

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**

وزارة التـعلم العـالي و البـحث العـلمي

**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 : Télécommunication**

**Spécialité : Réseau de Télécommunication**

**Par :**

- BOUACHRA Marwa

- BOUKHRIS Chaima

**Sujet**

**Conception et performance des réseaux d'antenne patch en bande Ka pour application du satellite.**

Soutenu publiquement, le 30/06/2022, devant le jury composé de

Mme MELIANI Maghnia

Mr IRID HADJ Mohammed

Mr KOURDI Zakarya

Mme BELHADAF Yamina

Université de Tlemcen

Université de Tlemcen

Université de Tlemcen

Université de Tlemcen

Président

Encadreur

Co-encadreur

Examineur

**Année universitaire 2021/2022**

# *Remerciements*

*Le travail présenté dans ce rapport a été effectué à l'université Abou-Beker Belkaid -Tlemcen-  
Avant tout, je remercie notre seigneur d'avoir donné à l'homme le pouvoir de raisonner et  
d'explorer les vérités de l'univers.*

*Que nos remerciements les plus sincères s'adressent à mon encadreur **IRID HADJ  
Mohammed**, maître de conférences à l'université Abou Beker Belkaid, pour avoir accepté de  
superviser mon travail et pour m'avoir initié aux bases de télécommunication système.*

*Que nos remerciements les plus sincères s'adressent à mon co-encadreur **KOURDI  
Zakarya**, maître de recherche au CDS, pour avoir accepté de superviser mon travail et pour  
m'avoir initié aux bases de télécommunication système.*

*Nous adressons nos sincères remerciements aux membres du jury Mme **MELIANI Maghnia***

*Et Mme **BELHADAF Yamina** pour avoir pris le temps d'examiner et juger ce travail.*

*Je ne pourrais oublier de présenter mes vifs remerciements et ma sincère gratitude à toutes  
celles et tous ceux qui m'ont épaulé dans les moments durs et m'ont donné la force pour  
continuer et arriver au bout du travail.*

*Nous ne pouvons terminer sans exprimer toute ma gratitude à tous les membres de ma famille  
qui m'ont soutenu et conseillé tout le long de ce travail, plus particulièrement ma mère.*

## Dédicaces

*C'est avec une joie que je dédie ce travail à ceux qui m'ont été une source d'inspiration et de volonté.*

*À ma très chère mère, quoi que je fasse ou que je dise, je ne saurai point te remercier comme il se doit. Ton affection me couvre, ta bienveillance me guide et ta présence à mes côtés a toujours été ma source de force pour affronter les différents obstacles, puisse dieu te protéger.*

*À mon très cher père, Qui était et est toujours un bon modèle et un premier soutien pour moi dans cette vie, quoi que je fasse ou que je dise, je ne saurai point te remercier comme il se doit puisse dieu te protéger.*

*À l'âme de mon très cher tonton houcine qui me manque énormément, j'espère que tu es fier de moi, que Dieu t'accueille dans son vaste Paradis .*

*الله يرحمه ويغفر له ويسكنه الفردوس الأعلى من الجنة*

*Je le dédie à mes très chers frères et sœurs.*

*A mon neveu abdou-allah et mes nièces aya ,lyna et ma petite janna.  
A toute ma grande famille BOUKHRIS et BENAHMED, surtout ma  
Très chère tante Houaria.*

*Une dédicace à tous mes amis, Sans exception et tous ceux qui connaissent BOUKHRIS Chaima.*

*Une dédicace spéciale à tous mes amis.*

*A la fin je dédie très chaleureusement ce mémoire  
À mon binôme ;*

**BOUKHRIS Chaima**

# *Dédicaces*

*Je dédie ce travail  
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 mari Belhadj  
Pour l'amour et l'affection qui nous unissent. Je ne saurais exprimer ma profonde reconnaissance pour le soutien continu dont tu as toujours fait preuve. Tu m'as toujours encouragé, incité à faire de mon mieux, ton soutien m'a permis de réaliser le rêve tant attendu. Je te dédie ce travail avec mes vœux de réussite, de prospérité et de bonheur.*

*A mes frères Radwan, Bedro, Ramzy, et ma sœur Ikhlassa et mon adorable neveu Ahmad  
Pour tous les sacrifices qu'ils n'ont cessé de m'apporter tout au long de mes années d'études. Que Dieu leur apporte le bonheur, les aide à réaliser tous leurs vœux et leur offre un avenir plein de succès.*

*A ma famille  
(BOUACHERA ; BENAARAB ; SOLTANI)  
A celui qui a participé avec moi à ce mémoire  
BOUKHRISSE Chaima*

*A mes amis qui ont contribué de près ou de loin pour que ce travail se réalise*

*Je vous dis merci.*

*BOUACHRA Marwa*

## *Abréviations*

## *Abréviations*

AUPC	Automatic Uplink Power Control
BUC	Bloc Up Converter
CLSA	Conical logarithm spiral antenna
DVB	Digital video Broadcasting
FAT	Final Acceptance Test
FDMA	Frequency Division Multiple Access
GIS	Geography Information System
LNB	Low Noise Bloc
MMBS	Band Multimedia Broadcasting System
NMS	Network Management System
ODU	Out Door Unit
OSAT	On-Site Acceptance Test
RCST	Return Channel Satellite Terminal
RF	Radio Frequency
RMS	Remote Maintenance System
SAC	Satellite Access Center
SCC	satellite Control Center
SCPC	Single Channel Per Carrier
TDM	Time Division Multiplexing
TTC& M	Telemetry and Tele-command Control & Maintenance
IDU	In Door Unit
VSAT	Very Small Aperture Antenna
HFSS	High Frequency Structure Simulator
WIMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access
WIFI	Wireless Fidelity

*Sommaire*

Remerciements .....	I
Dédicaces .....	II
<i>Dédicaces</i> .....	III
Abréviations .....	IV
Sommaire .....	V
Liste des figures.....	VIII
Listes Du Tableau .....	X
<i>Introduction Générale</i> .....	1
.....	1
Chapitre I : Généralité sur les antennes .....	2
I-1. Introduction .....	2
I-2. Définition de l'antenne .....	2
I-3. Les Caractéristiques d'une antenne.....	3
I-3-A. Diagramme de rayonnement .....	4
I-3-B. Angle d'ouverture .....	4
I-3-C. Ouverture rayonnante et Rendement .....	5
I-3-D. Gain .....	6
I-3-E. Directivité .....	7
I-3-F. Polarisation .....	7
I-3-F-1. Polarisation linéaire .....	7
I-3-F-2. Polarisation elliptique .....	8
I-3-F-3. Polarisation circulaire .....	8
I-3-G. Coefficient de réflexion .....	8
I-3-H. Bande passante .....	9
I-3-I. Le facteur de qualité.....	9
I-3-J. Rapport d'ondes stationnaires (ROS).....	10
I-3-K. L'impédance d'entrée .....	10
I-4. Différents types des antennes .....	10

## Sommaire

I-4-A.	Selon la directivité.....	11
I-4-A-1.	Antennes directives.....	11
I-4-A-1-a.	Antennes à ouverture rayonnante et système focalisant .....	11
I-4-A-1-b.	Antennes réseau.....	11
I-4-A-2.	Antennes omnidirectionnelles .....	12
I-4-A-3.	Antennes hémisphériques.....	12
I-4-B.	Selon l'orbite.....	13
I-4-C.	Selon le gain.....	13
I-4-C-1.	Antennes à gain faible $G \leq 6\text{dBi}$ .....	13
I-4-C-2.	Antennes à gain élevé $G \geq 6\text{dBi}$ [I-19].....	14
I-5.	Conclusion .....	15
Chapitre II : Etude des antennes patches dans bande Ka .....		16
II-1.	Introduction .....	16
II-2.	Les paramètres géométriques du l'antenne imprimée .....	16
II-2-A.	La largeur du Patch .....	18
II-2-B.	Longueur du patch.....	18
II-3.	Formes des antennes imprimées .....	18
II-4.	LES TECHNIQUES D'ALIMENTATION D'UNE ANTENNE IMPRIMEE .....	19
II-4-A.	Excitation avec contact.....	19
II-4-A-1.	Alimentation par ligne micro-ruban .....	19
II-4-A-2.	Alimentation par Sonde coaxiale.....	20
II-4-B.	Excitation sans contact (par proximité) .....	21
II-4-B-1.	Alimentation par fente.....	21
II-4-B-2.	Alimentation par ligne couplée.....	22
II-5.	Cahier de Charge .....	23
II-6.	L'application en bande ka .....	24
II-6-A.	La bande Ka.....	24
II-6-B.	Les systèmes satellitaires et la bande Ka.....	25
II-6-C.	Classifications des atténuations en bande Ka .....	25
II-6-C-1.	Atténuation due aux nuages.....	26
II-6-C-2.	Atténuation due aux précipitations .....	26
II-6-C-3.	Atténuation due aux gaz.....	27
II-7.	Les réseaux d'antennes .....	27

## Sommaire

II-7-A. Facteur de réseau.....	28
II-7-B. Alimentation d'un réseau d'antennes .....	28
II-7-C. Types de réseaux d'antennes .....	29
II-7-C-1. Réseaux linéaires uniformes .....	30
II-7-C-2. Réseaux plans .....	32
II-7-C-3. Réseaux circulaires.....	32
II-7-C-4. Autres types de réseau d'antennes .....	33
II-8. Conclusion.....	33
Chapitre III : Simulation et discussion des résultats.....	34
III-1. Introduction.....	34
III-2. Description du Logiciel de Simulation CST .....	34
III-2-A. Description générale de l'interface CST .....	34
III-3. Structure de l'antenne .....	35
III-4. Résultats et discussion .....	36
III-4-a. Antenne patch .....	38
III-4-a-1. Paramètre S .....	38
III-4-a-2 Taux d'onde stationnaire (VSWR).....	38
III-4-a-3. L'efficacité de rayonnement .....	39
III-4-a-4. Diagramme de rayonnement .....	39
III-4-a-5. Le gain .....	40
III-4-a-6. Densité de Courant.....	41
III-4-b. Réseau antenne .....	42
III-4-b-1. Amélioration du gain de l'antenne patch proposée .....	42
III-4-b-2. Augmentation du gain avec réseaux d'antenne à 2 et 4 et 8 éléments .....	42
III-4-b-3. Paramètre S .....	43
III-4-b-4. Taux d'onde stationnaire (VSWR).....	44
III-4-b-5. Le Gain.....	44
III-4-b-6. Diagramme de rayonnement en 2D.....	45
III-5. Conclusion .....	47
Conclusion générale .....	49
Références bibliographiques.....	50



Liste des figures

**Chapitre I : Généralité sur les antennes spatiales**

Figure I-1 : Chaîne de transmission par onde électromagnétique [5].	2
Figure I-2 : Représentation d'une antenne d'émission et de réception [5].	3
Figure I- 3 : Diagramme de rayonnement d'une antenne directive [7].	4
Figure I- 4 : Diagramme de rayonnement bidimensionnel en coordonnées cartésiennes [8].	5
Figure I- 5 : Rayonnement d'une antenne [8].	6
Figure I- 6 : Gain d'une antenne isotrope [10].	6
Figure I- 7 : La directivité des antennes-rapport avant-arrière [10].	7
Figure I- 8 : Différents types de polarisation [12].	7
Figure I- 9 : Coefficient de réflexion à l'entrée du réseau d'antennes [14].	8
Figure I- 10 : Exemple d'un coefficient de réflexion et bande passante d'une antenne [15].	9
Figure I- 11 : Rapport d'Onde Stationnaire d'antenne [18].	10
Figure I- 12 : Différents exemples d'antennes à ouverture rayonnante (a) Antennes cornets cylindriques, (b) et système focalisant (c) Antenne lentille (d) Antenne à réflecteur au sol (e) Antenne à réflecteur pour satellite [20].	11
Figure I- 13 : Antenne de télémétrie, poursuite et de commande (Courtesy of RUAG Aerospace Sweden) [20].	12
Figure I- 14 : Différents exemples d'antennes réseau [20, 21].	12
Figure I- 15 : Antenne bande X par RUAG [20].	13
Figure I- 16 : Antennes LEO : radar a aperture synthétique, Antenne SMOS de la bande X, b) Antenne SIR-C dans l'étage de configuration de laboratoire [18].	14
Figure I- 17 : Antenne patch microruban bande S pour microsatellite de Surrey SSTL Réf ..	14
Figure I- 18 : Antenne à réflecteur (AstroMesh) d'INMARSAT-4 [20].	14
Figure I- 19 : Réseaux d'antennes de SMOS SAT [20].	15

**Chapitre II : étude des antennes patches dans bande Ka**

Figure II-1 : Géométrie d'une antenne patch [II-5].	17
Figure II-2 : Alimentation par ligne coaxiale [II-6].	17
Figure II- 3 : Les différentes formes d'une antenne Imprimée [II-11].	19
Figure II- 4 : Alimentation du patch par une ligne micro-ruban [II-18].	20
Figure II- 5 : L'alimentation par une ligne micro-ruban axiale(a), décalée (b) et avec encoche(c) [II-16].	20
Figure II- 6 : Alimentation par sonde coaxiale [II-22].	21

## Liste des figures

Figure II- 7 : Alimentation par fente [II-22].	21
Figure II- 8 : Alimentation par couplage [II-22].	22
Figure II- 9 : Trajet d'un signal affecté par les facteurs atmosphériques.	26
Figure II- 10 : Atténuation due à la pluie en Ku, Ka et V [II-25].	27
Figure II- 11 : Alimentation d'un réseau d'antennes patch [II-34]; (a)-série (b)-parallèle.	29
Figure II- 12 : Géométries d'un réseau d'antennes (a)-linéaire (b)-circulaire (c)-planaire (d)-volumique [II-34].	30
Figure II- 13 : Configuration d'un réseau linéaire uniforme de N [II-31].	31
Figure II- 14 : Exemple d'un diagramme de rayonnement d'un réseau d'antennes linéaires uniformes [II-26].	31
Figure II- 15 : Réseau plan MxN [II-35].	32
Figure II- 16 : Réseau circulaire de N éléments [II-35].	33

### *Chapitre III : Simulation et discussion des résultats*

Figure III-1 : Interface du CST [III-2].	35
Figure III- 2 : Structure de l'antenne patch sur CST.	36
Figure III- 3 : (a) et (b) et (c), (d) les différentes géométries de l'antenne patch.	37
Figure III- 4 : Antenne adaptée avec encoche.	37
Figure III- 5 : S11 en (dB) en fonction de la fréquence.	38
Figure III- 6 : Rapport d'onde stationnaire en fonction de la fréquence	38
Figure III- 7 : L'Efficacité totale de l'antenne Patch.	39
Figure III- 8 : Diagramme de rayonnement d'une antenne patch.	39
Figure III- 9 : Diagramme de rayonnement 2D.	40
Figure III- 10 : Le Maximum de gain dans la bande Ka.	41
Figure III- 11 : (a) et (b) Densité de Courant d'antenne patch.	42
Figure III- 12 : Réseaux D'antenne à 2,4 et 8 Eléments.	43
Figure III- 13 : S-Paramètre pour 2,4 et 8 éléments.	43
Figure III- 14 : Le VSWR de l'antenne à 2,4, et 8 éléments.	44
Figure III- 15 : Le gain de l'antenne à 2,4 et 8 éléments.	45
Figure III- 16 : Diagramme de rayonnement en 2D sur l'axe (x, y et z).	46

## ***Liste des Tableaux***

### ***Listes Du Tableau***

#### **Chapitre II :**

Tableau II- 1 : Comparaison entre les méthodes d'alimentation [43].	23
Tableau II- 2 : Equation de calculs des dimensions de l'antenne patch rectangulaire.	24
Tableau II- 3 : Quelques systèmes satellitaires exploitant la bande Ka [44].	25

#### **Chapitre III :**

Tableau III- 1 : <i>Dimensions de l'antenne patch.</i>	36
--	----

***Introduction  
Générale***

## *INTRODUCTION GENERALE*

Les systèmes des Télécommunications mobiles ont connu un grand progrès au cours des dernières années. Ce progrès est dû principalement aux avancements technologiques dans tous les secteurs [1].

L'antenne est considérée comme un dispositif indispensable dans les systèmes de télécommunications mobiles. La conception de ce dispositif constitue donc un élément clé de la conception des systèmes intégrés mobiles et sans fil [2].

Les antennes micro rubans (imprimées, à élément rayonnant, plaquées, ou même patch ou microstrip en anglais) ont connu une évolution considérable. En effet, plusieurs recherches ont été menées afin de concevoir une antenne patch optimale pouvant répondre aux exigences de l'industrie des télécommunications pour des applications du satellite. Ce type d'antennes s'adapte facilement aux surfaces planes et non planes et présentent une grande robustesse et flexibilité lorsqu'il est monté sur des surfaces rigides. Les antennes imprimées sont également très performantes en termes de résonance, d'impédance d'entrée et de diagramme de rayonnement. Les inconvénients majeurs des antennes micro rubans résident dans leur faible pureté de polarisation et une bande passante étroite, malgré ses inconvénients, sont les structures d'antennes les plus utilisées dans les systèmes de communication sans fil, grâce aux avantages qu'elle présente (faible coût et facilité d'intégration).

Le but de ce mémoire est de concevoir un réseau d'antenne patch en bande Ka pour les applications du satellite, à travers l'utilisation du programme de simulation électromagnétique CST, et obtenir quelques résultats en terme du coefficient de réflexion  $S_{11}$ , le rapport des ondes stables VSWR, le diagramme de rayonnement, le gain. Cela pour atteindre l'objectif de cette étude.

Ce mémoire est réparti sur trois chapitres. Le premier chapitre comprend Une vue générale sur les antennes. On commence par donner une définition sur les antennes et leurs rôles. Les caractéristiques d'antennes telles que; le diagramme de rayonnement, gain et directivité, la polarisation, Coefficient de réflexion et la bande passante, le rapport d'ondes stationnaires ...ont été introduites et discutées, et à la fin les différentes types d'antennes.

Le deuxième chapitre a été consacré pour définir les antennes patchs et leurs paramètres géométriques leurs formes, les différentes techniques d'alimentation. À la fin de ce chapitre, on parle des réseaux d'antennes.

Le troisième chapitre est destiné à modéliser et simuler la conception de l'antenne imprimée par CST (CST Microwave Studio), et à conclure les résultats du coefficient de réflexion  $S_{11}$ , le rapport des ondes stables VSWR. Le gain, etc.

Enfin, on termine ce mémoire par une conclusion générale de la présentation des perspectives de ce travail.

***Chapitre I :***  
***Généralité sur***  
***les antennes***

# Chapitre I : Généralité sur les antennes

## CHAPITRE I : GENERALITE SUR LES ANTENNES

### I-1. INTRODUCTION

Depuis la découverte de l'onde hertzienne par Hertz, les techniques de l'information et de la communication à distance ont connu une évolution considérable « l'apparition de l'antenne ».

Les antennes sont un composant très important des systèmes de communication. Par définition, une antenne est un dispositif utilisé pour transformer un signal RF, voyageant sur un conducteur, dans une onde électromagnétique dans l'espace, en d'autres termes, une structure de transition entre espace libre et onde guidée [I-1]. Antennes démontrent une propriété connue sous le nom de réciprocité, ce qui signifie qu'une l'antenne conservera les mêmes caractéristiques, qu'elle soit transmission ou réception. La plupart des antennes sont des fonctionnent efficacement sur une bande de fréquences relativement étroite. Une antenne doit être réglé sur la même bande de fréquences du système radio auquel il est connecté, sinon la réception et la transmission sera lorsqu'un signal est introduit dans une antenne, l'antenne émet rayonnement distribué dans l'espace d'une certaine manière. Une représentation graphique de la distribution relative de la puissance rayonnée dans l'espace est appelée un profil de rayonnement. [I-2]

Le chapitre I de notre travail est destiné à présenter dans le cas général la définition d'une antenne, ces caractéristiques de rayonnement et électrique : comme le gain, directivité, le rendement, polarisation, Coefficient de réflexion et bande passante, ..., ainsi que les principaux types d'antennes employées pour les radiocommunications.

### I-2. DEFINITION DE L'ANTENNE

L'antenne est un conducteur parcouru par un courant électrique rayonnant dans l'espace et une onde électromagnétique, on distingue ainsi l'antenne d'émission et l'antenne de réception.

- A l'émission : afin d'assurer la propagation dans l'air, il est nécessaire qu'un dispositif génère une onde rayonnée. Le rôle de l'antenne d'émission est de transformer l'onde électromagnétique guidée issue d'un générateur en puissance rayonnée : c'est un transducteur.
- A la réception : de façon inverse, la puissance rayonnée peut être captée par une antenne de réception, dans ce sens l'antenne apparaît comme un capteur et un transformateur de puissance électromagnétique rayonnée en puissance électromagnétique guidée.

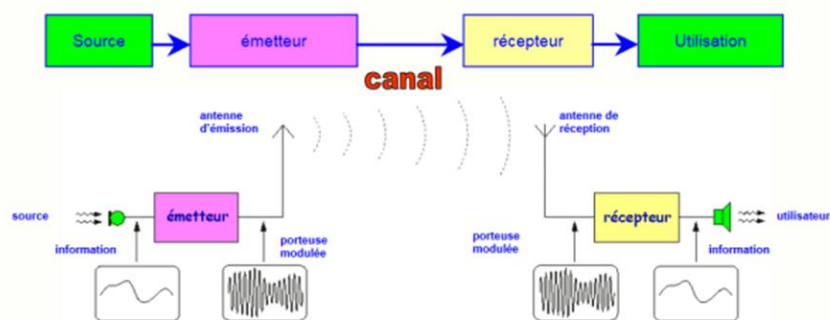


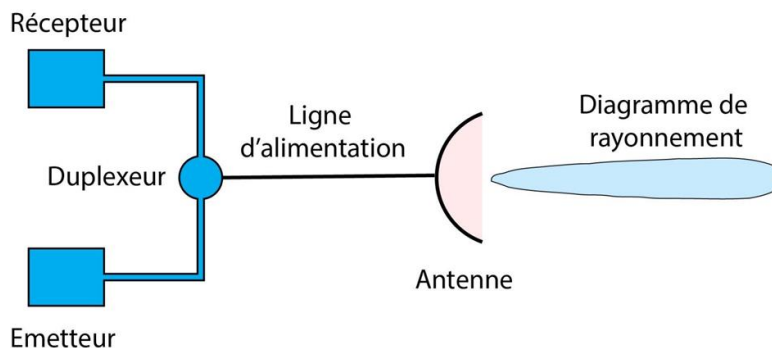
Figure I-1 : Chaîne de transmission par onde électromagnétique [I-3].

