

III.5.2 Le diagramme de rayonnement



(m)



(n)

Figure III. 21:(m) et (n) le diagramme de rayonnement des deux fréquences de résultat final d’une antenne à 4 éléments en (3D) et polaire.

III.5.3 Le gain

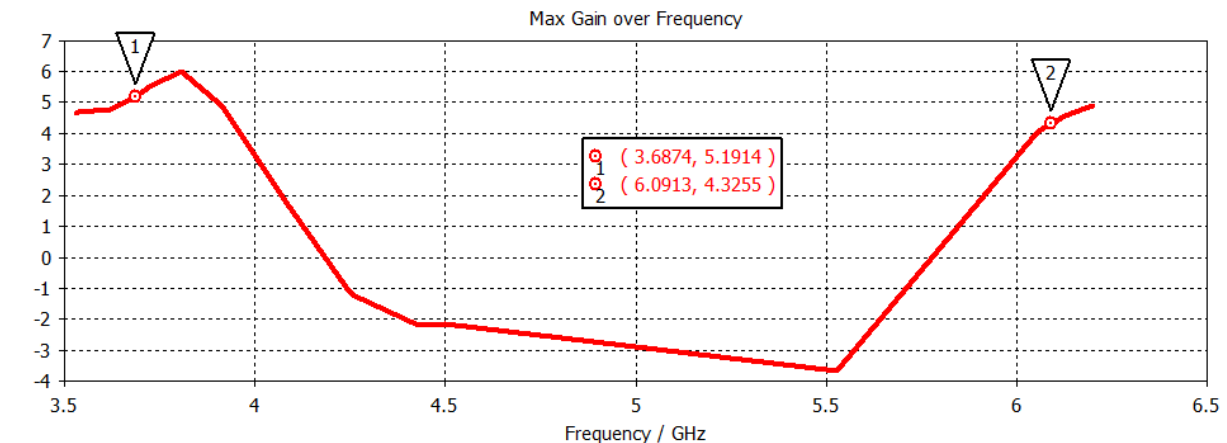


Figure III. 22: Le gain des deux fréquences de résultat final d'une antenne à 4 éléments.

Dans la **Figure III.22**, le gain des deux fréquences [3.6874 ; 6.0913] GHz qu'on a trouvé dans les réseaux d'antenne à 4 éléments [5.1914 ; 4.3255] dB est augmenté par rapport au gain du réseau d'antenne à 2 éléments.

III.5.4 Le VSWR

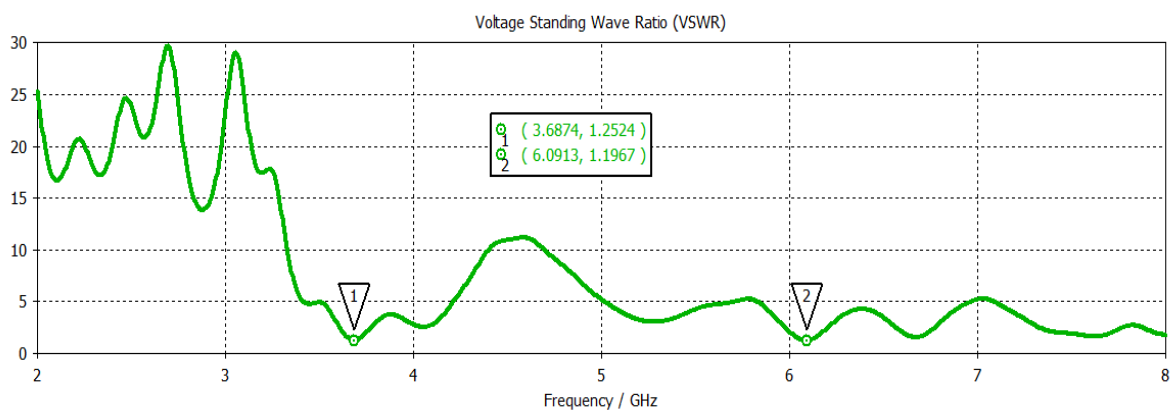
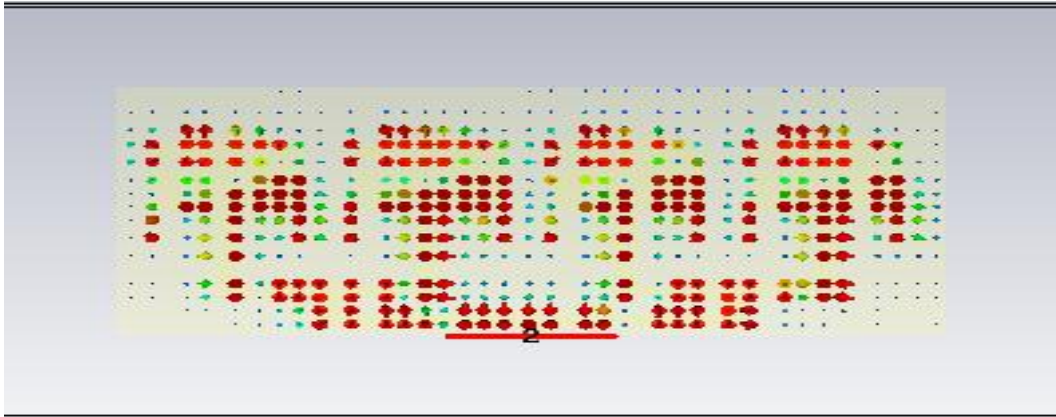


