

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd- Tlemcen -



Faculté de TECHNOLOGIE

MEMOIRE

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

En : : Télécommunication

Spécialité : Système de Télécommunication

Par : ZERROUKI Zoulikha

Sujet

**Conception Antenne Patch à Base Semi-Conducteurs Bande Ku Pour
Application Satellite**

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

Mr. MERIAH Sidi Mohammed
Mr. IRID Sidi Mohammed Hadj
Mr. KOURDIZakarya
Mr. BAHRI Sidi Mohammed

Prof
MCA
MRA
MCB

Université de Tlemcen
Université de Tlemcen
CDS-Oran
Université de Tlemcen

Président
Encadrant
Co-Encadrant
Examineur

Année universitaire 2021 2022

Remerciement

REMERCIEMENT

Les travaux présentés dans ce rapport ont été réalisés à l'Université Aboubakr Belkaïd

-Tlemcen-

Par-dessus tout, je remercie notre Seigneur d'avoir donné à l'humanité le pouvoir de raisonner et d'explorer la vérité de l'univers.

*Mes remerciements les plus sincères à mon encadrant **IRID Sidi Mohammed Hadj**, maître de conférences de niveau A à l'Université -Tlemcen-, qui a accepté Aboubakr Belkaïd d'encadrer mon travail et de m'initier aux bases des systèmes de télécommunication, ainsi qu'un soutien inconditionnel, des conseils précieux et sans fin patience qu'ils m'ont gracieusement offert lors de mes recherches de mémoire.*

*Mes remerciements les plus sincères vont à mon co-encadrant **KOURDI Zakarya**, Chercheur Senior de niveau A au Centre de Développement des Satellites d'Oran, qui a accepté d'encadrer mon travail et m'a initié aux bases des télécommunications système.*

*Mes sincères remerciements à **MERIAH Sidi Mohammed** professeur de l'Université Aboubakr Belkaïd Tlemcen pour m'avoir accordé le privilège d'être président du jury de soutenance. Je tiens également à remercier monsieur **BAHRI Sidi Mohammed**, maître de conférences, de m'avoir accordé le privilège de consulter mon travail.*

Je ne peux pas oublier d'exprimer mes sincères remerciements à tous ceux qui m'ont soutenu pendant ces moments difficiles et m'ont donné la force de continuer à travailler et de faire avancer les choses.

Enfin, je tiens à remercier toute ma famille, en particulier ma mère, qui m'a soutenu et conseillé tout au long de mon parcours universitaire

DEDICACES

Tout d'abord, je voudrais remercier Dieu Tout-Puissant de m'avoir donné le courage et la patience, malgré toutes les difficultés, j'ai encore le courage et la patience d'achever ce travail et de me donner la volonté pour tout mon parcours académique.

A mes chers parents qui m'ont construit une maison d'espoir, je leur souhaite une bonne santé et que Dieu les protège de toutes sortes de maux. Merci d'être avec moi. Je suis très reconnaissant de leurs efforts. Plus important encore, notre encadreur fait le travail. Je lui souhaite encore plus de succès et lui dédie le fruit de mes efforts.

A mes frères Mohammed, Miloud, à ma sœur Hakima, à mes chères amies, A toute ma grande famille, et à tous mes enseignants. Merci pour ses efforts.

Zerrouki Zoulikha

Abréviations

ABREVIATIONS

BcB: Benzocyclobutene

Fr4: flame retardant

GaAs: Arséniure de gallium

RO4003 : Rogers

Si : Silicium

SiO₂ : Oxyde de silicium

Sommaire

REMERCIEMENT	i
DEDICACES	ii
ABREVIATIONS	iii
LISTE DES FIGURES	vii
LISTE DES TABLEAUX	ix
INTRODUCTION GENERALE	1
I. Introduction.....	4
I.1. Définition d'antenne	4
I.2. Le rôle des antennes.....	4
II. Généralité sur les antennes	6
II.1. Les différents types des antennes	6
II.1.A. Selon la directivité	6
II.1.A.1) Antenne sectoriel (directive)	6
II.1.A.2) Antenne omnidirectionnelle	9
II.1.A.3) Antenne hémisphérique.....	10
II.1.B. Selon le gain.....	11
II.1. B.1. Antennes à gain faible $G \leq 6\text{dB}$	11
II.1. B.2. Antennes à gain élève $G \geq 6\text{dB}$	11
II.1.C. Selon l'orbite.....	12
II.2. Les différentes applications des antennes.....	12
II.2.A. Selon l'orbite	12
II.2.B. Selon le type d'antenne	13
III. Caractéristique des antennes	13
III.1. Diagramme de rayonnement	14
III.2. Directivité.....	14
III.3. L'impédance d'entrée.....	15
III.4. Gain	16
III.5. Le VSWR (Voltage Standing Wave Ratio) (ROS).....	16
III.6. Le coefficient de réflexion (S11) (adaptation)	17
III.7. La polarisation.....	18
III.7.A. Polarisation linéaire :.....	18
III.7.B. Polarisation circulaire :.....	19
III.7.C. Polarisation elliptique :.....	19
III.8. Bande passante	20
III.9. Bande de fréquence :.....	20

Sommaire

III.10. Les avantages et les inconvénients de la bande Ku.....	21
III.10.A. Les avantages à utiliser une bande Ku	21
III.10.B. Les inconvénients à utiliser une bande Ku	22
IV. Architecture d'un système de télécommunications par satellite	22
IV .1. Le secteur spatial.....	22
IV .2. Liaison satellitaire (Le secteur terrien)	22
IV .3. Les principaux paramètres d'une liaison satellitaire.....	23
IV.4. Les différents paramètres importants pour la conception d'une liaison	23
IV.4.A. EIRP	23
IV.4.B. Puissance de transmission et de réception.....	23
IV.4.C. Gain d'antenne	24
IV.4.D. Les pertes dans l'espace libre.....	24
IV.4.E. Perte par absorption atmosphérique	24
IV.4.F. Température de bruit.....	25
IV.4.G. Bilan de liaison.....	25
V. Conclusion.....	27
II.1. Introduction	29
II.2. Antenne patch :	29
II.1. Les différentes formes d'une antenne patch.....	29
II.2. L'utilisations des antennes patch.....	30
II.3. Géométrie Antenne Imprimée	31
II.3.A. Description d'une antenne patch	32
II.3.B. Antenne patch rectangle.....	32
II.3.C. Les paramètres géométriques de l'élément rayonnant.....	33
II.3.D. Calculs des dimensions théoriques	34
III. Modèle d'optimisation	35
III.1. Ligne ou transformateur quart d'onde.....	35
III.2. Les encoches	36
IV. Généralités sur la miniaturisation	37
IV.1. Définition d'une antenne miniature	37
IV.2. Les limites fondamentales des antennes miniatures	37
IV.2.A. Le facteur de qualité :.....	37
IV.2.B. L'efficacité rayonnée :.....	38
IV.3. Techniques de miniaturisation	38
IV.3.A. Utilisation des matériaux.....	38
IV.3. A.1. Utilisation d'un diélectrique	38
IV.3. A.2. Utilisation d'un matériau magnéto-électrique :	38

Sommaire

IV.4. Caractéristiques des substrats semi-conducteurs	38
V. Généralité sur les Matériaux.....	40
V.1. Conducteurs - Isolants - Semi-conducteurs.....	40
V.2. Les propriétés des semi-conducteurs.....	41
V.2.A. Semi-conducteurs de la colonne IV (Ge, Si) – Réseau "diamant"	41
V.2.B. Semi-conducteurs composés (III-V ou II-VI) - Réseau "Zinc-blende"	42
V.3. Semi-conducteur non dopé ou dopé	43
V.3.A. Semi-conducteur intrinsèque	43
V.3.B. Semi-conducteur extrinsèque : dopage.....	43
V.3.B.1. Semi-conducteur de type n	44
V.3.B.2. Semi-conducteur de type p	45
V.3.B.3. Semi-conducteur compensé	45
I. Introduction.....	48
II. Généralités sur logiciel CST MICROWAVE STUDIO	48
II.1. Définition du logiciel CST STUDIO SUITE	48
II.2. Description générale de l'interface CST	48
III. Design et structure de l'antenne	49
III.1. La structure de l'antenne patch :	50
III.1.A. Dessiner le substrat :.....	50
III.1.B. Dessiner le plan de masse :.....	50
III.1.C. Dessiner le patch :.....	51
III.1.D. Dessiner une encoche dans le patch :	51
III.1.E. La ligne micro-ruban :	52
III.1.F. Le port de polarisation :	53
IV. Conception d'une antenne patch rectangulaire	53
V. Résultats et discussion.....	55
V.1. Coefficient de réflexion S_{11}	55
V.2. VSWR	56
V.3. Gain d'antenne patch.....	57
V.4. Diagramme de rayonnement	60
V.5. Comparaison entre les performances des matériaux	66
VI. Conclusion	67
CONCLUSION GÉNÉRALE	70
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	68

Chapitre I

Figure I-1 : Principe de transmission par onde électromagnétique[I.1].....5
 Figure I-2 : Diagramme de rayonnement des différentes antennes existantes : (a) directive (b) omnidirectionnelle, (c) sectorielle.....6
 Figure I-3 : Différents exemples d’antennes à ouverture rayonnante7
 Figure I-4 : Les différents types d’antennes réseaux.....8
 Figure I-5 : Différents types d’antennes réseau9
 Figure I-6 : Exemples d'antennes Omnidirectionnel10
 Figure I-7 : Antenne bande X par RUAG10
 Figure I-8 : Antenne patch micro-ruban bande S pour microsatellite de Surrey SSTL11
 Figure I-9 : Antenne à réflecteur (AstroMesh) d’INMARSAT-411
 Figure I-10 : Les différents types d’orbites12
 Figure I-11 : Les différents formes typiques de diagramme de rayonnement [I.12].14
 Figure I-12 : Directivité d'une antenne [I.10].....15
 Figure I-13 : Représentation de l’impédance d’antenne16
 Figure I-14 : Schéma d’une antenne connectée à une ligne de transmission et un générateur18
 Figure I-15 : Rotation d’une onde plane et son ellipse de polarisation en fonction du temps à 0Z (1) Rotation de l’onde et (2) elliptique de polarisation18
 Figure I-16 : La polarisation linéaire19
 Figure I-17 : Polarisation circulaire19
 Figure I-18 : Polarisation elliptique19
 Figure I-19 : Les différents types de polarisation20
 Figure I-20 : Illustration la bande passante a-10 dB d’une antenne20
 Figure I-21 : Domaine de spectre électromagnétique21
 Figure I-22 : Liaison station d’émission-Satellite-station de réception22
 Figure I-23 : Configuration d’un lien de communication par satellite.....23

Chapitre II

Figure II-1 : Différentes forme d’élément rayonnant [I.5].....30
 Figure II.2: Antenne patch micro-ruban [II.3].31
 Figure II-3 : Structure d’une antenne patch rectangulaire.....32
 Figure II-4 : Extension de la longueur physique L.....33
 Figure II-5 : Transformateur quart d’onde36
 Figure II-6 : Exemples de semi-conducteurs.....42
 Figure II-7 : Semi-conducteur composé GaAs.....43
 Figure II-8 : Silicium dopé au phosphore.....44
 Figure II-9 : Dopage type N par un atome de phosphore (Atome donneur)44
 Figure II-10 : Dopage type P par un atome de Bore (Atome accepteur)45

Chapitre III

Liste des figures

Figure III-1 : Interface du CST [III.5].....	49
Figure III-2 : La structure du patch.	50
Figure III-3 : La structure du substrat.	50
Figure III-4 : La structure de la masse.	51
Figure III-5 : la structure du patch.	51
Figure III-6 : structure du patch avec le vide.	52
Figure III- 7 : Ligne micro-ruban du patch.	52
Figure III-8 : obtention du modèle unis.	53
Figure III- 9 : structure d'une antenne patch alimentée par une ligne micro ruban.....	53
Figure III-10 : La structure d'antenne patch proposé.....	54
Figure III- 11 : Coefficient de réflexion des matériaux utilisés en dB.....	55
Figure III-12 : Coefficient de réflexion pour le matériau gold/sio2 en dB.	56
Figure III-13 : Taux d'onde stationnaire des différents matériaux	56
Figure III-14 : Gain max pour le matériau Gold/FR4.....	57
Figure III-15 : Gain max pour le matériau Gold/RO4003	58
Figure III-16 : Courbe de Gain max pour le matériau Gold/Si.....	58
Figure III-17 : courbe de Gain max pour le matériau Gold/BnB.....	59
Figure III-18 : courbe de Gain max pour le matériau Gold/GaAs	59
Figure III-19 : courbe de Gain max pour le matériau Gold/SiO2	60

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre I

Tableau I-1 : Les différents types d'orbites et leur mission ou bien applications possibles [I.9] . 13
Tableau I-2 : Les différents types d'antennes et leurs applications [I.13] 13
Tableau I-3 : Tables les bandes de fréquences 21

Chapitre II

Tableau II-1 : Les différents avantages et inconvénients et applications les antennes patch..... 31
Tableau II-2 : tableau des équations utiliser..... 35
Tableau II-3 : Caractéristiques des matériaux AsGa, Germanium et Silicium [II.24]..... 39
Tableau II-4 : Exemples de semi-conducteurs 41

Chapitre III

Tableau III-1 : Dimensions de l'antenne patch rectangulaire alimentée par une ligne micro ruban 54
Tableau III.2 : Diagramme de rayonnement simulé pour les différents matériaux pour $\phi=0^\circ$..62
Tableau III.3 : Diagramme de rayonnement simulé pour les différents matériaux pour $\phi=90^\circ$.. 64
Tableau III.4 : Diagramme de rayonnement simulé pour les différents matériaux pour $\theta=90^\circ$.. 66
Tableau III.5 : Compression entre les performances de ces antennes des différents matériaux de substrat utilisé..... 67

Introduction Générale

INTRODUCTION GENERALE

Depuis 1957, date à laquelle l'Union soviétique a mis en orbite le premier satellite terrestre artificiel, sa seule fonction était de transmettre un signal sonore à deux tons, et l'industrie aérospatiale s'est considérablement développée. Ses champs d'application se sont également multipliés. Ainsi, des milliers de satellites en orbite terrestre couvrent un large spectre, comme les observations météorologiques et générales de la terre, le balayage de l'univers, la géolocalisation et la reconnaissance militaire, et enfin les télécommunications générales [1].

À l'origine des premières communications par satellite, la maîtrise technologique ne permettait pas les émissions à très fortes puissances. La contrainte pour assurer le bilan de liaison était alors reportée sur les antennes au sol dont la surface de captation devait alors être très grande pour assurer le gain nécessaire. Suite aux avancées technologiques successives, la puissance d'émission au niveau des satellites a augmenté de manière importante. Les contraintes sur le gain, donc sur la taille des antennes, ont alors été considérablement relaxées.

Les enjeux économiques et technologiques sont considérables. Les besoins du marché évoluent si rapidement que les industries doivent s'y adapter de façon continue pour faire face à la concurrence. La multiplication des normes, au sein d'un même dispositif, est devenue courante et le sera de plus en plus dans l'avenir. Ces normes doivent cohabiter que ce soit pour des applications télécoms, applications civiles et militaires, au niveau des stations terrestres ou hertziennes, quel que soit le secteur (terrestre, spatial), en bandes millimétriques ou centimétriques [2].

Certains travaux portent sur l'utilisation de matériaux fonctionnels (ferroélectriques, magnétiques, à cristaux liquides...) conducteurs mais ceux-ci ne présentent pas une adaptation suffisante pour adresser toutes les fréquences ou nécessitent des alimentations extérieures trop coûteuses ou trop complexes d'un point de vue d'intégration dans le système électronique. La voie la plus commune pour la réalisation d'une antenne patch consiste à reporter des éléments d'accord sur les substrats. Là aussi, de nombreux problèmes existent en termes de complexité, de pertes d'insertion, de consommation ou encore de fiabilité [3].

La taille de ces antennes peut être élevée pour certaines fréquences d'utilisation. Face à cette problématique, des travaux de recherche ont été menés, pour cela des techniques de miniaturisation ont été adaptées pour résoudre les problèmes de dimensions, surface et fréquence de résonance.

C'est dans ce contexte que s'inscrit ce mémoire de fin d'étude dont l'objectif est de montrer la faisabilité de réaliser une antenne patch à base semi-conducteur, en basant l'étude sur

Introduction Générale

une nouvelle démarche de conception. Il s'agit de concevoir des dispositifs passifs sur un substrat semi-conducteur, tel que le silicium et bien d'autres, en y intégrant l'élément d'accord, via des jonctions semi-conductrices. Ceci se fait dans une démarche de conception globale afin de donner un maximum de flexibilité aux concepteurs[4].

La conception d'antenne nécessite une phase de simulation numérique. Pour cela plusieurs logiciels ont été conçus tel que CST, HFSS, etc., qui résolvent les équations de Maxwell, et permettent la simulation et la conception d'antennes. Nous allons utiliser le logiciel CST pour notre travail[1].

Notre travail est réparti en trois chapitres. On trouvera tout d'abord les généralités et le principe de fonctionnement des antennes. On commence par donner une définition ainsi que les caractéristiques d'antennes. Comme on citera aussi les différents domaines d'utilisation[3].

Le deuxième chapitre est dédié à l'étude d'antenne patch en passant par son étude paramétrique, les modèles d'optimisations. On parlera aussi des techniques de miniaturisation d'antenne imprimée en fonction des différents matériaux semi-conducteurs

Le troisième chapitre est consacré à la présentation du logiciel CST Micro-wave Studio où nous avons présenté de façon générale le rôle de chaque fonction pour réaliser nos simulations. On parlera des résultats de la simulation sous le logiciel CST.

Enfin, on terminera par une conclusion générale.

Chapitre I :
Généralités sur les antennes
utilisées
dans le domaine spatial

I. Introduction

Les télécommunications se sont banalisées au cours de ces dernières années. Poussés par l'engouement du public, les systèmes de réception sont devenus portables et les antennes se sont miniaturisées, l'antenne imprimée est devenue largement utilisée dans les systèmes de communications. 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 ».

Dans ce chapitre, nous présentons la description générale de l'antenne, ses caractéristiques, la liaison satellite utilisée pour les radiocommunications [I.1], les paramètres électriques des antennes tels que la fréquence de résonance, la bande passante, le coefficient de qualité, l'impédance d'entrée, et le coefficient de réflexion.

Nous définirons les types d'antennes et nous donnerons leurs domaines d'utilisation et leurs applications.

I.1. Définition d'antenne

Une antenne est un dispositif qui assure la transition entre un guide d'onde et l'espace libre dans lequel ces ondes vont se propager, ou inversement (rayonner « émetteur » ou capter « récepteur »).

I.2. Le rôle des antennes

Le rôle d'antenne est de convertir l'énergie électrique d'un signal en énergie électromagnétique transportée par une onde électromagnétique (ou inversement)

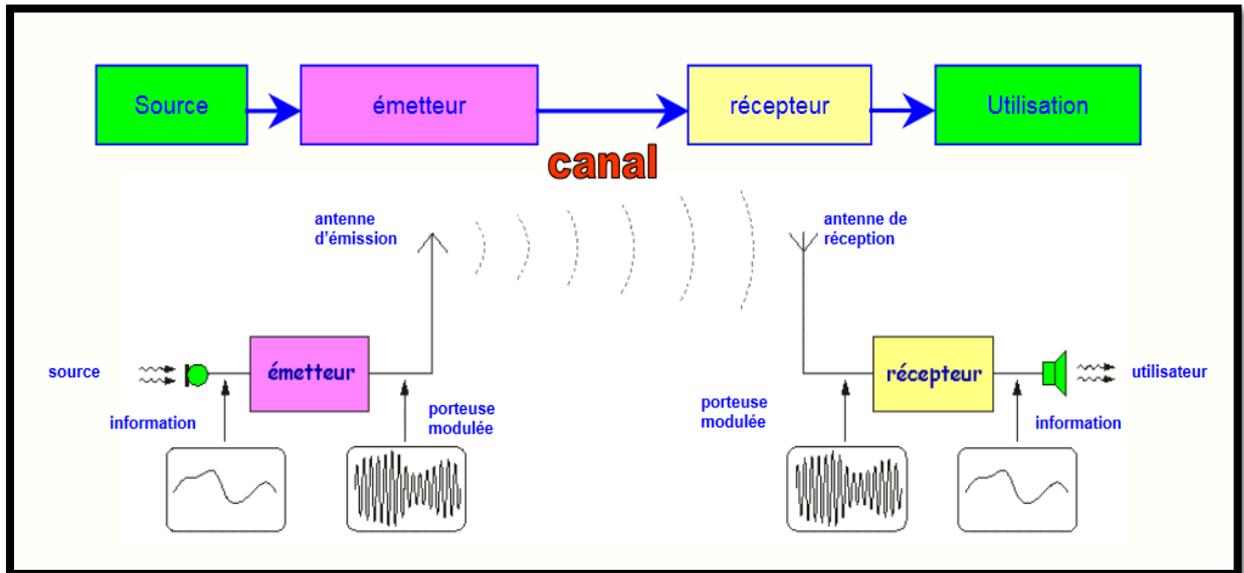


Figure I-1 : Principe de transmission par onde électromagnétique[I.1].