## Chapitre I : Généralité sur les antennes

- Dans la plupart des cas, une antenne peut être utilisée en réception ou en émission avec les mêmes propriétés rayonnantes. On dit que son fonctionnement est réciproque. Ceci est une conséquence du théorème de réciprocité qui sera démontré plus loin. Dans quelques cas exceptionnels pour lesquels les antennes comportent des matériaux non linéaires ou bien anisotropes, elles ne sont pas réciproques. Du fait de la réciprocité des antennes, il ne sera pratiquement jamais fait de différence entre le rayonnement en émission ou en réception. Les qualités qui seront annoncées pour une antenne le seront dans les deux modes de fonctionnement, sans que cela soit précisé dans la plupart des cas.

Les antennes ont donc pour principales fonctions

- La transmission ou la réception de l'énergie dans des directions privilégiées.
- L'adaptation correcte entre les circuits électroniques terminaux et le milieu de propagation.
- La transmission la plus fidèle possible de l'information souhaitée.



**Figure I-2 : Représentation d'une antenne d'émission et de réception [I-3].**

L'antenne peut être utilisée (en particulier dans un système de communication) pour diriger l'énergie du rayonnement dans une direction, et de la réduire ou l'annuler dans d'autres directions selon les fréquences. Ceci dit, l'antenne n'est plus seulement un outil de transmission, mais également un dispositif de transition. En conséquence la forme d'une antenne est commandée par un besoin particulier. C'est pourquoi, les antennes prennent tantôt les formes d'ouverture, de patch, de réflecteurs, de lentilles, d'ensemble d'éléments, etc. Une bonne conception de l'antenne peut assouplir les exigences du système et améliorer la performance globale du système.

### I-3. LES CARACTERISTIQUES D'UNE ANTENNE

Les caractéristiques d'une antenne sont déterminées par rapport à une source de référence, une source ponctuelle qui rayonne sa puissance d'alimentation d'une façon identique dans toutes les directions constituant la source de référence idéale [I-4]. La puissance rayonnée par unité d'angle solide dans une direction définie par les deux angles  $(\theta, \phi)$  s'écrit:

$$P_0(\theta, \phi) = \frac{P_a}{4\pi} \quad (\text{I. 1})$$

Où  $P_a$  est la puissance d'alimentation.



# Chapitre I : Généralité sur les antennes

## I-3-A. Diagramme de rayonnement

Le diagramme de rayonnement d'une antenne présente les variations de la puissance rayonnée par unité d'angle solide dans les différentes directions de l'espace. En dehors du cas des antennes omnidirectionnelles dans certains plans, les antennes ne rayonnent pas leurs puissances de façon uniforme dans toutes les directions de l'espace. Il y a généralement une direction de rayonnement maximale autour de laquelle se trouve concentrée une grande partie de la puissance rayonnée et des directions secondaires autour desquelles se répartit la fraction de la puissance restante. La fonction caractéristique de rayonnement  $F(\theta, \varphi)$  de l'antenne permet d'avoir une vision globale du rayonnement. Elle est définie comme étant le rapport de la puissance transmise dans une direction donnée  $P(\theta, \varphi)$  à la puissance  $P_{Max}$  de la direction où le rayonnement est maximal [I-4]. (Formule. I.1)

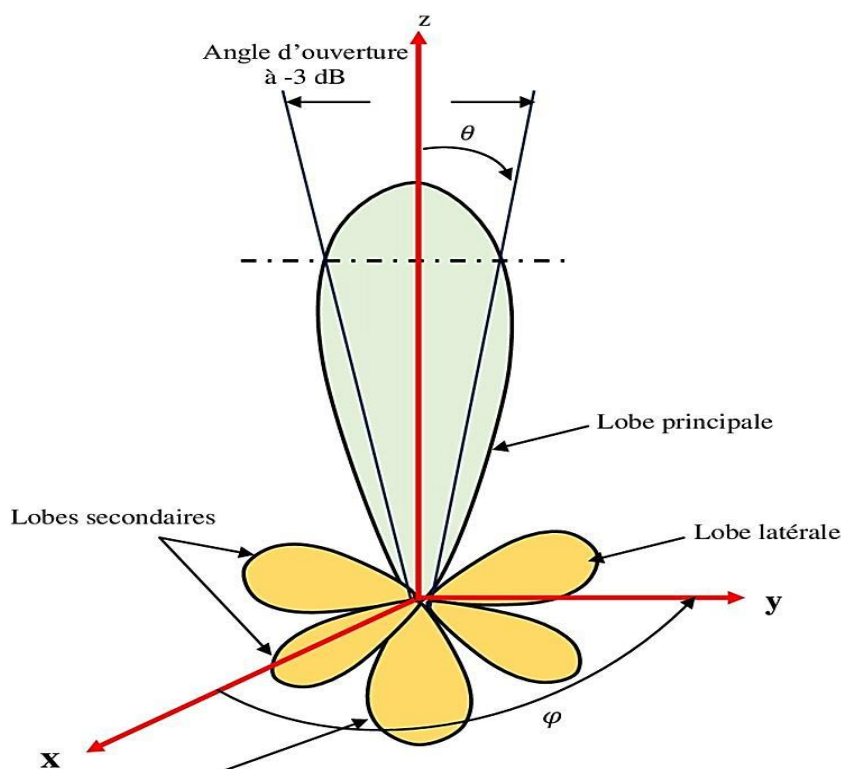
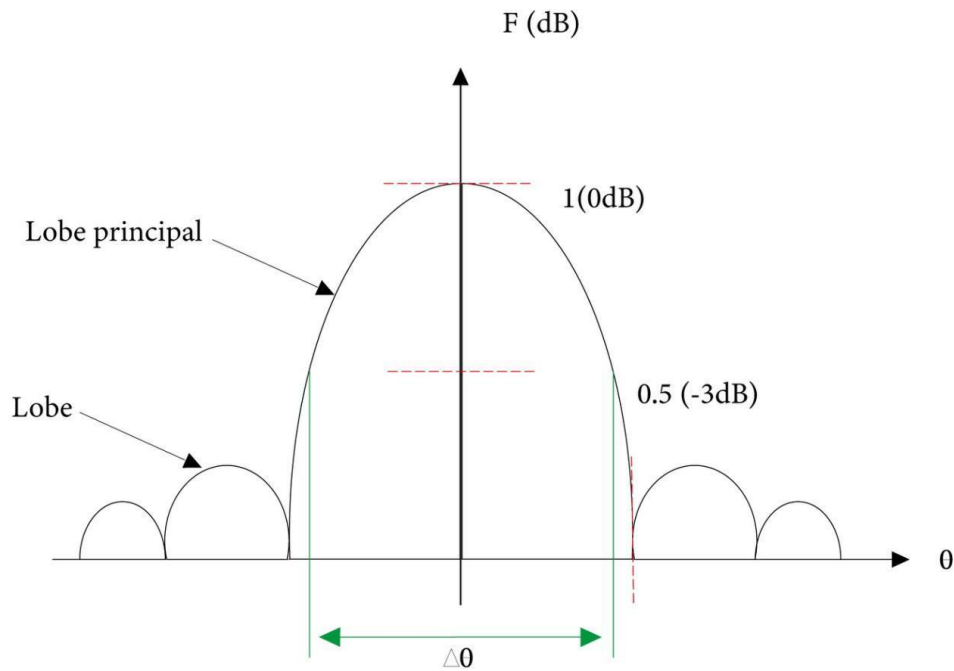


Figure I- 3 : Diagramme de rayonnement d'une antenne directive [I-5].

## I-3-B. Angle d'ouverture

L'angle d'ouverture est l'angle que font entre elles les deux directions du lobe principal selon lesquelles la puissance rayonnée est égale à la moitié de la puissance rayonnée dans la direction de rayonnement maximal. La figure (I-2) présente un exemple de présentation diagramme de rayonnement en coordonnées cartésiennes.

## Chapitre I : Généralité sur les antennes



**Figure I- 4 : Diagramme de rayonnement bidimensionnel en coordonnées cartésiennes [I-6].**

L'angle  $\Delta\theta$  présenté sur ce diagramme est l'angle d'ouverture, lorsque l'antenne présente un lobe principal assez fin, la plus grande partie de la puissance rayonnée est à l'intérieur des deux directions à (-3dB). Donc l'angle d'ouverture nous donne une idée assez précise sur la "F" messe du lobe et la qualité du rayonnement [I-4].

### I-3-C. Ouverture rayonnante et Rendement

L'ouverture rayonnante d'une antenne est la surface géométrique rayonnante de cette antenne. C'est aussi la surface qui capte l'énergie des ondes électromagnétiques transmises. La puissance rayonnée par l'antenne est généralement différente de la puissance d'alimentation de l'antenne. On définit alors le rendement d'une antenne comme étant le rapport entre la puissance totale  $P$  qu'elle rayonne et la puissance d'alimentation  $P_a$  de cette antenne [I-7].

$$\eta = \frac{P}{P_a} \quad (\text{I.2})$$

## Chapitre I : Généralité sur les antennes

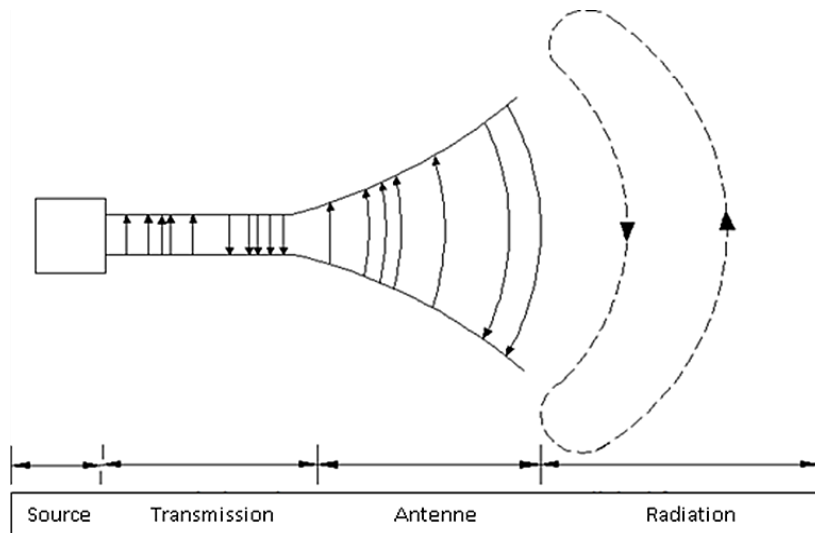


Figure I- 5 : Rayonnement d'une antenne [I-6].

### I-3-D. Gain

Le gain est considéré comme un des principaux paramètres des antennes directives. Pour ces derniers, l'énergie est moins importante dans certaines directions et plus importante dans d'autres. Le gain d'une antenne est évalué par le rapport entre la puissance émise dans la direction du lobe principal et la puissance qui serait émise par une antenne omnidirectionnelle, les deux antennes étant alimenté [I-3], [I-8].

$$G(\theta, \varphi) = \frac{p(\theta, \varphi)}{P_0} = \frac{P(\theta, \varphi)}{\frac{P_t}{4\pi R^2}} = \frac{4\pi R^2 p(\theta, \varphi)}{\iint p(\theta, \varphi)} \quad (\text{I.3})$$

$P$ : est la densité de puissance moyenne rayonnée par l'antenne directive (W/m<sup>2</sup>).

$P_0$ : est la densité de puissance moyenne rayonnée par l'antenne isotrope (W/m<sup>2</sup>).

$P_t$ : est la puissance totale rayonnée par les deux antennes (W).

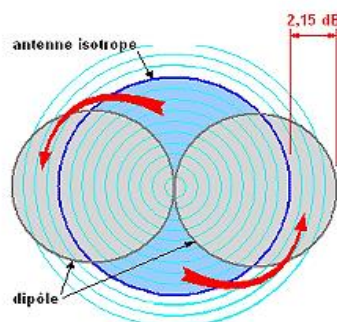


Figure I- 6 : Gain d'une antenne isotrope [I-9].

# Chapitre I : Généralité sur les antennes

## I-3-E. Directivité

La directivité (parfois appelée gain directionnel) d'une antenne est définie comme le rapport de la densité de puissance surfacique  $P(r, \theta, \varphi)$  rayonnée par l'antenne et la densité de puissance surfacique rayonnée par l'antenne isotrope.

L'antenne isotrope est une antenne fictive émettant la même puissance dans toutes les directions [I-10].

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

Dans la direction de rayonnement maximale  $P_0(\theta_0, \varphi_0)$  on note la directivité :

$$D(\theta, \varphi) = D = 4\pi \frac{p_n(\theta_n, \varphi_n)}{Pr} \quad (\text{I. 5})$$

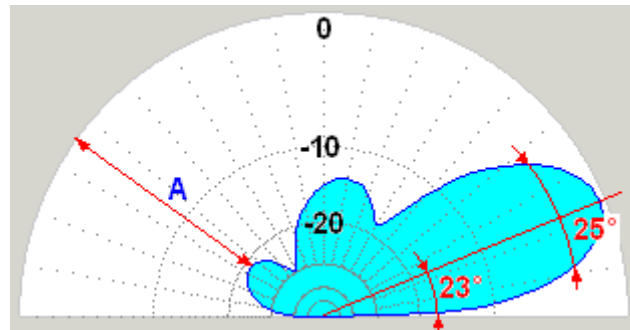


Figure I- 7 : La directivité des antennes-rapport avant-arrière [I-9].

## I-3-F. Polarisation

La polarisation d'une antenne est déterminée par la trajectoire que décrit le champ électrique E de l'onde qu'elle émet ou reçoit de manière privilégiée. Le type de polarisation peut être linéaire, circulaire ou dans le cas général elliptique [I-3]. Les trois types de polarisation sont récapitulés dans la figure (I-3).

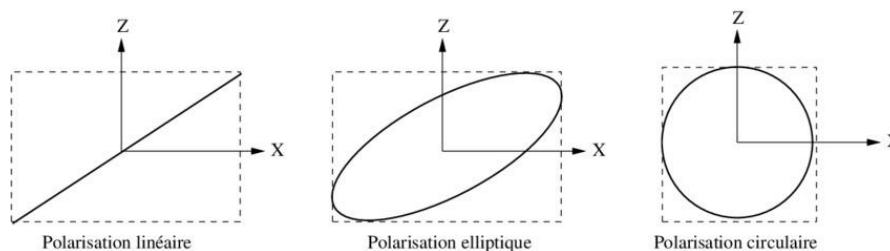


Figure I- 8 : Différents types de polarisation [I-11].

### I-3-F-1. Polarisation linéaire

On dit qu'il y a une polarisation linéaire si le champ E est perpendiculaire ou horizontal à la direction de propagation.

## Chapitre I : Généralité sur les antennes

L'angle que fait la direction du champ E avec la direction de propagation peut être  $0^\circ$  = polarisation Horizontale ou  $90^\circ$  = polarisation Verticale [I-3].

### I-3-F-2. Polarisation elliptique

Dans ce type de polarisation le champ E change de direction en fonction de la fréquence. Si le petit axe de l'ellipse est égal à zéro, nous avons une polarisation linéaire. Si les deux axes sont égaux, nous avons une polarisation circulaire [I-3].

### I-3-F-3. Polarisation circulaire

Dans ce type de polarisation le champ E décrit un cercle autour de la direction de propagation et qui peut être "droite" ou "gauche" dans le sens dextre ou ambidextre.

### I-3-G. Coefficient de réflexion

Le coefficient de réflexion donne le transfert d'énergie par l'antenne (l'adaptation de l'antenne) qui est lié à l'impédance d'entrée par la relation suivante [I-12] :

$$S_{11} = \frac{Z_R - Z_C}{Z_R + Z_C} \quad (I.6)$$

Où :

$Z_C$  : est l'impédance caractéristique, en générale égale à  $50\Omega$ .

Le module du coefficient de réflexion est habituellement présenté en décibel (dB) et est noté  $|S_{11}|$  et se définit comme suit :

$$S_{11} = 20 \log S_{11} \quad (I.7)$$

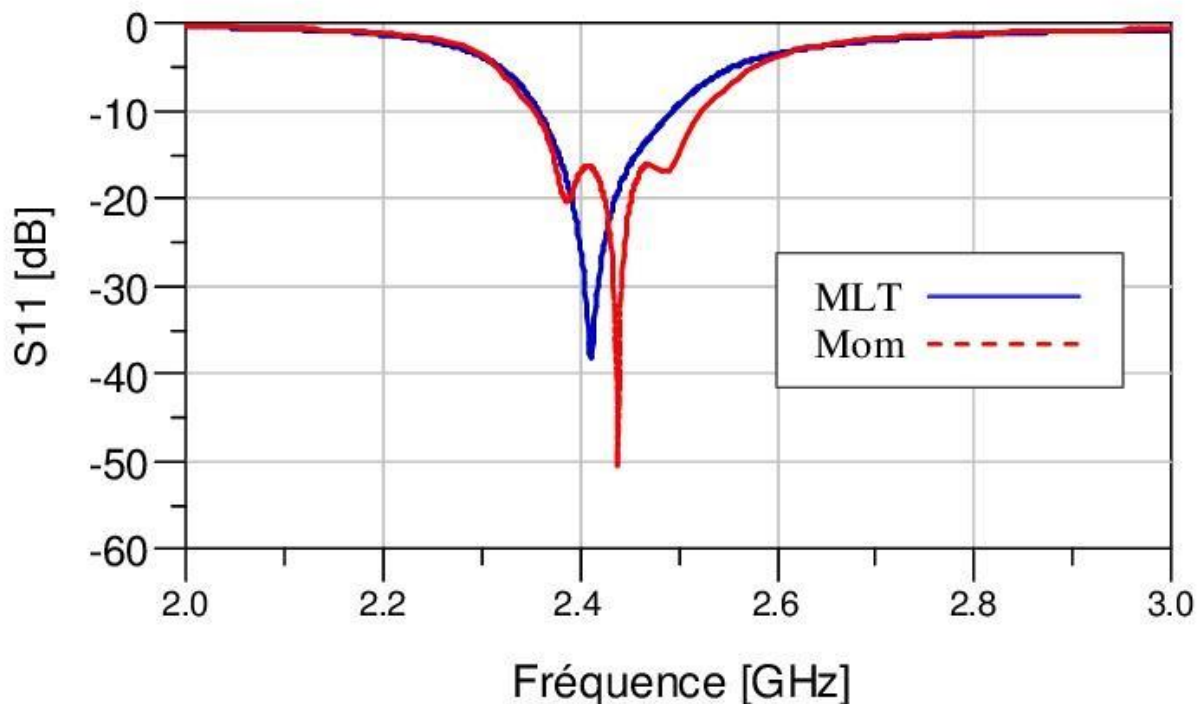


Figure I- 9 : Coefficient de réflexion à l'entrée du réseau d'antennes [I-13].

## Chapitre I : Généralité sur les antennes

### I-3-H. 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.

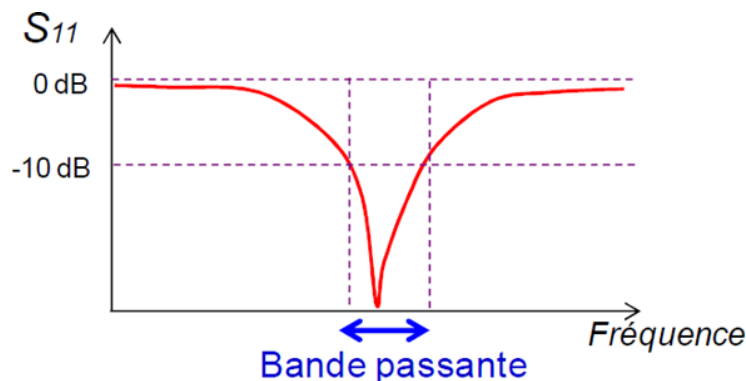


Figure I- 10 : Exemple d'un coefficient de réflexion et bande passante d'une antenne [I-14].

### I-3-I. Le facteur de qualité

Ce paramètre est défini comme étant le rapport entre l'énergie stockée et l'énergie Dissipée avec l'énergie rayonnée. Donc, ce paramètre est évalué par la relation [I-15]

$$Q = 2\pi \frac{\text{énergie stockée}}{\text{énergie rayonnée et dissipée}} \quad (\text{I. 8})$$

Une bonne estimation du facteur de qualité est donnée par le rapport entre la fréquence de résonance  $f_r$  de l'antenne et sa bande passante  $\Delta f$  :

$$Q = \frac{f_r}{\Delta f} \quad (\text{I. 9})$$

Une bande passante étroite implique un fort coefficient de qualité donc un rayonnement très actif de l'antenne, ce qui limite les interférences à l'extérieur de la gamme de fonctionnement.

Une faible valeur issue de la formule (I.9) implique une large bande passante et donc une éventuelle collecte du bruit présent dans cette gamme, dégradant de ce fait le rapport signal sur bruit en réception [I-15].

## Chapitre I : Généralité sur les antennes

### I-3-J. Rapport d'ondes stationnaires (ROS)

Ce paramètre est un indicateur du bon fonctionnement du système d'alimentation d'une antenne, qui est évaluée par le rapport entre le maximum et le minimum de tension mesurés sur la ligne au niveau d'un ventre de tension [I-16].

$$ROS = \frac{U_{max}}{U_{min}} = \frac{I_{max}}{I_{min}} \quad (\text{I. 10})$$

On peut aussi l'évaluer à partir du coefficient de réflexion :

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

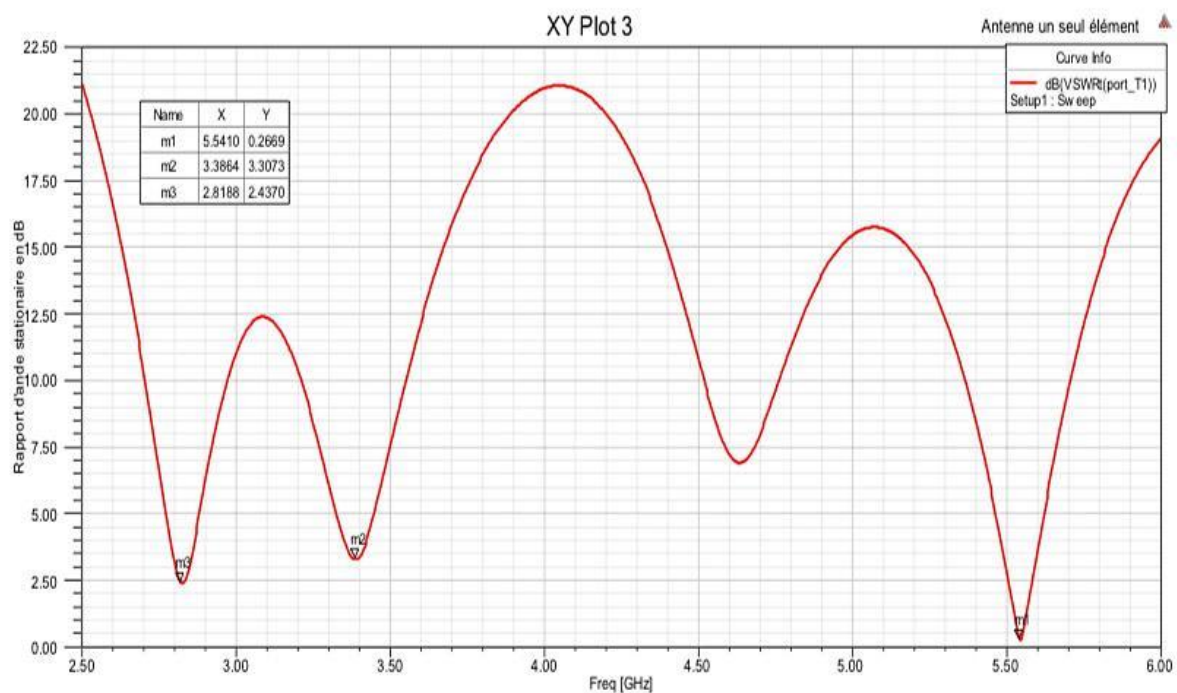


Figure I- 11 : Rapport d'Onde Stationnaire d'antenne [I-17].