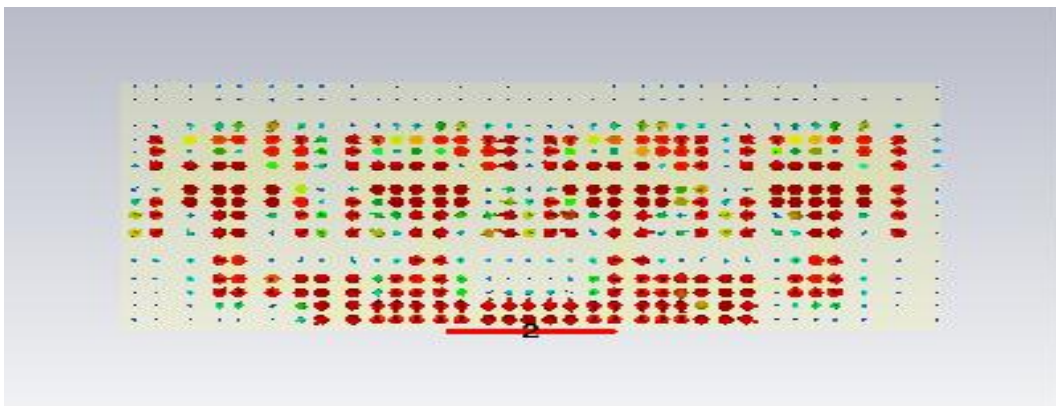
Figure III. 23: Le VSWR des deux fréquences de résultat finale d'une antenne à 4 éléments.

Dans la **Figure III.23**, on remarque des bons résultats dans les fréquences 3.3687 et 6.0913 [1.2524, 1.1967] puisque le VSWR est inférieure à 2

III.5.5 La densité de courant



(I)



(J)

Figure III. 24:(I) est la densité de courant pour la fréquence 3.6874 et (J) pour la fréquence 6.0193