- L'antenne d'émission reçoit le signal électrique de l'émetteur et rayonne l'onde Électromagnétique. Cette dernière se propage dans l'espace autour de l'antenne d'émission. En fonction du type et de la forme de l'antenne utilisée certaines directions de propagation peuvent être privilégiées. La puissance produite par l'émetteur est appliquée sur l'antenne et se propage dans l'espace.
- L'antenne de réception capte une faible partie de cette puissance et la transforme en signal électrique. Qui sera appliqué par la suite à l'entrée du récepteur qui en extrait l'information transmise.

Dans la plupart des cas, une antenne peut être utilisée en émission (Afin d'assurer la propagation dans l'air, l'antenne d'émission est de transformer la puissance électromagnétique guidée, c'est un transducteur) ou en réception (de façon inverse, la puissance rayonnée peut être captée, l'antenne apparaît comme un capteur et un transformateur de puissance rayonnée en puissance électromagnétique guidée).

Les antennes avec les mêmes propriétés rayonnantes, on dit que son fonctionnement est réciproque. Dans autres cas exceptionnels pour lesquels les antennes comportent des matériaux non linéaires ou bien anisotropes, elles ne sont pas réciproques.

II. Généralité sur les antennes

II.1. Les différents types des antennes

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

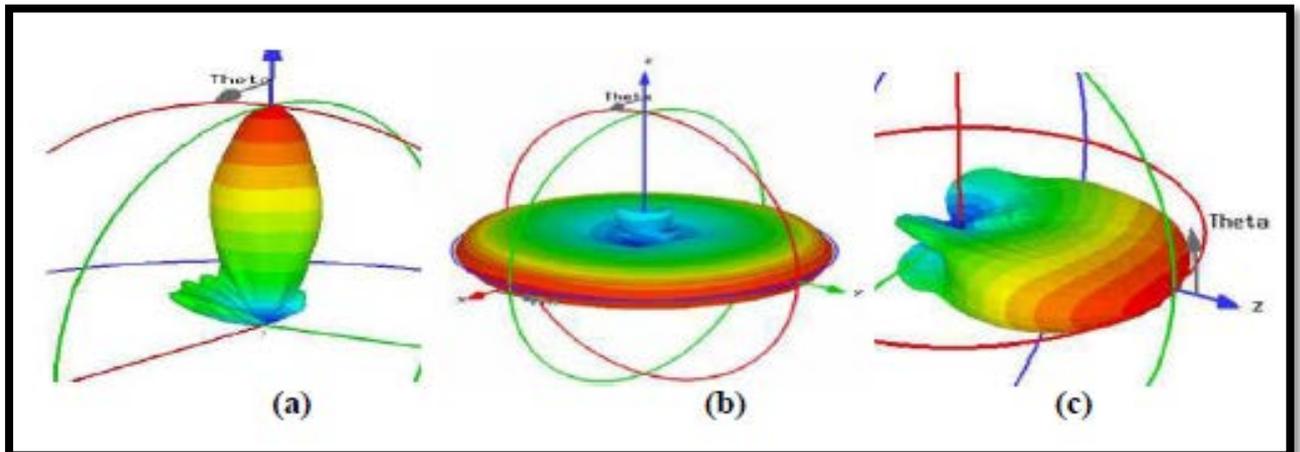


Figure I-2 : Diagramme de rayonnement des différentes antennes existantes : (a) directive (b) omnidirectionnelle, (c) sectorielle [I.2].

II.1.A. Selon la directivité

Trois types des antennes spatiales peuvent être distingués :

II.1.A.1) Antennes sectorielles (directive)

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 :

II.1.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.



a) Antenne cornet cylindrique



b) Antenne cornet rectangulaire



c) Antenne lentille



d) Antenne à réflecteur au sol



e) Antenne à réflecteur pour satellite

Figure I-3 : Différents exemples d'antennes à ouverture rayonnante[I.3].

Le cornet (**Figure I.3.a et Figure I.3.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 (**Figures I.3.d et I.3.e**) sont des systèmes focalisant en réflexion. Elles sont constituées d'une source qui illumine un réflecteur métallique[I.4].

II.1.A.1.b) Antennes réseaux

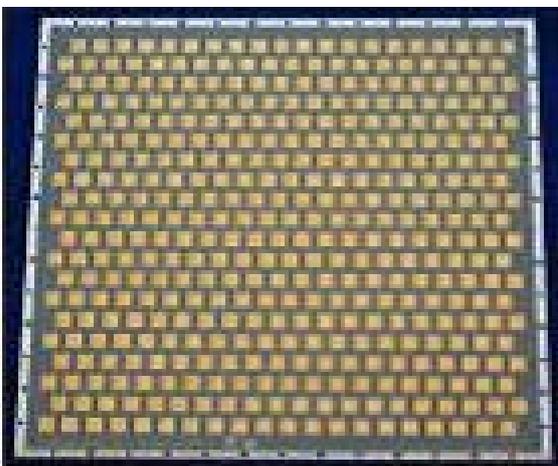
Une antenne réseau est constituée d'un groupement de plusieurs antennes identiques.



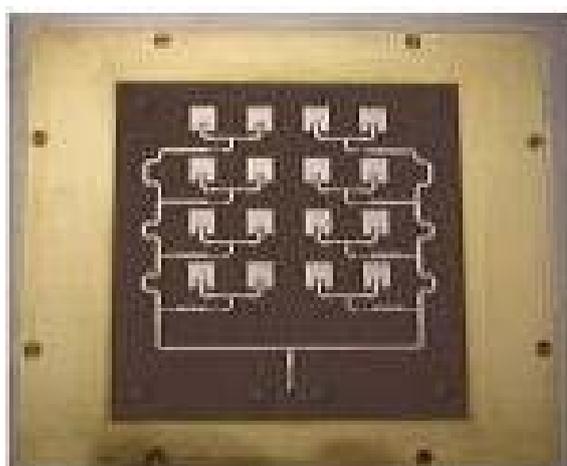
a) Réseau de cornets



b) Réseau de fentes



c) Réseau de cornets



d) Réseau de fentes



e) Réseau d'antenne actifs

Figure I-4 : Les différents types d'antennes réseaux[I.6].

Chapitre I : Généralités sur les antennes utilisées dans le domaine spatial

Ce groupement d'antennes peut être formé de dipôles, de patches, de fentes, ou même de cornets.

L'utilisation simultanée de plusieurs antennes proches les unes des autres a pour effet d'augmenter la directivité du rayonnement.

De plus, en jouant sur la phase de l'alimentation ainsi que sur le module, le rayonnement peut être orienté et modelé dans l'espace (ou le demi espace s'il y a présence d'un plan de masse)

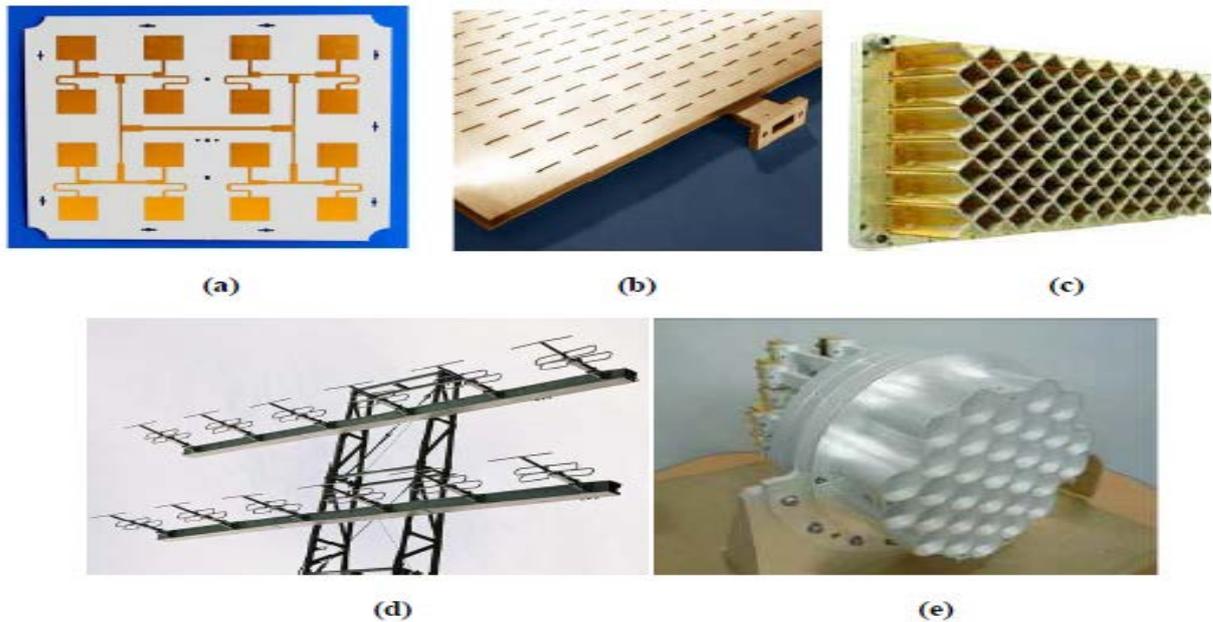


Figure I-5 : Différents types d'antennes réseau[I.3].

Lorsque l'on double le nombre d'éléments rayonnants, on augmente (en théorie) de 3 dB la puissance de rayonnement de l'ensemble.

II.1.A.2) Antenne omnidirectionnelle

Une antenne omnidirectionnelle ou isotrope est une antenne théorique qui rayonne même densité de puissance quelle que soit l'orientation spatiale. L'antenne est considérée comme une antenne à faible gain. Dans le domaine spatial, de telles antennes sont généralement utilisées pour la télémétrie, la poursuite et le sous-système de commande TTC (Telemetry, Tracking & Command), car ce dernier doit être exécutable dans toutes les phases de la tâche, même si le contrôle de l'attitude est perdu.



Figure I-6 : Exemples d'antennes Omnidirectionnel[I.4].

II.1.A.3) Antenne hémisphérique

Répondre aux besoins de petite taille et de fréquence unique légère Antennes hémisphériques ou quasi-hémisphériques, fonctionnant dans les bandes S, C ou X, Les antennes de groupe de patch excité ont été développées par RUAG Aerospace en Suède dans la Figure.



Figure I-7 : Antenne bande X par RUAG[I.3].

Ils se composent d'une courte coupelle cylindrique avec une section transversale de Circulaire et excitateur. Utilisez deux éléments de patch circulaires pour inspirer la coupe, ou un patch. Mise sous tension à montage par le bas ou à montage unique à la fois et exciter lesdeux interférences opposées pour produire une polarisation circulaire.

II.1.B.Selon le gain

II.1. B.1. Antennes à gain faible $G \leq 6\text{dB}$

L'antenne patch est une pastille métallique à la surface d'un substrat diélectrique dont la face inférieure est métallisée. 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.

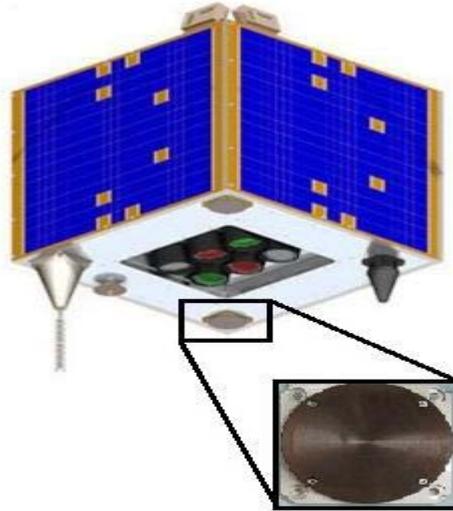


Figure I-8 : Antenne patch micro-ruban bande S pour microsatellite de Surrey SSTL[I.5].

II.1. B.2. Antennes à gain élevé $G \geq 6\text{ dB}$

Les antennes à réflecteur parabolique et les réseaux d'antennes patches et les antennes destinées pour les applications de l'espace lointain par exemple les antennes Cassini sont des antennes à gain élevé.



Figure I-9 : Antenne à réflecteur (AstroMesh) d'INMARSAT-4[I.7].

II.1.C.Selon l’orbite

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

- Les orbites basses, dites LEO (Low Earth Orbit) d’une altitude variant entre 600 et 1600 km
- L’orbite géostationnaire, dite GEO (Geostationary Orbit) située à 36000 km.
- 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.

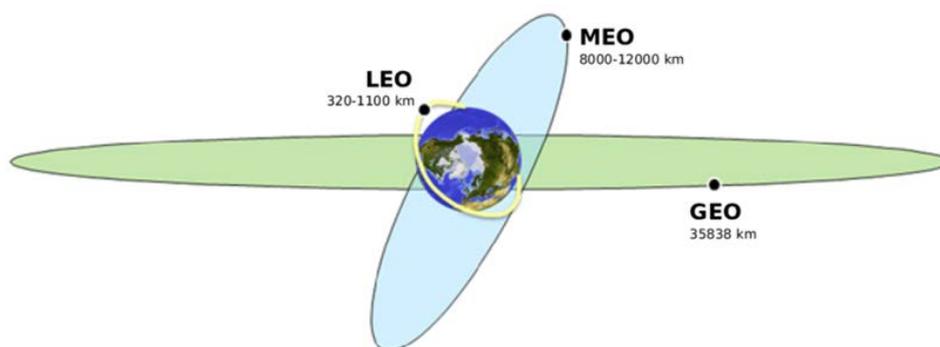


Figure I-10 : Les différents types d’orbites [I.8].

II.2. Les différentes applications des antennes

II.2.A. Selon l’orbite

Ce tableau représente des différents types d’orbites et leur mission ou bien applications possibles :

Orbite	Altitude	Missions possibles
Orbite basse LEO	600 – 1600 Km	Observation de la terre, météo Télécommunications (constellations)
Orbite moyenne MEO	10 000-20 000 km	Télécommunications (Constellations), positionnement par satellites, missions scientifiques
Orbite géostationnaire GEO	35 786 km	Télécommunications, positionnement par satellites, Missions scientifique

Tableau I-1 : Les différents types d'orbites et leur mission ou bien applications possibles [I.9]

II.2.B. Selon le type d'antenne

Les antennes doivent être classées pour comprendre plus clairement leur structure physique et leur fonctionnalité. Il existe de nombreux types d'antennes en fonction des applications.

Type des antennes	Exemple	Applications
Antennes filaires	Antenne dipôle, Antenne monopolaire, Antenne hélice, Antenne boucle	Applications personnelles, bâtiments, navires, automobiles, vaisseaux spatiaux.
Antennes à ouverture	Guide d'ondes (ouverture), antenne cornet	Applications encastrées, avions, vaisseaux spatiaux
Antennes à réflecteur	Réflecteurs paraboliques, Réflecteurs en coin	Communication par micro-ondes, suivi des satellites, radioastronomie
Antennes à lentille	Plan convexe, Plan concave, Lentilles convexes-convexes, Lentilles concaves-concaves	Utilisé pour les applications à très haute fréquence
Antennes à micro-ruban	Patch métallique de forme circulaire ou rectangulaire au-dessus du plan de masse.	Avions, vaisseaux spatiaux, satellites, missiles, voitures, téléphones portables, etc.
Antennes-réseaux	Antenne Yagi-Uda, réseau de microbandes, réseau d'ouvertures, réseau de guides d'ondes à fentes.	Utilisé pour les applications à très haut gain, principalement lorsqu'il est nécessaire de contrôler le diagramme de rayonnement.

Tableau I-2 : Les différents types d'antennes et leurs applications[I.13]

III. Caractéristique des antennes

Un grand nombre de paramètres permettent de caractériser les antennes tels que la directivité, le diagramme de rayonnement, la bande passante, la polarisation, etc.

Alors la performance d'une antenne peut être évaluée à partir de ses paramètres qui sont présentées ci-dessous.

III.1. Diagramme de rayonnement

La représentation graphique de la fonction caractéristique de l'antenne porte le nom de diagramme de rayonnement. Ce dernier représente le changement de la puissance rayonnée issue de l'antenne dans tous les trajets de l'espace. Ce paramètre dépend de la structure globale de l'antenne.

Le diagramme de rayonnement peut diviser en deux formes typiques malgré chacun d'eux se varie en fonction de l'antenne (Omnidirectionnel, Directif).

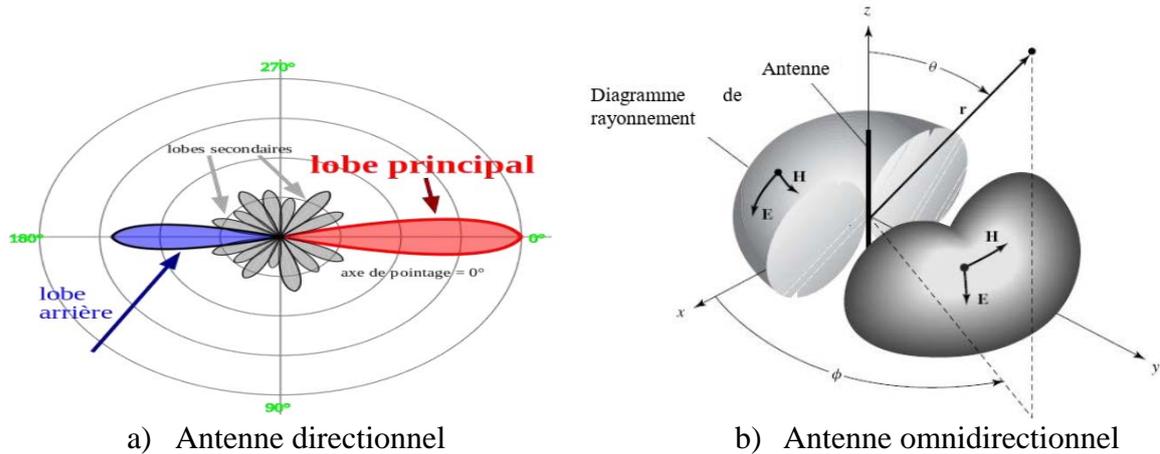


Figure I-11: Les différents formes typiques de diagramme de rayonnement [I.12].

III.2. Directivité

La directivité d'une antenne caractérise la manière dont cette antenne concentre son rayonnement dans certaines directions de l'espace. La directivité est définie comme : le rapport de l'intensité de rayonnement dans une direction de l'antenne par rapport à l'intensité de puissance que rayonnerait la source isotrope. Elle est donnée par la relation suivante :

$$D = 4\pi * \frac{P(\theta, \varphi)}{P_r} \quad \dots (I - 1)$$

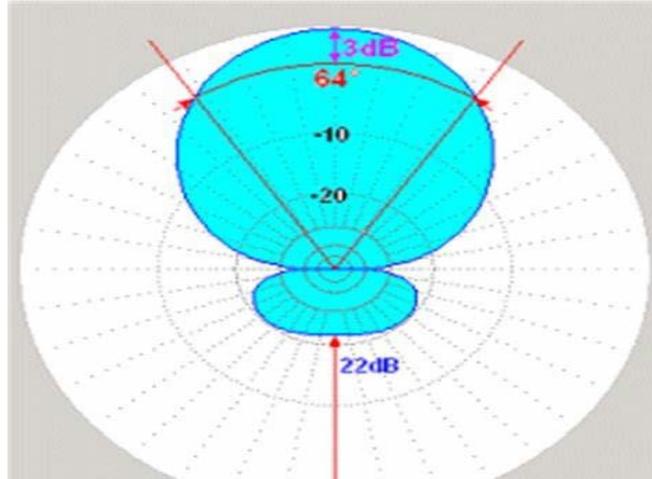


Figure I-12 : Directivité d'une antenne [I.10]

P_r : est la puissance totale rayonnée.