### I-3-K. L'impédance d'entrée

L'impédance d'entrée de l'antenne est l'impédance vue de la part de la ligne d'alimentation au niveau de l'antenne. Cette impédance est donnée par la formule :

$$Z_{in} = Z_0 \frac{(1 + S_{11})}{(1 - S_{11})} \quad (\text{I. 12})$$

$Z_0$  = Impédance caractéristique de la ligne d'alimentation.

**N.B :** Comme  $S_{11}$  est fonction de la fréquence, alors  $Z_{in}$  varie aussi avec la fréquence [I-18].

## I-4. DIFFERENTS TYPES DES ANTENNES

Les antennes peuvent être classées selon la forme structurale, la bande de fréquences de fonctionnement, la directivité, le gain, l'orbite, ..., etc.



## Chapitre I : Généralité sur les antennes

### I-4-A. Selon la directivité

Trois types des antennes spatiales peuvent être distingués :

#### I-4-A-1. Antennes directives

Une antenne directive est donc une antenne qui rayonne dans une (ou plusieurs) directions privilégiées. Les antennes directives sont utilisées lorsque l'on veut couvrir une zone importante, par exemple pour la téléphonie mobile ou pour la radiodiffusion. Il existe plusieurs types d'antennes directives spatiales tels que :

##### I-4-A-1-a. Antennes à ouverture rayonnante et système focalisant

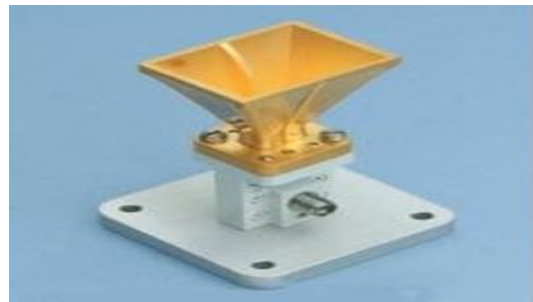
Les cornets font partie des antennes à ouverture rayonnante et les antennes à réflecteur ou à lentille sont des antennes à système focalisant.

Le cornet (Figure I-12-a et Figure I-12-b) est une antenne qui sert de transition progressive entre un milieu guidé et l'espace libre. Il peut être de forme rectangulaire ou circulaire. Les pertes dans ce type d'antenne sont minimales.

Les antennes à réflecteur (Figure I-12-d et I-12-e) sont des systèmes focalisant en réflexion. Elles sont constituées d'une source qui illumine un réflecteur métallique.



a)



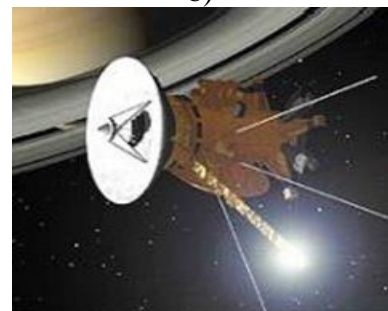
b)



c)



d)



e)

**Figure I- 12 : Différents exemples d'antennes à ouverture rayonnante (a) Antennes cornets cylindriques, (b) et système focalisant (c) Antenne lentille (d) Antenne à réflecteur au sol (e) Antenne à réflecteur pour satellite [I-19].**

##### I-4-A-1-b. Antennes réseau

Une antenne réseau est constituée d'un groupement de plusieurs antennes identiques. Ce groupement d'antennes peut être formé de patches, de fentes, ou même de cornets, Figure I-14.



## Chapitre I : Généralité sur les antennes

### I-4-A-2. Antennes omnidirectionnelles

L'antenne omnidirectionnelle ou bien isotopique, est une antenne fictive qui rayonne la même densité de puissance quelle que soit la direction de l'espace.

Cette antenne est considérée comme étant une antenne à gain faible, les antennes filaires et hélices présentent ce type d'antenne.

Dans le domaine spatial, ce type d'antenne a été généralement utilisée dans le sous-système télémétrie, poursuite et de commande TTC (Telemetry, Tracking & Command)), parce que ce dernier doit être opérationnel pendant toutes les phases de la mission, même si le contrôle d'attitude est perdu. La Figure I-13 représente quelques exemples sur l'antenne omnidirectionnelle.



Figure I- 13 : Antenne de télémétrie, poursuite et de commande (Courtesy of RUAG Aerospace Sweden) [I-19].

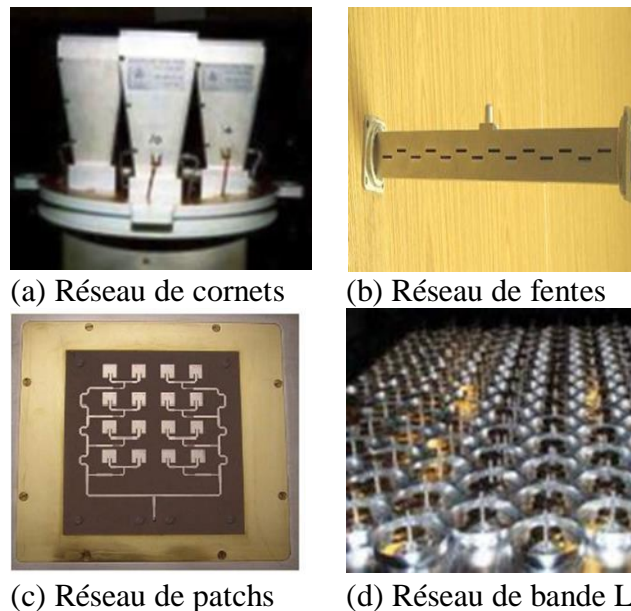


Figure I- 14 : Différents exemples d'antennes réseau [I-19, I-20].

### I-4-A-3. Antennes hémisphériques

Pour répondre à la nécessité d'une fréquence unique à profil bas et de faible poids antennes hémisphériques ou quasi-hémisphérique, le travail à S, C, ou de la bande X, antennes patch-tassent excités ont été mis au point à RUAG Aerospace Suède Figure I-15.

## ***Chapitre I : Généralité sur les antennes***

Ils sont constitués d'une coupelle cylindrique courte, avec une section transversale circulaire et un excitateur. La coupe est excitée l'aide des deux éléments patchs circulaire, ou un seul patch. La partie inférieure patch ou le patch unique est alimenté à un moment donné et le patch à deux perturbations opposées pour générer la polarisation circulaire.



**Figure I- 15 : Antenne bande X par RUAG [I-19].**

### **I-4-B. Selon l'orbite**

Les antennes peuvent être classées selon les types d'orbite :

Les orbites basses, dites LEO (Low Earth Orbit) d'une altitude variante entre 600 et 1600 km, l'orbite géostationnaire, dite GEO (Geostationary Orbit) située à 36 000 km et les orbites moyennes, dites MEO (Middle Earth Orbit) pour toutes les altitudes intermédiaires.

Les antennes LEO utilisent généralement les bandes L, S, C ou X, elles sont montées dans les satellites LEO par exemple les satellites d'observation de la terre, la Figure I-16 représente deux antennes radars à aperture synthétique le premier est l'antenne SMOS de la bande X (Figure I-16-a) et l'autre est l'antenne SIR-C de la bande C pour le satellite Seasat voir la Figure I-16-b.

### **I-4-C. Selon le gain**

Par la valeur du gain  $G=6\text{dBi}$ , les antennes spatiales ayant 4 catégories :

#### **I-4-C-1. Antennes à gain faible $G \leq 6\text{dBi}$**

L'antenne patch est une pastille métallique à la surface d'un substrat diélectrique dont la face inférieure est métallisée, Figure I-17. L'antenne patch est le meilleur choix dans les véhicules, les avions et les petits satellites. Ce type d'antenne est utilisé dans les navigateurs du satellite, récepteur GPS.

## Chapitre I : Généralité sur les antennes

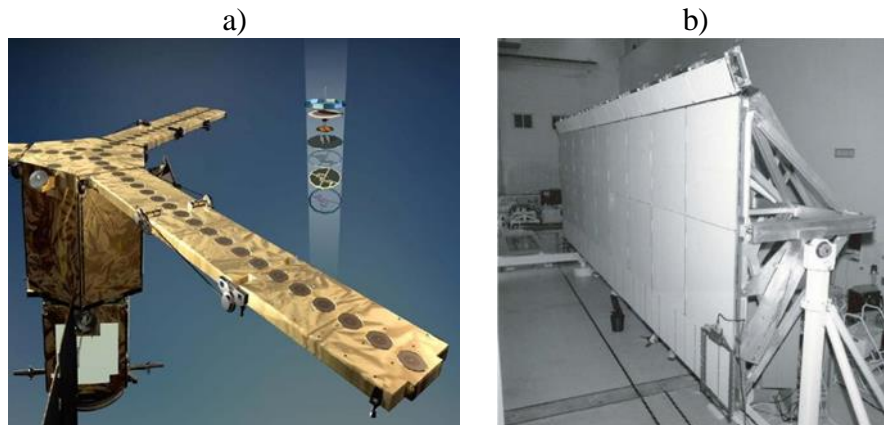


Figure I- 16 : Antennes LEO : radar a aperture synthétique, Antenne SMOS de la bande X, b) Antenne SIR-C dans l'étage de configuration de laboratoire [I-19].



Figure I- 17 : Antenne patch microruban bande S pour microsatellite de Surrey SSTL [20].

### I-4-C-2. Antennes à gain élevé $G \geq 6\text{dBi}$ [I-19].



Figure I- 18 : Antenne à réflecteur (AstroMesh) d'INMARSAT-4 [I-19].

*Antenne SIR-C dans l'étage de configuration de laboratoire.*

Les antennes à réflecteur parabolique et les réseaux d'antennes patches et les antennes destinés pour les applications de l'espace lointain par exemple les antennes *Cassini* sont des antennes à gain élevé (Figures I-18 et I-19).

## *Chapitre I : Généralité sur les antennes*



**Figure I- 19 : Réseaux d’antennes de SMOS SAT [I-19].**

### **I-5. CONCLUSION**

La maîtrise de la théorie des antennes est plus que nécessaire, elle nous permet de comprendre leur comportement à des différentes gammes de fréquences. Car pour toute application, il faut choisir des caractéristiques bien conforme au standard spécifique.

Dans ce chapitre nous avons dressé la forme générale d’une antenne, on a présenté les paramètres essentiels de l’antenne tels que le gain, la directivité, Diagramme de rayonnement, l’impédance, le coefficient de réflexion, bande passante, en suite on a donné un bref aperçu sur quelques types d’antennes.

Après ce passage, on présente l’antenne imprimé qu’on détaillera dans le chapitre suivant.

***Chapitre II :***  
***étude des***  
***antennes patchs***  
***dans bande Ka***

## **CHAPITRE II : ETUDE DES ANTENNES PATCHS DANS BANDE KA**

### **II-1. INTRODUCTION**

Dans les systèmes de télécommunication, les antennes sont considérées comme l'un des éléments nécessaires pour assurer la transition entre l'onde guidée et l'onde rayonnée. Il existe plusieurs types d'antennes telles que les antennes imprimées qui font l'objet de ce chapitre. La théorie et la technologie des antennes imprimées ont connu une croissance rapide, et elles ont été l'une des technologies les plus innovatrices dans leur conception. Les antennes imprimées jouent un rôle important dans le domaine des télécommunications, grâce à leurs formes géométriques diverses, elles sont implantées dans de nombreux dispositifs électroniques telles que le téléphone portable, les ailes des avions, les appareils photos numériques...etc [II-1]. Parmi les avantages de cette technologie d'antennes, on peut citer : le faible poids, leur volume réduit, la conformabilité et la possibilité d'intégrer les circuits micro-ondes au niveau des antennes. Ajoutons que la simplicité de leurs structures fait que ce type d'antenne le faible coût de fabrication [II-2].

### **II-2. LES PARAMETRES GEOMETRIQUES DU L'ANTENNE IMPRIMEE**

Le concept des antennes imprimées a été proposé dès 1953 par Deschamps [II-3] mais il n'a été possible de les réaliser efficacement qu'à partir de 1970 (Howel et Muson) grâce à l'arrivée sur le marché de diélectrique à faibles pertes. Depuis, la recherche dans ce domaine n'a cessé de s'intensifier pour exploiter les nombreux avantages des antennes imprimées :

- faible poids,
- faible volume et épaisseur réduite,
- faible coût de fabrication,
- compatibilité avec des circuits intégrés (antennes actives),
- réseau d'antennes.

Ces antennes présentent malheureusement, également des désavantages :

- largeur de bande étroite,
- faible gain.

Le calcul du rayonnement et des caractéristiques radioélectriques des antennes imprimées est assez complexe. Plusieurs approches ont été proposées : modèle de la ligne de transmission, modèle de la cavité, approche spectrale. Compte-tenu de leurs complexités ces approches ne sont pas développées dans cet article et ne sont pas abordées avec nos étudiants de licence professionnelle. Pour de plus amples informations le lecteur se référera à [II-3],[ II-4].

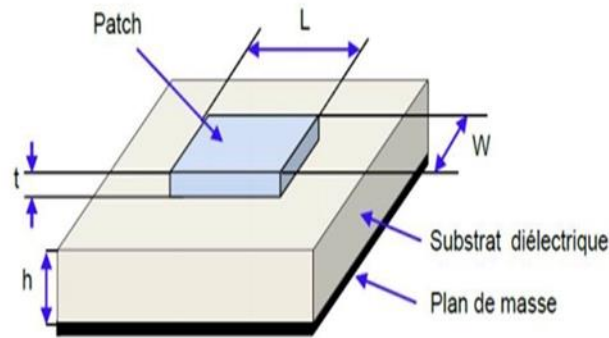


Figure II-1 : Géométrie d'une antenne patch [II-5].

L'antenne la plus simple à étudier est sans doute le patch rectangulaire (Figure II-1) qui est définie par :

- Ses caractéristiques électromagnétiques : son gain, son diagramme de rayonnement, sa largeur de faisceau, sa polarisation.
- Ses paramètres d'utilisations : sa fréquence de résonance  $f$ , sa résistance d'entrée  $R_{in}$  et sa bande passante  $B$ .
- Ses paramètres internes : son facteur de qualité  $Q$ , sa résistance de rayonnement  $R_r$ , son rendement et ses pertes métal et diélectrique mesurées par  $Q_c$ ,  $Q_d$ . La première étape est le choix du substrat et du conducteur pour lesquels les caractéristiques à connaître sont :
  - pour le substrat :  $\epsilon_r$ , sa permittivité relative,  $\tan\delta$  sa tangente de perte et sa hauteur  $h$
  - pour le conducteur : sa conductivité  $\sigma$  et son épaisseur  $t$ . La conception consiste alors à déterminer
  - la longueur et la largeur du patch (L et W),
  - la position et le type de l'alimentation (coaxiale, microstrip, fente).

Dans cet article un seul type d'alimentation est présenté. Il s'agit d'une alimentation par une ligne coaxiale (Figure II-2).

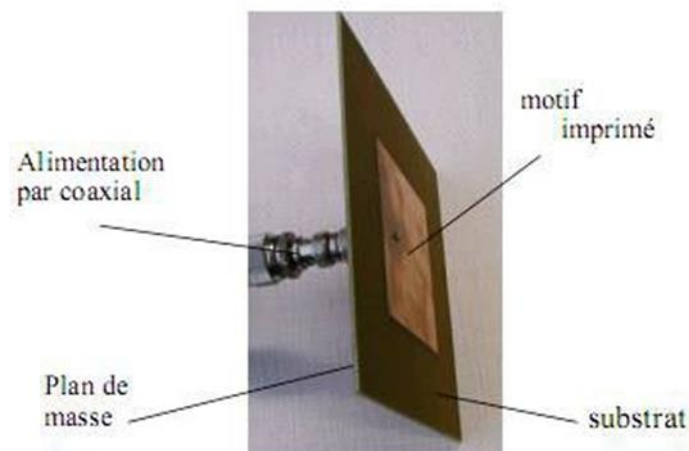


Figure II-2 : Alimentation par ligne coaxiale [II-6].

## Chapitre II : étude des antennes patchs dans bande Ka

### II-2-A. La largeur du Patch

La largeur du patch a un effet mineur sur les fréquences de résonance et sur le diagramme de rayonnement de l'antenne. Par contre, elle joue un rôle pour l'impédance d'entrée (sur le bord) de l'antenne (Formule. II.1) et la bande passante à ses résonances :

$$R_{IN} = 90 \frac{\epsilon_r^2}{\epsilon_r^2 - 1} \quad (\text{II. 1})$$

Pour permettre un bon rendement de l'antenne, une largeur W pratique est :

$$W = \frac{c}{2f_{01}} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (\text{II. 2})$$

Où le terme  $f_{01}$  représente la fréquence de résonance fondamentale de l'antenne. En contrepartie, le diagramme de rayonnement est légèrement dégradé car il apparaît plusieurs lobes secondaires.

Avec : c la vitesse de la lumière ( $c=3.0 \times 10^8$  m/s)

### II-2-B. Longueur du patch

La longueur du patch détermine les fréquences de résonance de l'antenne. Il ne faut surtout pas oublier de retrancher deux fois la longueur  $\Delta L$  qui correspond au débordement des champs (formule. II.3).

$$L = \frac{\lambda_{g \text{ dielectric}}}{2} - 2\Delta L = \frac{c}{2f_{01}\sqrt{\epsilon_{r \text{ eff}}}} - 2\Delta L \quad (\text{II. 3})$$

La longueur L doit être légèrement inférieure que la longueur d'ondes dans le diélectrique. A cette fréquence d'opération,  $\lambda$  dépend de la constante diélectrique efficace. L'effet de débordement du champ fait électriquement, le patch semble plus grand que sa dimension physique. Il y a donc une augmentation de L (Formule. II.4) de chaque côté de patch.

$$\Delta L = 0.421h \frac{(\epsilon_r + 0.3)\left(\frac{L}{h} + 0.264\right)}{(\epsilon_{eff} + 0.258)\left(\frac{L}{h} + 0.8\right)} \quad (\text{II. 4})$$

Donc la dimension effective du patch sera :

$$L_{eff} = L + 2\Delta L \quad (\text{II. 5})$$

### II-3. FORMES DES ANTENNES IMPRIMEES

Les antennes imprimées peuvent prendre des formes géométriques arbitraires. Parmi les formes les plus utilisées, on distingue : la forme circulaire, la forme rectangulaire qui est préférable à cause des dimensions encombrantes de la circulaire. Cependant, dans certaines applications, l'antenne micro ruban circulaire [II-7] offre des performances meilleures que celle de l'antenne rectangulaire. En outre, l'antenne circulaire présente l'avantage de pouvoir obtenir



## Chapitre II : étude des antennes patches dans bande Ka

la polarisation circulaire. L'antenne micro ruban circulaire a fait l'objet d'un grand nombre de recherche durant ces dernières années.

La forme triangulaire a également été prise en considération par certains auteurs [II-8],[ II-9]. Le dépôt des éléments triangulaires de certaine façon permettant au constructeur de réduire de manière considérable le couplage entre les éléments adjacents du réseau, ils présentent aussi des caractéristiques de rayonnement semblables à celles du rectangle [II-10]. On trouve également, des antennes à des formes complexes et difficiles à analyser. Elles sont utilisées dans certaines applications particulières, elles résultent souvent de la combinaison de deux formes simples.

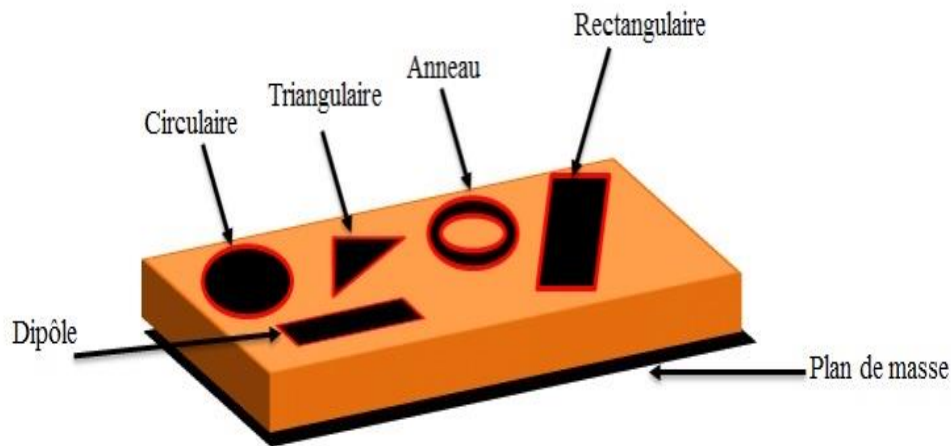


Figure II- 3 : Les différentes formes d'une antenne Imprimée [II-11].

### II-4.LES TECHNIQUES D'ALIMENTATION D'UNE ANTENNE IMPRIMEE

L'un des problèmes sérieux lors de la conception des antennes imprimées est le problème d'adaptation, en effet, les antennes planaires ont une dimension de l'ordre d'une demi-longueur d'onde, ce qui rend l'impédance d'entrée de l'antenne dépendante de la position du point d'alimentation. Pour cela plusieurs techniques d'alimentation ont été adoptées afin de permettre au phénomène de résonance de s'établir [II-12], [II-13],[ II-14], elles sont classées en deux catégories, excitation avec contact et excitation sans contact. Dans les méthodes d'excitation avec contact, la puissance est acheminée aux patchs rayonnants en utilisant un élément de contact tels la ligne micro-ruban et le câble coaxial. Dans la deuxième classe d'excitation, le couplage électromagnétique est utilisé pour transmettre la puissance de la ligne micro-ruban au patch rayonnant. Les quatre techniques d'alimentation les plus utilisées sont la ligne micro-ruban, câble coaxiale, fente et ligne couplée [II-15], [II-16].