III.6 Augmentation du gain avec réseaux d'antenne à 6 éléments

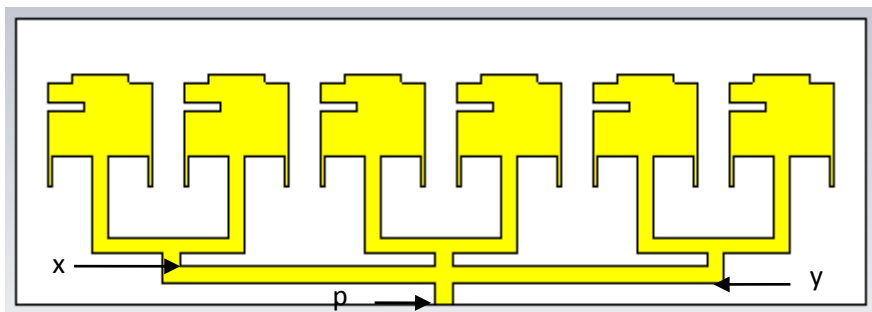


Figure III. 25: Réseaux d'antenne à 6 éléments

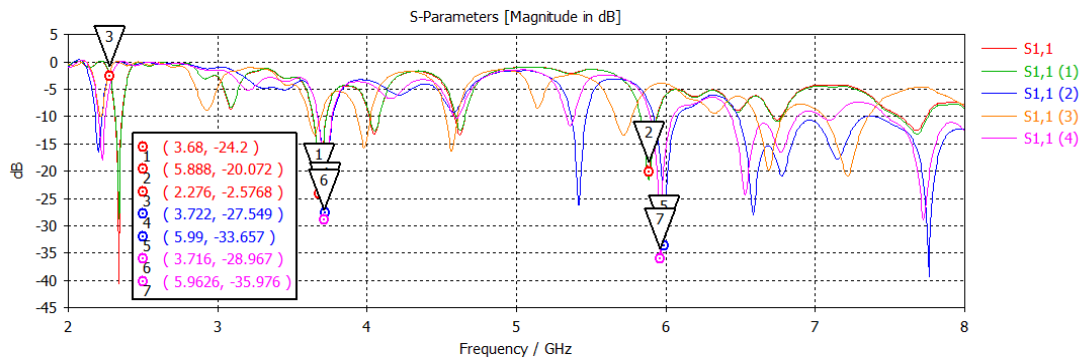


Figure III. 26: Le coefficient de réflexion S11 des essais

Résultat final

III.6.1 Simulation de paramètre S11

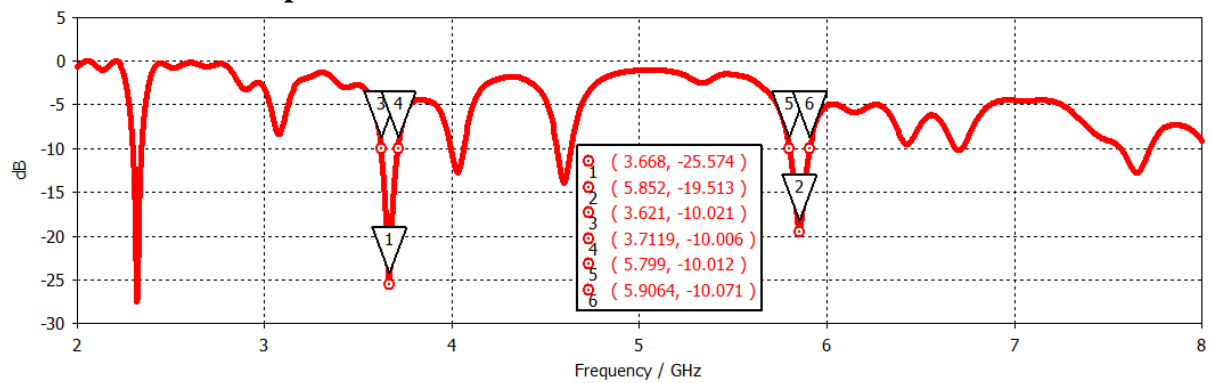
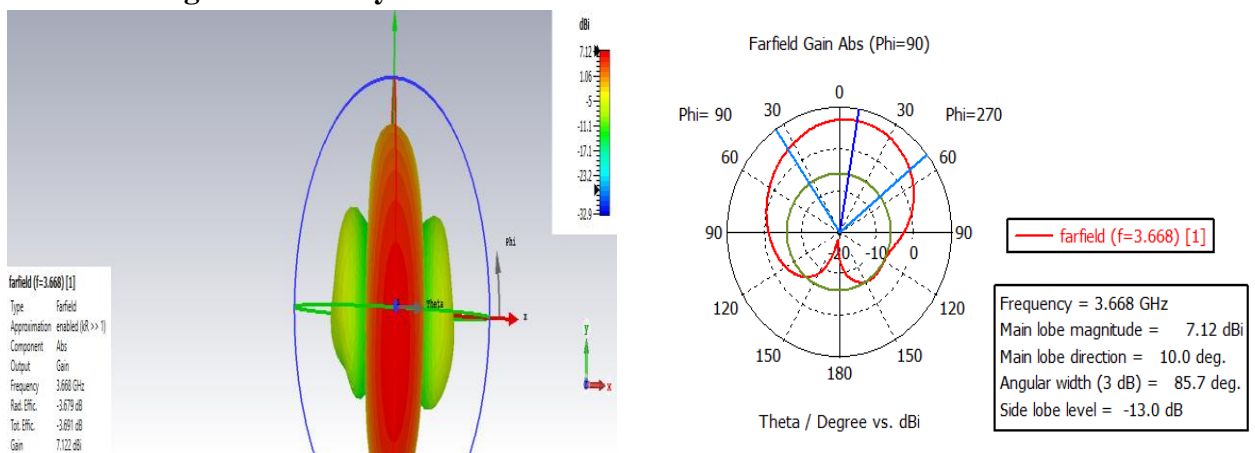


Figure III. 27: Le coefficient de réflexion S11 de résultat final d'une antenne à 6 éléments.