$P(\theta, \varphi)$: puissance rayonnée par unité d'angle solide

III.3. L'impédance d'entrée

Pour évaluer l'impédance d'une antenne, on considère une antenne à l'émission. L'antenne est équivalente à une charge à l'entrée de laquelle existent un courant I_{in} et une tension V_{in} . Le rapport de ces deux quantités fournit l'impédance Z_{in} .

$$Z_{in} = \frac{v_{in}}{I_{in}} = R_{in} + jX_{in} \quad \dots (I - 2)\#$$

Avec :

X_{in} : La partie réactive (réactance) de l'antenne, elle représente la puissance stockée dans les régions proches du champ rayonné.

R_{in} : La partie active est reliée aux champs (puissance) rayonnés et à la puissance perdue par effet de joules. Elle est constituée de deux composantes, une résistance de rayonnement R_r et une résistance de perte

$$R_p(R_{in} = R_p + R_r) \quad \dots (I - 3)$$

La puissance associée à la résistance R_r est la responsable de rayonnement de l'antenne, tandis que la puissance dissipée par la résistance R_p est perdue en chaleur dans l'antenne. D'autre part, l'impédance d'entrée de l'antenne peut s'écrire en fonction du coefficient de réflexion S_{11} sous la formule :

$$Z_{Ant} = Z_C * \frac{1 + |S_{11}|}{1 - |S_{11}|} \quad \dots (I - 4)$$

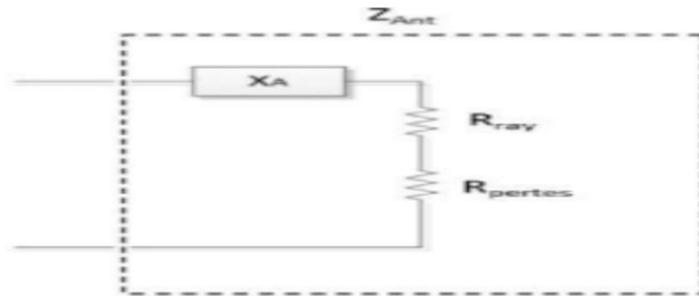


Figure I-13 : Représentation de l'impédance d'antenne[I.13]

III.4. Gain

Le gain $G(\theta, \varphi)$ d'une antenne dans une direction (θ, φ) est le rapport entre la puissance rayonnée dans une direction donnée $P(\theta, \varphi)$ sur la puissance que rayonnerait une antenne isotrope sans pertes.

En général, le gain G correspond au gain dans la direction de rayonnement maximal (θ_0, φ_0) . Cette propriété caractérise la capacité d'une antenne à focaliser la puissance rayonnée dans une direction.

$$G = \frac{4\pi * P(\theta_0, \varphi_0)}{P_{in}} \quad \dots (I - 5)$$

P_{in} : puissance totale d'entrée

Remarque : Une antenne omnidirectionnelle présente un gain de 0 dB.

III.5. Le VSWR (Voltage Standing Wave Ratio) (ROS)

Pour qu'une antenne fonctionne efficacement, le transfert maximum de puissance doit être entre l'émetteur et l'antenne. Ce transfert ne s'effectue pas s'il n'y a pas adaptation entre l'entrée de l'antenne et l'émetteur.

La puissance peut être transférée si l'impédance de l'émetteur est le complexe conjugué de l'impédance de l'antenne :

$$Z_{in} = Z_s^* \quad \dots (I - 6)$$

Chapitre I : Généralités sur les antennes utilisées dans le domaine spatial

Avec l'impédance de sortie de l'émetteur :

$$Z_s = R_s + jX_s \quad \dots (I - 7)$$

Circuit équivalent d'une antenne en émission.

Si cette condition n'est pas satisfaite, et une partie de la puissance est réfléchi, cela conduit à la création d'ondes stationnaires, qui peut être caractérisé par un paramètre appelé le rapport d'ondes stationnaires (ROS) ou bien VSWR.

- Le VSWR est donné par Markov par :

$$VSWR = \frac{1 + |S_{11}|}{1 - |S_{11}|} \quad \dots (I - 8)$$

Avec :

$$S_{11} = V_r V_i = Z_{in} - Z_s Z_{in} + Z_s \quad \dots (I - 9)$$

Avec ;

V_r : Amplitude de l'onde réfléchi.

V_i : Amplitude de l'onde incidente.

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

III.6. Le coefficient de réflexion (S_{11}) (adaptation)

D'une manière générale, lorsqu'une onde incidente change de milieu de propagation ou rencontre une nouvelle interface, une partie de cette onde incidente est réfléchi et l'autre partie est transmise dans le nouveau milieu. Le coefficient de réflexion d'une antenne se définit comme étant le rapport des amplitudes des ondes incidentes sur les ondes réfléchies. Pour une antenne d'impédance Z_{ant} , reliée à la source par une ligne d'impédance caractéristique Z_c (souvent égale à 50 Ω), le coefficient de réflexion peut être défini comme suit :

$$S_{11} = \Gamma = \frac{Z_{ant} - Z_c}{Z_{ant} + Z_c} \quad \dots (I - 10)$$

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

$$|S_{11}|_{dB} = 20 \log |S_{11}| \quad \dots (I - 11)$$

Chapitre I : Généralités sur les antennes utilisées dans le domaine spatial

Le coefficient de réflexion permet de connaître la qualité d'adaptation d'une antenne. En effet, plus son module tend vers l'infini, plus l'antenne est adaptée. Souvent, la fréquence de résonance d'une antenne est celle où le coefficient de réflexion est minimal.

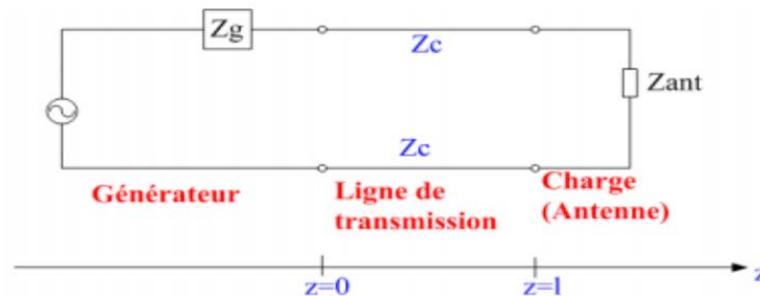


Figure I-14 : Schéma d'une antenne connectée à une ligne de transmission et un générateur

III.7. La polarisation

La polarisation d'une antenne indique la direction de son champ électrique E (la direction de l'onde qu'elle rayonne ou qu'elle reçoit).

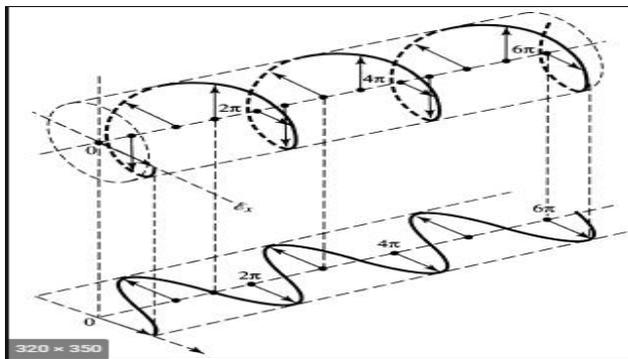


Figure I-15 : Rotation d'une onde plane et son ellipse de polarisation en fonction du temps à $0Z$ (1) Rotation de l'onde et (2) ellipse de polarisation [I.20]

Il existe trois types de polarisation :

III.7.A. Polarisation linéaire :

La direction du vecteur champ électrique reste constant au cours du temps, sa trajectoire est donc un segment de droite.

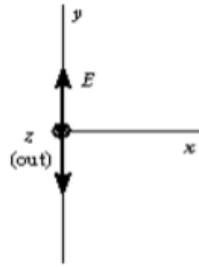


Figure I-16 : La polarisation linéaire[I.13]

Un dipôle génère classiquement une « OEM » polarisée linéairement. Lorsque la polarisation de l'antenne est linéaire, le diagramme de rayonnement est celui d'un dipôle magnétique.

III.7.B. Polarisation circulaire :

La polarisation est dite circulaire lorsque le vecteur champ E décrit un cercle avec le temps. Ce champ E a deux composantes de même amplitude et déphasées de 90°

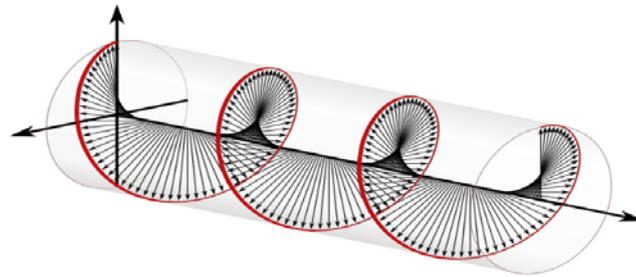


Figure I-17 : Polarisation circulaire[I.14].

III.7.C. Polarisation elliptique :

La polarisation est dite elliptique lorsque le vecteur champ E décrit une ellipse dans le temps. Elle correspond au cas général d'un champ E comprenant deux composantes d'amplitudes différentes déphasées de $\pi/2$.

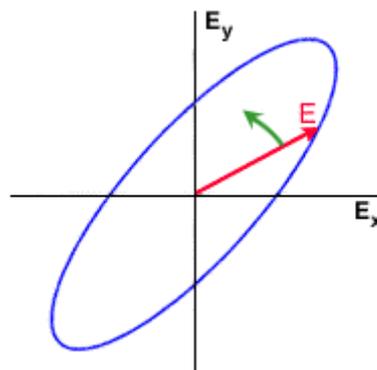


Figure I-18 : Polarisation elliptique[I.15]

Chapitre I : Généralités sur les antennes utilisées dans le domaine spatial

Certaines antennes ont une polarisation elliptique ou circulaire. Si la polarisation de l'antenne n'est pas adaptée à la polarisation de l'onde le signal subit un affaiblissement pouvant aller jusqu'à l'infini.

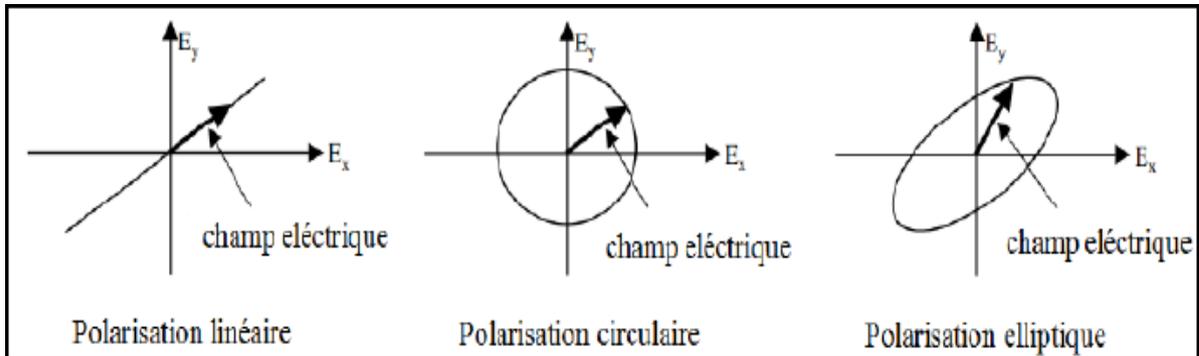


Figure I-19 : Les différents types de polarisation [I.5].

III.8. Bande passante

La bande passante d'une antenne définit la plage de fréquence dans laquelle le coefficient de réflexion est inférieur à un seuil fixé arbitrairement.

On déduit souvent la bande passante à partir de la courbe de son coefficient de réflexion inférieure à -10 dB.

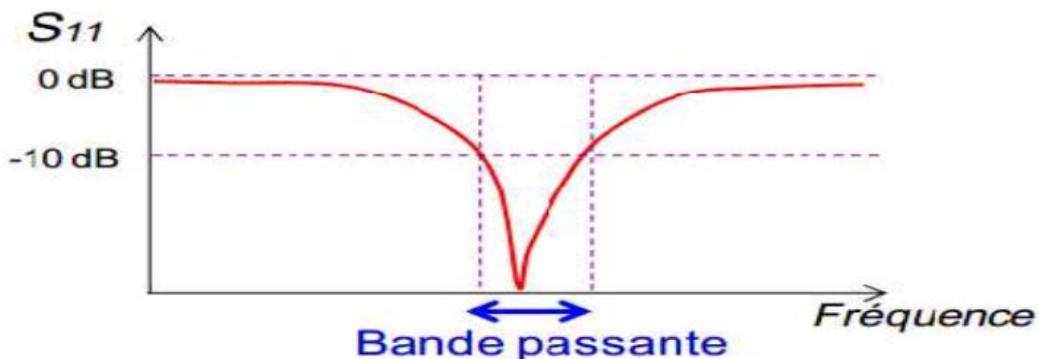


Figure I-20 : Illustration de la bande passante à -10 dB d'une antenne [I.17].

Cette figure représente le paramètre d'une antenne en fonction de la fréquence et met en évidence la bande passante à -10 dB.

La fréquence de résonance, correspond à la fréquence pour laquelle l'antenne est la mieux adaptée, c'est-à-dire pour laquelle le coefficient de réflexion est le plus faible [I.5].

III.9. Bande de fréquence :

La fréquence de résonance de l'antenne dépend d'abord de ses dimensions mais aussi des éléments qui lui sont ajoutés. Par rapport à la fréquence de résonance centrale de l'antenne, on

peut tolérer un certain affaiblissement (généralement 3 décibels) qui détermine la fréquence minimum et la fréquence maximum d'utilisation

Désignation	Bande de fréquence ITU
Bande L	De 1 à 2 GHz
Bande S	De 2 à 4 GHz
Bande C	De 4 à 8 GHz
Bande X	De 8 à 12 GHz
Bande Ku	De 12 à 18 GHz
Bande K	De 18 à 26 GHz
Bande Ka	De 26 à 40 GHz
Bande Q	De 30 à 50 GHz
Bande U	De 40 à 60 GHz
Bande V	De 46 à 56 GHz
Bande W	De 56 à 100GHz

Tableau I-3 : Tables les bandes de fréquences[I.18].

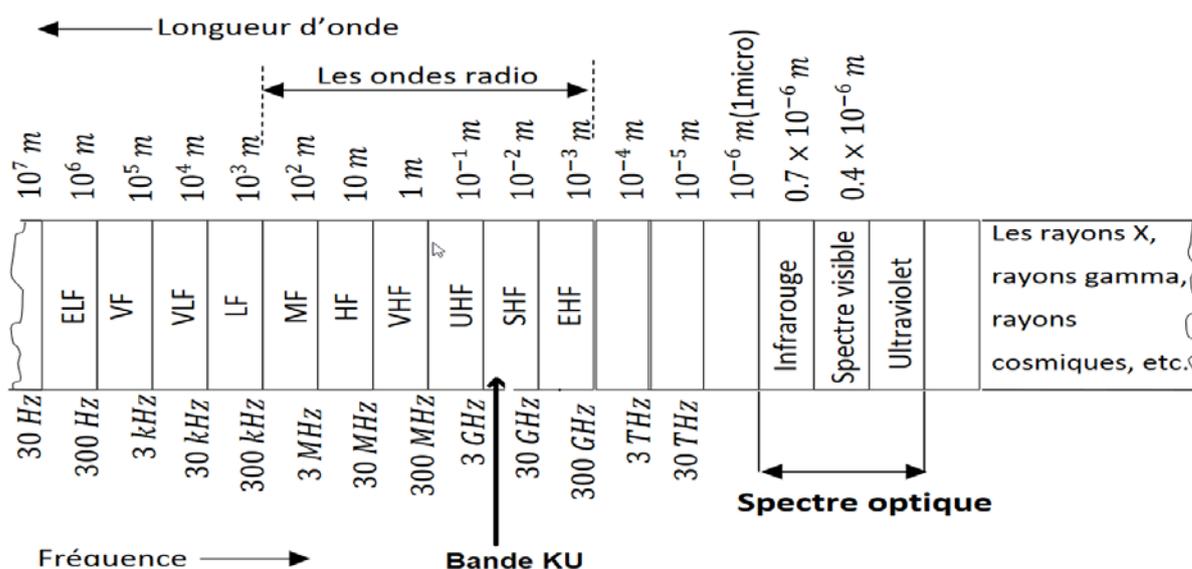


Figure I-21 : Domaine de spectre électromagnétique[I.19].

III.10. Les avantages et les inconvénients de la bande Ku

III.10.A. Les avantages à utiliser une bande Ku

Les systèmes de bandes Ku nécessitent de plus petites antennes à cause de la grande puissance du transpondeur de leurs satellites et de leur fréquence très élevées, qui se traduisent par de plus petites, antennes bon marché sur le sol entraînant des coûts de démarrage et de transport faibles. Les plus petites antennes des bandes Ku peuvent être facilement installées presque sur n'importe quelle surface du sol, les toits ou boulonnés sur le côté du bâtiment. Cela est une considération importante pour les régions à espace limité.

III.10.B. Les inconvénients à utiliser une bande Ku

Les systèmes bandes Ku sont plus affectés par les chutes de pluie à cause de leur fréquence élevée de fonctionnement et de ce fait sont habituellement considérés inappropriés pour des applications critiques sous les tropiques. A moins que des mesures spécifiques soient prises pour réduire l'atténuation de surplus de pluie, par exemple en utilisant des antennes plus larges. Cet inconvénient a aussi été légèrement compensé par les satellites de grande puissance fabriqués de nos jours.

IV. Architecture d'un système de télécommunications par satellite

IV .1. Le secteur spatial

Les satellites artificiels sont des Machines fabriquées par l'homme et placée en orbite autour d'un astre, en particulier de la Terre, par une fusée ou un système de transport spatial. Par opposition, on parle de satellites naturels pour les corps célestes (ou « lunes ») qui gravitent autour d'un astre de masse plus importante.