#### II-4-A. Excitation avec contact

##### II-4-A-1. Alimentation par ligne micro-ruban

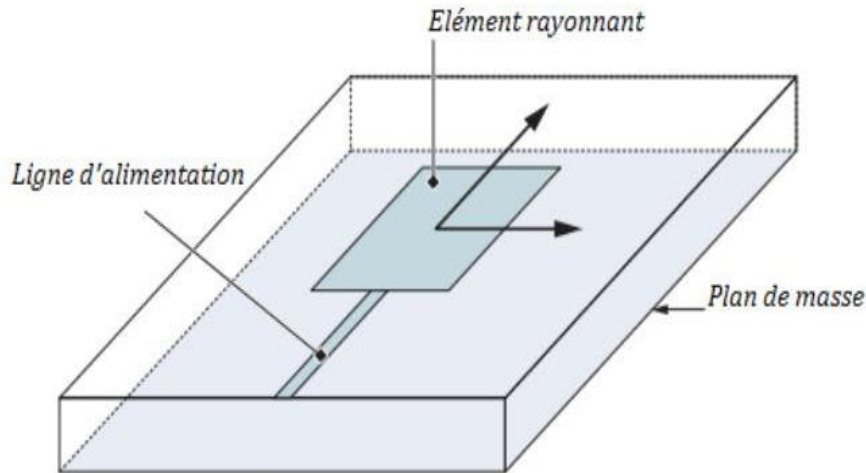
L'alimentation la plus aisée et la moins coûteuse consiste à utiliser une ligne micro-ruban sur le même plan que l'élément rayonnant (Figure II-4).

L'antenne est considérée comme une charge connectée à une ligne d'impédance caractéristique dépendant de sa longueur, de sa hauteur et du matériau diélectrique qui la

## Chapitre II : étude des antennes patches dans bande Ka

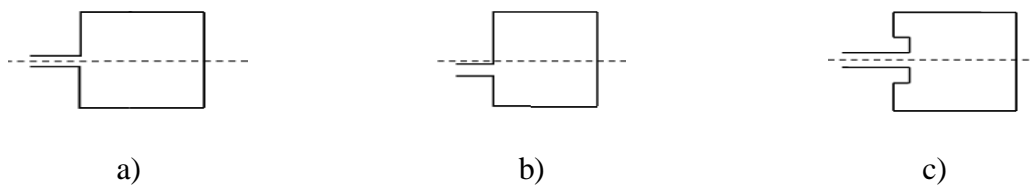
supporte. Une fois l'impédance de l'élément rayonnant déterminée (soit mesurée, soit calculée) on choisit les dimensions de la ligne d'alimentation qui assurent la meilleure adaptation. Cependant, si le point d'excitation est mal positionné, il présente une forte impédance et l'adaptation sera difficile. Pour éviter ce problème, il est courant de réaliser des encoches dans l'élément rayonnant dont la taille est bien calculée afin d'obtenir une meilleure adaptation.

Cette disposition présente un inconvénient majeur qui est le rayonnement parasite engendré par la ligne qui peut perturber le rayonnement propre de l'antenne [II-12],[ II-17].



**Figure II- 4 : Alimentation du patch par une ligne micro-ruban [II-18].**

L'alimentation peut se faire par la connexion directe à une ligne micro-ruban (Figure II-5), 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 [II-19], [II-20], [II-21]. Elle est très utilisée dans les réseaux d'antennes imprimées de différentes.



**Figure II- 5 : L'alimentation par une ligne micro-ruban axiale(a), décalée (b) et avec encoche(c) [II-16].**

### II-4-A-2. Alimentation par Sonde coaxiale

Cette alimentation est réalisée par contact direct entre l'élément rayonnant (patch) et le câble coaxial. Pour cela on perce un trou dans le plan de masse et le diélectrique de façon à faire passer le conducteur central qui est soudé en un point situé sur l'axe de symétrie du patch dont la distance au bord de l'antenne procure l'adaptation. Le conducteur extérieur du câble est soudé au plan de masse (Figure II.6).

Cette technique présente une meilleure adaptation dans le cas de substrat de faible épaisseur. Par contre, dans le cas de substrat épais, la réactance inductive supplémentaire apportée par la sonde affecte la bande passante, elle peut aussi rayonner [II-12].

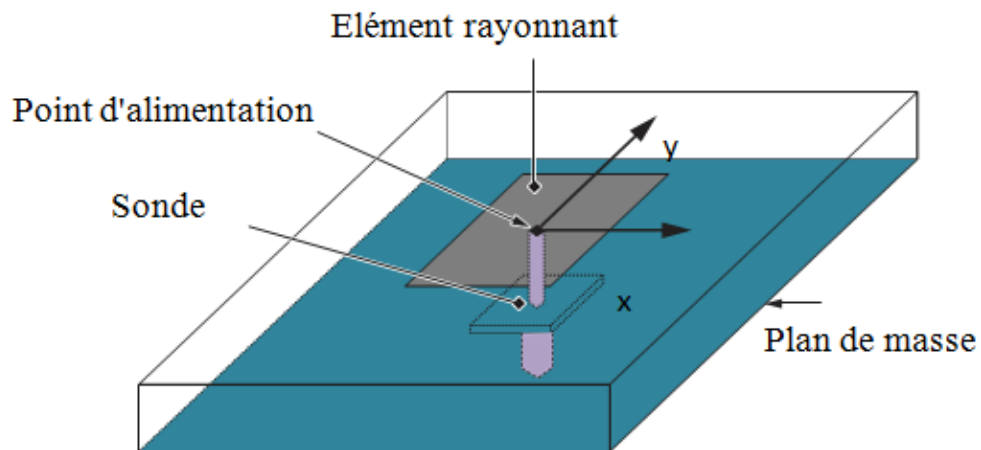


Figure II- 6 : Alimentation par sonde coaxiale [II-22].

#### II-4-B. Excitation sans contact (par proximité)

##### II-4-B-1. Alimentation par fente

Une solution du problème de rayonnement de la ligne dans l'alimentation par ligne micro-ruban, consiste à réaliser l'alimentation sous une seconde plaque de substrat. Le transfert de puissance de la ligne à l'élément rayonnant se fait par couplage magnétique depuis la ligne à travers la fente. Ce type d'alimentation est appelé alimentation par fente (Figure II-7). Pratiquement il n'existe plus de rayonnement parasite dans l'hémisphère supérieure du patch, mais un rayonnement arrière apparaît. Cette technique nécessite un positionnement très précis qui n'est pas toujours facile à obtenir surtout dans le cas des structures de petites dimensions.

L'adaptation de l'antenne à la ligne est difficile car l'impédance ramenée au plan du patch possède une partie imaginaire et une partie réelle. Pour obtenir l'adaptation adéquate, on peut modifier les dimensions de la fente et la longueur de la ligne [II-12].

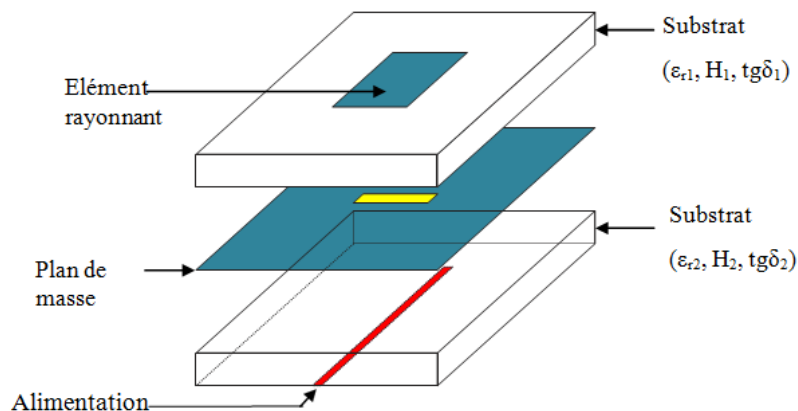


Figure II- 7 : Alimentation par fente [II-22].

### II-4-B-2. Alimentation par ligne couplée

Dans ce cas, la ligne d'alimentation est placée entre le patch et le plan de masse et positionnée entre deux substrats diélectriques dont le substrat inférieur est d'épaisseur assez faible et de permittivité élevée, le substrat supérieur est plus épais et de faible permittivité, ce qui réduit considérablement le rayonnement de la ligne (Figure II-8).

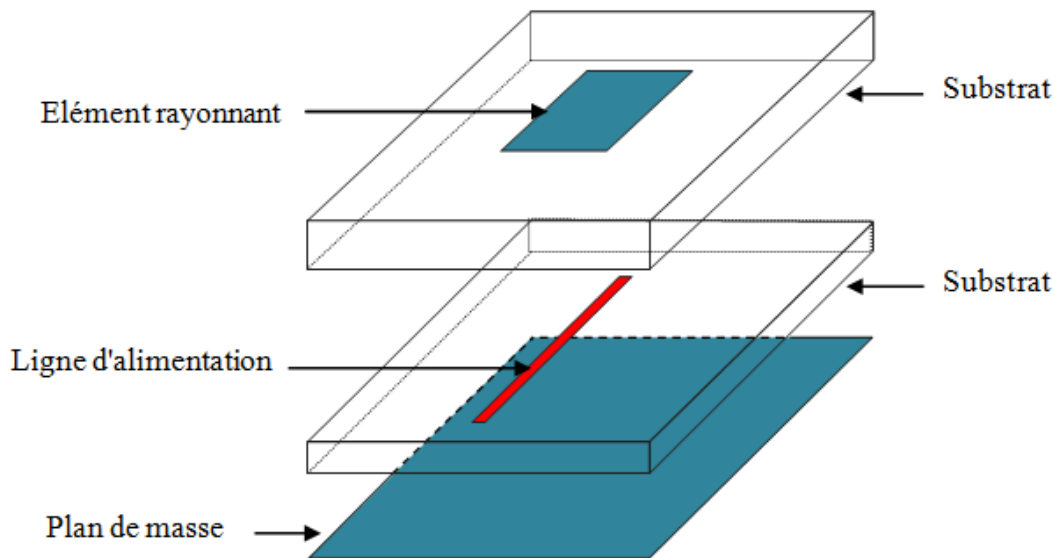


Figure II- 8 : Alimentation par couplage [II-22].

Une comparaison entre l'alimentation avec contact (sonde coaxiale et la ligne microbande) et l'alimentation sans contact (par couplage, guide d'onde coplanaire, et le couplage par fente), est résumée dans le tableau II-1.

	<i>Avantages</i>	<i>Inconvénients</i>
<i>Sonde Coaxial</i>	Pas des pertes par rayonnement de ligne. Sélection possible d'un mode privilégié. Obtention de l'impédance d'entrée par le positionnement de la sonde Prédiction aisée de l'impédance d'entrée pour des substrats de faible hauteur Technique de perçage simple jusqu'à 10Ghz	Rayonnement parasite de la sonde de type monopolaire. Partie selfique ramenée par l'âme du connecteur à prendre en compte. Technique de perçage et de soudure plus délicate en millimétrique. Rapidement cher et compliqué industriellement pour exciter chaque élément d'un réseau à forte directivité.

## Chapitre II : étude des antennes patchs dans bande Ka

<b>Ligne microstrip</b>	Procédé technologique plus simple par gravure sur la même face de l'antenne et du circuit d'alimentation. Adaptation de l'aérien possible par contact pénétrant.	Rayonnement parasite de la discontinuité de ligne aérienne. Rayonnement parasite possible du circuit de distribution en millimétrique Structure figée après gravure
<b>Ligne microstrip en CO</b>	- Procédé technologique plus simple par gravure sur la même face de l'antenne et du circuit d'alimentation	Rayonnement parasite possible du circuit de distribution en millimétrique Structure figée après gravure Paramétrage du positionnement relatif de la ligne nécessaire pour adapter l'antenne
<b>LM en Sandwich</b>	- Dessin du circuit d'alimentation modifiable par rapport aux aériens - Bande passante plus large par augmentation de la hauteur ( $h_1+h_2>h_1$ )	Deux couches de substrat requises. Difficulté pour l'intégration de dispositifs actifs et pour la dissipation de chaleur
<b>Ligne à fente</b>	Procédé technologique simple. Facilités pour intégrer des dispositifs actifs et dissiper la chaleur résultante.	- Rayonnement arrière parasite possible de la fente - Transition fente-ligne de transmission
<b>Guide d'onde Coplanaire</b>	Mêmes avantages que le cas de la ligne à fente. Faible rayonnement arrière Transitions simples pour l'intégration des dispositifs actifs et de circuit MMIC.	- Génération de modes de propagation parasites sur les guides d'onde coplanaires.
<b>Couplage par fente</b>	Réalisation du circuit de distribution et de l'aérien indépendante. Séparation électromagnétique des deux couches. Possibilité d'élargir la bande en associant la résonance de l'élément	Technologie plus coûteuse et complexe (positionnement des deux couches, quatre faces de métallisation) Intégration sur un support mécanique nécessitant des précautions Rayonnement arrière parasite de la fente lorsque celle-ci résonne au voisinage de l'élément.
<b>Couplage par fente d'une ligne encastrée</b>	Mêmes avantages que le cas du couplage par fente Rayonnement arrière nul	Mêmes avantages que le cas du couplage par fente Rayonnement arrière nul

**Tableau II- 1 : Comparaison entre les méthodes d'alimentation [II-23].**

### II-5. CAHIER DE CHARGE

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

- La permittivité diélectrique du substrat (époxy) :  $\epsilon_r = 3,55$
- La hauteur du substrat diélectrique :  $h=0,50\text{mm}$
- La fréquence de résonance que l'on désire :  $f_r=25.75\text{ GHz}$
- L'adaptation à 50 Ohm
- L'alimentation par ligne microstrip

## Chapitre II : étude des antennes patchs dans bande Ka

- L'épaisseur de la métallisation est de 35  $\mu\text{m}$
- Les pertes tangentiels du substrat : perte tangentielle = 0.009
- Réception dans la bande 20-30 GHz.

Les paramètres de cette antenne ont été calculés en utilisant les équations du Tableau II-2 :

<i>Elément</i>	<i>Equation</i>
<i>Fréquence de résonance</i>	$f_r = \frac{c}{2L_{eff}\sqrt{\epsilon_{reff}}}$
<i>Largeur du patch</i>	$W = \frac{c}{2f_r\sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}}}$
<i>Constate diélectrique efficace</i>	$\epsilon_{reff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r + 1}{2} \left[ 1 + 12 \frac{h}{w} \right]^{-\frac{1}{2}}$
<i>Distance <math>\Delta L</math></i>	$\Delta L = \frac{0.412h(\epsilon_{reff} + 0.3)\left(\frac{W}{h} + 0.264\right)}{(\epsilon_{reff} - 0.258)\left(\frac{W}{h} + 0.8\right)}$
<i>Longueur effective</i>	$L_{eff} = \frac{c}{2f_r\sqrt{\epsilon_{reff}}}$
<i>Longueur du patch</i>	$L = L_{eff} - 2\Delta L$
<i>Longueur du substrat</i>	$L_g = L + 6h$
<i>Largeur du substrat</i>	$W_g = W + 6h$

**Tableau II- 2 : Equation de calculs des dimensions de l'antenne patch rectangulaire.**

### II-6. L'APPLICATION EN BANDE KA

#### II-6-A. La bande Ka

Avec l'émergence de nouvelles applications et de nouveaux services multimédias, les communications nécessitent de plus en plus, une communication large bande. L'on se tourne alors vers les possibilités d'exploitation de nouvelles bandes de fréquences pouvant fournir des communications large bande, en particulier à l'heure actuelle, vers la bande Ka.

Cette bande reste, encore sous-exploitée, en particulier dans les zones tropicales et les zones à fort taux de précipitations, et son exploitation est encore destinée à certains services spécifiques. Mais de plus en plus, l'intérêt général des opérateurs de télécommunications par satellite se

## Chapitre II : étude des antennes patchs dans bande Ka

manifeste pour cette bande et des études pour son éventuelle exploitation sont réalisées dans les zones sujettes à de forts taux de précipitations.

### II-6-B. Les systèmes satellitaires et la bande Ka

L'idée même de l'exploitation de cette bande de fréquence nait du constat de saturation des autres bandes de fréquences exploitées jusqu'à l'heure actuelle, particulièrement la bande C et la bande Ku. Son exploitation offre l'avantage de disposer de canaux plus larges pouvant supporter un grand nombre d'utilisateurs, de réduire les dimensions des terminaux utilisateurs et des antennes employées.

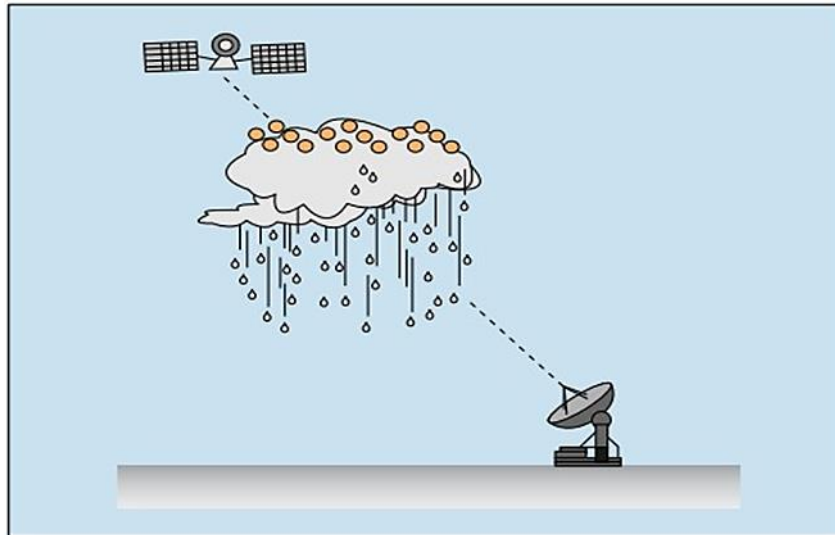
Malgré les difficultés que présentent les systèmes de télécommunications par satellite opérant en bande Ka du fait de sa sensibilité élevée aux perturbations atmosphériques, certains systèmes exploitant cette bande sont déployés, parmi lesquels :

Système	Couverture	Lien montant / descendant	Débit (Kbps)
DFS –Kopernikus (Allemagne)	Régionale GEO	29.58GHz / 19.78 GHz	64-2048
ITALSAT Multibeam Global Payload (Italie)	Régionale GEO	27.5-30 GHz /18.5-20.0 GHz	32-128
CS-2 / CS-3 (Japon)	Régionale GEO	27.515-28.995 GHz / 17.775-19.19 GHz	192-6144
Teledesic (US)	Globale LEO	28.6-29.1 GHz / 18.8-19.3 GHz	16-23000

Tableau II- 3 : Quelques systèmes satellitaires exploitant la bande Ka [II-24].

### II-6-C. Classifications des atténuations en bande Ka

La dégradation du signal en bande Ka provient essentiellement des conditions atmosphériques et météorologiques. Les conditions atmosphériques sont celles générées par les éléments qui sont présents dans l'atmosphère terrestre de façon permanente tels que l'eau ou les gaz, tandis que les conditions météorologiques englobent les facteurs dont la présence est fonction du temps et de l'espace, à l'instar des nuages ou des précipitations. Ces dernières sont celles ayant le rôle le plus important dans l'atténuation du signal.



**Figure II- 9 : Trajet d'un signal affecté par les facteurs atmosphériques.**

### **II-6-C-1. Atténuation due aux nuages**

Les effets des nuages sur le signal sont fonction de la densité de ces derniers, ainsi que de leur épaisseur. La cause typique d'atténuation due aux nuages est la présence de vapeur d'eau dans leur constitution. Mais l'affaiblissement dû à ceux-ci est plus élevé que celui causé par la vapeur d'eau.

La valeur de l'atténuation à 20 GHz est de 0.4 dB pendant 50% du temps d'une année moyenne et de 0.8 dB à 30 GHz.

### **II-6-C-2. Atténuation due aux précipitations**

L'atténuation due aux précipitations est fonction de la pluviométrie et des caractéristiques des précipitations. Dans les zones tropicales, on rencontre des précipitations de faible étendue, caractérisées par une forte intensité et une durée dans le temps relativement faible par rapport à celles rencontrées dans les pays d'Europe et les autres zones.

L'absorption météorologique est la principale cause de dégradation du signal dans la tranche de fréquences des 10 à 30 GHz. Ce qui constitue le premier inconvénient dans l'exploitation des bandes de fréquences Ku et Ka. La figure suivante illustre l'atténuation due aux précipitations pour les différentes bandes de fréquence entre 12 GHz et 40 GHz.



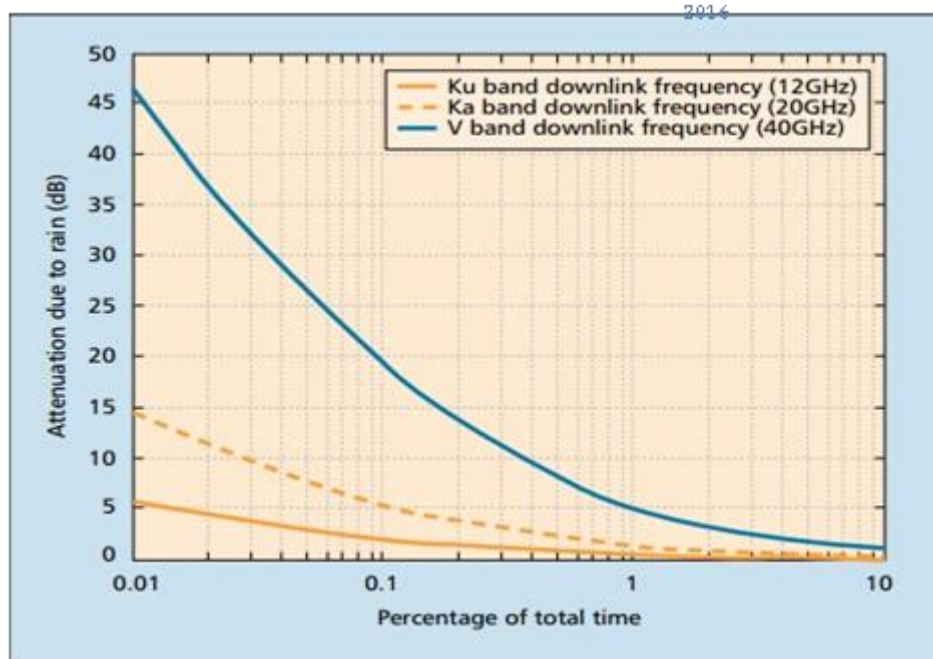


Figure II- 10 : Atténuation due à la pluie en Ku, Ka et V [II-25].

### II-6-C-3. Atténuation due aux gaz

L'établissement d'un bilan de liaison dans les bandes de fréquences des 20 GHz doit tenir compte de l'atténuation due aux gaz atmosphériques. L'oxygène de l'air est en particulier le composant gazeux qui affecte le plus la qualité du signal en bande Ka. Cette atténuation étant présente de façon constante et permanente, il est pratiquement inutile d'en tenir compte lors de l'élaboration de techniques de compensation de pertes du signal.

### II-7. LES RESEAUX D'ANTENNES

Des antennes peuvent être arrangées dans l'espace, selon différentes configurations géométriques, pour obtenir des diagrammes très directifs. Ces configurations d'antennes s'appellent des réseaux. Dans un réseau d'antennes, les champs des différents éléments s'ajoutent de manière constructive dans certaines directions et de manière destructive (annulation) dans d'autres. A des fins d'analyse, on supposera par la suite des réseaux constitués d'éléments identiques, bien qu'il soit possible de créer un réseau avec des éléments ayant des diagrammes différents [II-26].