Le coefficient de réflexion S11 obtenu au réseau d'antenne à 6 éléments est [3.668GHz ; -25.574 dB] et [5.852GHz ; -19.513dB].

III.6.2 Le diagramme de rayonnement



(x)

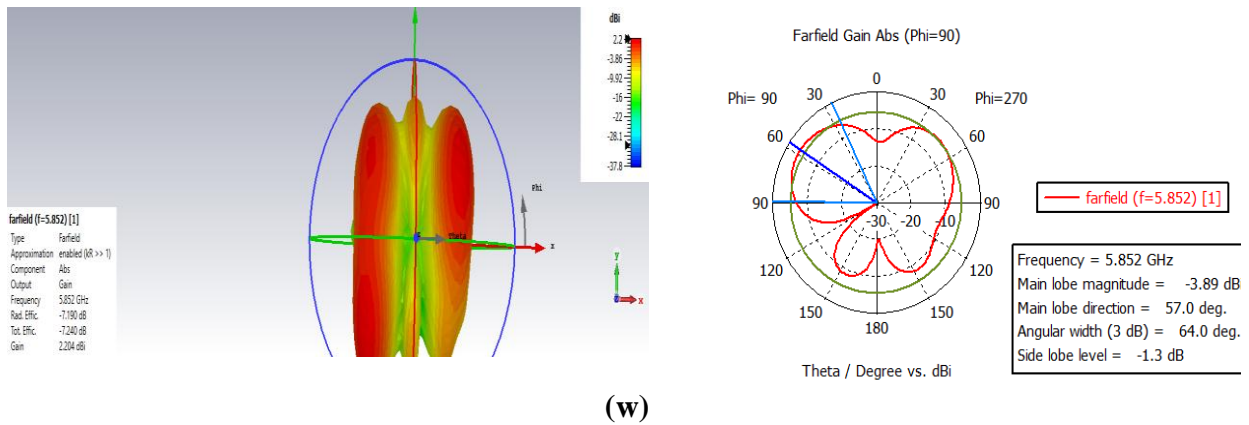


Figure III. 28:(x) et (w) le diagramme de rayonnement des deux fréquences de résultat final d’une antenne à 6 éléments en (3D) et polaire.

III.6.3 Le gain

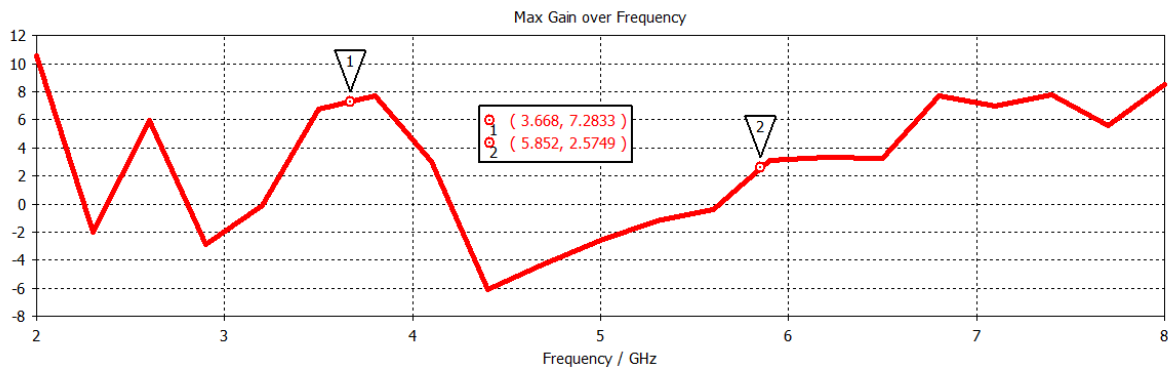


Figure III. 29: Le gain des deux fréquences de résultat final d’une antenne à 6 éléments.

Dans la Figure III.29, le gain des deux fréquences [3.668 ;5.852] GHz qu’on a trouvé dans le réseaux d’antenne à 6 élément [7.2833 ;2.5749]dB est bon par rapport le gain des réseaux d’antenne précédent.