IV .2. Liaison satellitaire (Le secteur terrien)

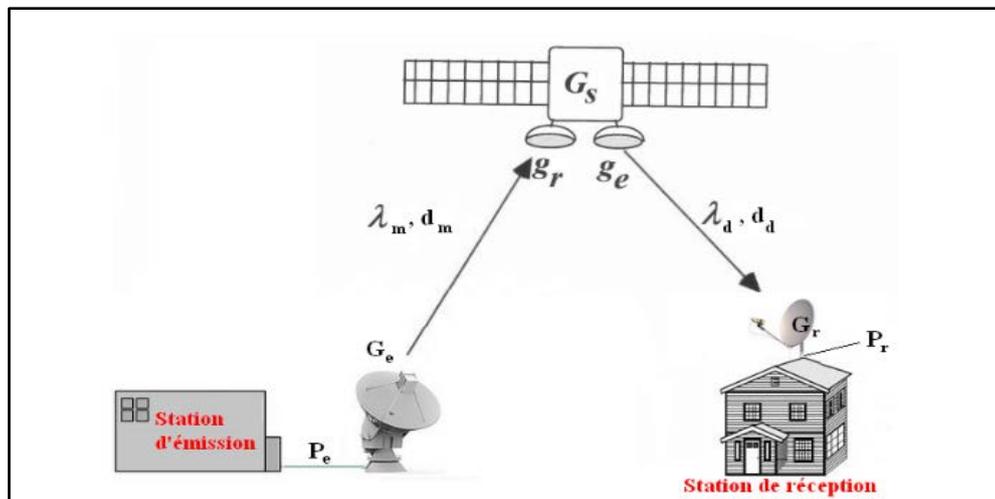


Figure I-22 : Liaison station d'émission-Satellite-station de réception[I.20]

PE : Puissance émise par l'émetteur

Pr : Puissance reçue par le récepteur

Ge : Gain de l'antenne émettrice

Gr : Gain de l'antenne réceptrice

Gs : Gain du transpondeur du satellite

λd : Longueur d'onde du faisceau descendant

dm : Distance entre l'émetteur et le satellite

dd : Distance entre le satellite et le récepteur

gé : Gain de l'antenne émettrice du satellite

gr : Gain de l'antenne réceptrice du satellite

λm : Longueur d'onde du faisceau montant

IV .3. Les principaux paramètres d'une liaison satellitaire

Une liaison de communication par satellite :

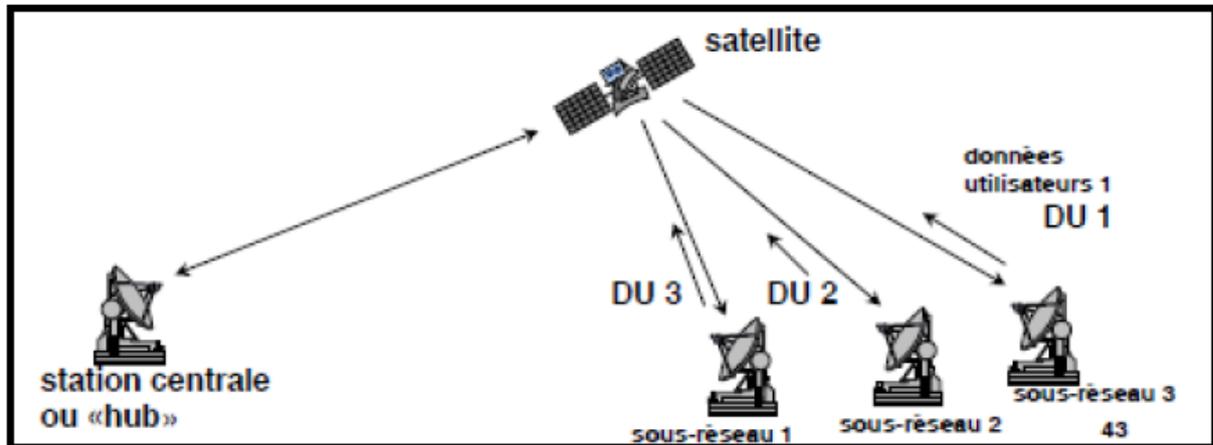


Figure I-23 : Configuration d'un lien de communication par satellite[I.21].

IV.4. Les différents paramètres importants pour la conception d'une liaison

IV.4.A. EIRP

Le produit de la puissance d'émission et du gain de l'antenne d'émission, P_t , G_t , est appelé puissance rayonnée isotrope équivalente, généralement exprimée en EIRP (puissance rayonnée isotrope équivalente). Il est souvent utilisé comme indicateur de la capacité de transmission d'une station de base.

$$\text{EIRP} = P_t \cdot G_t [\text{W}] \quad \dots \text{ (I - 12)}$$

IV.4.B. Puissance de transmission et de réception

Une antenne de réception dirigée dans la direction de rayonnement principal de l'antenne d'émission va recevoir une fraction de la puissance rayonnée. Cette fraction est proportionnelle à la surface de l'antenne de réception et à son orientation par rapport à la direction de propagation de la puissance émise.

La puissance reçue s'écrit :

$$P_r = \frac{P_T G_T A_R}{4\pi d_2^2} \quad \dots \text{ (I - 13)}$$

Avec

$$A_r = \frac{D_2^2}{4} \eta \pi \quad \dots \text{ (I - 14)}$$

IV.4.C. Gain d'antenne

Dans les calculs de liaison, le gain est la caractéristique la plus importante d'une antenne. Il est défini comme le rapport de la puissance rayonnée par unité d'angle solide de l'antenne dans une direction à la puissance rayonnée par unité d'angle solide de l'antenne de référence

IV.4.D. Les pertes dans l'espace libre

Le calcul de l'affaiblissement en espace libre est une étape fondamentale dans le calcul des liaisons de communication par satellite. Dans ce type de système de communication, les antennes d'émission et de réception sont supposées alignées face à face dans l'espace libre et séparées d'une distance d suffisamment grande, en mètres. Soient respectivement G_t et G_r le gain des antennes d'émission et de réception, A_r la surface effective de l'antenne de réception, P_t la puissance d'émission et λ la longueur d'onde. La puissance reçue P_r peut être exprimée selon l'équation de Fris :

$$P_r = P_t G_t \frac{A_r}{4\pi d^2} = P_t G_t G_r \frac{\lambda^2}{4\pi d^2} \quad \dots \text{(I - 15)}$$

$$A_r = G_r \frac{\lambda^2}{4\pi} \quad \dots \text{(I - 16)}$$

Ainsi, les pertes dans l'espace libre L_{fs} peuvent être exprimées comme le rapport de la puissance reçue par la puissance transmise. Si en plus, nous ne supposons que les antennes de transmission et de réception sont isotropes nous pouvons exprimer les pertes de transmission comme suit :

$$L_{fs} = \frac{(4\pi d^2)}{\lambda^2} \quad \dots \text{(I - 17)}$$

IV.4.E. Perte par absorption atmosphérique

Les molécules gazeuses de la troposphère, telles que l'oxygène et la vapeur d'eau, sont un facteur majeur d'atténuation des ondes radio sous forme d'absorption résonnante. L'atténuation peut être causée par des phénomènes d'absorption et de diffusion provoqués par des particules de glace ou des gouttelettes d'eau. La perte de propagation (L_p) des ondes radio dépend de la fréquence en raison des effets atmosphériques.

IV.4.F. Température de bruit

Le niveau de bruit au niveau des récepteurs, dans un système de communication par satellite, doit être extrêmement faible puisque le signal désiré est souvent assez faible. Ce niveau de bruit peut être exprimé en termes de température absolue fictive.

Particulièrement, quand le bruit thermique, par unité de largeur de bande, d'un objet est équivalent au bruit thermique généré par une résistance de 50 Ω à une température absolue T.

La puissance du bruit thermique par unité de largeur de bande, N_0 , peut être exprimée par kT avec k désigne la constante de Boltzmann ($k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$).

La température T qui correspond à ce bruit thermique est appelée température de bruit (noise temperature en anglais).

Il est souvent recommandé d'exprimer N_0 en décibel selon l'équation suivante :

$$[N_0] \text{ dB} = 10 * (k) + 10 * \log(T) = -228,6 + 10 * \frac{\log(T) \text{ dB}}{\text{HZ}} \dots \text{(I - 18)}$$

IV.4.G. Bilan de liaison

La grandeur intéressante pour l'évaluation de performances de la liaison est le rapport signal à bruit SNR. Pour la transmission numérique, la probabilité d'erreur sur les symboles binaires reçus doit être raisonnable, compte tenu de l'ensemble des dégradations.

L'évaluation du rapport SNR au récepteur se fait à l'aide du bilan de liaison qui recense l'ensemble des dégradations aux divers endroits de la liaison. [I.6]

$$\text{SNR} = \frac{P_R}{N} = \frac{\text{EIRP} \cdot G_R}{N L_{fs}} = \frac{\text{EIRP} \cdot G_R}{B N_0 L_{fs}} \dots \text{(I - 19)}$$

$$N_0 = \frac{N}{B} \dots \text{(I - 20)}$$

$$\frac{P_R}{N_0} = \frac{\text{EIRP} \cdot G_R}{K L_{TOT}} \dots \text{(I - 21)}$$

Tel que :

- N : le bruit global du système.
- L_{TOT} : les pertes totales (perte de l'espace libre, pertes de propagation, perte de désadaptation, perte du guide d'onde d'alimentation (feeder) ... etc).
- B : la bande passante de l'antenne.



Chapitre I : Généralités sur les antennes utilisées dans le domaine spatial

- G_R/T représente la figure de mérite.

V. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté, d'une manière générale, les antennes, leur différents types et caractéristiques, tels que leur diagramme de rayonnement, directivité, etc.

Cette maîtrise nous permet de comprendre leur comportement et leur adaptation au différent milieu dont elles sont implémentées à des gammes de fréquences différentes. L'environnement spatial est un milieu riche de contraintes pour les engins spatiaux. Plus particulièrement sur certains composants tels que les antennes à cause de leurs comportements physiques importants.

La diversité des applications spatiales implique l'utilisation de large gamme des antennes. Pour cela, le deuxième chapitre sera consacré plus spécifiquement a des antennes patchs en bande Ku.

Chapitre II :
Caractéristique d'antenne
patch à base de
semi-conducteur

II.1. Introduction

Dans les communications sans fils, télécommunications spatiales et radars, il est utilisé plus couramment des antennes avec réflecteurs. Ces appareils puissants ont un rendement considérable, pureté de polarisation élevée et large bande de fréquence. Par exemple, pour les applications mobiles, le poids et le volume des antennes sont les deux principaux inconvénients. Les antennes imprimées ou micro-ruban ont levé ces problèmes. Dans les années soixante, la technologie dite des circuits imprimés était largement utilisée surtout dans le domaine de l'électronique. Appliquée actuellement la technologie Antenne micro-ruban (ou antenne patch)[II.1].

Dans ce chapitre, nous passerons en revue quelques définitions et l'histoire des antennes Micro-strip, et la technologie de ces antennes. Nous allons définir l'antenne patch. Nous donnerons leurs caractéristiques, domaines d'utilisation, avantages et leurs inconvénients.

En 1953, Georges propose pour la première fois le concept d'antenne imprimée champ. Le premier brevet utilisant ce concept a été déposé par Henri en 1956 Gutton et Georges Boissinot. Cependant, ce n'est que dans les années 1970 que nous avons vu la réalisation du premier prototype est apparue, notamment grâce à l'amélioration lithographie de cuivre et d'or sur des substrats diélectriques, et avancées en modélisation. En 1972, John Howell a produit l'impression sur Polarisation linéaire et circulaire pour les bandes L et UHF de la NASA. Durant la même période, Robert Munson de Ball Aerospace Systems Toute la circonférence du missile [II.1].

Actuellement, aucun terme français n'a été établi pour désigner une antenne nommée "patch" en anglais ("paved" ou "pastille" en français). Les plus courantes sont les "antennes imprimées" ou les "antennes micro-ruban" car la première antenne imprimée rectangulaire composée d'une partie de ligne micro-ruban rayonnante [II.2].

II.2. Antenne patch :

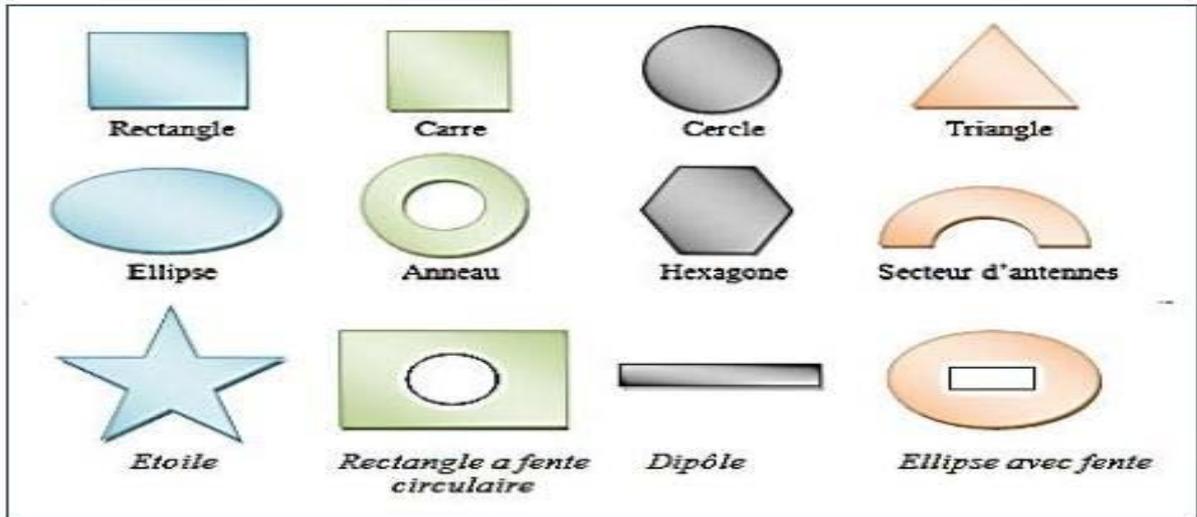
II.1. Les différentes formes d'une antenne patch

L'élément rayonnant de l'antenne patch peut prendre plusieurs formes qui peuvent être rectangulaire, carrée, circulaire ou simplement un dipôle de dimension d'ordre de demi longueur d'onde ($\lambda/2$). Les formes suivantes sont les plus courantes car elles présentent une grande facilité d'analyse et de fabrication, mais également un diagramme de rayonnement très intéressant. Ils

Chapitre II : Caractéristique d'antenne patch à base de semi-conducteur

ont la particularité de présenter une large bande passante et d'occuper très peu d'espace, ce qui les rend particulièrement adaptés à la réalisation de réseaux d'antennes [II.4].

Parmi toutes les formes des éléments rayonnants, le rectangle est le plus facile à appréhender pour la compréhension des mécanismes de rayonnement des antennes patch



FigureII-1:Différentes forme d'élément rayonnant[I.5].

II.2. L'utilisations des antennes patch

Les antennes patch sont largement utilisées. Leurs applications couvrent un large domaine de fréquence allant de 100MHz jusqu'à 100GHz.[II.6]. La technologie de ces antennes micro-rubans est issue de celle des circuits imprimés ce qui leur confère certains avantages tels que : le faible poids, leur volume réduit, la conformabilité et la possibilité d'intégrer les circuits micro-ondes au niveau des antennes cependant, elles présentent même des inconvénients [II.7]

Les avantages	Les inconvénients	Les applications
<ul style="list-style-type: none"> • Profil plat • Faible poids • Volume réduit • simplicité de leurs structures • Faible coût • Plusieurs éléments radiants peuvent être placés sur la même plaque 	<ul style="list-style-type: none"> • Faible bande passante • Faible puissance. • Faible gain • Impureté de la polarisation • Un rayonnement parasite de l'alimentation et des ondes de surface 	<ul style="list-style-type: none"> • Les contrôles et commandes à distance. • Les radars, • Les communications spatiales et la téléphonie mobile. La télémessure par missile. Les équipements portatifs. Les éléments d'alimentation dans les antennes complexes. • Les antennes d'émission utilisées en médecine.

Tableau II-1 : Les différents avantages et inconvénients et applications les antennes patch[II.8]

II.3. Géométrie Antenne Imprimée

L'antenne micro-ruban est constituée d'une mince couche métallique d'épaisseur très petite par rapport à la longueur d'onde dans l'espace libre λ_0 ($e\lambda_0$) imprimée sur un diélectrique de hauteur h très faible devant λ_0 ($h\lambda_0$) au-dessus d'un plan de masse. A sa résonance, l'excitation du résonateur donne naissance à des champs électriques diffractés en phase sur les bords de l'antenne. Très souvent, cet élément rayonnant (appelé aussi patch) prend une forme géométrique simple comme un carré, un rectangle, un cercle ou encore un triangle, etc. Ces formes d'antennes sont les plus utilisées à cause de leur analyse et leur synthèse simple. Les performances électriques de ce résonateur sont alors intrinsèquement liées à la géométrie et les dimensions du patch, de la hauteur et de la nature du substrat support

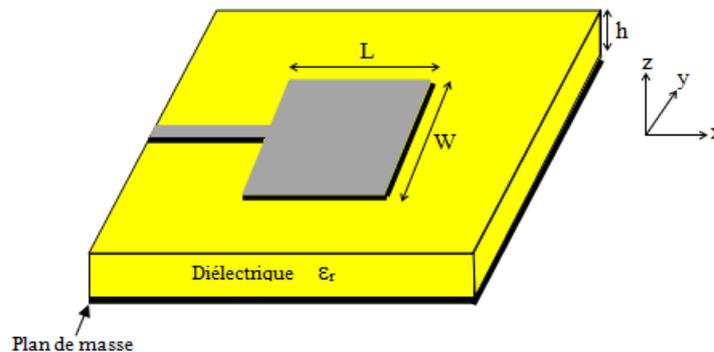


Figure II.2: Antenne patch micro-ruban[II.3].

II.3.A. Description d'une antenne patch

On général l'antenne a une structure de base qui se compose par :

- ✓ **Le plan de masse** : est constitué d'un métal hautement conducteur(généralement du cuivre) recouvrant la partie inférieure du substrat. il permet de rayonner le dessus.
- ✓ **Élément rayonnant (patch)** : La tôle rayonnante a une longueur L et une largeur W ,situéesur le dessus (motif), elle est généralement constituée d'un matériau conducteur comme le cuivre ou l'or (en raison de leur conductivité élevée). La longueur du patch métallique est $\lambda/2$. Lorsque l'antenne est excitée, les ondes générées dans le diélectrique subissent des réflexions et l'énergie est rayonnée depuis les bords du patch métallique, ce qui est très faible
- ✓ **Le substrat diélectrique** : est constitué de matériaux isolants et la hauteur h estgénéralement petite avant la longueur d'onde de fonctionnement, mais ne doit pas être inférieure à $0,025$ longueur d'onde, sinon cela réduira l'efficacité de l'antenne et utilisera la constante diélectrique relative ϵ_r pour augmenter la puissance rayonnée de l'antenne et réduire la perte par effet Joules et augmenter la bande passante de l'antenne.

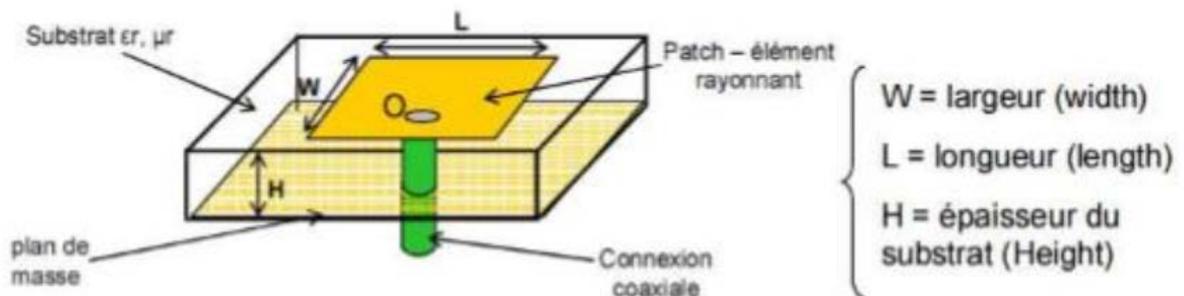


Figure II-3 : Structure d'une antenne patch rectangulaire[II.3]

II.3.B. Antenne patch rectangle

La conception de l'antenne est basée sur la transformation d'une antenne rectangulaire simple à bande passante réduite en une structure répondant au critère de bande passante, en introduisant quelques perturbations sur sa géométrie [II.9]. Pour un patch rectangulaire, la bande passante dépend généralement de la géométrie de l'antenne, la permittivité relative du substrat r ainsi que son épaisseur h . La technique d'élargissement de bande passante la plus simple est la réduction du facteur de qualité.

II.3.C. Les paramètres géométriques de l'élément rayonnant

La détermination des paramètres géométriques de l'élément rayonnant est basée sur le :
Calcul de la permittivité effective en fonction de la largeur du patch W et le calcul de la longueur L du patch en fonction de la permittivité effective

Sachant que la propagation des ondes dans une ligne micro-ruban s'effectue à la fois dans le milieu diélectrique et dans l'air. Du point de vue modélisation, les deux milieux sont remplacés par un unique milieu effectif caractérisé par un constant diélectrique exprimé par [II.10]

$$\epsilon_{\text{reff}} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2 \left(1 + \frac{12h}{w}\right)^{\frac{1}{2}}} \quad \dots \text{(II - 1)}$$

Le patch rectangulaire représente une longueur effective, car le rayonnement se base sur la longueur réelle ainsi que les deux fentes. Pour le patch rectangulaire la longueur L est étendue de deux ΔL (Figure II-4).