L'avantage principal des réseaux d'antennes par rapport à une antenne simple est leurs capacités de balayage électronique, c'est-à-dire, que le lobe principal peut être orienté vers n'importe quelle direction en changeant la phase du courant d'excitation de chaque élément du réseau (antennes à réseaux déphasés). En outre, en agissant également sur les amplitudes des courants d'excitation, une grande variété de diagrammes de rayonnement et des caractéristiques de niveau des lobes secondaires peuvent être produites. Les antennes adaptatives (également appelées "antennes intelligentes" dans des applications de communication mobiles) passent encore à un stade supérieur par rapport aux réseaux déphasés en dirigeant leur lobe principal (avec un gain accru) dans une direction désirée (par exemple, un utilisateur mobile dans un système de communication cellulaire) et annulant le faisceau dans les directions de l'interférence ou des brouilleurs [II-27].

## Chapitre II : étude des antennes patchs dans bande Ka

Il y a cinq paramètres principaux qui affectent les performances globales d'un réseau d'antennes : la géométrie du réseau (par exemple, linéaire, circulaire, ou planaire des éléments rayonnants), distances de séparation entre les éléments adjacents, amplitudes des courants d'excitation de chaque élément, phase de chaque élément rayonnant, diagramme de rayonnement de chaque élément.

L'association en réseau de plusieurs antennes imprimées permet de compenser les limitations des caractéristiques d'une antenne seule et d'améliorer leurs performances en gain et rayonnement...etc. [II-28] Actuellement un réseau imprimé est largement utilisé puisqu'il permet de répondre à de nombreuses contraintes commandées par les systèmes. Il est caractérisé par le diagramme de rayonnement, la fonction caractéristique, l'angle d'ouverture, la dynamique d'une antenne, le gain et la directivité. Les domaines d'utilisation privilégiés de ces antennes sont trouvés dans de nombreux systèmes de communication tels que la téléphonie mobile, les systèmes multimédias sans fil (WIFI, Bluetooth, WIMAX...etc.) ou encore les communications spatiales. Elles trouvent également des applications dans certains systèmes radar ou de télé-détection et sont utilisées dans des bandes de fréquences allant de 1 GHz jusqu'aux bandes millimétriques. Ces applications sont soumises à des critères sélectifs et à des limitations de poids, de volume et d'épaisseur [II-29],[ II-30],[ II-31].

### II-7-A. Facteur de réseau

Le facteur de réseau est un outil qui nous sert à caractériser le retard successif pour chaque antenne par rapport à la l'origine. Chaque réseau peut être caractérisé par se qu'on appelle facteur de réseau. Voir la formule :

$$F(\theta) = 2 \cos\left(\frac{1}{2}(kdcos\theta + \phi)\right) \quad (\text{II. 6})$$

Le facteur de réseau est une fonction des paramètres suivants :

- l'arrangement géométrique des éléments rayonnants du réseau
- les courants d'excitation des éléments
- le nombre d'éléments
- la distance de la séparation  $d$  des éléments adjacents
- fréquences (ou longueur d'onde) d'opération D'une façon générale, le diagramme de rayonnement d'un réseau est donné par le diagramme de rayonnement de l'élément simple multiplié par le facteur de réseau[II-32] .

### II-7-B. Alimentation d'un réseau d'antennes

La synthèse d'un réseau consiste à trouver les bons coefficients de pondération en amplitude et/ou en phase qui permettent d'approcher au mieux le besoin. Pour cela, l'alimentation d'un réseau d'antennes s'effectue à travers un réseau d'alimentation qui assure la répartition d'énergie sur différentes antennes élémentaires. Selon le besoin, le réseau d'excitation peut avoir des architectures différentes. Dans le cas d'un réseau d'antennes patch, le principe de la répartition d'énergie se fait par des lignes micro ruban, où les déphaseurs, les diviseurs et les combineurs de puissance sont réalisés par des lignes micro ruban. Nous montrons sur la figure II-11 deux types d'alimentations d'un réseau d'antennes.

- *Alimentation série* : les éléments rayonnants sont excités en série à travers une ligne de transmission. Entre deux éléments rayonnants consécutifs il y a un

déphaseur qui permet d'imposer la loi de phase appropriée (Figure II-11.a).

- *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 (Fig. II-11.b).

Le problème de synthèse doit répondre aux contraintes de rayonnement, surtout la réduction des lobes secondaires et l'amélioration du lobe principal. Pour cela, il existe diverses lois d'alimentation en amplitude d'un réseau d'antennes, telles que celles données par [II-33] :

Pour un réseau de  $N$  éléments rayonnants, les coefficients d'excitation  $C_i$  sont donnés par :

- ✓ Loi uniforme ;  $C_i = 1; \forall i = 1, \dots, N$ .
- ✓ Loi triangulaire :  $C_i = (1 - 2|i| / D); \forall i = 1, \dots, N$ .
- ✓ Loi cosinus :  $C_i = \cos(\pi i / D); \forall i = 1, \dots, N$ .
- ✓ Loi cosinus carré :  $C_i = \cos^2(\pi i / D)$  ; ou encore :  $C_i = (1/3)(1 + 2 \cos^2(\pi i / D))$ .
- ✓ Loi binomiale ; le développement de la fonction  $(1 + x)^{m-1}$  en série permet de déterminer les coefficients d'excitation :

$$(1 + x)^{m-1} = 1 + \frac{(m-1)(m-2)}{2!} x^2 + \dots + \frac{(m-1)(m-p)}{p!} x^p$$

Où  $m$  représente le nombre d'éléments rayonnants du réseau. Les coefficients d'excitation sont les coefficients de polynôme. Ils sont obtenus par le triangle de pascal et s'écrivent sous la forme :

$$C_i = \binom{N-1}{i-1} = \frac{(N-1)!}{(i-1)!(N-i)!}; i = 1, \dots, N \quad (\text{II. 7}).$$

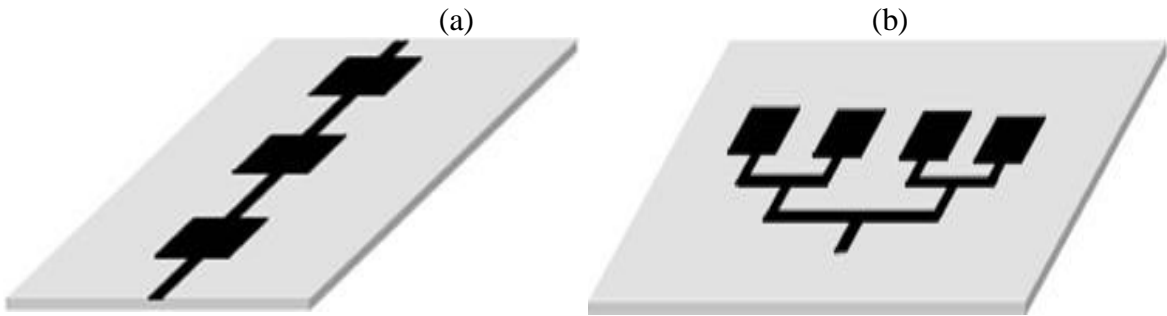


Figure II- 11 : Alimentation d'un réseau d'antennes patch [II-34]; (a)-série (b)-parallèle.

### II-7-C. Types de réseaux d'antennes

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 II-12).

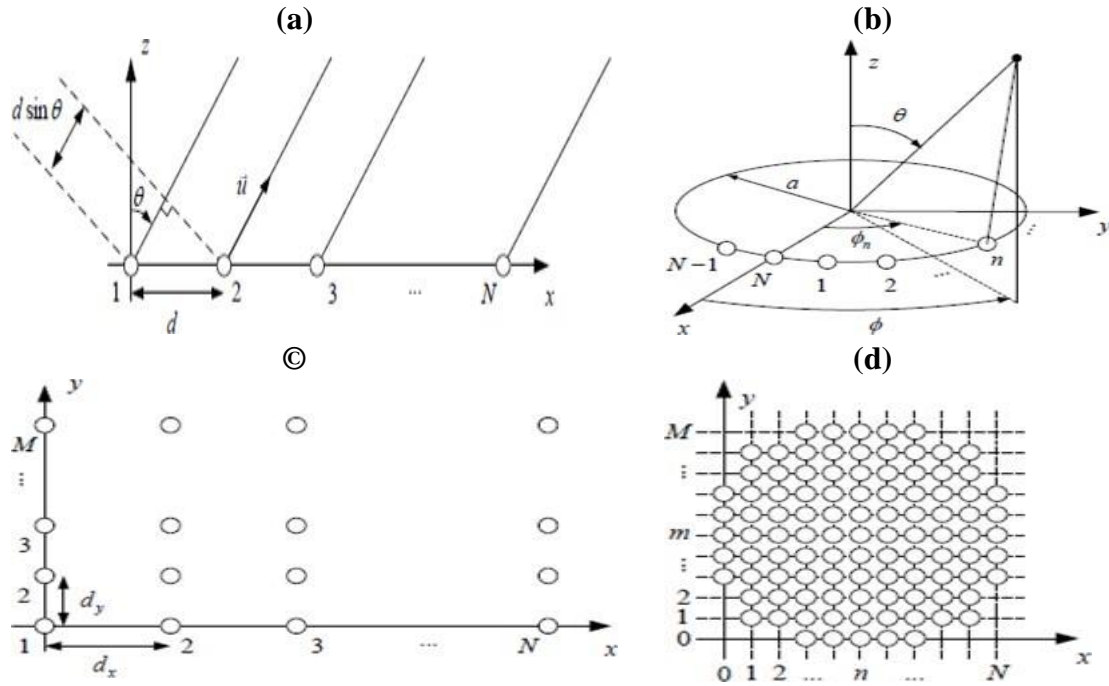


Figure II- 12 : Géométries d'un réseau d'antennes (a)-linéaire (b)-circulaire (c)-planaire (d)-volumique [II-34].

### II-7-C-1. Réseaux linéaires uniformes

On appelle un réseau linéaire toute antenne placée suivant une ligne et uniforme quand les éléments sont identiques et alimentée avec un courant de même amplitude avec un déphasage progressif  $\phi$  [II-27].

Considérons maintenant un réseau de N éléments de sources isotropes représentés sur la (Fig. II-13). La distance de séparation entre les éléments adjacents est d. Dans ce cas-ci le facteur de réseau peut être exprimé comme la somme des contributions de chaque élément :

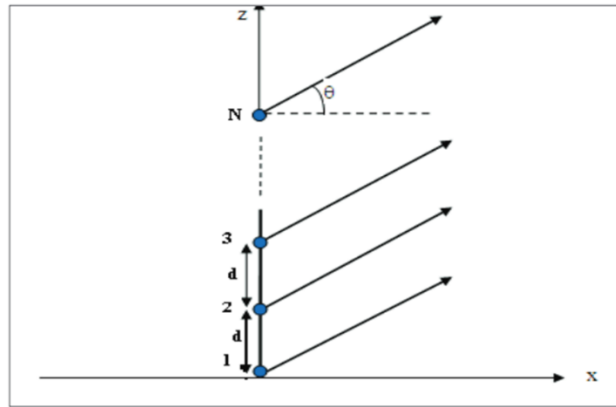
$$F(\Psi) = 1 + e^{j\Psi} + e^{j2\Psi} + e^{j3\Psi} + \dots + e^{j(N-1)\Psi} \quad (\text{II. 8}).$$

Où :  $\Psi = kd \cos \theta + \phi$

C'est une série géométrique qui peut s'écrire de façon compacte par :

$$F = \frac{\sin(N\Psi/2)}{\sin(\Psi/2)} \quad (\text{II. 9}).$$

## Chapitre II : étude des antennes patches dans bande Ka



**Figure II- 13 : Configuration d'un réseau linéaire uniforme de N [II-31].**

L'examen de cette équation permet de faire ressortir les points suivants concernant le facteur de réseau d'un réseau linéaire uniforme :

Le maximum principal (lobe principal) se produit quand  $\theta = 0$ , c'est-à-dire, sources.

Où :  $Kd \cos \theta_{Max} + \Psi = 0$

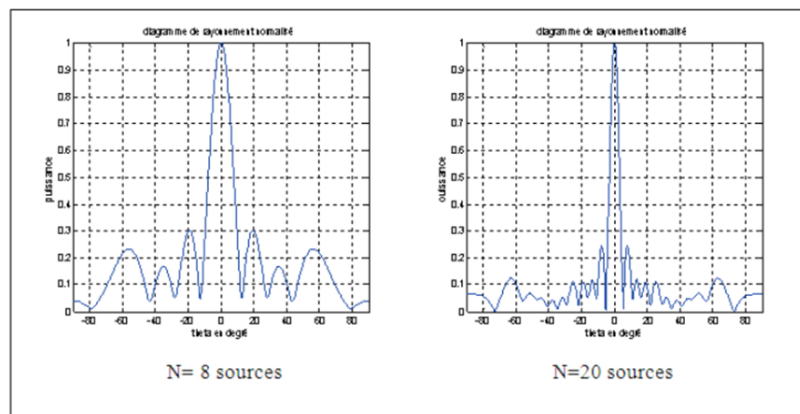
$$\theta_{Max} = \text{Arc cos}\left(-\frac{\lambda\Psi}{2\pi d}\right)$$

- Les nuls se produisent quand  $\sin(N\Psi / 2) = 0$ , c'est-à-dire,  $N\Psi / 2 = \pm n\pi$  pour  $n = 1, 2, 3, \dots$

Exemple d'un réseau linéaire uniforme :

Dans ce cas on va donner un exemple d'un réseau d'antennes linéaires uniformes pour  $N=8$ , et

20 sources, Voir la (Figure II-14)



**Figure II- 14 : Exemple d'un diagramme de rayonnement d'un réseau d'antennes linéaires uniformes [II-26].**

D'après la (Figure II-14), l'augmentation de N augmente la directivité (l'ouverture du lobe principal) et le nombre de lobes secondaires, donc le réseau d'antennes est plus directif s'il contient plus d'éléments, mais cela augmente en revanche le nombre de lobes secondaires, ce qui nous oblige à chercher un compromis ou à manipuler d'autres paramètres.

### II-7-C-2. Réseaux plans

A la différence des réseaux linéaires qui peuvent seulement balayer dans un plan (ou les réseaux plans peuvent balayer dans les deux plans (et).

Les réseaux plans offrent un gain plus élevé et des lobes secondaires plus bas aux dépens d'un nombre d'éléments plus grand. Les principes de conception des réseaux plans sont semblables à ceux présentés pour les réseaux linéaires. Puisque les éléments sont placés dans deux dimensions (Figure II-15), le facteur de réseau d'un réseau plan peut être exprimé comme le produit des facteurs de réseau de deux réseaux linéaires : l'un situé le long de l'axe des abscisses et l'autre le long de l'axe des ordonnées [II-32] :

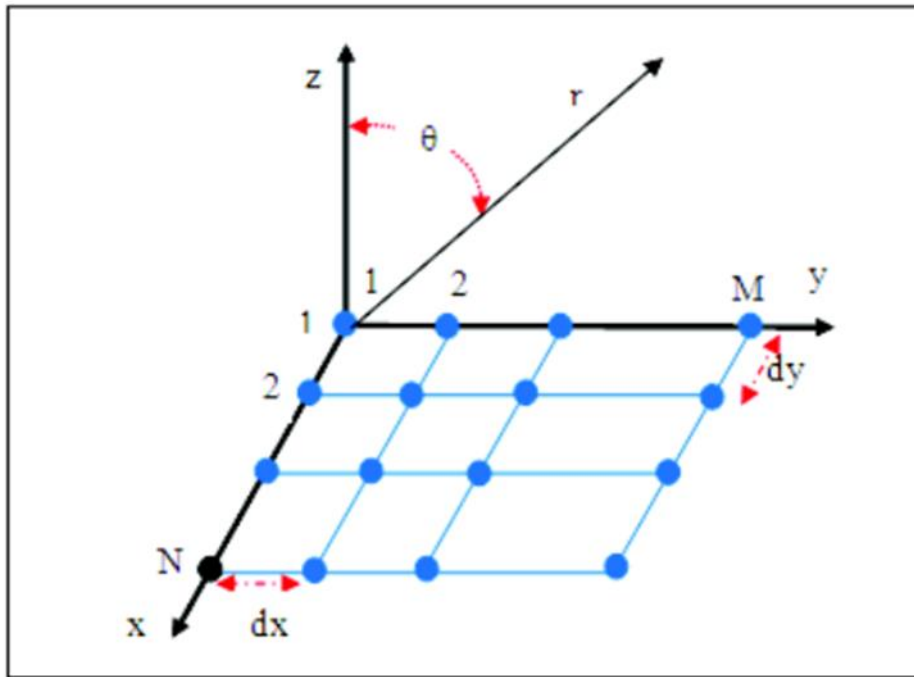


Figure II- 15 : Réseau plan MxN [II-35].

Le facteur de directivité du réseau est donné par :

$$F = \left( \frac{\sin\left(\frac{N\Psi_x}{2}\right)}{N \sin\left(\frac{\Psi_x}{2}\right)} \right) \left( \frac{\sin\left(\frac{M\Psi_y}{2}\right)}{M \sin\left(\frac{\Psi_y}{2}\right)} \right) \quad (\text{II. 10}).$$

Où :

$$\Psi_x = \frac{2\pi}{\lambda} d_x \cos \theta \cos \varphi + \phi_x$$

$$\Psi_y = \frac{2\pi}{\lambda} d_y \sin \theta \sin \varphi + \phi_y$$

### II-7-C-3. Réseaux circulaires

Dans une configuration de réseau circulaire, les éléments sont placés sur un cercle, comme, représenté sur la (Figure II-16).

Le facteur de réseau dans ce cas est donné par [II-28]

## Chapitre II : étude des antennes patches dans bande Ka

où :  $\theta = 0$  et  $\phi = 0$  sont les angles du faisceau principal,  $a$  est le rayon du réseau circulaire et  $I_n$  les courants d'excitation des éléments.

La figure II-16 représente un réseau circulaire de 12 éléments avec un espacement de  $(\lambda/2)$ .

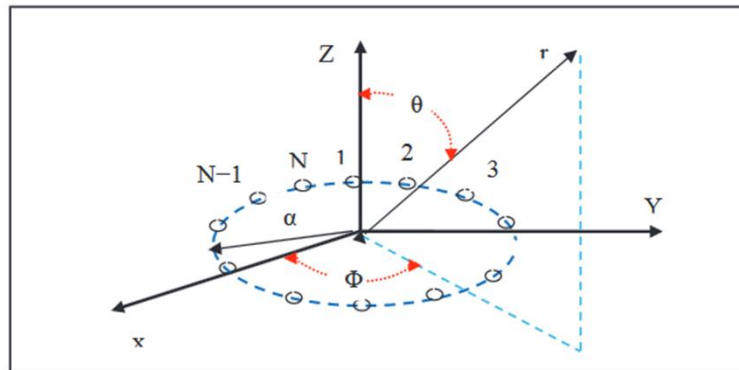


Figure II- 16 : Réseau circulaire de N éléments [II-35].

### II-7-C-4. Autres types de réseau d'antennes

Outre les réseaux d'antennes présentés précédemment, il existe d'autres configurations de réseaux d'antennes qui sont généralement développées à partir de la structure planaire. L'objectif de ces configurations est souvent de réduire les niveaux des lobes secondaires et/ou l'amélioration du lobe principal (une bonne focalisation), ainsi que l'amélioration de la couverture de l'espace entouré. Parmi ces configurations, on trouve les réseaux multisurfaces dans lesquels un polyèdre est couvert par des réseaux d'antennes planaires. Le polyèdre peut être un parallélépipède, un cylindre, un hémisphère ou une pyramide. Les dimensions des réseaux planaires multisurfaces sont généralement grandes et les lois d'alimentations nécessitent parfois des processus d'optimisation pour réduire les interférences entre les lobes, ce qui limite l'utilisation de ces réseaux aux secteurs spatial et militaire [II-36], [II-37], [II-38].

### II-8. CONCLUSION

Ce chapitre a été consacré pour l'étude des antennes patches. Ses paramètres géométriques ses formes nous ont permis de connaître la bande Ka, les techniques d'alimentations et les réseaux d'antennes. En effet, nombreux systèmes de télécommunication l'intègrent actuellement. Pour illustrer cette étude, le chapitre suivant va porter sur la conception et la réalisation d'une antenne patch rectangulaire fonctionnant en bande ka, La conception de ce système d'antenne a été effectuée en utilisant des logiciels 3D tels que CST (Microwave Studio).

***Chapitre III :***  
***Simulation et***  
***discussion des***  
***résultats***



*Chapitre III : Simulation et discussion des résultats*

### **III-1. INTRODUCTION**

La phase de conception d'une antenne, à l'aide d'un logiciel adapté est une étape obligatoire. Pour cela, les étapes de fabrications et de mesure de prototype sont remplacées par des simulations, permettant aussi la réduction du temps de conception et donc du cout. Parmi les simulateurs dédiés à la simulation et l'analyse des circuits micro-onde et les antennes, les plus utilisés sont le HFSS et le CST. Le choix de logiciel « CST » pour notre application est justifié, en effet c'est un logiciel dédié à la simulation haut fréquence des circuits micro-onde. Il s'agit d'un logiciel puissant qui étudie et simule des structures complexe en trois dimensions, il est exploité notamment pour calculer les paramètres S, les fréquences de résonances ainsi que les champs électrique et magnétique et aussi la visualisation du diagramme de rayonnement en 3D. Dans ce chapitre nous allons développer la phase de conception en présentant un bref récapitulatif sur le logiciel de simulation « CST ». Ensuite, nous présentons les structures de l'antenne conçue (antenne patch rectangulaire alimentée par une ligne micro ruban avec encoches que nous l'avons utilisée pour les réseaux d'antennes). En finira par la présentation et la discussion des résultats de la simulation de ces antennes.

### **III-2. DESCRIPTION DU LOGICIEL DE SIMULATION CST**

CST Microwave Studio est un logiciel de simulation électromagnétique de structures passives en 3 dimensions basé sur la résolution des équations de Maxwell suivant la technique des équations intégrales finies. Cette méthode numérique offre une discrétisation de l'espace permettant la description directement en 3 dimensions 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 [III-1].

#### **III-2-A. Description générale de l'interface CST**

Une fois le projet est créé, on accède à l'interface d'utilisateur du CST telle que présenté sur la figure III-1.