III.6.4 Le VSWR

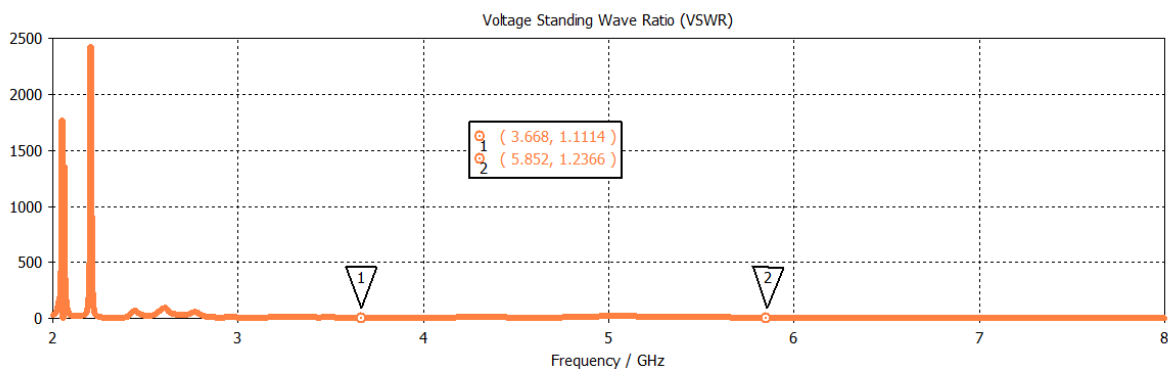
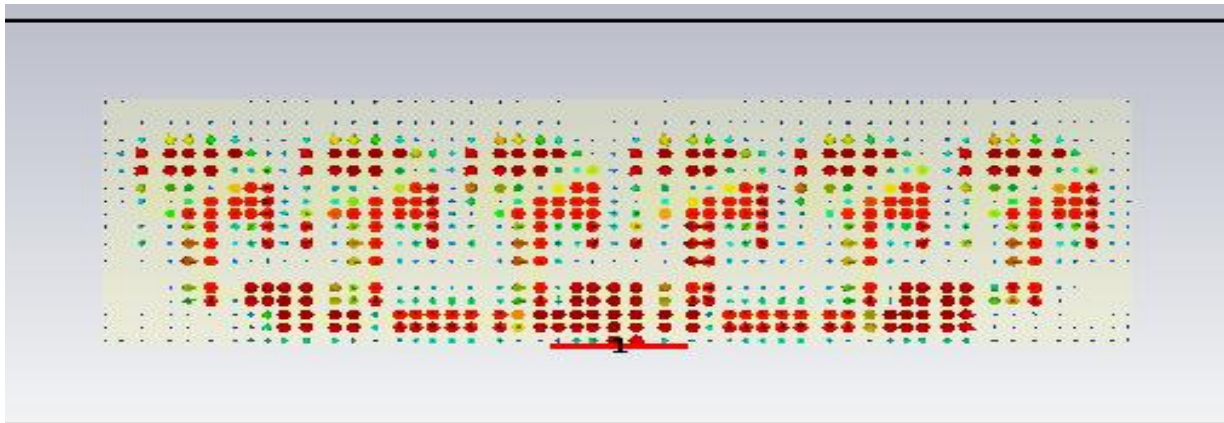


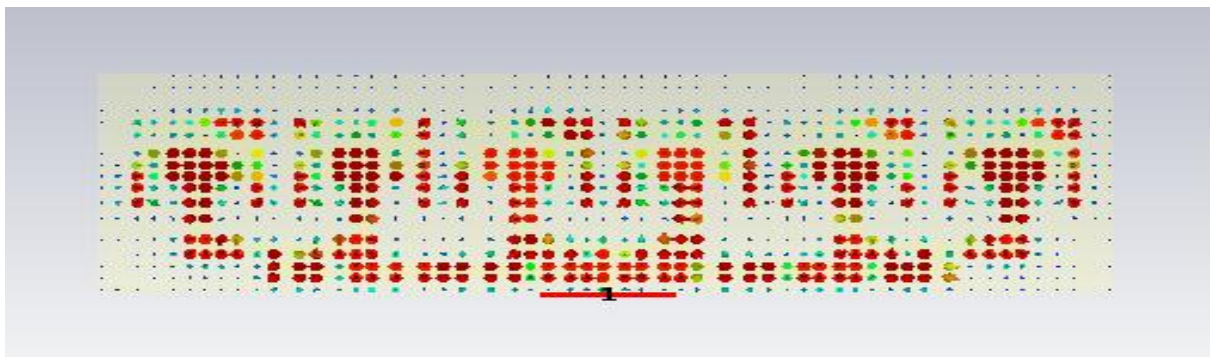
Figure III. 30: Le VSWR des deux fréquences de résultat final

Dans la Figure III.30,on remarque des bonne résultats dans les fréquences [3.668et 5.852]GHz [1.114, 1.2366] puisque le VSWR est inférieure à 2

III.6.5 La densité de courant



(K)



(L)

Figure III. 31:(K) est la densité de courant pour la fréquence 3.668 et (L) pour la fréquence 5.852

III.7 Prototype et mesures du réseau d'antennes patch proposé

Nous avons réalisé le prototype du réseau d'antennes patch proposé au laboratoire de télécommunication LTT de l'université de Tlemcen sous la direction du Docteur Ferouani souheyla, notre encadrante.