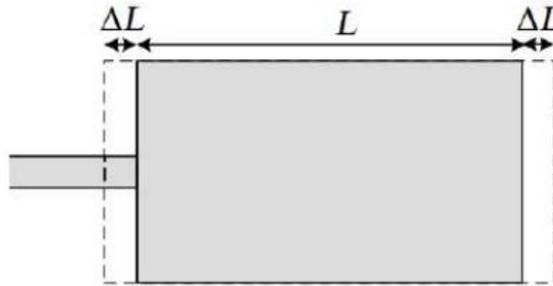


Figure II-4: Extension de la longueur physique L [I.11]

$$L = \frac{c}{3f\sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}} - 2\Delta L \quad \dots \text{(II - 2)}$$

Avec

Cette extension en L est donnée par la formule de Hammerstad :

$$\Delta L = 0.412h \frac{(\epsilon_{\text{reff}} + 0.3) \left(\frac{w}{h} + 0.264\right)}{(\epsilon_{\text{reff}} - 0.258) \left(\frac{w}{h} + 0.8\right)} \quad \dots \text{(II - 3)}$$

Où :

- C : la célérité de la lumière dans l'air,
- F : la fréquence
- L : la longueur résonante du patch

Chapitre II : Caractéristique d'antenne patch à base de semi-conducteur

- W : largeur du patch
- h : l'épaisseur du substrat
- ϵ_{eff} : permittivité effective du milieu,

La longueur effective L_{eff} du patch devient alors :

$$L_{eff} = L + 2\Delta L \quad \dots (II - 4)$$

- La fréquence de résonance f_r est donnée par :

$$f_r = \frac{c}{2L_{eff}\sqrt{\epsilon_{reff}}} \quad \dots (II - 5)$$

- Cependant, la largeur du patch W est calculée à partir de la formule :

$$W = \frac{c}{2f_r} = \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}} \quad \dots (II - 6)$$

II.3.D. Calculs des dimensions théoriques

L'Antenne patch est constituée d'un élément rayonnant de forme carrée de longueur L et largeur W , imprimé sur un substrat d'une épaisseur h et de permittivité.

Le tableau suivant représente les équations utilisées pour le calcul de notre antenne à une fréquence de 11.7GHz.

Paramètre d'antenne	Equations
Longueur du patch (L)	$L = l_{eff} - 2\Delta L$
Longueur effective (Leff)	$Leff = \frac{c}{2f_r \sqrt{\epsilon_{reff}}}$
L'extension de la longueur (ΔL)	$\Delta L = 0.412h \frac{(\epsilon_{reff} + 0.3) \left(\frac{W}{h} + 0.264\right)}{(\epsilon_{reff} - 0.258) \left(\frac{W}{h} + 0.8\right)}$
Constante diélectrique (ϵ_{reff})	$\epsilon_{reff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[1 + 12 \frac{h}{W}\right]^{-1/2}$
Largeur du patch (W)	$W = \frac{c}{2f_r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}}$
Longueur du substrat (L_g)	$L_g = 1 + 11 + 6 \times h$
Largeur du substrat (W_g)	$W_g = W + 6 \times h$
L'impédance caractéristique de la ligne microruban	$ZC = \frac{119.9}{\sqrt{2(\epsilon_r + 1)}} \left[\ln \left(4 \frac{h}{wf} + \sqrt{16 \left(\left(\frac{h}{wf} \right)^2 + 2} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1} \right) \left(\ln \frac{\pi}{2} + \frac{1}{\epsilon_r} \ln \frac{4}{h} \right) \right]$
La largeur de la ligne simple	$L1 = \frac{\lambda}{2} = \frac{\lambda_0}{2\sqrt{\epsilon_{reff}}}$

Tableau II-2 : tableau des équations utiliser [I.12].

III. Modèle d'optimisation

Une optimisation de différents paramètres qui affectent les caractéristiques de l'antenne permet d'obtenir une antenne réduite avec des meilleures performances. L'antenne patch proposée présente plusieurs avantages : structure simple, petite taille, fabrication facile et bande passante plus large.

III.1. Ligne ou transformateur quart d'onde

Le transformateur à quart d'onde est une méthode qui est utilisée quand il y a un mauvais couplage d'impédance et que celui-ci est une résistance pure.

Chapitre II : Caractéristique d'antenne patch à base de semi-conducteur

Il est donc utilisé pour faire le couplage entre des lignes d'alimentation d'impédance différente. La (Figure II-5) montre un transformateur quart d'onde.

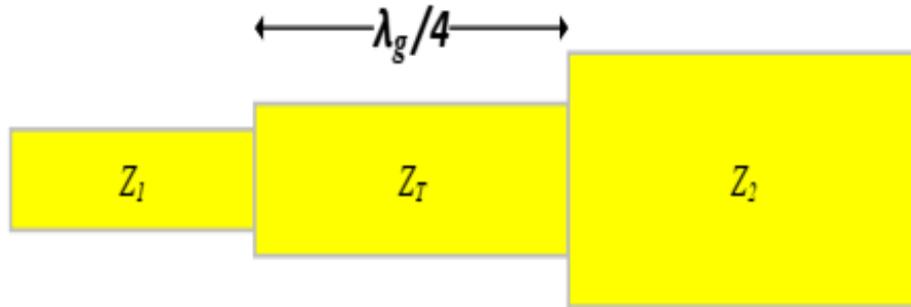


Figure II-5: Transformateur quart d'onde [II.13]

Les équations suivantes, définissent l'utilisation de transformateur quart d'onde.

$$Z_T = \sqrt{Z_1 Z_2} \quad \dots (II - 7)$$

Z_T : Impédance de couplage de la partie centrale (Ω) ;

Z_1 : Impédance résistive de départ (Ω) ;

Z_2 : Impédance cible à atteindre (Ω) ;

$$\lambda_g/4 = \frac{c}{4f\sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}} \quad \dots (II - 8)$$

f : Fréquence de fonctionnement du circuit (Hz) ;

λ_g : Longueur d'onde dans le substrat (m) ;

ϵ_r : Permittivité diélectrique du substrat utilisé (F/m) ;

c : Vitesse de la lumière (m/s) ;

Donc, avec ces 2 équations, on peut transformer une impédance de valeur quelconque en une autre valeur d'impédance de notre choix [II.14].

III.2. Les encoches

Utiliser la technique des encoches ou bien des fentes, l'objectif est de minimiser les ondes réfléchies et diminuer les dimensions de l'antenne pour qu'elle résonne à la fréquence définie.

IV. Généralités sur la miniaturisation

Lors des dernières décennies, nous avons observé une montée exponentielle dans les télécommunications. En effet, les développements des appareils mobiles et tablette sont devenu indispensables dans notre vie de tous les jours.

De nouvelles techniques permettent la miniaturisation des dispositifs électroniques. Plus de leurs petites tailles, ces appareils ont l'avantage de pouvoir communiquer sans fils, et pour cela, ils ont besoin d'un élément primordial qui est l'antenne.

De nos jours, l'antenne occupe de grande place d'où le challenge est de la réduire autant que possible.

La miniaturisation d'une antenne consiste à réduire ses dimensions, sa surface, son volume à fréquence de résonance. Elle doit être intégrée au plus près de l'antenne des circuits d'adaptation nécessaire à son fonctionnement.

Pour cela, des limites théoriques ont été établies par WHEELER 1947 et CHU 1948, ces dernières déterminent comment la taille de l'antenne et la bande passante (ou son facteur de qualité) sont reliées [II.15].

IV.1. Définition d'une antenne miniature

Une antenne miniature ou électriquement petite est l'antenne dont la taille est beaucoup plus petite que la longueur d'onde à sa fréquence de travail.

WHEELER indique qu'une antenne pouvait être considérée comme électriquement petite si ses dimensions maximales étaient inférieures à « K » qui représente le nombre d'onde.

$$K = \frac{2\pi}{\gamma} \quad \dots \text{(II - 9)}$$

Avec « γ » : la longueur d'onde de l'antenne à sa fréquence d'utilisation.

IV.2. Les limites fondamentales des antennes miniatures

IV.2.A. Le facteur de qualité :

Le but de la miniaturisation est de réduire la taille de l'antenne tout en gardant les caractéristiques électromagnétiques optimales (bande passante et le gain). Le facteur de qualité est l'un des critères limitants. Il est inversement proportionnel à la bande passante. C'est un paramètre intrinsèque qui est défini comme dans l'équation suivante :

$$Q = \frac{2W_0 \text{Max}(W_e, W_m)}{PA} \quad \dots \text{(II - 10)}$$

Chapitre II : Caractéristique d'antenne patch à base de semi-conducteur

W_e et W_m sont les quantités moyennes d'énergie stockée dans l'antenne.
PA : c'est la puissance reçue par l'antenne.

IV.2.B. L'efficacité rayonnée :

Elle est définie par le rapport entre la puissance rayonnée et celle reçue par l'antenne. Les pertes au niveau de l'antenne sont modélisées par une résistance en série de perte (R_{LOSS}). On écrit l'efficacité rayonnée de la manière suivante :

$$\eta = \frac{R_{rad}}{R_{rad} + R_{loss}} = \frac{R_{rad}}{R_a} \quad \dots (II - 11)$$

IV.3. Techniques de miniaturisation

IV.3.A. Utilisation des matériaux

IV.3. A.1. Utilisation d'un diélectrique

Pour réduire l'encombrement, on peut aussi jouer sur les propriétés diélectriques des matériaux. En effet de nombreux travaux ont montré que les substrats à forte permittivité, typiquement de l'ordre de 10 à 20 permettaient de réduire les dimensions d'une antenne sans en modifier la géométrie.

Avec un tel matériau, les lignes de champ sont concentrées sous l'antenne. Ce phénomène s'explique par le fait qu'un milieu avec une très haute permittivité influence sur l'organisation des charges électriques. Ainsi avec un substrat de permittivité diélectrique ϵ_r élevée, la longueur d'onde guidée λ_g diminue [II.16].

IV.3. A.2. Utilisation d'un matériau magnéto-électrique :

L'utilisation de matériaux magnéto-diélectriques dont la permittivité et la perméabilité sont toutes les deux supérieures à 1, permet de miniaturiser une antenne sans dégrader ses performances en termes de bande passante. Ils réduisent la taille des antennes imprimées car les dimensions de l'antenne sont inversement proportionnelles à l'indice de réfraction du substrat. [II.17].

IV.4. Caractéristiques des substrats semi-conducteurs

Les composants semi-conducteurs classiques sont réalisés à partir de matériaux tels que le germanium (Ge), le silicium (Si), le sélénium (Se) ou des alliages comme le silicium germanium (SiGe), le carbure de silicium (SiC), l'arséniure de Gallium (AsGa), le nitrure de gallium (GaN) ou le phosphore d'indium (InP). Les plus répandus, dans la fabrication de dispositifs accordables, sont le Si, l'AsGa ou le SiGe.

Chapitre II : Caractéristique d'antenne patch à base de semi-conducteur

Le tableau compare les caractéristiques des matériaux AsGa, Germanium et Silicium (pour une température de 300 K) [II.24].

	AsGa	Ge	Si
Permittivité diélectrique (ϵ_r)	12.9	16	11.8
Hauteur de la bande interdite	1.42 eV	0.75 eV	1.12 eV
Mobilité des électrons	9200 cm ² /(V.s)	3900 cm ² /(V.s)	1450 cm ² /(V.s)
Mobilité des trous	400 cm ² /(V.s)	1900 cm ² /(V.s)	450 cm ² /(V.s)
Constante de pertes (ϵ''/ϵ')	0.0005 [104]		0.0018 [105]
Quantité de porteurs intrinsèques	2.5×10^6 atome/cm ³	2.33×10^{10} atomes/cm ³	7.1×10^3 atomes/cm ³

Tableau II-3 : Caractéristiques des matériaux AsGa, Germanium et Silicium [II.24].

L'AsGa présente de très bonnes performances en termes de tenue en puissance (supportant des valeurs élevées de champ électrique), de rapidité (mobilité élevée des électrons), de pertes et de niveau de bruit. Malgré son coût élevé, ses performances font qu'il est très utilisé en optoélectronique et en hyperfréquences. Par rapport à l'AsGa, l'inconvénient de l'alliage SiGe est son temps de commutation plus élevé (mobilité des porteurs plus faible). Par contre, le coût d'un mm² sur SiGe est de l'ordre de trois fois moins élevé. Sa permittivité plus élevée que l'AsGa est un atout dans la conception de filtres mais un inconvénient pour les antennes.

Par rapport à l'AsGa ou à l'alliage SiGe, le silicium fait partie des semi-conducteurs «lents» (mobilité des électrons et des trous plus faibles). Par contre, c'est une matière première très abondante ce qui entraîne un faible coût dans le cas d'une fabrication à grande échelle. De plus, il possède un oxyde naturel, l'oxyde de silicium (SiO₂), qui est un bon isolant que l'on peut faire croître directement sur le silicium [II.24].

V. Généralité sur les Matériaux

V.1. Conducteurs - Isolants - Semi-conducteurs

Les matériaux ayant la plus faible résistivité à température ambiante, typiquement inférieure à $10^{-5} \Omega\text{cm}$, sont les métaux (cuivre, or, argent, aluminium...). La conduction électrique s'effectue essentiellement par les électrons libres dont la concentration diffère peu d'un métal à l'autre (de 10^{22} à 10^{23}cm^{-3}) quelle que soit sa pureté. Une augmentation de la température provoque une légère augmentation de la résistivité, pouvant s'expliquer par le fait que les électrons libres sont gênés dans leur déplacement par les vibrations (croissantes avec la température) des atomes du métal.

Envisager des matériaux avec une résistivité généralement supérieure à $10^8 \Omega\text{cm}$. En tant qu'isolant, c'est le cas du verre, du mica, du dioxyde de silicium (SiO_2), du carbone (diamant). Cette Le multiple de l'augmentation de température entraîne la libération d'électrons (et "trous") qui peuvent participer à la conduction électrique, ce qui provoque une chute La résistivité varie avec la température.

Entre le métal et l'isolant se trouve un semi-conducteur (SC) dont la résistivité Variations de 10^{-3} à $10^{-4} \Omega\text{cm}$ (ou plus). La conduction se produit à travers les électrons et les trous, ou priorité par l'un ou l'autre type de titulaire. Les semi-conducteurs peuvent être pur, auquel cas il est dit "intrinsèque", ou dopé en impuretés (ce qui permet de contrôler sa résistivité) dans ce cas elle est dite « extrinsèque ». Si nous prenons le silicium comme exemple Pur, avec 1 atome de bore ou de phosphore ajouté à 10^5 atomes de silicium, son Résistivité de 10^3 à environ $10^2 \Omega\text{cm}$ [II.18].

Le tableau (II.4) donne des exemples de matériaux ou de composés semi-conducteurs en fonction des éléments qui les constituent et de la position de ces éléments dans le tableau de Mendeleïev.

Colone	Semi-conducteur
---------------	------------------------

IV		Ge, Si
III-VI	Binaire	GaAs, GaP, GaSb, InAs, InP, InSb
	Ternaire	$Al_xGa_{1-x}As, GaAa_y, P_{1-y}$
	Quarternaire	$Al_xGa_{1-x}As_yP_{1-y}$
II-VI	binaire	CdS, HgTe, CdTe, ZnTe, ZnS
	Ternaire	$Cd_cHg_{1-x}Te$

Tableau II-4 : Exemples de semi-conducteurs

V.1. Structure de l'état solide

Les matériaux solides se classent en deux grandes catégories qui sont :

- a) Les matériaux cristallins où les atomes sont rangés régulièrement aux nœuds d'un réseau périodique ; la maille (ou motif) élémentaire se répète régulièrement
- b) Les matériaux amorphes où l'ordre n'est que local et non répété à "longue distance". On distingue essentiellement quatre familles de solides cristallins :
 - c) Les cristaux ioniques, par exemple le Na^+Cl^- où les ions sont liés par attraction Coulombienne. Aucun électron n'est libre ce qui rend ces cristaux isolants et très dur (la liaison est très solide).
 - d) Les cristaux covalents (colonne IV : C, Si, Ge, Sn). Les quatre électrons périphériques sont mis en commun avec quatre voisins et établissent des liaisons de valence. Ces liaisons sont moins fortes que les liaisons ioniques et les propriétés des cristaux vont dépendre de la "force" de ces liaisons (C diamant est isolant, Sn est conducteur) [II.19]
 - e) Les métaux (Li, Na, K, Cu, Ag, Au) conducteurs électriques qui ont un électron libre par atome. Leur température de fusion est moins élevée que celle des cristaux covalents.
 - f) Les cristaux moléculaires.

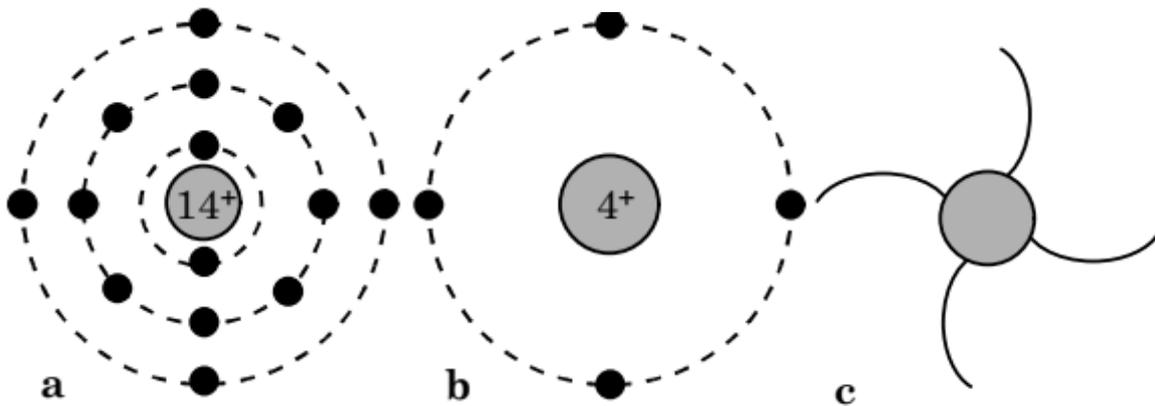
V.2. Les propriétés des semi-conducteurs

V.2.A. Semi-conducteurs de la colonne IV (Ge, Si) – Réseau "diamant"

Les électrons d'un atome isolé prennent des valeurs d'énergie discrètes et chaque niveau d'énergie peut accueillir un nombre limité d'électrons. Ce nombre est égale à $2n^2$ où n correspond au numéro du niveau (couche) en partant du noyau. Les électrons se répartissent

en occupant d'abord les niveaux les plus proches du noyau (ce qui correspond à l'énergie minimale).

Dans le cas du Silicium, qui a un numéro atomique Z égal à 14, il y aura 2 électrons sur la première couche (complète), 8 sur la seconde (complète aussi) et 4 sur la dernière qui n'est donc pas pleine puisqu'elle peut contenir jusqu'à 18 électrons. La figure (II.6.a) donne une représentation des niveaux d'énergie et des électrons qui les occupent. Cette représentation est simplifiée à la figure (II.6.b) en considérant seulement les quatre électrons "périphériques" de la couche externe (qui participeront aux liaisons entre atomes)[II.20].



a) Les niveaux d'énergie et électrons les occupant b) Le dernier niveau d'énergie et électrons les occupant c) Les quatre liaisons covalentes possibles.

Figure II-6 : Exemples de semi-conducteurs[II.20]

V.2.B. Semi-conducteurs composés (III-V ou II-VI) - Réseau "Zinc-blende"

Un type de liaisons très proche de celui qui vient d'être décrit peut aussi se faire entre atomes de nature différente par exemple entre le Gallium ($Z = 31$) et l'Arsenic ($Z = 33$). La figure(II.7) donne la représentation en deux dimensions du semi-conducteur GaAs dans lequel un atome de Ga prend quatre atomes de As comme voisins et l'As quatre atomes de Ga. En réalité, le cristal se construit à partir des ions Ga^- et As^+ qui ont tous quatre électrons périphériques.