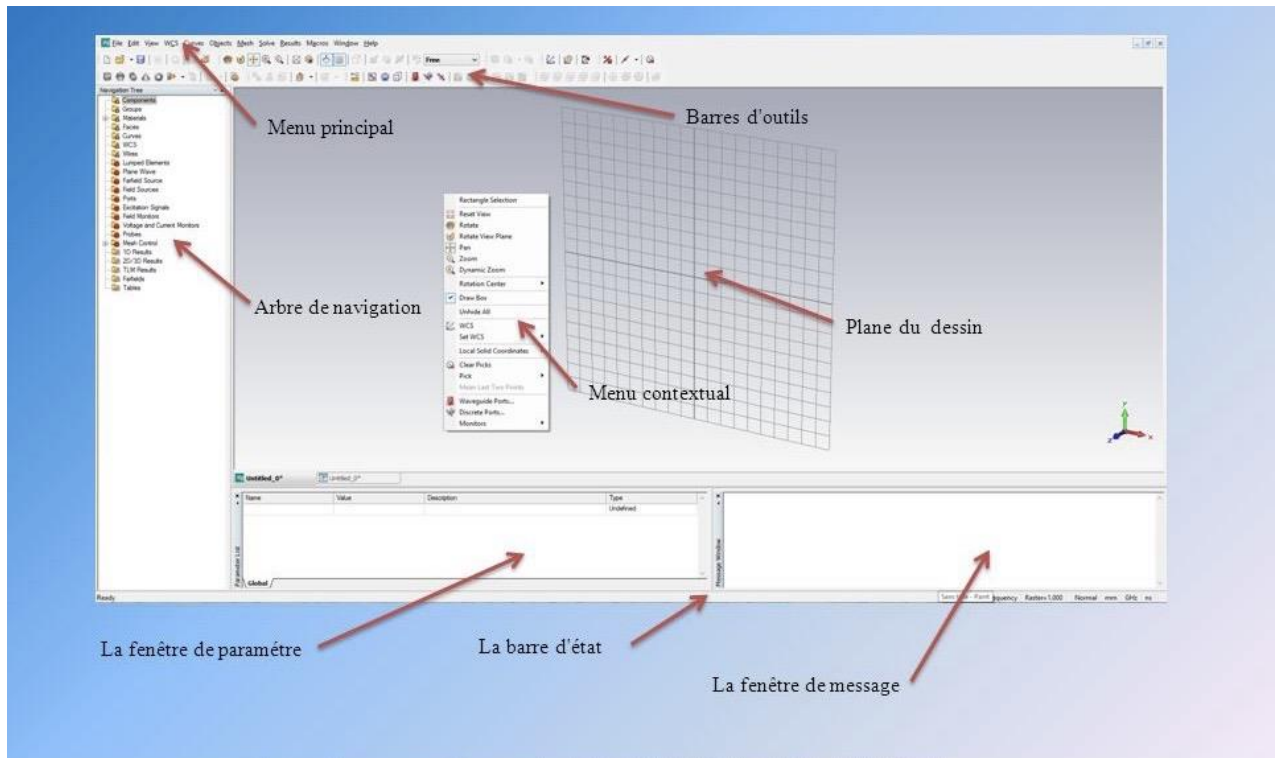


Figure III-1 : Interface du CST [III-2].

A l'entête de l'interface, on trouve la barre d'outils qui est un ensemble de raccourcis de la barre de menu.

- ✓ A gauche de l'interface, nous avons l'arbre de navigation d'où on peut accéder aux éléments structuraux et aux résultats de simulation.
- ✓ Au corps de l'interface se trouve le plan de travail sur lequel la structure est en 3D.
- ✓ Au pied de l'interface, nous avons :
  - La liste des paramètres d'où on trouve les variables utilisées pendant la simulation.
  - Le message qui informe si chaque étape est simulée avec succès. Dans le cas contraire, un message d'erreur apparaît [III-3].

### III-3. STRUCTURE DE L'ANTENNE

La structure de l'antenne proposée est indiquée dans la figure III.2. Elle présente une ligne microbande gravée sur un patch de forme rectangle. Le plan inférieur représente le plan de masse qu'il est composé d'un matériau cuivre, celui-ci a un petit trou d'un matériau PEC (Perfect electric conductor). Le substrat de l'antenne est un Rogers RO 4003, qui a une permittivité relative  $\epsilon_r = 3.5$  et une tangente de perte diélectrique  $\tan \delta = 0,0009$ .

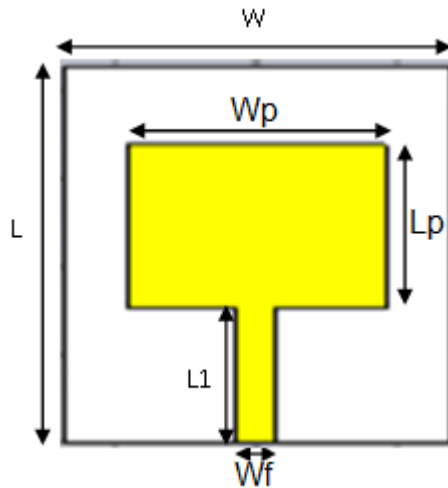


Figure III- 2 : Structure de l'antenne patch sur CST.

Les dimensions de l'antenne à simuler sont illustrées par le tableau III.1

Paramètres	Description	Valeur(mm)
<b>L</b>	Longueur du substrat et du plan de masse	9.108
<b>W</b>	Largeur de substrat et du plan de masse	9.1
<b>H</b>	Epaisseur de Substrat	0.508

<b>Lp</b>	Longueur du Patch	2.823
<b>Wp</b>	Largeur du Patch	3.822
<b>hp</b>	Epaisseur de Patch	0.035

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

#### III-4. RESULTATS ET DISCUSSION

Antenne patch adapté à la bande Ka [20,40] GHz, Nous avons créé des ligne microruban et des encoches sur le patch, pour l'adaptation des fréquences :

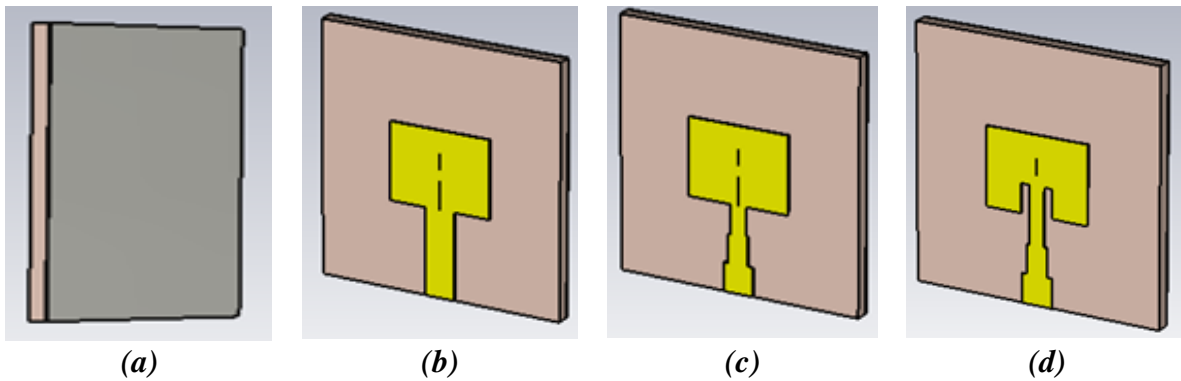


Figure III- 3 : (a) et (b) et (c), (d) les différentes géométries de l'antenne patch.

La nature du substrat (Figure III-3-(a)) va être déterminante pour les caractéristiques de l'antenne. Il y'a des paramètres importants dans le choix du substrat qui sera utilisée : l'épaisseur, la constante diélectrique et la tangente de perte ( $\tan \delta$ ). Il a été choisi le substrat RO 4003 avec une faible constante diélectrique  $\epsilon_r=3.5$  pour obtenir une antenne avec des petites dimensions, une épaisseur  $h=0.508$  mm et une tangente de perte  $\tan \delta=0.009$ .

La création de la ligne micro ruban (Figure III-3-(b)). En effet, l'élément rayonnant ainsi que la ligne qui l'alimente sont réalisés par procédé photolithographie sur le même substrat diélectrique, dont le point de jonction est sur l'axe de symétrie de l'élément ou décalé par rapport à cet axe, si cela permet une meilleure adaptation d'impédance.

Le transformateur à quart d'onde (Figure III-3-(c)) est une méthode qui est utilisée quand il y a un mauvais couplage d'impédance et que celui-ci est une résistance pure. Il est donc utilisé pour faire le couplage entre des lignes d'alimentation d'impédance différente.

La figure (III-3-(d)) suivante représente la simulation d'une antenne patch avec encoche.

Les encoches était menée (Figure III-3-d) pour avoir un meilleur résultat par rapport à la fréquence adapté à son impédance d'entrée  $Z=50\Omega$ , les modifications ont touché les valeurs de la longueur des encoches et la largeur de l'encoches, ainsi la largeur de la ligne d'alimentations.

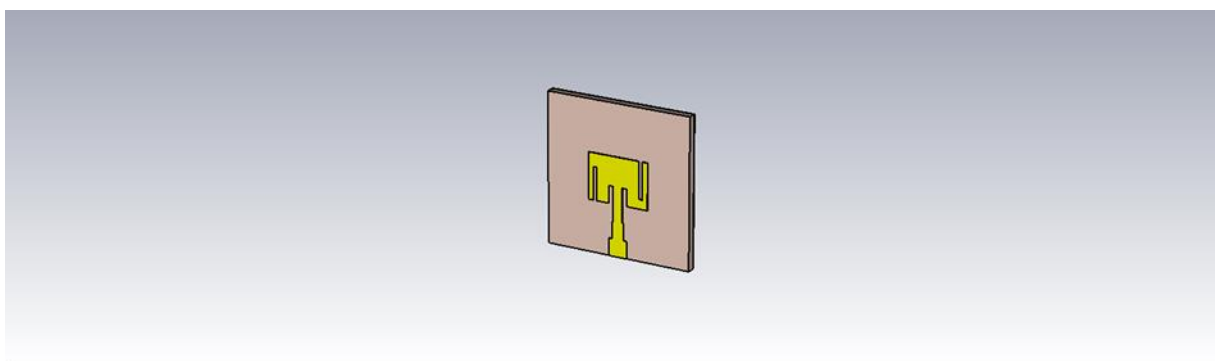


Figure III- 4 : Antenne adaptée avec encoche.

La Figure (III-4) montre la géométrie finale obtenue dans la bande Ka [20-40] GHz, avec un uplink de [30 à 40] et un downlink [20;30] GHz.

Parmi les différentes caractéristiques des antennes qui sont présentées dans la première partie, on se basant sur quelques paramètres pour tester notre antenne.

### III-4-a. Antenne patch

#### III-4-a-1. Paramètre S

Cette figure montre les paramètres  $S_{11}$  en (dB) (Figure III-5) en fonction de la fréquence indiquant la fréquence de résonance fondamentale

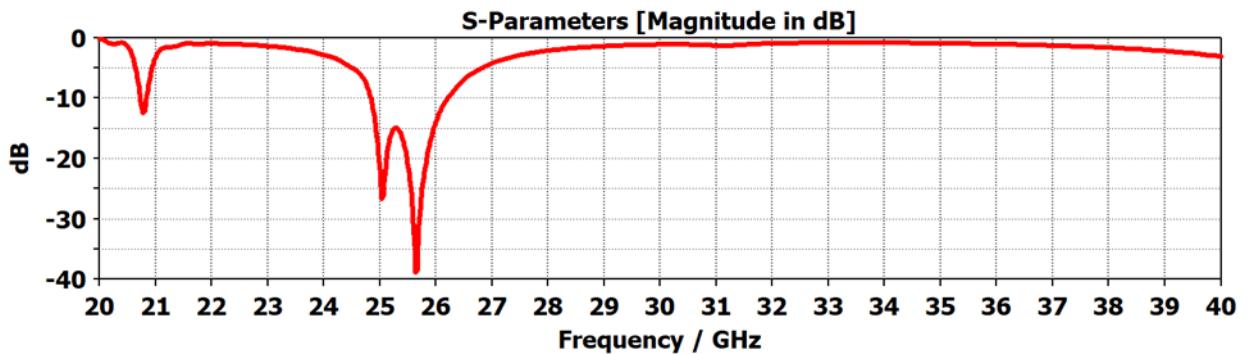


Figure III- 5 :  $S_{11}$  en (dB) en fonction de la fréquence.

On peut voir que l'antenne a une largeur de bande maximale de 1.41 GHz autour de la fréquence de résonance (25.75GHz) dans l'intervalle (24.88- 26.29) GHz.

Ces résultats montrent une bonne adaptation, avec un coefficient de réflexion inférieur à -38.8 dB en 25.75GHz.

#### III-4-a-2 Taux d'onde stationnaire (VSWR)

Le rapport d'onde stationnaire (VSWR) de l'antenne est présenté à la (Figure III-6) Le niveau acceptable de VSWR pour la plupart des applications sans fil ne devrait pas dépasser 2 et idéalement 1. Comme on le voit sur la figure (III-6), la valeur de VSWR obtenue à la fréquence de résonance de 25,75 GHz est de 1,161 et ce qui est acceptable.

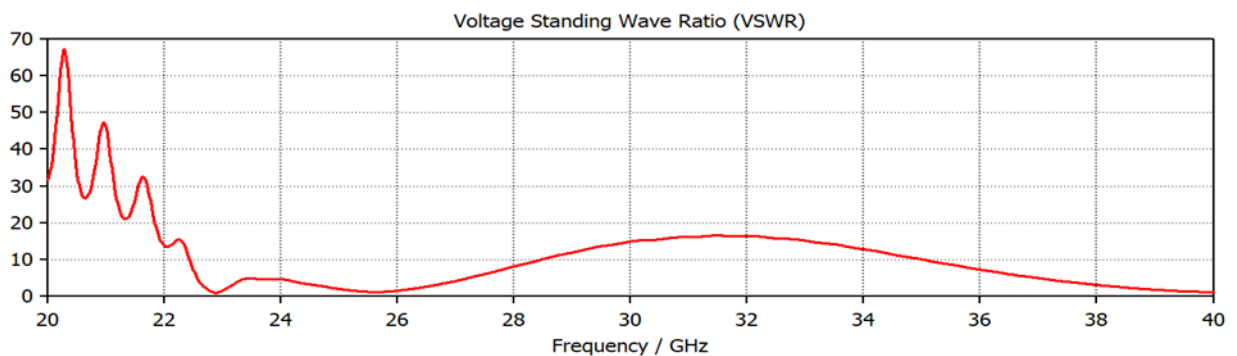


Figure III- 6 : Rapport d'onde stationnaire en fonction de la fréquence

### Chapitre III : Simulation et discussion des résultats

On remarque des bons résultats dans les fréquences [22.90 et 25.85] GHz [1.444, 1.3949] puisque le VSWR est inférieure à 2.

#### III-4-a-3. L'efficacité de rayonnement

La Figure (III-7) présente l'efficacité totale et la radiation de notre antenne Patch :

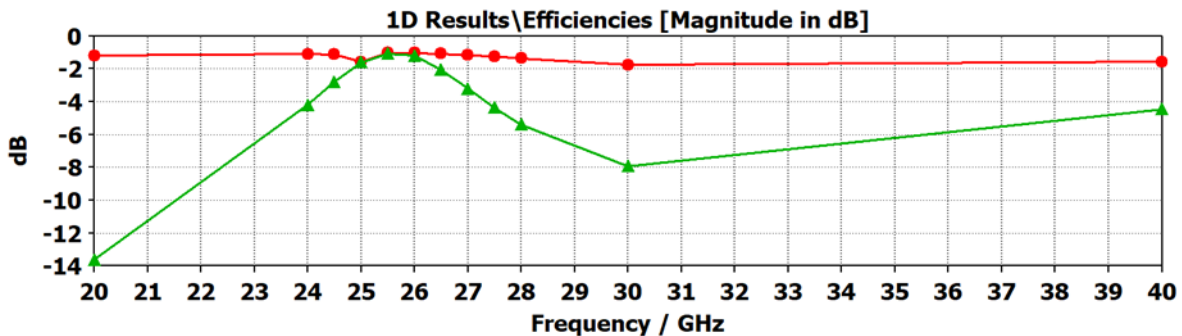


Figure III- 7 : L'Efficacité totale de l'antenne Patch.

Cette antenne présente une forme omnidirectionnelle compacte tout en conservant une efficacité de rayonnement élevée. Plus précisément, la structure d'une antenne Patch est sure modifiée pour optimiser son efficacité de rayonnement avec une dimension globale l'impédance optimale présente la même efficacité de rayonnement tout en ayant des dimensions plus faibles (par rapport à la longueur d'onde de fonctionnement en espace libre).

#### III-4-a-4. Diagramme de rayonnement

En utilisant les paramètres de conception précédemment cités, le modèle du diagramme de directivité en 3D du réseau antennaire est prédit grâce au logiciel de simulations CST comme montre les figures suivantes CST permet de visualiser les diagrammes de rayonnement de l'antenne simulée. C'est une représentation qui nous informe sur la directivité de l'antenne.

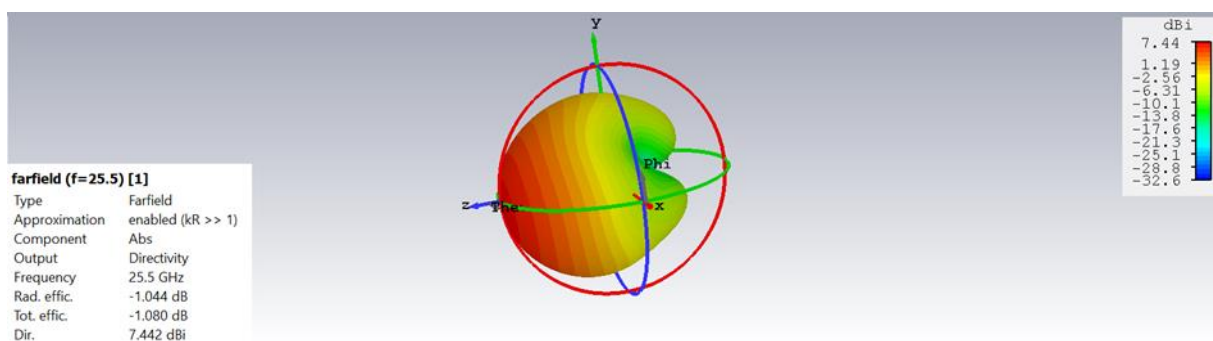


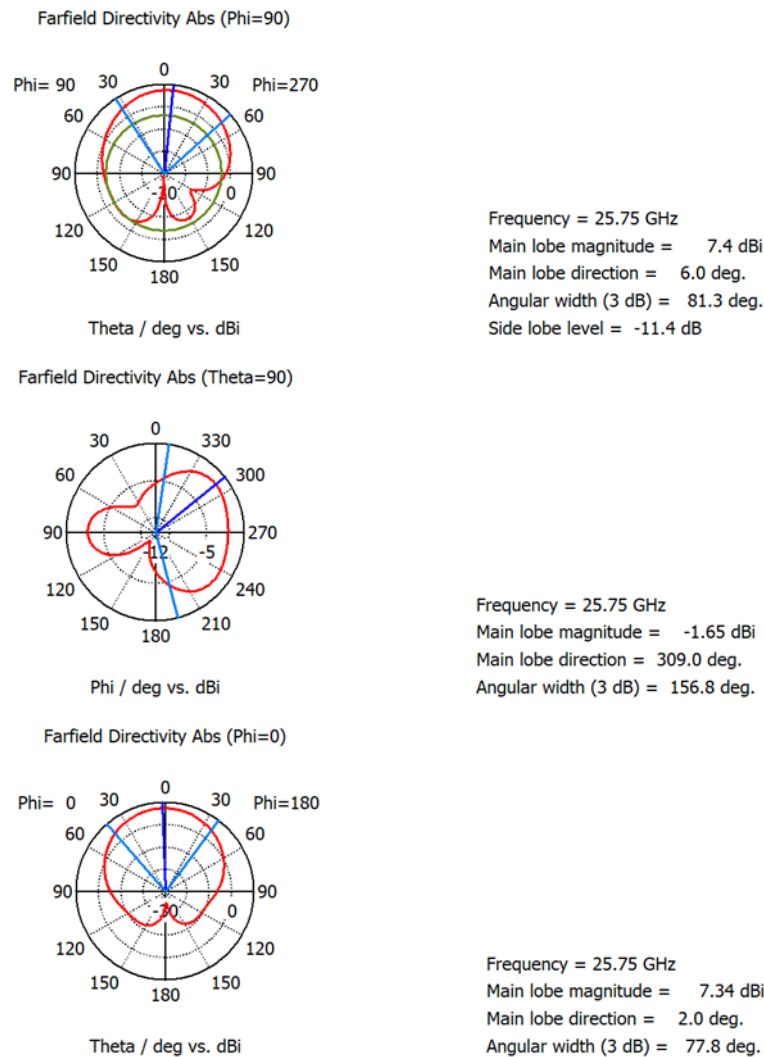
Figure III- 8 : Diagramme de rayonnement d'une antenne patch.

Le diagramme de rayonnement de l'antenne a une forme appropriée, comme le montre la figure (III-8), puisque le rayonnement est concentré dans le plan supérieur de l'antenne, comme exigé dans le cas de ce type de réseaux.

On remarque que l'antenne est omnidirectionnelle avec un gain égal à 7.44 dB.

### Chapitre III : Simulation et discussion des résultats

La Figure (III-9) montre le diagramme de rayonnement 2D dans le plan E et le plan H de l'antenne conçue. L'énergie rayonnée par une antenne est représentée par son diagramme de rayonnement.



**Figure III- 9 : Diagramme de rayonnement 2D.**

Cette représentation schématique définit la variation de la puissance rayonnée par une antenne en fonction de la direction s'éloignant de l'antenne et montre la distribution de l'énergie rayonnée dans l'espace.