Les mesures de coefficient de réflexion et VSWR ont été effectuées au laboratoire d'Instrumentation & de Metrologie-AIT au département d'Assemblage, Intégration et Test au niveau du Centre du développement des satellites CDS sous la direction du Docteur Rabah, notre co-encadrant. Nous avons utilisé un analyseur de réseau type « Agilent technologie de type PNA network analyzer n5222a ». Ce dernier permet de mesurer les paramètres S dans la plage de fréquence entre 10 MHz jusqu'à 26.5 GHz avec calibration. Pour notre application dans la bande satellitaire C, nous avons utilisé une calibration entre 4-8 GHz. La figure III.32 montre le prototype du réseau d'antennes patch réalisé.

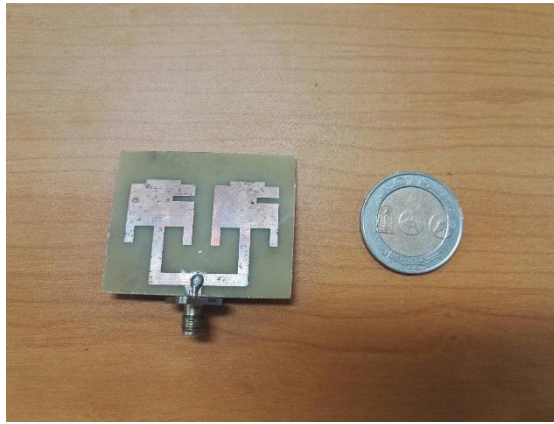


Figure III.32 prototypes de l'antenne patch réalisé

III.7.1 Résultats de Mesures

1) Le S11

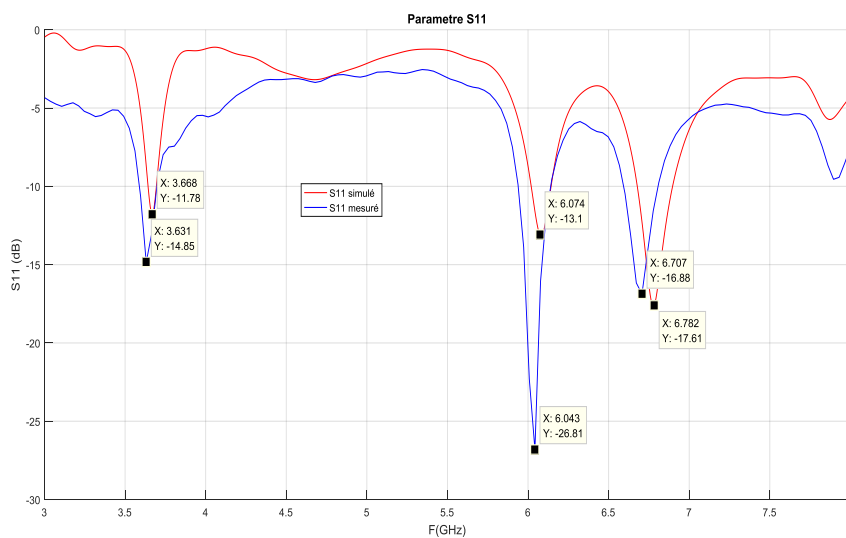


Figure III. 33 Paramètre de réflexion S11 simulé et mesuré

La figure III.33, montre un coefficient de réflexion de -11.87 GHz à 3.668 GHz, -13.1 à 6.074 , -17.66 à 6.776 GHz avec le simulateur CST Microwave et -14.85 à 3.631 GHz, -13.87 à 6.783 GHz, -16.88 à 6.707 GHz avec l'analyseur réseau. Nous avons obtenu presque les mêmes valeurs entre les résultats de simulation et les résultats de mesures effectués à l'aide de l'analyseur réseau.