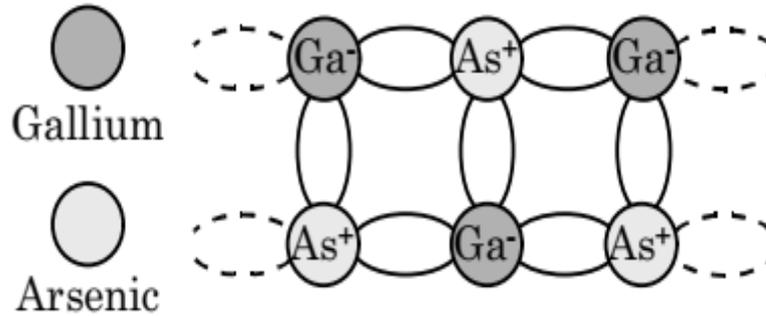


Figure II-7 : Semi-conducteur composé GaAs[II.20].

Le réseau correspondant est celui de la blende (minerai de sulfure de zinc : ZnS) qui peut être considéré comme une variante du réseau diamant : pour GaAs, il est constitué de deux réseaux cubiques faces centrées (l'un de Ga et l'autre de As) imbriqués et décalés du quart de la diagonale principale[II.21].

V.3. Semi-conducteur non dopé ou dopé

V.3.A. Semi-conducteur intrinsèque

Lorsque le cristal n'est pas contaminé (volontaire ou Non) par des impuretés qui peuvent modifier la concentration en porteurs libres. Pour un A des températures autres que 0 K, les électrons peuvent devenir "libres", c'est-à-dire : La bande de valence est dans la bande de conduction, où leurs concentrations sont notées n. ces électrons Laisse des trous (concentration notée p) dans le BV, qui sont également libres de se déplacer

De plus, les concentrations n et p sont égales. Pour ce cas particulier, nous définissons un Concentration intrinsèque n_i (égale aux concentrations n et p) nous montrerons plus loin d'être donnée par la relation[II.22].

$$n = p = n_i(T) = AT^{3/2} \exp\left(-\frac{E_G}{2KT}\right) \quad \dots (II - 12)$$

où A est une constante spécifique du matériau.

V.3.B. Semi-conducteur extrinsèque : dopage

L'introduction de certaines impuretés dans un matériau semi-conducteur permet d'y modifier le nombre de porteurs libres, de choisir le type de conduction (par électrons ou par trous) et de contrôler la conductivité.

V.3.B.2. Semi-conducteur de type p

Le silicium intrinsèque est composé d'atomes possédant quatre électrons périphériques. Ainsi, pour obtenir un dopage de type P, on introduit des atomes trivalents (possédant trois électrons périphériques), tel que le Bore (Figure II.10), ce qui augmente la densité de trous dans le semi-conducteur intrinsèque. Les trous, plus nombreux, sont les porteurs majoritaires et les électrons les porteurs minoritaires. Un semi-conducteur dopé P est caractérisé par le nombre d'atomes accepteurs (N_a) où $p \approx N_a$ et $n \approx n_i^2/N_a$.

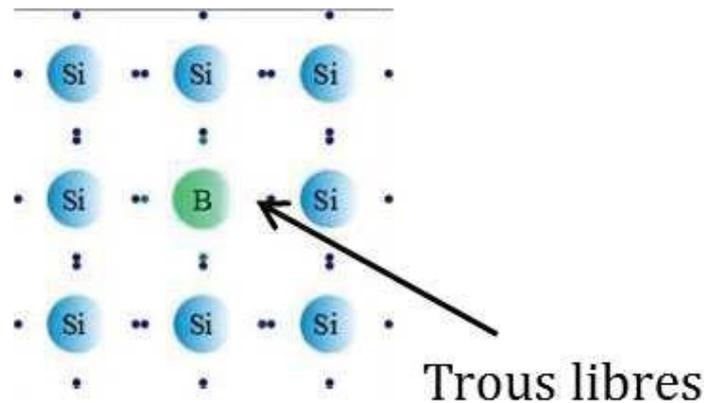


Figure II-10 : Dopage type P par un atome de Bore (Atome accepteur)[II.23].

Cette fois les impuretés sont de type accepteur d'électrons ce qui correspond aux atomes de la colonne III pour un cristal constitué d'atomes de la colonne IV [II.23].

V.3.B.3. Semi-conducteur compensé

Les impuretés dopantes (ou même profondes) de type différent peuvent se compenser, partiellement ou totalement. Le semi-conducteur aura le type de l'impureté dominante. Si on arrive à compenser parfaitement ($N_A = N_D$), on obtient alors un semi-conducteur "intrinsèque par compensation" (...bien qu'il contienne des impuretés dopantes).

VI. Conclusion

La technologie des antennes, en général, est très populaire dans l'industrie et les marchés, qu'ils soient terrestres ou par satellite, et en particulier les antennes patch. Nous avons présenté la description et le mécanisme de fonctionnement, les avantages, les inconvénients des antennes patchs.

Pour certaines fréquences d'utilisation, la taille de ces antennes peut être assez importante. Face à ce problème, dans notre recherche ont été menés, pour lesquels la technique de miniaturisation avec les matériaux semi-conducteurs a été employées pour répondre aux problématiques d'encombrement, de surface et de fréquence de résonance.

Chapitre II : Caractéristique d'antenne patch à base de semi-conducteur

Ce type de matériau sont largement utilisés comme matière première dans l'assemblage d'éléments électroniques qui font partie de notre vie quotidienne, tels que les circuits intégrés. Ils sont des éléments qui jouent le rôle de conducteurs ou d'isolateurs sélectivement, en fonction des conditions externes auxquelles ils sont soumis, tels que la température, la pression, le rayonnement et les champs magnétiques ou électriques.

Chapitre III : Résultats et discussion

I. Introduction

La majeure partie des éléments accordables est réalisée à base de jonctions semi-conductrices, leur comportement en fonction de la tension de polarisation a été étudié à partir d'une technologie silicium (même si cette étude est transposable à d'autres technologies semi-conductrices). A priori, la contrainte de l'utilisation d'un tel substrat dans des applications satellites dans un niveau de pertes non négligeable, ce qui limite leur utilisation dans la conception des antennes patch. Cependant, des techniques permettant d'augmenter les performances de dispositifs sur un tel substrat sont discutées [III.1].

Dans ce chapitre, nous avons conçu une antenne patch rectangulaire à substrat alimenté par une ligne micro ruban (ligne quarte d'onde) avec encoches que nous l'avons utilisée avec des différents types de matériaux du substrat [III.2].

Dans la dernière partie de ce chapitre, les antennes sur substrat silicium sont présentés. Certaines études sont à l'origine de fonctions accordables à éléments d'accord intégrés dans le substrat semi-conducteur. L'agilité des composants passifs est réalisée à partir de la variation des caractéristiques des jonctions semi-conducteurs [III.3].

Nous avons comparé les résultats obtenus des différents matériaux dans le but d'avoir les meilleures caractéristiques, en utilisant l'outil de simulation électromagnétique dans le domaine fréquentiel CST MICROWAVE STUDIO dans lequel nous discuterons globalement du rôle de chaque fonction utilisée pour réaliser nos simulations [III.4].

II. Généralités sur logiciel CST MICROWAVE STUDIO

II.1. Définition du logiciel CST STUDIO SUITE

En 1992, la société allemande CST STUDIO a été fondée. Après de nombreuses recherches, la première version de CST Micro wave studio fut apparue en 1998. Cette dernière a pour but la conception magnétique. Elle permet l'analyse rapide et précise des dispositifs à haute fréquence tel que : les antennes, les filtres ...etc [III.5].

CST Micro-wave studio est un outil spécialisé pour la simulation en 3D des composants à haute fréquence basé sur la résolution des équations de MAXWELL suivant la technique des intégrales finies (FIT, Finit Intégration Technique).

Comme tous les simulateurs 3D, l'avantage de cet outil est la possibilité de traiter toutes sortes de structures homogènes quelle que soit la technologie utilisée [III.6].

II.2. Description générale de l'interface CST

Une fois le projet est créé, on accède à l'interface d'utilisateur du CST

Chapitre III: Résultats et discussion

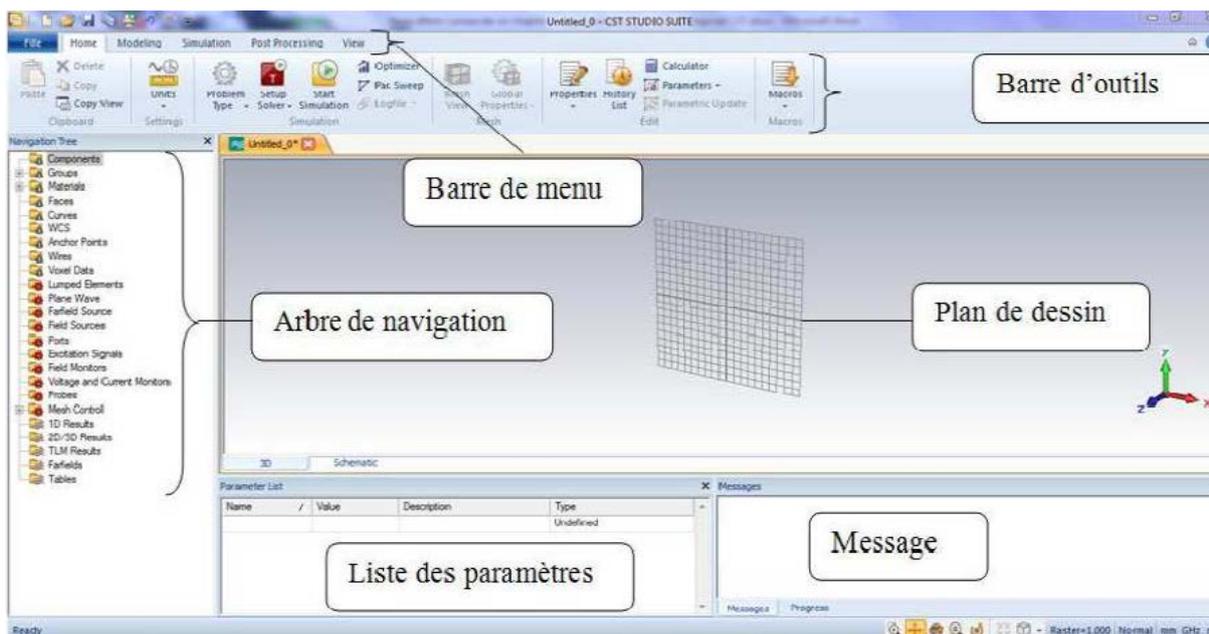


Figure III-1 : Interface du CST[III.5].

- 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[III.7].
- 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.8].

III.Design et structure de l'antenne

Dans notre travail, on s'intéresse à la simulation d'une antenne patch alimentée par une lignemicro ruban.

Le schéma représentant l'antenne patch est décrit comme suit :

Chapitre III: Résultats et discussion

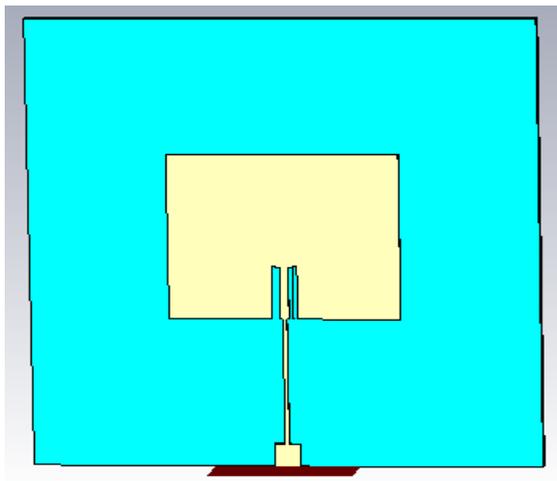


Figure III-2 : La structure du patch.

III.1. La structure de l'antenne patch :

Premièrement, on remplit la liste des paramètres en insérant leurs valeurs numériques :

III.1.A. Dessiner le substrat :

Pour cela, on clique sur 'brick', puis on appuie sur la touche 'ESC' du clavier et on aura une fenêtre de dialogue dans laquelle on définit les coordonnées du substrat.

Puis, le substrat apparaît comme suit :

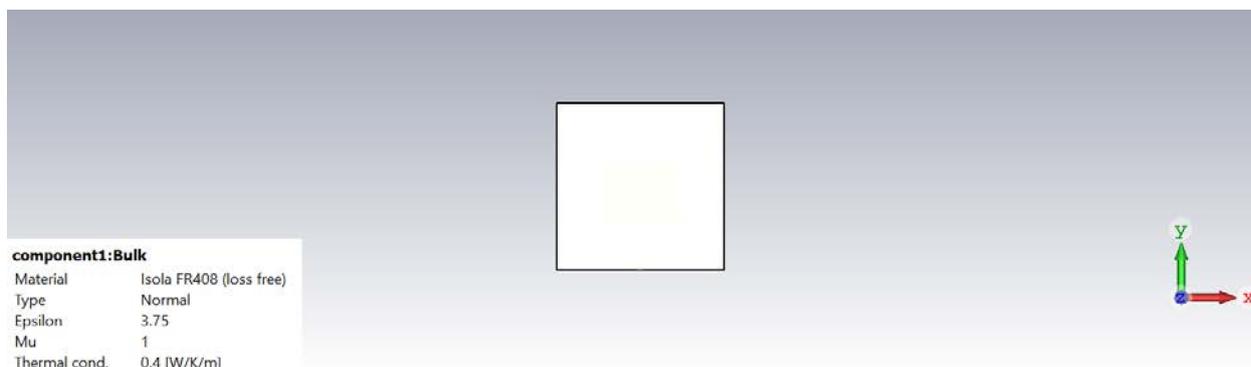


Figure III-3 : La structure du substrat.

III.1.B. Dessiner le plan de masse :

Après avoir sélectionné une deuxième fois la face, on clique sur 'Extrude face' et une boîte de dialogue apparaît sur laquelle on précise les coordonnées et le matériau utilisé et on clique sur 'ok'.

Chapitre III: Résultats et discussion

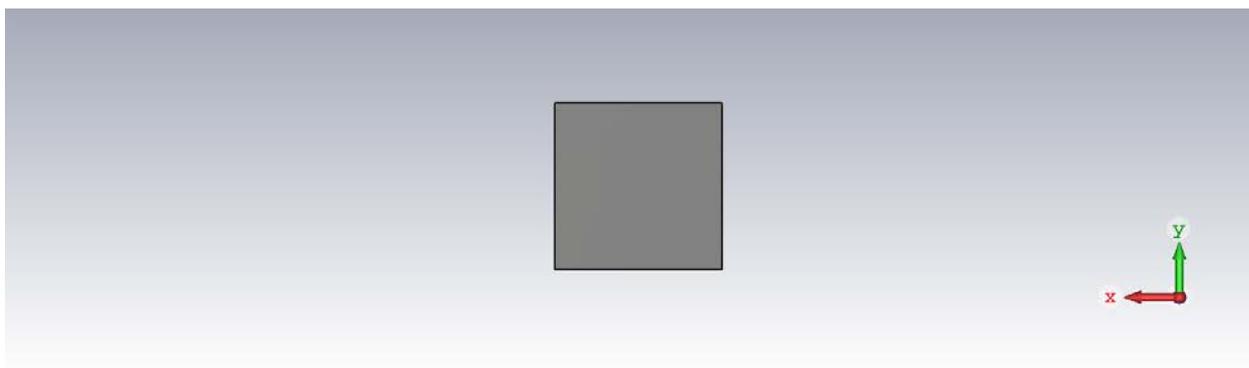


Figure III-4 : La structure de la masse.

On retourne encore une fois notre plan sur l'autre face du substrat, et on sélectionne la face en cliquant sur : 'Modeling « WCS » « Aligne WCS » « Aligne WCS W ».

III.1.C. Dessiner le patch :

On clique sur 'Brick', ensuite on appuie sur la touche « ESC » du clavier, et une boîte de dialogue apparaît pour qu'on puisse injecter les coordonnées et le matériau du patch, puis on valide.

La structure du patch est définie comme dans la figure suivante :

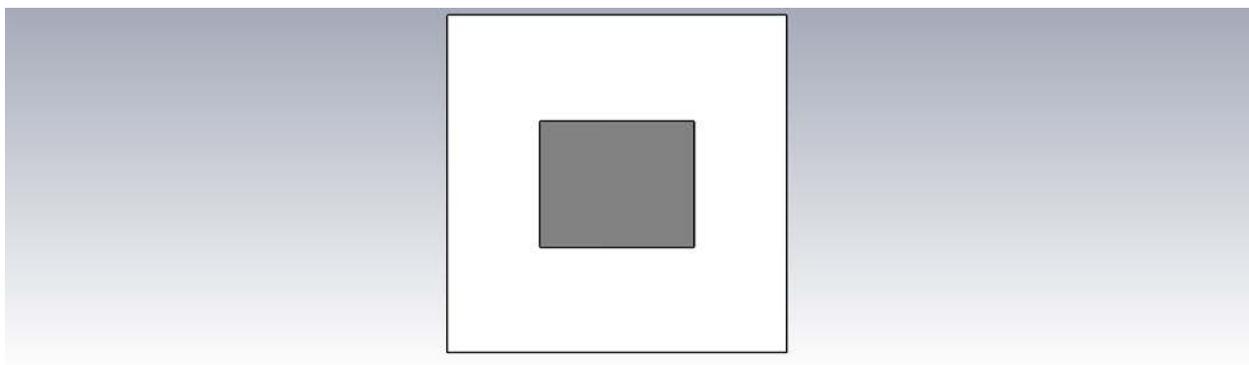


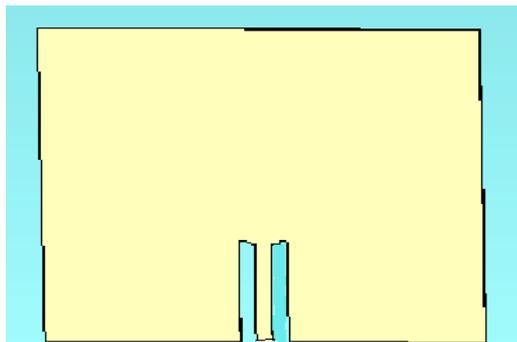
Figure III-5: la structure du patch.

III.1.D. Dessiner une encoche dans le patch :

Pour réaliser ceci, on clique sur 'Brick', puis 'ESC' du clavier alors une fenêtre de dialogue apparaît sur laquelle on définit les coordonnées et le matériau utilisé

On obtient alors la figure suivante :

Chapitre III: Résultats et discussion



FigureIII-6: structure du patch avec le vide.

III.1.E. La ligne micro-ruban :

On clique sur 'Brick', puis 'ESC' du clavier et on aura une boîte de dialogue sur laquelle on spécifie les coordonnées et le matériau utilisé. On doit créer la ligne d'alimentation :

on obtient la figure suivante :

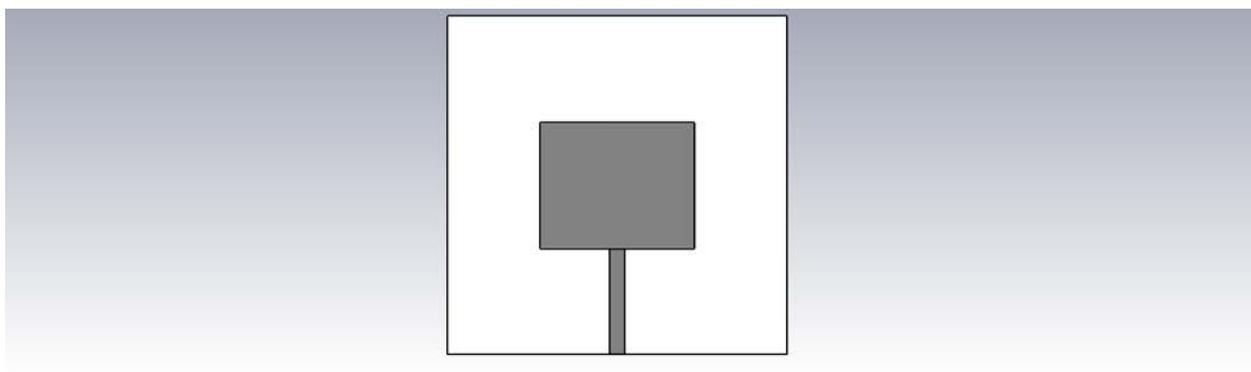


Figure III- 7 : Ligne micro-ruban du patch.