#### III-4-a-5. Le gain

Nous allons maintenant nous intéresser au gain de l'antenne Patch qui est présenté dans la Figure (III-10) :

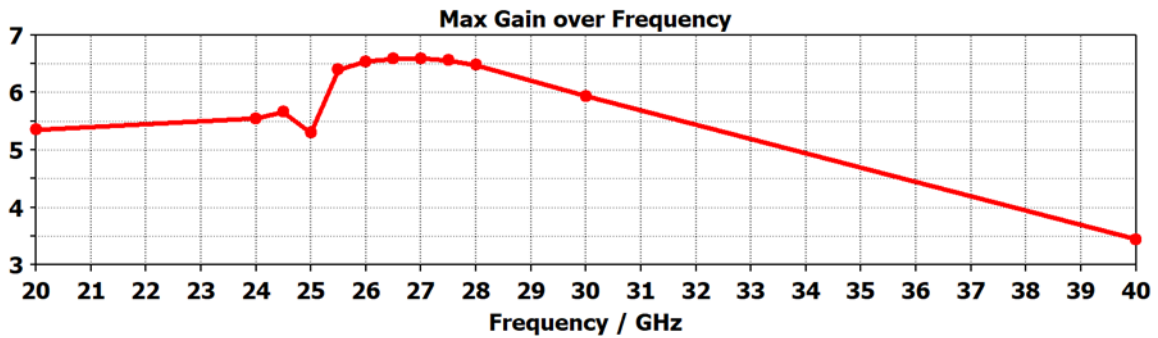


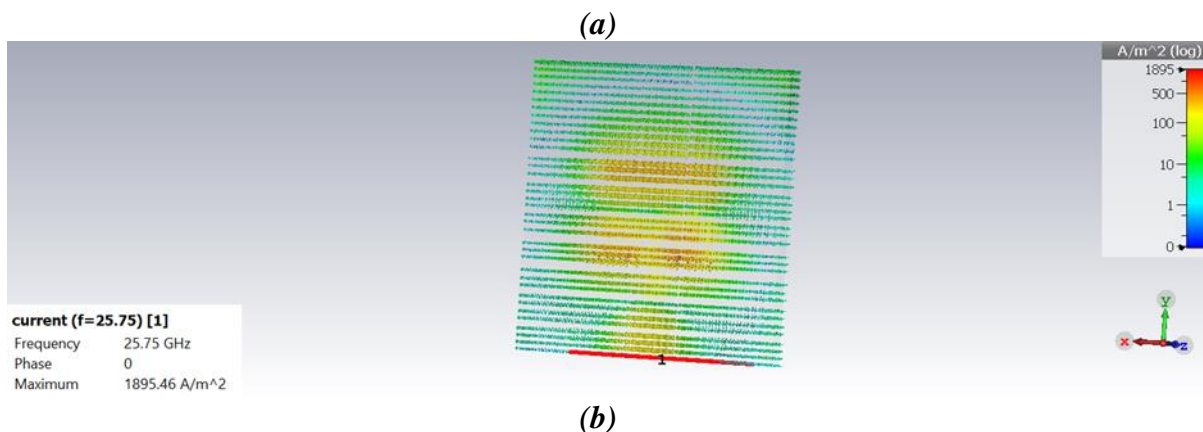
Figure III- 10 : Le Maximum de gain dans la bande Ka.

Nous remarquons que l’antenne présente un rayonnement omnidirectionnel avec des valeurs de gain qui varie entre 3.5 dB et 6.55 dB qui est une bonne valeur pour des communications satellitaire dans la plage de fréquence en bande Ka, On remarque que la valeur du gain augmente de 20 GHz à 24.5 GHz cela est acceptable car le gain du patch augmente avec l'augmentation de la fréquence puis elle commence à se diminuer vers 25 GHz. Ensuite on voit une autre augmentation de la valeur du gain de 25 GHz à 27 GHz, les performances sont dégradées après la fréquence de 28 GHz.

#### III-4-a-6. Densité de Courant

Nous observons que le rayonnement est répandu dans les zones les plus importantes de l'antenne. Cela indique que cela fonctionne parfaitement.

La distribution du courant de l’antenne étudiée permet de mieux comprendre comment les courants sont répartis sur la structure. La Figure (III-11-(a)) montre que le courant est distribué au tour de la ligne, nous constatons aussi l’absence de la densité de courant électrique dans l’extrémité.





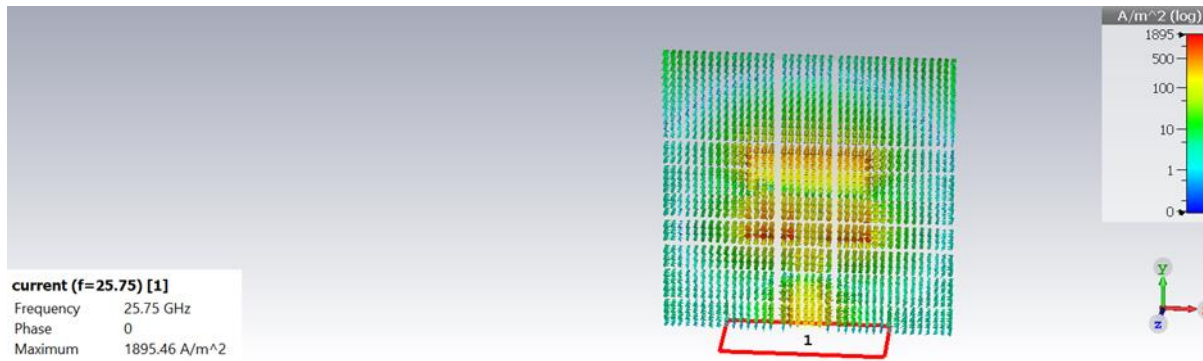


Figure III- 11 : (a) et (b) Densité de Courant d'antenne patch.

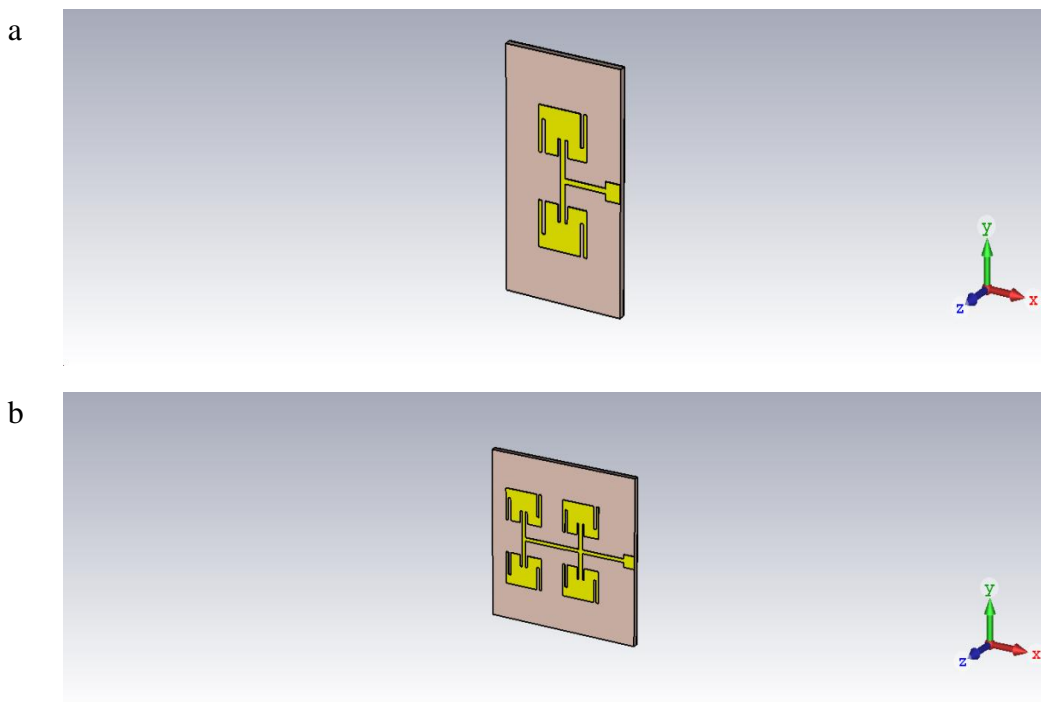
La Figure (III-11-(b)) notez que le rayonnement (rayonnement rouge) est concentré aux ouvertures et au début de la ligne et sur le patch cela indique que cette antenne envoie un rayonnement d'une manière excellente.

### III-4-b. Réseau antenne

#### III-4-b-1. Amélioration du gain de l'antenne patch proposée

Le gain obtenu de notre antenne patch est de 6.6 dB pour la fréquence 25.75 GHz respectivement. La bande Ka nécessite un moyen gain inférieur à -6 dB, nous allons utiliser la technique du réseau d'antenne pour augmenter le gain.

#### III-4-b-2. Augmentation du gain avec réseaux d'antenne à 2 et 4 et 8 éléments



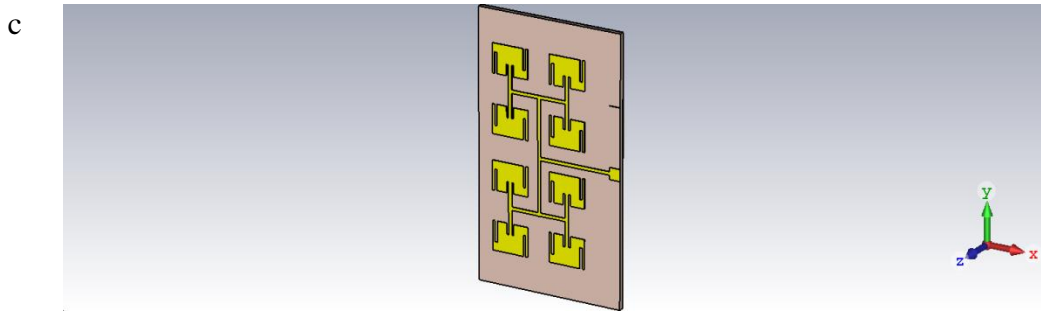


Figure III- 12 : Réseaux D'antenne à 2,4 et 8 Eléments.

### III-4-b-3. Paramètre S

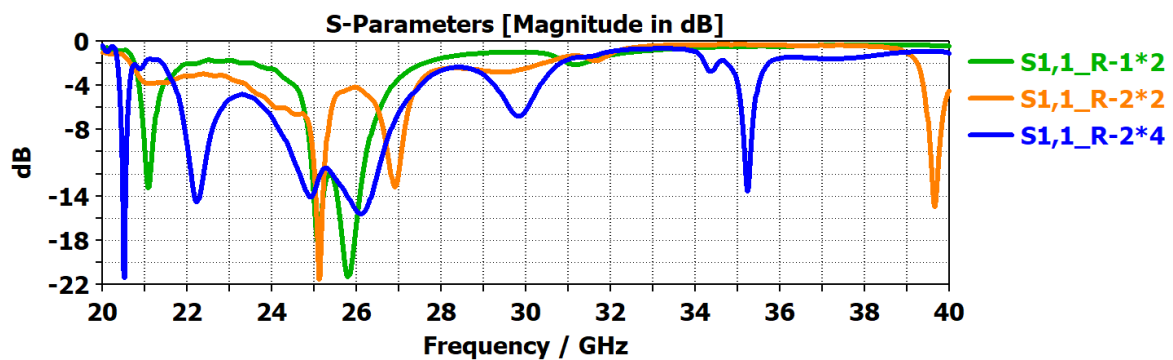


Figure III- 13 : S-Paramètre pour 2,4 et 8 éléments.

La figure (III-13) représente Le coefficient de réflexion  $S_{11}$  obtenu au réseau d'antenne à 2,4 et 8 éléments :

- Le courbe vert des paramètres  $S_{11}$  de la Figure III-13 montre que ce réseau d'antenne représente une bonne adaptation dans la gamme de fréquence [20, 40] GHz, elle est parfaitement adaptée à la bande de fréquence de 25 GHz à 26.2 GHz avec un coefficient de réflexion de  $-21.8$  dB à la fréquence de résonance de 25.85GHz
- Dans la simulation de  $(2*2)$  éléments, le paramètre S vaut  $-21.87$  dB avec une bande passante allant de 25 à 27.2 GHz (Bande Passante=2.2 GHz).
- Le courbe de couleur bleu représente le coefficient de réflexion à 8 éléments L'antenne admet une bonne adaptation d'impédance à la fréquence de résonance 20.5GHz avec un coefficient de réflexions =  $-21.8$  dB. On obtient aussi une bande passante de 20.5 à 22.40 GHz.

III-4-b-4. Taux d'onde stationnaire (VSWR)

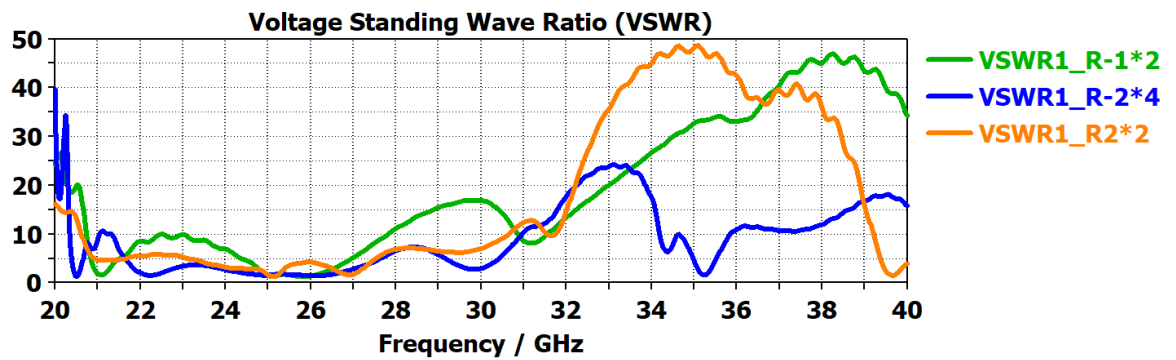


Figure III- 14 : Le VSWR de l'antenne à 2,4, et 8 éléments.

La figure III.14 représente le VSWR de réseaux d'antenne (2x1),(2x2) et(4x2) éléments .

- D'après le cas de 2 éléments on constate que le rapport d'ondes stationnaires est inférieur à 2 dans la fréquence de réseau d'antenne étudiée ce qui indique une bonne adaptation d'impédance entre le réseau et la ligne d'alimentation, VSWR=1.75

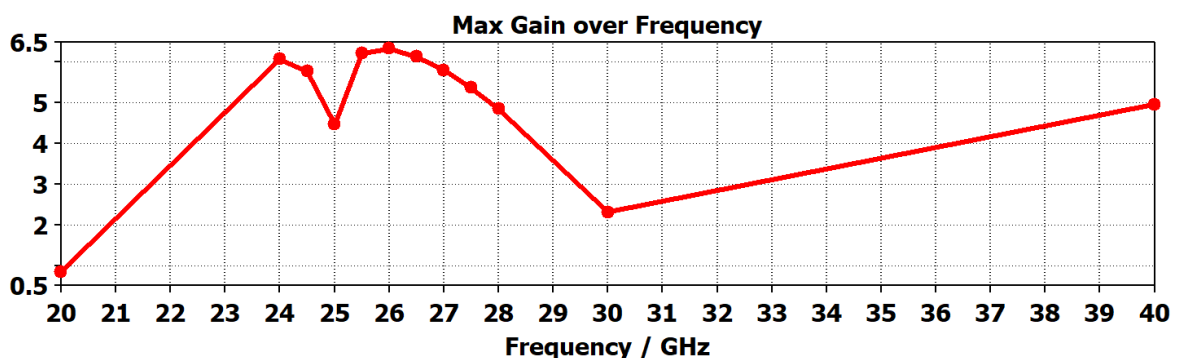
La simulation de 4 éléments :

- Le paramètre VSWR admet une valeur diminutive considérable par rapport à la simulation précédente. C'est qui nous donne une qualité d'adaptation plus meilleure que précédemment. La valeur du VSWR qui est représenté dans le courbe orange vaut 1.5 à la fréquence de résonance (25.20 GHz),

La simulation de 8 éléments :

- le paramètre VSWR reste toujours favorable à la qualité d'adaptation de l'antenne donc elle diminue. La valeur du VSWR de la simulation 3 vaut 1.351 à la fréquence de résonance (20.5 GHz).
- En considérant le critère d'un VSWR < 2 pour un bon fonctionnement du dispositif, on constate que nous avons une bonne adaptation sur la bande passante considérée

II-4-b-5. Le Gain



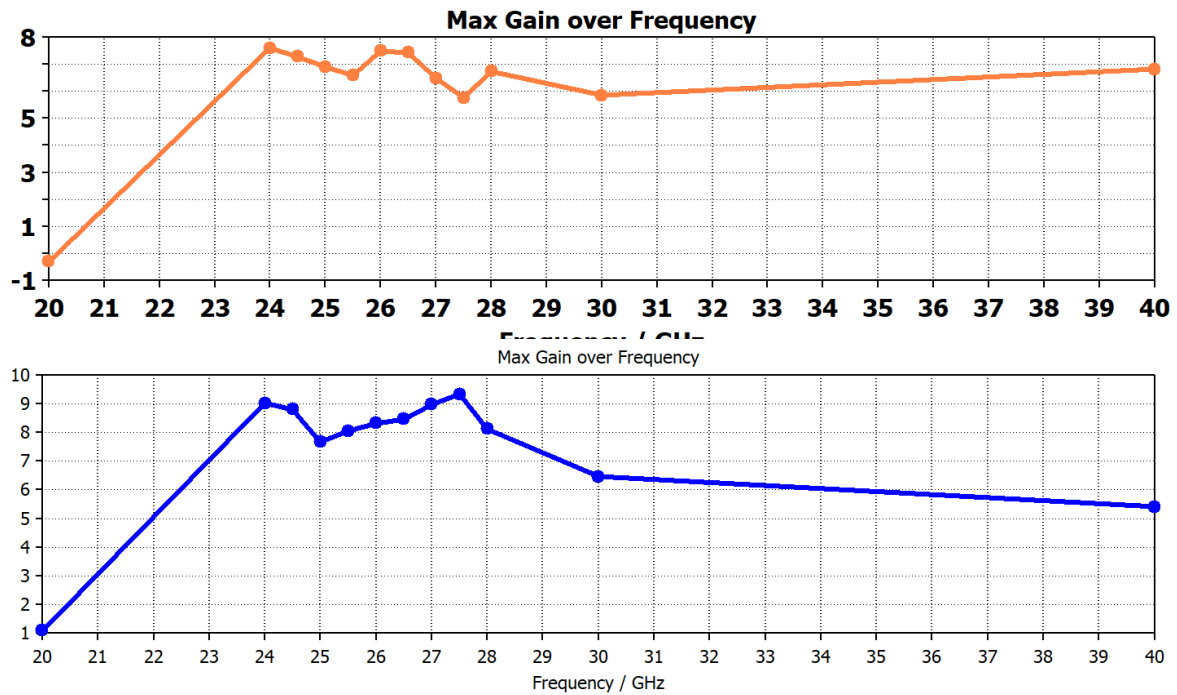


Figure III- 15 : Le gain de l'antenne à 2,4 et 8 éléments.

Dans la Figure III-15

- Le gain de la fréquence 25.75GHz qu'on a trouvé dans les réseaux d'antenne à 2 éléments [26 ;6.45] dB est augmenté par rapport le gain de l'antenne patch adaptée avec l'encoche à la bande ka
  - Dans la deuxième simulation de réseau d'antenne (2\*2), le gain maximal de l'antenne est 7.80 dBi à la fréquence de résonance (25.75 GHz).  
Donc l'antenne admet un rayonnement beaucoup mieux que la précédente.
  - Dans la simulation 3, Le gain maximal de l'antenne vaut 9.75 dB à 27.5 GHz. Le gain minimum est presque égal au gain maximum de la simulation 1. Nous avons donc un rayonnement plus élevé.
- ✓ D'après les résultats de simulation obtenus, Nous constatons une diminution par rapport au paramètre S et le paramètre VSWR de la simulation 1 à la simulation 3. Plus le paramètre VSWR est petit, plus la qualité d'adaptation de l'antenne à la ligne de transmission est meilleure. Nous remarquons également une augmentation du gain d'où un rayonnement plus élevé.

#### III-4-b-6. Diagramme de rayonnement en 2D

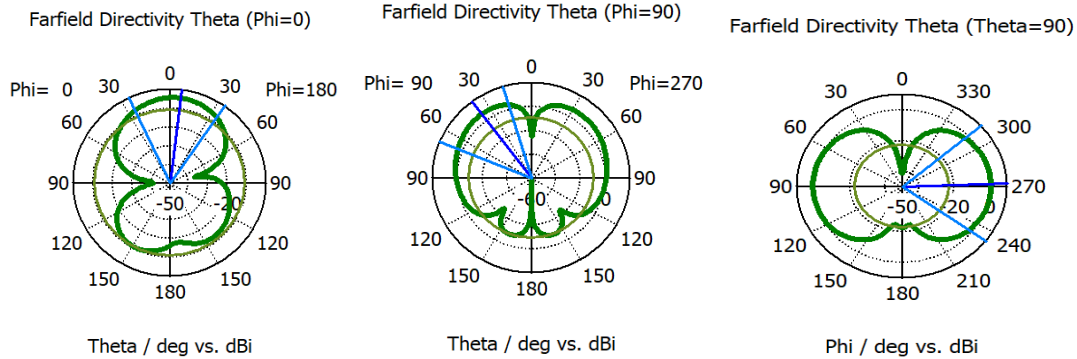
Il existe une multitude de façons de représenter le rayonnement d'une antenne : diagramme en champ, en puissance, gain, directivité, en polaire ou cartésien, en linéaire ou en décibels, en 2D ou 3D.

Le diagramme de rayonnement d'une antenne nous renseigne sur la façon avec laquelle l'antenne dirige son rayonnement dans une direction ou une autre dans l'espace et aussi il

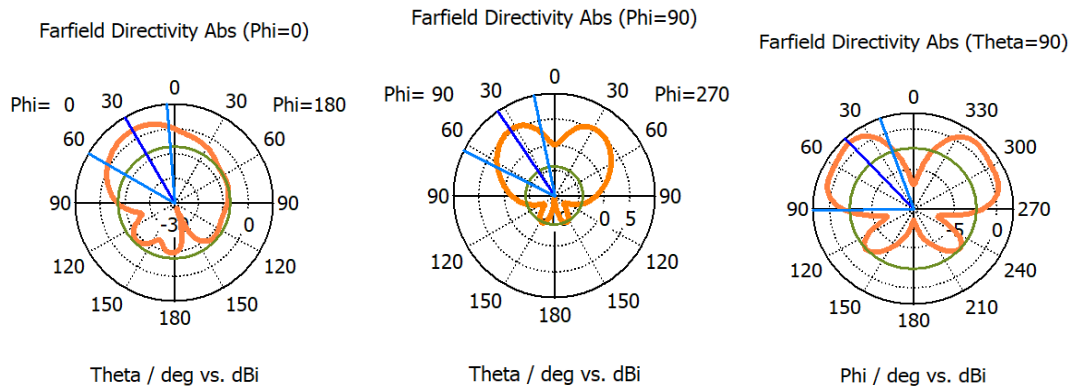
### Chapitre III : Simulation et discussion des résultats

permet de visualiser ces lobes sans dimensions dans le plan horizontal ou dans le plan vertical incluant ainsi le lobe le plus important.

#### Réseau 1\*2



#### Réseau 2\*2



#### Réseau 2\*4

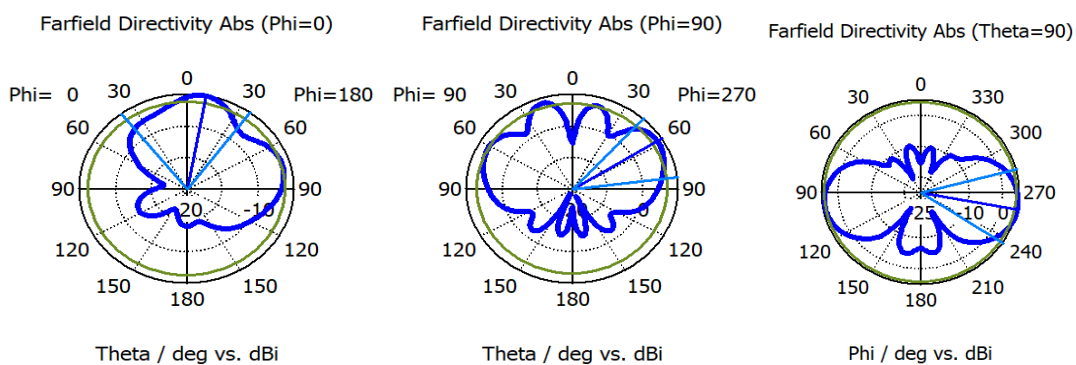


Figure III- 16 : Diagramme de rayonnement en 2D sur l'axe (x, y et z).