2) VSWR

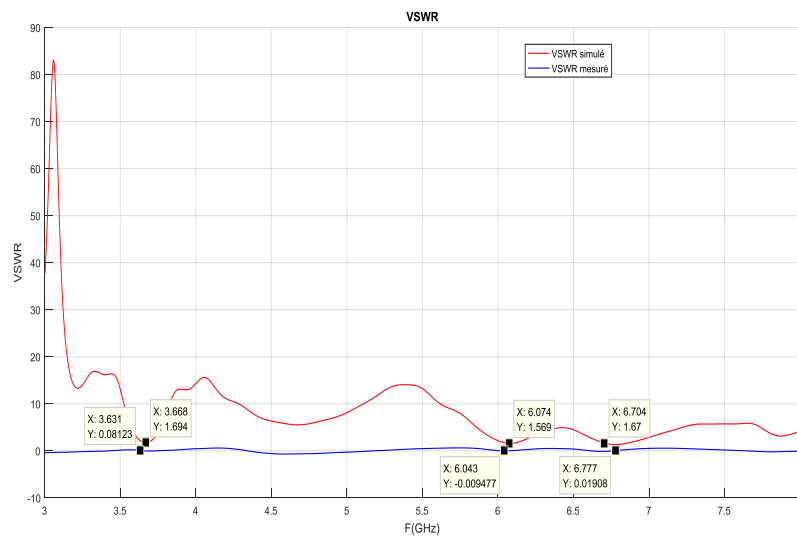


Figure III.34 VSWR simulé et mesuré

La figure III.34, montre un VSWR < 2 pour la simulation et les mesures à l'aide de l'analyseur réseau.

III.8 Conclusion

Nous avons conçu avec le logiciel CST microwave une antenne patch rectangulaire dédiée aux applications de la bande C [4-8] GHz.

Les résultats de simulations et de mesures sont très satisfaisants en termes de S_{11} , VSWR, Gain et directivité.

Conclusion générale

Conclusion générale

L'organisation de notre travail nous a permis de bien assimiler l'ensemble de connaissances collectées dans le domaine des antennes imprimées.

En premier chapitre nous avons donné des généralités sur les antennes imprimées en parlant de leurs :

- Caractéristiques.
- Techniques d'augmentations.
- Techniques d'adaptations.
- Réseau d'antenne (technique d'augmentation de gain).

Ensuite en deuxième chapitre nous avons parlé sur la bande satellitaire C, ses services et les divers types d'antennes existantes dans les satellites.

En dernier chapitre nous avons entamé la simulation d'un réseau d'antennes patch rectangulaire en faisant sortir toutes ses caractéristiques tel que le S11, VSWR, gain et le diagramme de rayonnement. Enfin nous avons présentés le prototype du réseau d'antennes à 2 éléments avec les mesures effectués à l'aide de l'analyseur réseau.

Les résultats de simulations et de mesures obtenus sont très satisfaisants en termes de paramètre de réflexion S11, de diagramme de rayonnement et de gain. L'antenne est prête pour être utilisé dans toutes les applications de la bande C.

REFERENCES

- [1] **Mr. REFICE Mohamed Lamine**, « Modélisation et simulation des antennes en onde Millimétrique à base de méta matériaux », Mémoire Magister en micro ondes .UniversitéZiane Achour de Djelfa Faculté des Sciences et de la Technologie2013-2014.
- [2] **MohamedMansouri et El haithemEzzeroug**, « Conception et simulation d'une antenne Patch ultra large bande [1-8 GHz] », Mémoire Master en aéronautique. l'institut d'aéronautique et des études spatiales.
- [3] **NOUIRI Mouna et TERKI Zakia**, « Conception d'une Antenne MicrorubanReconfigurable à base de Diode PIN et des Structures EBG », Master Académique systèmes de télécommunication, UniversitéMohamedBoudiaf - M'SILA,2018 /2019.
- [4] **ZianecherifAbderrahmanetBenhaddoudiabderrahim**, « Conception, modélisation et réalisation d'une antenne micro ruban triangulaire miniature ULB », Mémoire de Fin d'Etudes MASTER.Centre Universitaire Belhadj Bouchaib d'Ain-Temouchent, 2016/2017.
- [5]**Rabih A Slim**, « Conception Antenne WIFI »,Rapport MDR. Université Antonine Faculté des Ingénieurs en Télécommunications, Informatique.
- [6]**Belabas Lynda et Chemmoun Lila**, « Miniaturisation de l'antenne PATCH sous CST » ; Mémoire de Fin d'Etudes MASTER, Université Mouloud MAMMERI de Tizi-Ouzou, 2017 / 2018.
- [7]**Chorfi Hamid**, « Conception d'un nouveau système d'antenne réseau en onde », Thèse de doctorat, Université De Québec, Mai 2012.
- [8] **CHAIMA Amel**, « Etude et conception d'une antenne reconfigurable pour les applications WLAN », Master en télécommunication, universitéMohamedBoudiaf - M'SILA,2017/2018.
- [9] **R. L Yadava**, «Antenna and Wave Propagation», PHI Learning Pvt. Ltd., 2011.
- [10] **Ben Tahar Zohra et Ben Abdesselam Sarah Yamina**, « Réalisation d'une Interface graphique de Calcul des paramètres d'antennes patch et conception logicielle », Mémoire de Fin d'Etudes MASTER. Centre Universitaire Belhadj Bouchaib d'Ain-Temouchent, 2018/2019.
- [11] **Fouad Benamrane**, « Conception d'uneantenne Patch Microstrip»; Master télécom hyperfréquence mémoire online; UniversitéSidi Mohamed Ben Abdellah (Fés) maroc 2011.
- [12]**D.Khedrouche**,« Modélisation des antennes microbandes par une analyse tridimensionnelle rigoureuse en utilisant une méthode intégrale », Thèse de Doctorat, Université de Constantine, 06/ 2009.