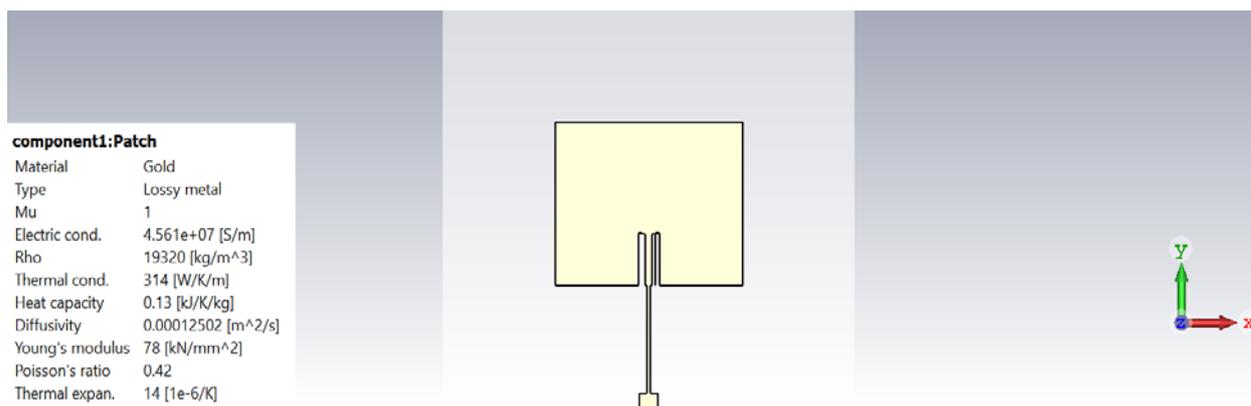
Après avoir réalisé le dessin de notre structure, le patch et le micro strip doivent être assemblés en un seul objet .et pour cela, on procède de la manière suivante :

On clique sur le patch dans l'arbre de navigation :

Modeling → Add → micro → strip → entrer.

on obtient le modèle unis en un seul objet.

Chapitre III: Résultats et discussion

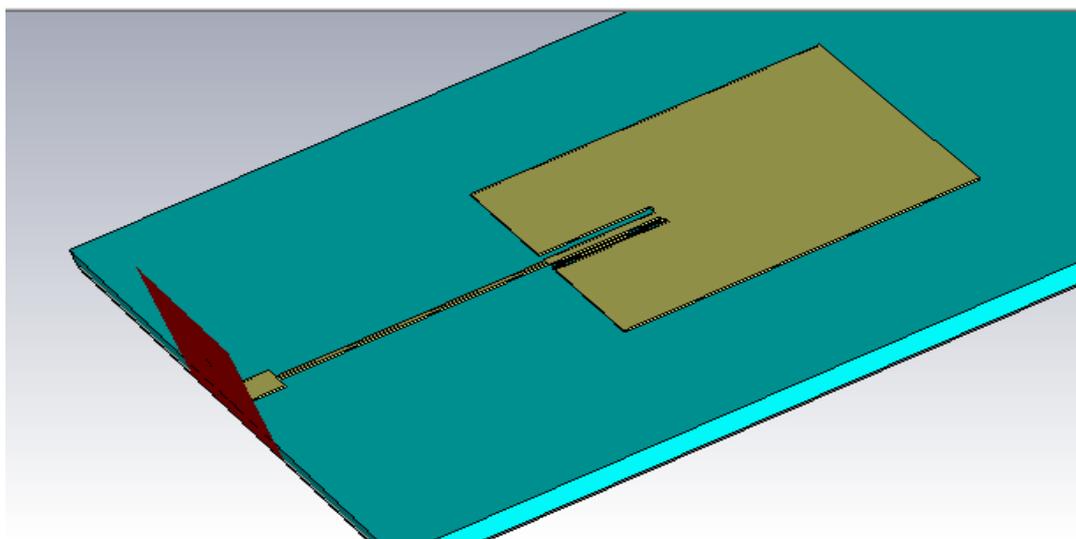


FigureIII-8: obtention du modèle unis.

III.1.F. Le port de polarisation :

Choisir dans la barre d'outils l'icône correspondantedansla barre d'outils ainsi « **pick** » face par la suite Choisir l'icône complétez lesparamètreset cliquez sur « **OK** ».

Enfin, on obtient le résultat suivant :



FigureIII- 9: structure d'une antenne patch alimentée par une ligne micro ruban

IV. Conception d'une antenne patch rectangulaire

Les dimensions de notre antenne sont obtenues par les calculs théoriques de l'antenne micro ruban à la fréquence 11.7 GHz (les équations sont indiquées dans le chapitre II). Les dimensions de l'antenne initiale sont mentionnées dans le Tableau III.1

Chapitre III: Résultats et discussion

Les paramètres	Les dimensions
W	17
L	17
Hs	0.0385
Ht	0.385
Wp	7.725
Lp	6.25
Qf	0.28
Lf	7.9314
Fl	4.25
Fx	0.8612

Tableau III-1 : Dimensions de l'antenne patch rectangulaire alimentée par une ligne micro ruban

La structure de l'antenne patch choisie est de forme rectangulaire alimentée par une ligne micro-ruban de longueur L_f . L'antenne est constituée d'un élément rayonnant rectangulaire ($L_p \times W_p$) avec des encoches et une ligne quarte d'onde qui est imprimé sur la face supérieure d'un substrat diélectrique ($L \times W$) d'épaisseur H_s . Le plan de masse est imprimé sur la surface de dessous du substrat. La géométrie de cette antenne et sa structure dans le rédacteur du CST Micro-wave Studio sont données par la figure suivante :

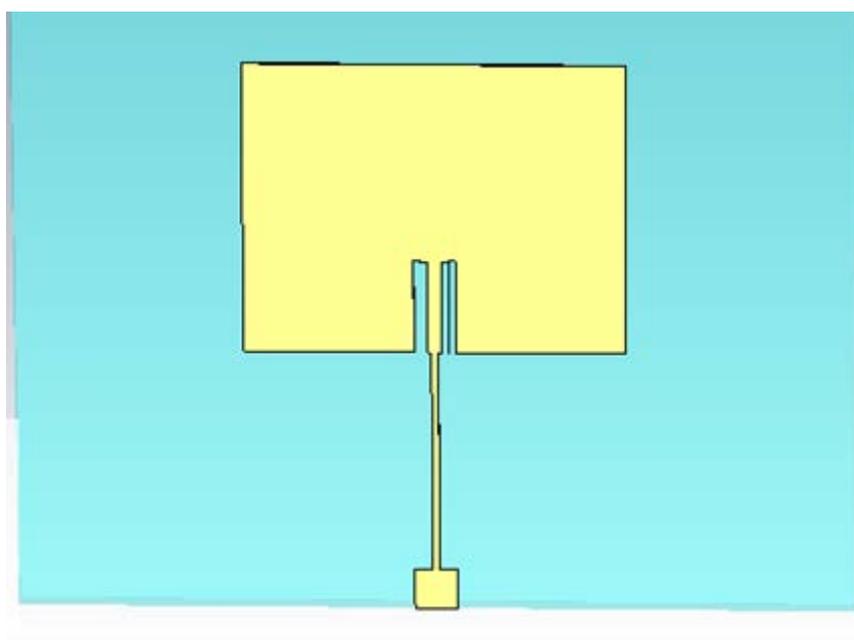


Figure III-10 : La structure d'antenne patch proposé

V. Résultats et discussion

Dans cette partie, nous présenterons et nous évaluerons tous les résultats de l'antenne conçue en termes du coefficient de réflexion, du rapport d'ondes stationnaires, du diagramme de rayonnement, du gain. Dans cette partie, nous allons étudier la simulation de l'antenne patch réalisée avec des différents matériaux utiliser, ensuite nous allons comparer ses caractéristiques.

V.1.Coefficient de réflexion S_{11}

Le résultat de simulation de coefficient de réflexion S_{11} de cette antenne avec différents matériaux utilisés et représenté sur la figure III- 10.

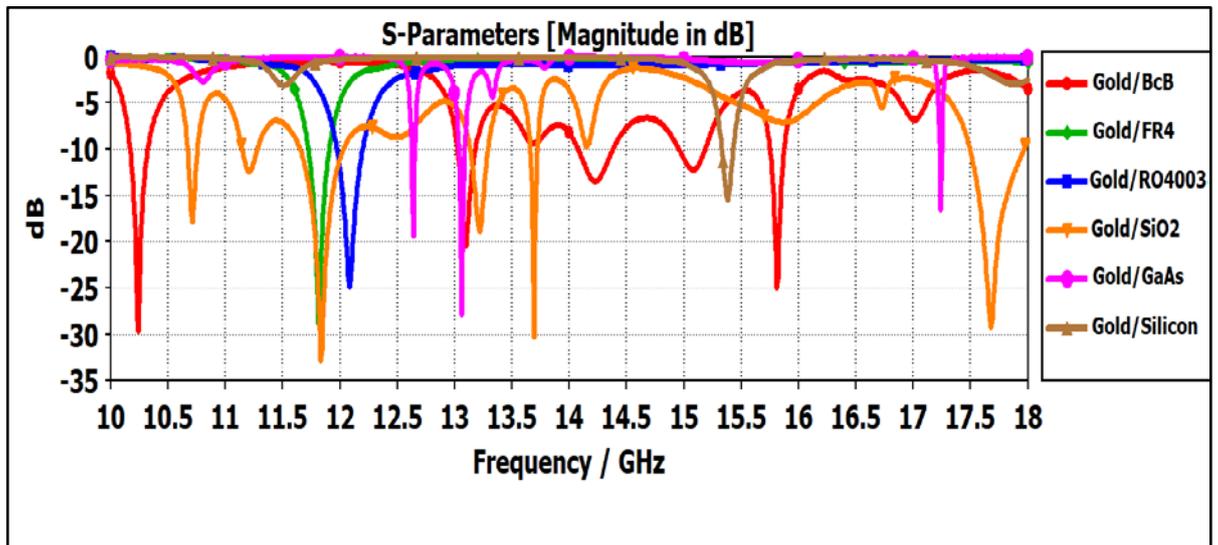


Figure III- 11: Coefficient de réflexion des matériaux utilisés en dB

Sur la figure III-10 : on représente le coefficient de réflexion qui va nous permettre de visualiser le niveau d'adaptation et la bande passante à la fréquence de résonance de l'antenne avec différents types de matériaux semi-conducteurs.

L'antenne patch doit alors présenter une impédance d'entrée complexe conjuguée de celle de la source (généralement fixée à 50Ω)[III.6].

Chapitre III: Résultats et discussion

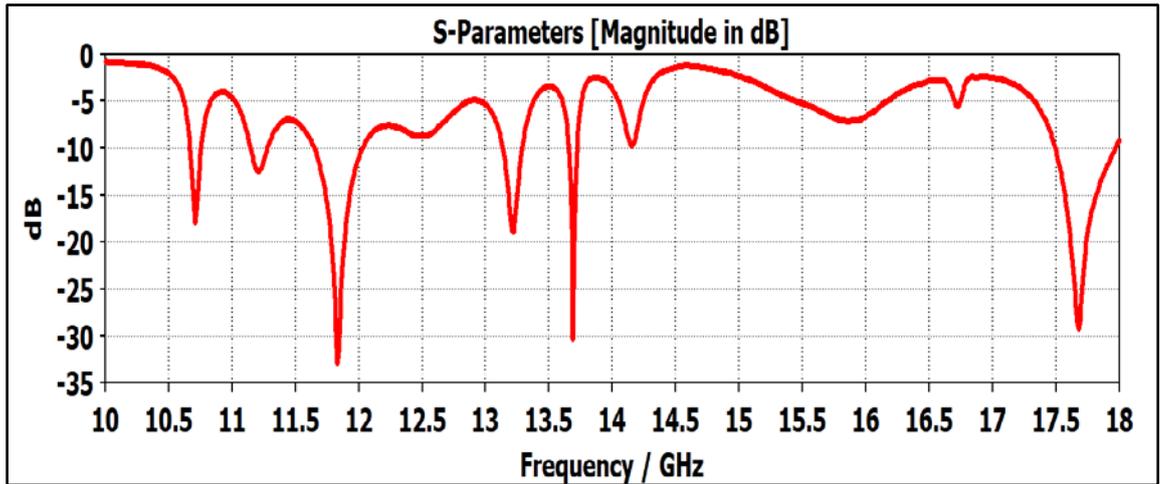


Figure III-12 :Coefficient de réflexion pour le matériau gold/sio2 en dB.

Un niveau inférieur à -34 dB et une bande passante autour de 0.5 GHz de 11.5 GHz à 12 GHz. Donc l'antenne s'approche d'un fonctionnement très large a la fréquence de résonance $F_r=11.7\text{GHz}$ pour le matériau semi-conducteur **gold/sio2**. (La meilleure résultat)

V.2. VSWR

La figure III- 11 :montre simulée du VSWR par polarisation linéaire pour l'antenne patch on utilisent des matériaux différents (rapport d'ondes stationnaires de tension).

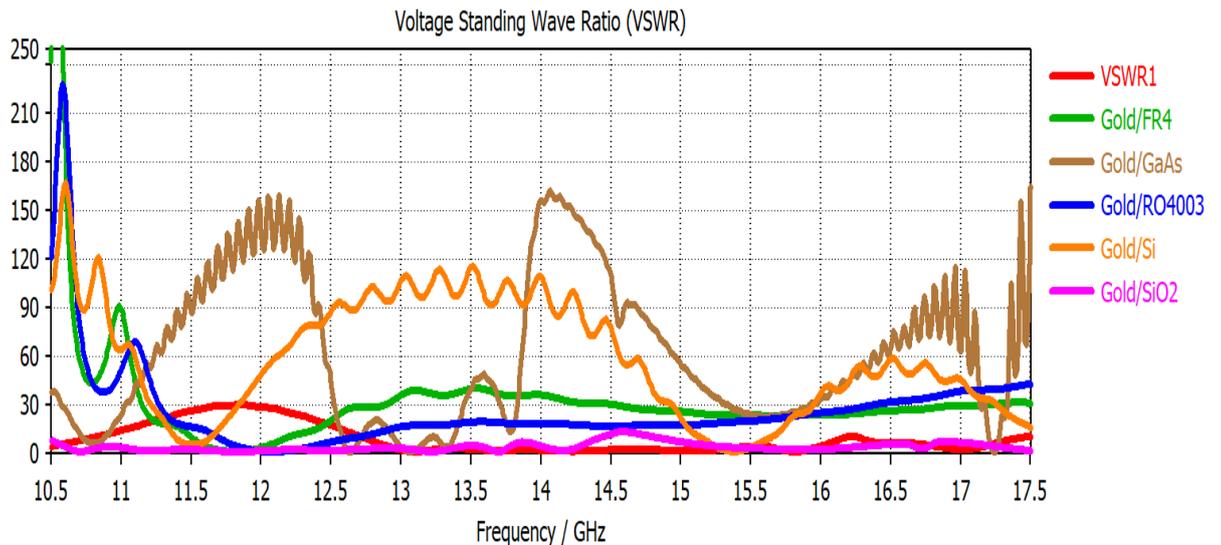


Figure III-13 : Taux d'onde stationnaire des différents matériaux

Chapitre III: Résultats et discussion

VSWR (rapport de tension des ondes stationnaires), c'est une quantité d'efficacité avec laquelle une puissance radiofréquence est transmise d'une source d'alimentation, via une ligne de transmission, à une charge.

On remarque que le VSWR a une valeur comprise entre 0 et 250, une valeur maximale de VSWR <50 dans une plage de fréquences comprise entre 10.5 et 16 GHz pour les différents matériaux.

Pour le matériau **gold/sio2** aucune puissance réfléchi ne serait réfléchi, de 10.5 GHz jusqu' 12 GHz en vois que la tension aurait une amplitude stable égale a 1, ce qui signifie que l'antenne s'adapter sur cette partie de la plage.

V.3. Gain d'antenne patch

Le gain de l'antenne est simulé au-dessus de 10 GHz à 16 GHz pour les différents matériaux représentés sur lesfigures.

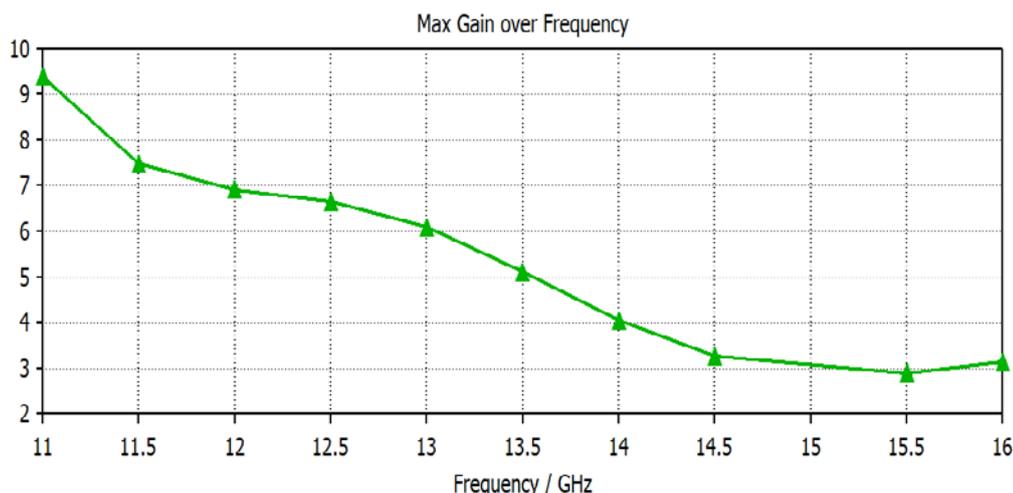


Figure III-14 : Gain max pour le matériau Gold/FR4

Le gain de l'antenne est simulé au-dessus de 11 GHz à 16 GHz gamme représentés sur la figure III-13. On peut remarquer que le gain est supérieur à 3 dans toute la bande de fréquence. Avant de 11,5 GHz, le gain est max égale a9.5 dB. Le gain de l'antenne diminue que la fréquence augmente en outre .la valeur du gain diminue de façon monotone de 7.5 à 3dB après la fréquence 11.5 GHz.