### **Chapitre III : Simulation et discussion des résultats**

Le diagramme de rayonnement de l'antenne permet d'apprécier la directivité de l'antenne. Parfois représenté sous la forme d'une figure en 3 dimensions, on présente en général le diagramme de rayonnement dans deux « plans de coupe » : horizontal plan E( $\phi=0^\circ$ ) et vertical plan H( $\phi=90^\circ$ )

Pour le réseau d'antenne à (1\*2) éléments et une fréquence de résonance 25.5 GHz

- Angle d'ouverture de diagramme de rayonnement est défini entre ( $50.6^\circ$ ) et ( $78.2^\circ$ )
- Dans la plan horizontal E on voit que l'antenne est rayonnée bidirectionnelle sur le plan horizontal E
- Pour  $\theta=90^\circ$ , nous remarquons que l'antenne rayonnée bidirectionnelle sur le plan vertical H
- Le lobe secondaire de diagramme de rayonnements est presque négligeable

Le diagramme de réseau d'antenne a 4 éléments montre que :

- Le lobe secondaire reste toujours négligeable par rapport au lobe principale
- L'angle d'ouverture de rayonnements est compris entre  $52^\circ$  et  $71.2^\circ$
- L'antenne présente un rayonnement omnidirectionnel

Dans la troisième simulation de réseau d'antenne de 8 éléments la figure montre que :

- Le rayonnement de l'antenne est omnidirectionnel avec un angle d'ouverture de  $40.7^\circ$  à  $73.8^\circ$ 
  - ✓ D'après les résultats de simulation de diagramme de rayonnement en 2 dimensions, L'antenne reste idéale et rayonne dans toutes les directions, c'est à dire elle présente un rayonnement omnidirectionnel.

#### **III-5. CONCLUSION**

Les systèmes de communications par satellite en bande Ka sont mis en œuvre depuis peu afin de fournir aux utilisateurs des services à haut débit d'accès à Internet partout dans le monde. Ces nouveaux systèmes ont été conçus à partir de gros satellites géostationnaires et utilisent des bandes de fréquences plus élevées que les systèmes précédents afin de bénéficier de conditions de régulation plus favorables et offrir des débits utilisateurs plus élevés.

A travers ce chapitre, nous avons traité les différentes étapes pour concevoir une antenne imprimée rectangulaire alimentée par une ligne micro ruban, qui résonne à la bande [20,40] GHz dans le but de réaliser cette antenne, en faisant plusieurs simulations sous CST. Tout d'abord nous avons commencé par la conception d'une antenne initiale, après cette simulation en termes de coefficients de réflexion, nous avons vu une désadaptation à la fréquence demandée. Afin d'améliorer l'adaptation de notre antenne nous avons fait une étude paramétrique sur (longueur de patch et largeur de transformateur quart d'onde), l'effet positif

### *Chapitre III : Simulation et discussion des résultats*

de cette étude paramétrique sur l'adaptation est clairement observé dans la simulation CST, mais la réalisation de l'antenne n'est pas effectuée.

Après une recherche bibliographique, nous sommes orientés vers l'utilisation du substrat (Rogers 4003), car en hyper fréquences FR-4 n'est réalisable à cause des pertes de matériels 0.025 qui implique l'augmentation des pertes de propagation, par contre les pertes de matériel dans (Rogers 4003) égale à 0.0009 moins que (FR-4).

Dans notre projet, on a une fréquence qui est supérieure à 10 GHz, donc nous avons utilisé Rogers 4003 en suivant les mêmes étapes que le FR-4 (conception initiale, études paramétriques), et d'après cette étude on déduit que :

- Le but de la ligne micro ruban donne une meilleure adaptation d'impédance. C'est l'une des techniques les plus utilisées dans les antennes imprimées. L'avantage de ce type d'alimentation est qu'elle peut être gravée sur la même face de l'antenne, elle est facile à fabriquer et simple à adapter à la résonance.
- Le but de l'encoche est de minimiser les ondes réfléchis, et donc de mieux adapter la ligne d'alimentation à l'antenne.
- Le CST est vraiment un outil d'aide à la conception d'antenne, simple, rapide, efficace et surtout économique.

Notre objectif d'optimiser le gain de l'antenne patch est bien achevé en gardant la même fréquence de résonance. Nous avons présenté les résultats de simulation suivis par des commentaires et des discussions. Les performances étudiées sont :

- Variation du coefficient de réflexion en fonction de la fréquence.
- Le taux d'onde stationnaire en fonction de la fréquence.
- Diagramme de rayonnement (2D, 3D)
- La variation de gain en fonction de la fréquence.

Les résultats de simulations et de mesures sont très satisfaisants en termes de S11, VSWR, Gain et directivité.

***Conclusion  
générale***



### *CONCLUSION GENERALE*

Les travaux de recherche académique et industrielle sur les technologies ultra large bande a connu un essor notoire ces dernières années. Cette technologie de radiocommunication est perçue comme étant l'avenir des communications sans fil à très haut débit pour les applications grand public. Les antennes imprimées peuvent être intégrées avec le module d'émission ou de réception sur le même substrat au vue de leur performance et leurs dimensions réduites. Compte tenu du besoin des antennes ultra large bande dans les systèmes de radiocommunications mobiles, ce mémoire a été consacré à la conception, la simulation et la réalisation d'une antenne patch ultra large bande. Le logiciel de simulation d'antennes basé sur la méthode des moments a été utilisé dans le cadre de ce travail.

Ce projet a été très enrichissant. D'une part, il nous a permis d'appliquer les connaissances acquises sur le logiciel CST et d'autre part, il nous a aussi permis d'approfondir nos connaissances sur les antennes imprimées. Ce projet nous a permis aussi de nous familiariser avec une situation réelle de projet, de par le peu d'indications données au départ. Nous avons également pu observer la mise en pratique des notions d'hyperfréquences assez difficiles à appréhender seulement en théorie.

L'objectif de ce travail était de concevoir et de réaliser une antenne patch à ultra large bande. Afin d'atteindre nos objectifs, nous avons effectué dans un premier temps une revue de la théorique des antennes plaques afin d'avoir une meilleure compréhension des phénomènes se produisant dans les substrats diélectriques. De nombreuses simulations effectuées avec le logiciel CST nous ont permis de nous rapprocher du meilleur cas réel. Le comportement de notre antenne a été analysé par simulation en fonction de chaque paramètre de conception.

L'étude expérimentale nous a permis d'observer en pratique les résultats obtenus, grâce au tracé du coefficient de réflexion en fonction de la fréquence et le diagramme de rayonnement.

# *Références*

### REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1]. A. Chaabane, Conception d'une antenne BIP large bande à fort gain, Thèse de doctorat présentée à l'université Ferhat Abbas Sétif-1, 2017.
- [2]. M. Matin, Ultra wideband communications: novel trends—antennas and propagation, InTech, CC BY-NC-SA 3.0 License, ISBN 978-953-307-452-8, 396 pages, 2011.
- [I-1]. C.A. Balanis, Modern Antenna Handbook. John Wiley and Sons, 2008.
- [I-2]. <http://wireless.ictp.it/handbook/C4.pdf> , 29/2022.
- [I-3]. G. Mohamed, Conception d'une antenne "PIFA" multi-bandes pour applications sans fil, Mémoire d'Ingénieur présenté à l'Université Sidi Mohamed Ben Abdellah, 2016.
- [I-4]. Yijun Zhou ; Chi-Chih Chen; Volakis, J.L. "Single-fed Circularly Polarized antenna Element With Reduced Coupling for GPS Arrays," IEEE Trans. On Antenna and Propagation, vol.56no.5, pp.1469-1472, May 2008.
- [I-5]. Doct.Tel. Bahloul Med Salim, ÉTUDE ET CONCEPTION DE RÉSEAUX D'ANTENNES IMPRIMÉES LARGES BANDES À POLARISATION DIVERSE PAR L'UTILISATION D'ARCHITECTURES LOG PÉRIODIQUES, These Présentée pour l'obtention du grade de DOCTEUR EN SCIENCES, Université Abou bakr Belkaïd – Tlemcen –, 2017.
- [I-6]. H. Chorfi, CONCEPTION D'UN NOUVEAU SYSTÈME D'ANTENNE RÉSEAU CONFORME EN ONDE MILLIMÉTRIQUE, MÉMOIRE PRÉSENTÉ À L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À CHICOUTIMI COMME EXIGENCE PARTIELLE DE LA MAÎTRISE EN INGÉNIERIE. Mai 2012.
- [I-7]. M. Matin, Ultra wideband communications: novel trends—antennas and propagation, InTech, CC BY-NC-SA 3.0 License, ISBN 978-953-307-452-8, 396 pages, 2011.
- [I-8]. A. Niang, Antennes miniatures et structures électromagnétiques avec circuits non-Foster, Thèse de doctorat présentée à l'Université de Paris-Saclay, 2017.
- [I-9]. <https://f5zv.pagesperso-orange.fr/RADIO/RM/RM08/RM08a/RM08a05.html> .
- [I-10]. M. MEGUELATI, Cours d'antennes, 4ème années ingénieur, édition 2001.
- [I-11]. C. Paulus, Filtrage de données sismiques multicomposantes et estimation de la polarisation, Sciences de la Terre. Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, 2006.
- [I-12]. N. Dieudonné, Etude et Conception d'un réseau d'antennes imprimées log - périodique multicouches, Mémoire de Master présenté à l'Université de Abou Bekr Belkaïd de Tlemcen, juillet 2012.
- [I-13]. M. Messaoudene et M. Abri, Conception des Réseaux d'antennes à encoche par Modèle Equivalent à trois ports pour système Bluetooth, Laboratoire de Télécommunications Département de Génie Electrique, Faculté de Technologie, Université Abou-Bekr Belkaïd – Tlemcen BP 230, Pôle Chetouane, 13000 Tlemcen-Algérie, 2015.
- [I-14]. A. Boyer, Cours\_antennes\_oct11\_v4\_5RT, INSA Toulouse, octobre 2011.
- [I-15]. H. Ragad, Etude et conception de nouvelles topologies d'antennes à résonateur diélectrique dans les bandes UHF et SHF, Thèse de doctorat présentée à l'université de Nantes, Université de Tunis El Manar, Tunisie, 2013.

## Références

- [I-16]. B.Somia, Contribution à l'étude et à la modélisation des antennes Imprimées rectangulaires Applications aux systèmes de communication, Mémoire de Magister présenté à l'Université 8Mai 1945 Guelma, 2012.
- [I-17]. S.Toukali ,Kh.Yaalaoui , Conception et simulation d'un réseau linéaire d'antennes imprimées, Mémoire Présenté pour obtenir LE DIPLOME DE MASTER, Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj,2021.
- [I-18]. A.BENKHERBACHE , A.SALEM, Etude D'un Réseau D'antenne Patch Rectangulaire A Bande Interdite Electromagnétique (BIE) 1D Opérant Dans La Bande X, Mémoire présenté pour l'obtention Du diplôme de Master Académique, UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA,2019 .
- [I-19]. A.Brahimi , Etude de la Technologie des Antennes Multi-bandes pour les Applications Spatiales, Mémoire En vue de l'obtention du diplôme de Magister, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran MOHAMED BOUDIAF,2009.
- [I-20]. D.ABERKANE, CH.ROUIFIED, Étude des antennes à ouvertures rayonnantes, Mémoire de fin d'études Présenté en vue de l'obtention du Diplôme d'Ingénieur d'État en Électronique, UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI, TIZI-OUZOU,2011.
- [II-1]. KADRI, BOUFELDJA , Modélisation des Synthèse de Réseaux Periodiques et non perio-diques d'antenne micro-rubans par l'application d'un algorithme Génétique-Flou, 2011.
- [II-2]. S.BEN BRAHEM, Etude et simulation d'une antenne imprimée rectangulaire mise en réseau,Université Saad Dahleb Blida , 2009.
- [II-3]. K. R. Carver, J. W. Mink, "Microstrip Antenna Technology", IEEE Trans. on Antennas and Propagation, vol AP-29, N°1, pp 2 -24, January 1981.
- [II-4]. P.F. Combes, "Micro-ondes - Vol 2 - circuits passifs, propagation, antennes, cours et exercices", ed. Dunod, chap. 15, pp 299-323.
- [II-5]. Antennes patch Réalisé par Ait Tamlihat Malak ,Belmahi Hajar ,El Kaissi Yousra , Ibriz Sara Master Matière et Rayonnement ,Module : Antenne et Microondes .
- [II-6]. F. Daout, S. Jacquet, X. Durocher, G. Holtzmer, Conception, Simulation, Réalisation et mesure d'une antenne imprimée rectangulaire 2.4 GHz ,IUT Ville d'Avray, Dep GEII, 50 rue de Sèvres, 92410 Ville D'avray auteur@u-paris10.fr .
- [II-7]. T. E. Van Deventer, P. B. Katehi and A. C. Cangellaris, An Integral Equation Method For The Evaluation of Conductor and Dielectric Losses in High Frequency Interconnects, IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques, Vol. 37, No. 12, Dec. 1989, pp. 1964-1971.
- [II-8]. A. BENAKCHA,Signaux et Communications : Méthodes de caractérisation hyperfréquence des antennes imprimées,mémoire de magister, Université Mohamed, Biskra, 2013.
- [II-9]. T.JAFFRE, Caractérisation des matériaux a bande interdite électromagnétique multipériodiques et leurs applications aux antennes, thèse de doctorat, université de limoges, 2005.
- [II-10]. <http://docslide.fr/documents/rapport-1.html> .
- [II-11]. M.Braham , Y.Chaouche ,Conception d'Antennes Planaires Reconfigurables pour Opération Large Bande et Multi-Bande,THÈSE DE DOCTORAT 3ème CYCLE, Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj,2019.
- [II-12]. G. Kossiavas, A. Papiernik, R. Staraj, C. Luxey Antennes imprimées -

## Références

- Bases et principes Dossier E 3310, Antenne, Techniques de l'Ingénieur, 2012.
- [II-13]. K.R. Carver, J.W. Mink Microstrip Antenna Technology IEEE Transaction on Antennas and Propagation, vol. 29, no 1, pp. 2-24, janvier 1981.
- [II-14]. H.Pues, A.V.D. Capelle Accurate Transmission-Line Model for the Rectangular Microstrip Antenna Proc. IEE, vol. 131, Part. H, No 6, p. 334-340. 1984.
- [II-15]. D.Khedrouche, «Modélisation des antennes microbandes par une analyse tridimensionnelle rigoureuse en utilisant une méthode intégrale », Thèse de Doctorat, Université de Constantine, 06/ 2009 .
- [II-16]. 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.
- [II-17]. O. Picon, Coll les antennes, Théorie, conception et application l'usine du nouvelle, Dunod, 2009.
- [II-18]. Dr.Djamel KHEDEUCHE, D.BELGUELLAOUI, Analyse et conception des antennes microrubans alimentées par guide d'onde coplanaire, MEMOIRE DE MASTER, UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA, juin 2016.
- [II-19]. 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.
- [II-20]. B. Zaoui , Modélisation d'une antenne microruban compacte, Master academique , Université Echahid Hamma Lakhdar El oued, 06/2015.
- [II-21]. O. Picon, Coll, Les Antennes, théorie, conception et applications, Dunod, Paris, 978-2- 10-051989-7, 2009.
- [II-22]. Doct.Tel.Bahloul MedSalim ,ÉTUDE ET CONCEPTION DE RÉSEAUX D'ANTENNES IMPRIMÉES LARGES BANDES À POLARISATION DIVERSE PAR L'UTILISATION D'ARCHITECTURES LOG PÉRIODIQUES ,These Présentée pour l'obtention du grade de DOCTEUR EN SCIENCES , Université Abou bakr Belkaïd – Tlemcen –, 2017.
- [II-23]. A.Boufrioua ,Contribution à l'étude des antennes a patch résistifs et parfaitement conducteur tenant compte d'une source d'excitation et des nouvelles formes asymptotiques de courant ,thèse de Doctorat, Institut d'électronique, Université de Constantine, 11 /2006.
- [II-24]. Recommandation UIT-R M.1079-2, Exigences imposées à la qualité globale et à la qualité de service pour les télécommunications mobiles internationales-2000 (IMT-2000), page 5.
- [II-25]. ITU NEWS N°5 2015, Protection des fréquences essentielles aux services par satellite, Rupert Pearce, Président de l'Association Européenne des opérateurs de satellites (ESOA), Directeur Général d'Inmarsat.
- [II-26]. W.SAMATI ,optimisation d'un réseaux d'antenne ,thèse d'ingénieur, université de Blida, édition 2010.
- [II-27]. N.Nora, Etude et simulation de diagramme de rayonnement de l'antenne intelligente, thèse de doctorat, université de Blida, édition 2007.
- [II-28]. Lee K.F, Luk K.M., Tong K.F., Shum S.M., Huynh T., and Lee R.Q. Experimental and simulation studies of the coaxially fed u-slot rectangular patch antenna. Microwaves, Antennas and Propagation, IEE Proceedings, 144(5) :354–358, Oct 1997.

## Références

- [II-29]. R.KEBBAB, Conception d'antennes ultra large bande en technologie imprimé, Thèse de magister, Université de Abou Bakr Belkaid-Tlemcen, 2010.
- [II-30]. D. M. Pozar, Microstrip antennas, IEEE, Vol. 80, N° .1, pp. 79-91, January 1992.
- [II-31]. L.CHOUTI, Contribution à l'étude d'antennes imprimées rectangulaires double bande et multi bandes tenant compte de l'effet de couplage, Mémoire de magister, Université Mentouri-Constantine, 2009.
- [II-32]. M. Messaoudene et M. Abri ,Conception des Réseaux d'antennes à encoche par Modèle Equivalent à trois ports pour système Bluetooth ,Laboratoire de Télécommunications Département de Génie Electrique, Faculté de Technologie, Université Abou-Bekr Belkaïd –Tlemcen BP 230, Pôle Chetouane, 13000 Tlemcen-Algérie,2015
- [II-33]. T.A. Milligan Modern Antenna Desing, second edition John Wiley & Sons, Inc, 2005.
- [II-34]. N.GUELLIL , Etude et conception d'un réseau d'antennes beamforming à base de la matrice de Butler en utilisant ADS Momentum, Pour l'obtention du Diplôme de MAGISTER, UNIVERSITE FERHAT ABBAS –SETIF 1-UFAS (ALGERIE).
- [II-35]. K.KENAOUI, Optimisation d'un réseau d'antennes (ILS) par l'algorithme d'abeilles, MEMOIRE DE FIN D'ETUDES Pour l'obtention du diplôme de Master en génie électrique, Université de M'Hamed BOUGARA Boumerdes,2016.
- [II-36]. R.J.Mailloux ,Phased Array Antenna Handbook, Second Edition Artech House, Inc, 2005.
- [II-37]. W.K. CHEN The Electrical Engineering Handbook Elsevier Inc, 2004.
- [II-38]. L. Josefsson, P. Persson Conformal Array Antenna Theory and Design. IEEE antenna and propagation society, Wiley-Interscience 2006.
- [III-1]. A.BOUAKA, L.TEMMAR, Simulation d'un réseau d'antennes pour les mobiles 5G avec CST Microwave Studio ,Mémoire MASTER, UNIVERSITE de OUARGLA, Juin 2018.
- [III-2]. <https://slideplayer.fr/amp/3032977/> .
- [III-3]. H.KANANE, L.BELABAS,L.CHEMMOUN, Miniaturisation de l'antenne PATCH sous CST , Mémoire MASTER, Université de Tizi-Ouzou, 2018.

## Résumé

### \*\*\*Résumé\*\*\*

Les réseaux d'antennes en bande Ka reçoivent une attention croissante à mesure que les applications dans les radars haute résolution, l'imagerie et les communications à haute vitesse continuent de croître en raison de leur profil bas, de leur poids léger, de leur fabrication facile et de leur faible coût de production en série. Avec le développement rapide de la technologie de communication sans fil, un seul patch peut difficilement répondre à la demande de haute performance des systèmes de communication. Les réseaux d'antennes bénéficient d'une directivité et d'un gain élevés, qui sont essentiels pour les applications militaires et spatiales.

Dans ce travail, des réseaux d'antennes microruban sont présentés. Un réseau d'antennes  $2 \times 2$  est construit et simulé en utilisant CST comme réseau d'unités, puis nous étendons le réseau d'unités à un réseau d'antennes  $4 \times 2$  pour des performances supérieures.

\*\*\*Mots-clés\*\*\* : Satellite, antenne patch, Ka bande, CST Studio.

---

### \*\*\*Abstract\*\*\*

Ka-band antenna arrays are receiving increasing attention as applications in high-resolution radar, imaging, and high-speed communications continue to grow due to their low profile, light weight, manufacturing easy and their low cost of mass production. With the rapid development of wireless communication technology, a single patch can hardly meet the demand for high performance of communication systems. Antenna arrays benefit from high directivity and gain, which are essential for military and space applications.

In this work, polarized microstrip antenna arrays are presented. A  $2 \times 2$  antenna array is constructed and simulated using CST as the unit array, then we extend the unit array to a  $4 \times 2$  antenna array for higher performance.

\*\*\*Keywords\*\*\*: Satellite, patch antenna, Ka band, CST Studio.

---

### \*\*\*تلخيص\*\*\*

تحظى صفيقات هوائي النطاق Ka باهتمام متزايد مع استمرار نمو التطبيقات في الرادار عالي الدقة والتصوير والاتصالات عالية السرعة نظرًا لانخفاض مظهرها وخفة وزنها وسهولة تصنيعها وانخفاض تكلفة إنتاجها الضخم. مع التطور السريع لتكنولوجيا الاتصالات اللاسلكية، فإن التصحيح الفردي لا يكاد يلبي الطلب على الأداء العالي لأنظمة الاتصالات. تستفيد صفائف الهوائيات من الاتجاهية العالية والكسب الضروريين للتطبيقات العسكرية والفضائية.

في هذا العمل، يتم تقديم صفائف هوائي المستقطبة. يتم إنشاء ومحاكاة صفيق هوائي  $2 \times 2$  باستخدام CST كمصفوفة وحدة، ثم نقوم بتوسيع مصفوفة الوحدة إلى مصفوفة هوائي  $2 \times 4$  للحصول على أداء أعلى.

\*\*\*الكلمات المفتاحية\*\*\*: لأقمار الصناعية، هوائي التصحيح، نطاق Ka، استوديو CST.