- [13] **D. Aissaoui**, « Analyse a l'aide de modèles équivalents d'antennes imprimées Alimentées par ligne adaptées », Mémoire de Magister, Université de Abou Baker Belkaid Tlemcen, 03/2007.
- [14] **M. Titaouine**, « Analyse des antennes microrubans de forme arbitraire par la Méthode des moments et le modèle généralisé de la cavité », Thèse de Doctorat, Université de Sétif, 09/2007.
- [15] **B. Zaoui**, « Modélisation d'une antenne micro ruban compacte », Master académique , Université Echahid Hamma Lakhdar El oued, 06/2015.
- [16] **L. I. Basilio, M. A. Khayat, J. Williams, S. A. Long**, « The dependence of the input impedance on feed position of probe and microstrip line fed patch antennas », IEEE trans Antennas Propagat, vol. 49, pp. 45-47, 01/2001.
- [17] **O. Picon, Coll**, « Les Antennes, théorie, conception et applications », Dunod, Paris, 978-2-10-051989-7, 2009.
- [18] **Pele, Mahe, Y. chousseaud, A. Toutain, S. Garel**, « antenna design with control of radiation pattern and frequency bandwidth ». Antennas and propagation society international symposium 2004, vol.1, p. 783-786.
- [19] **Mr. ARAB Tarek**, « Etude des matériaux composites (Titanate oxyde) : application pour la réalisation des substrats d'antennes miniatures » NIVERSITE SETIF-1.
- [20] **D.M. POZAR**, « Microstrip Antennas », IEEE, Vol.80 N 1, pp.79-91, january 1992.
- [21] **R.J. Mailloux**, « Phased Array Antenna Handbook », Second Edition Artech House, Inc, 2005.
- [22] **W.K. CHEN**, the Electrical Engineering Handbook Elsevier Inc, 2004.
- [23] **L. Josefsson, P. Persson**, « Conformal Array Antenna Theory and Design », IEEE antenna and propagation society, Wiley-Interscience 2006.
- [24] **A. Boyer**, « Cours_antennes_oct11_v4_5RT », INSA Toulouse, octobre 2011.
- [25] **Zianikerarti Djalal**, « cours de master 'antennes pour les applications satellitaires », institut national des télécommunications et des technologies d'information et des communications , 2018
- [27] **B. Malek et A. Boualleg**, « Antennes satellites Pour télécommunication spatiales », Alegria: Editons El-Djazair, janvier 2014.

[28]Nicolas Moynier et Philippe Lorent, « Télécommunications par satellite applications militaires », Date 28/02/2011.

[29]Azichafiâa et Zair Samia, « étude des réseauxvsat », Mémoire de fin d'étude. Université mouloud Mammeri – tizi-ouzoufaculte du génie électrique et informatique, 2007-2008.

[30]A. Boyer, « support de cours énonce de travaux dirigés », Cours 5 éme année réseau et Télécom. Institut national des sciences appliquées de Toulouse, 2011,

Webeliographie

[26]http://www.esa.int/Applications/Telecommunications_Integrated_Applications/Satellite_frequency_bands, 04/05/2021.