Parconséquent, les performances sont dégradées après la fréquence de 12 GHz

Chapitre III: Résultats et discussion

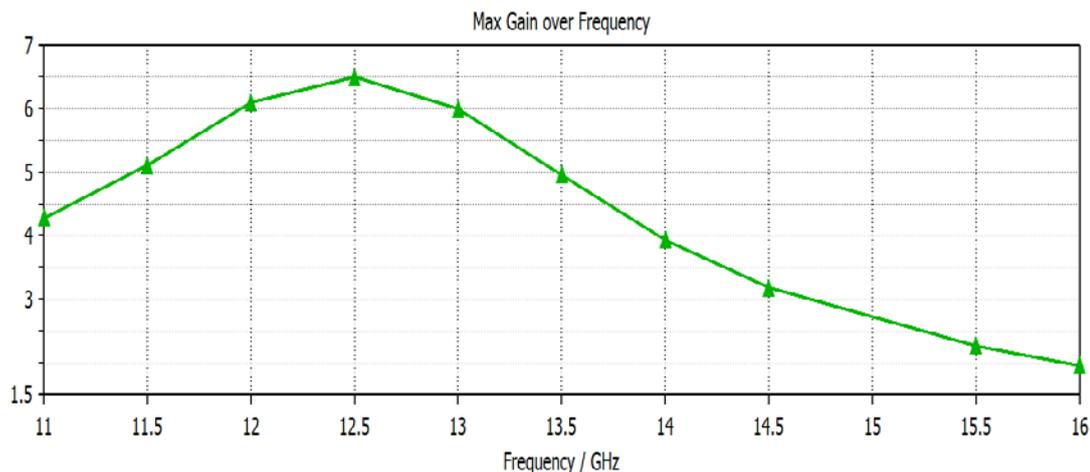


Figure III-15 : Gain max pour le matériau Gold/RO4003

Pour le deuxième matériau est simulé au-dessus de 10 GHz à 16 GHz gamme représentés sur la figure III-14. On peut remarquer que le gain est supérieur à 2 sur toute la bande de fréquence. Avant de 12,5 GHz, le gain de l'antenne augmente que la fréquence augmente en outre de 4 dB jusqu'à ce qu'il atteigne le max égale à 6.5 dB a la fréquence 12.5GHz. Puis le gain de l'antenne diminue de façon monotone de 6.5 à 1,5 dB après 12.5 GHz

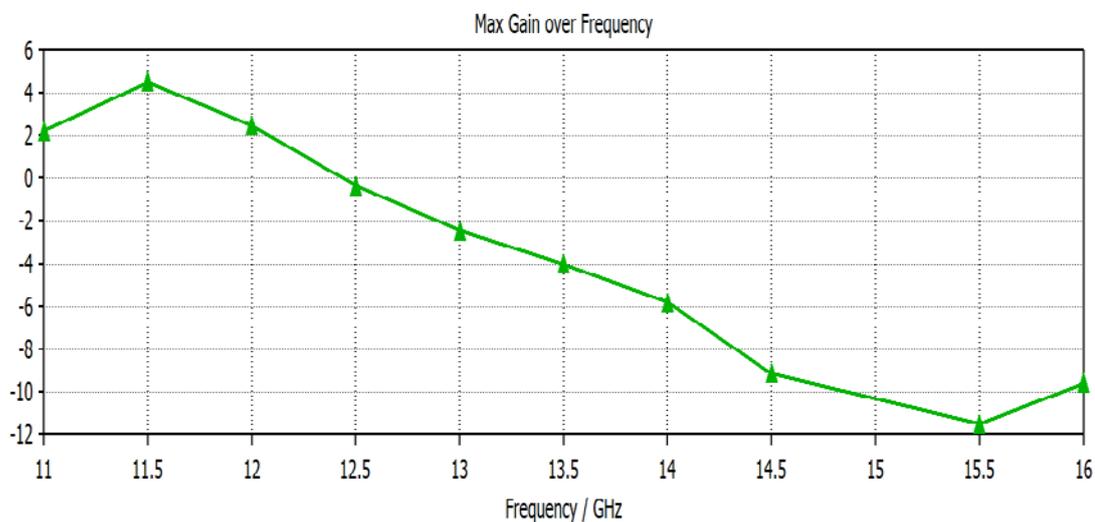


Figure III-16 : Courbe de Gain max pour le matériau Gold/Si

La figure (II.15) représente le gain obtenu pour le matériau (Si), on remarque que le gain de l'antenne et max a la fréquence 11.5 GHz. Puis il diminue de façon monotone de 4 à -12 dB que la fréquence augmente en outre

Chapitre III: Résultats et discussion

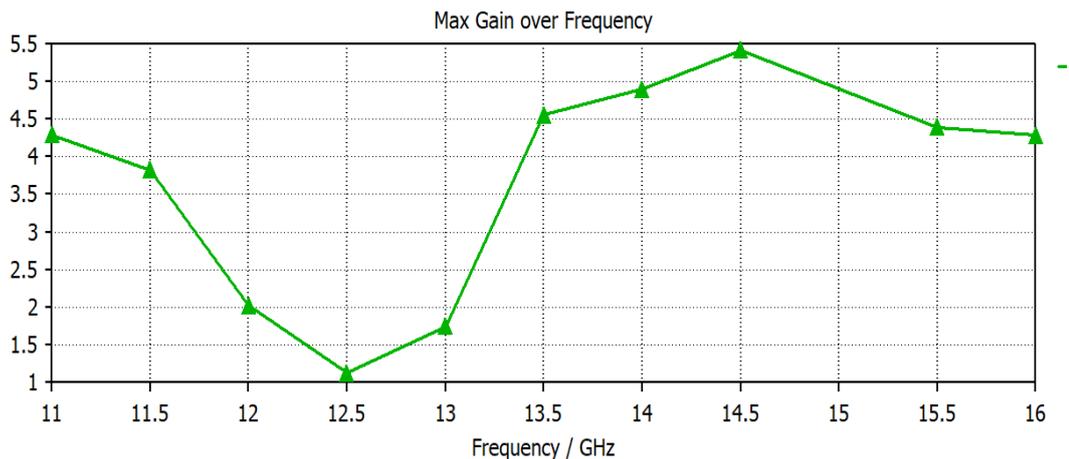


Figure III-17 : courbe de Gain max pour le matériau Gold/BnB

Pour le BnB, Avant de 12,5 GHz, le gain de l'antenne diminue de façon monotone de 4.3 à 1 dB, puis augmente d'une valeur max 5.5 dB a la fréquence 14.5 GHz

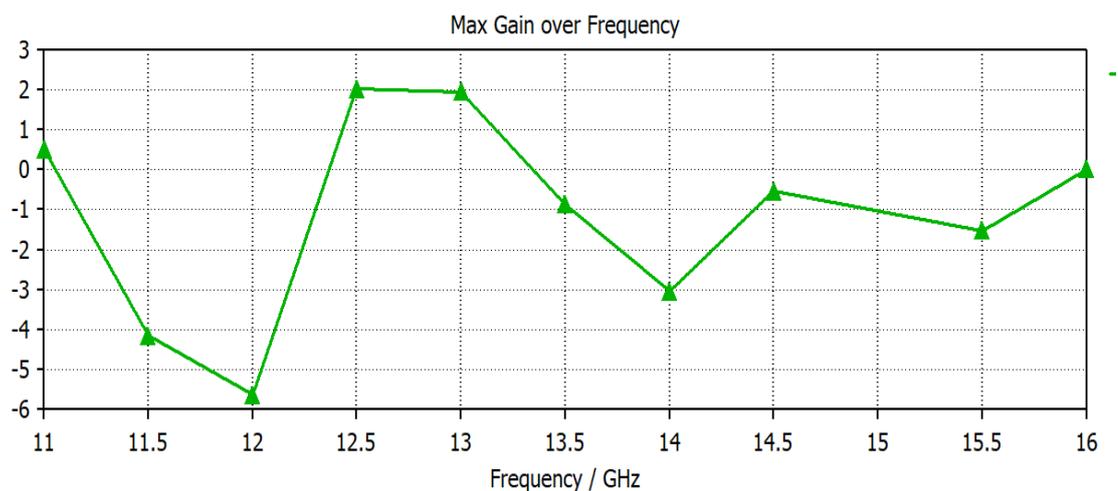


Figure III-18 : courbe de Gain max pour le matériau Gold/GaAs

La courbe est en augmentation et diminution dans toute la bande de frequence. Le gain max de l'antenne avec le materiau GaAs atteint le sommet dans la bande [12.5- 13] GHz

Chapitre III: Résultats et discussion

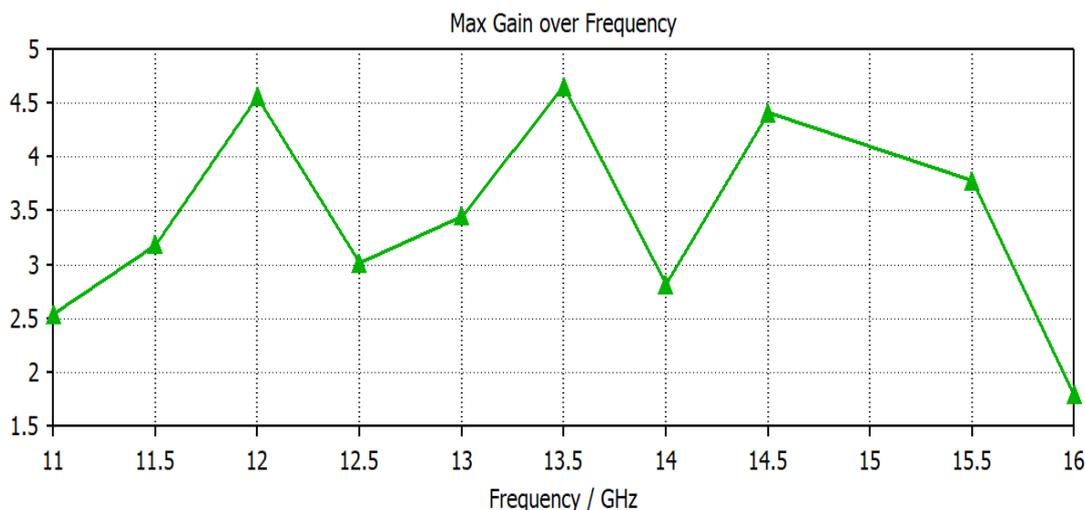


Figure III-19 : courbe de Gain max pour le matériau Gold/SiO2

Pour ce dernier, la courbe n'est pas fixe mais plutôt tortueuse sur toute la bande de fréquence. La valeur max qu'il a atteinte est 4.7dB a la fréquence 13.5GHz

- **Remarque**

On peut remarquer que le gain est très inférieur à 10 dB pour la plupart des matériaux, entre 2 à 6.5 dB sur toute la bande de fréquence.

Mais pour le premier matériau « Gold/FR4 », on constate qu'il est bien égal à 9.5 à la fréquence de résonance 11GHz, puis diminue progressivement jusqu'à atteindre un minimum de 3 dB que la fréquence augmente

V.4. Diagramme de rayonnement

Le logiciel CST MWS permet de visualiser aussi les diagrammes de rayonnement en 2D de l'antenne. C'est une représentation qui nous informe sur le gain et la directivité de l'antenne. Il nous donne la possibilité de visualiser le rayonnement sur un plan polaire ; ceci nous donne une idée sur l'angle d'ouverture[III.9].

Le diagramme de rayonnement permet de visualiser les lobes dans deux dimensions, dans le plan horizontal ($\phi=0^\circ$) ou dans le plan vertical ($\phi=90^\circ$) incluant le lobe le plus important. Notre étude sera sur le plan horizontal. Les résultats du diagramme de rayonnement pour les deux principaux plans en 2D pour les différents matériaux utilisés à une fréquence de résonance 11.5 GHz sont montrés sur le tableau suivant

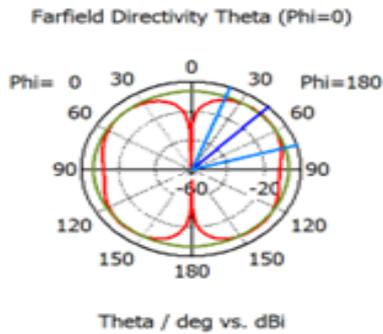
➤ **Pour $\phi = 0^\circ$**

Chapitre III: Résultats et discussion

Les Matériaux

Diagramme de rayonnement

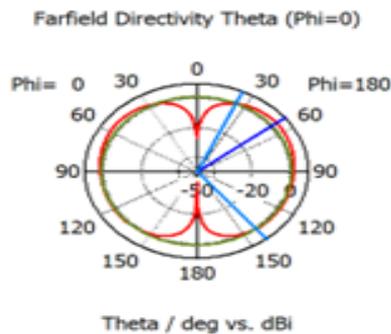
Gold/BcB



— farfield (f=11.5)

Frequency = 11.5 GHz
Main lobe magnitude = -6.28 dBi
Main lobe direction = 44.0 deg.
Angular width (3 dB) = 53.1 deg.
Side lobe level = -0.5 dB

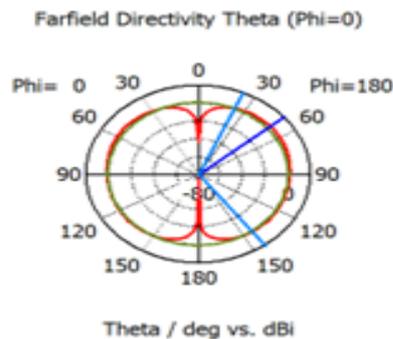
Gold/GaAs



— farfield (f=11.5)

Frequency = 11.5 GHz
Main lobe magnitude = 3.76 dBi
Main lobe direction = 52.0 deg.
Angular width (3 dB) = 116.9 deg.
Side lobe level = -2.5 dB

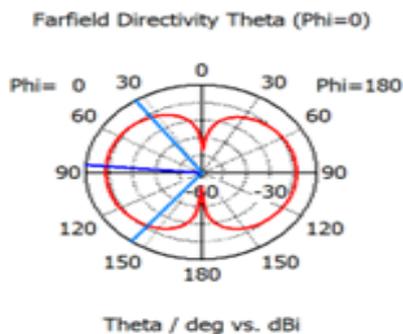
Gold/SiO2



— farfield (f=11.5)

Frequency = 11.5 GHz
Main lobe magnitude = 3.62 dBi
Main lobe direction = 50.0 deg.
Angular width (3 dB) = 120.2 deg.
Side lobe level = -2.5 dB

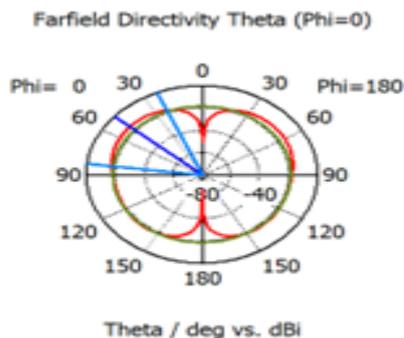
Gold/Si



Frequency = 11.5 GHz
Main lobe magnitude = -18.8 dBi
Main lobe direction = 85.0 deg.
Angular width (3 dB) = 108.0 deg.

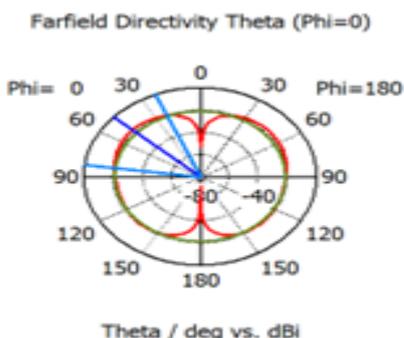
Chapitre III: Résultats et discussion

Gold/RO4003



Frequency = 11.5 GHz
 Main lobe magnitude = -14.1 dBi
 Main lobe direction = 49.0 deg.
 Angular width (3 dB) = 60.1 deg.
 Side lobe level = -4.1 dB

Gold/FR4



Frequency = 11.5 GHz
 Main lobe magnitude = -17.6 dBi
 Main lobe direction = 48.0 deg.
 Angular width (3 dB) = 59.9 deg.
 Side lobe level = -3.5 dB

Tableau III.2 : Diagramme de rayonnement simulé pour les différents matériaux pour $\phi=0^\circ$

• On remarque que :

✓ Largeur angulaire varie entre 53.1 et 120.2 deg
 « 53.1° < Largeur angulaire < 120.2° »

✓ Niveau des lobes latéraux varie entre -3.5 et -0.5 dB
 « -3.5 dB < Niveau des lobes latéraux < -0.5 dB »

L'antenne proposée à une bonne efficacité globale et elle se caractérise par un gain de puissance élevée que nous pouvons observer dans la bande de fréquences de résonance, ce qui confirme que l'antenne proposée fonctionne correctement dans la bande souhaitée. Les principales différences sont la directivité légèrement plus grande et l'augmentation du lobe arrière de -3.7 dB à -0,5 dB.

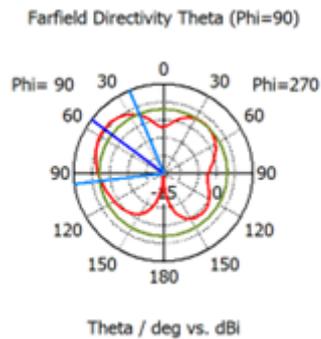
Chapitre III: Résultats et discussion

➤ Pour $\phi = 90^\circ$

Les matériaux

Diagramme de rayonnement

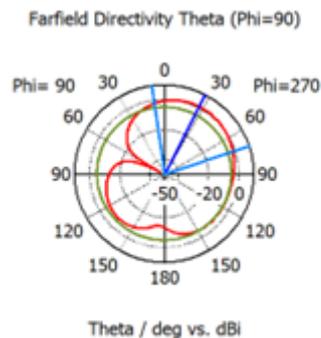
Gold/BcB



— farfield (f=11.5)

Frequency = 11.5 GHz
Main lobe magnitude = 5.54 dBi
Main lobe direction = 53.0 deg.
Angular width (3 dB) = 74.5 deg.
Side lobe level = -2.6 dB

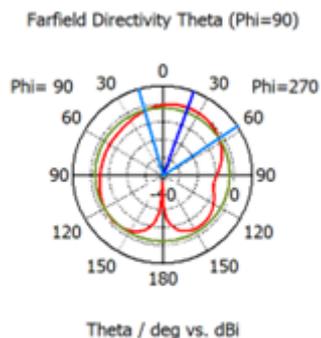
Gold/GaAs



— farfield (f=11.5)

Frequency = 11.5 GHz
Main lobe magnitude = 0.989 dBi
Main lobe direction = 27.0 deg.
Angular width (3 dB) = 79.4 deg.
Side lobe level = -6.0 dB

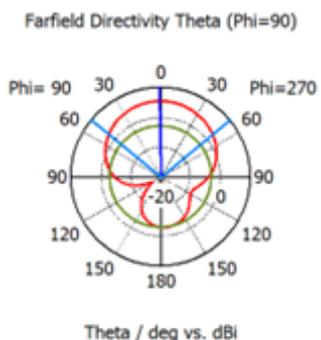
Gold/SiO2



— farfield (f=11.5)

Frequency = 11.5 GHz
Main lobe magnitude = 0.304 dBi
Main lobe direction = 20.0 deg.
Angular width (3 dB) = 71.8 deg.
Side lobe level = -2.7 dB

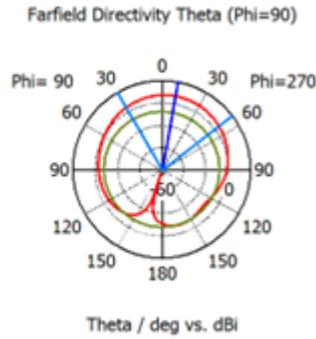
Gold/Si



Frequency = 11.5 GHz
Main lobe magnitude = 5.36 dBi
Main lobe direction = 1.0 deg.
Angular width (3 dB) = 100.9 deg.
Side lobe level = -8.4 dB

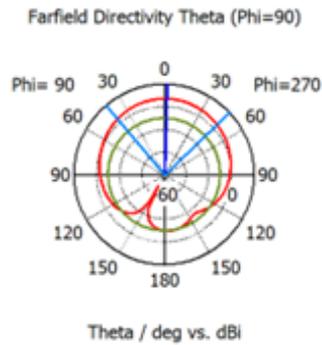
Chapitre III: Résultats et discussion

Gold/RO4003



Frequency = 11.5 GHz
 Main lobe magnitude = 7.29 dBi
 Main lobe direction = 10.0 deg.
 Angular width (3 dB) = 82.4 deg.
 Side lobe level = -15.4 dB

Gold/FR4



— farfield (f=11.5)

Frequency = 11.5 GHz
 Main lobe magnitude = 7.12 dBi
 Main lobe direction = 2.0 deg.
 Angular width (3 dB) = 86.2 deg.
 Side lobe level = -17.3 dB

Tableau III.3 : Diagramme de rayonnement simulé pour les différents matériaux pour phi=90

- On remarque que :

✓ Largeur angulaire 71.8 et 100.9 deg

« $71.8^\circ < \text{Largeur angulaire} < 100.9^\circ$ »

✓ Niveau des lobes latéraux varie entre -17.3 et -2.6 dB

« $-17.3\text{dB} < \text{Niveau des lobes latéraux} < -2.6\text{ dB}$ »

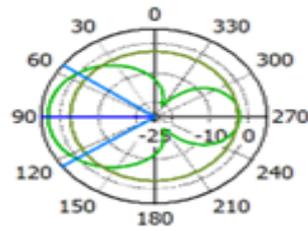
➤ Pour theta = 90°

Chapitre III: Résultats et discussion

Les Matériaux Diagramme de rayonnement

Gold/BcB

Farfield Directivity Theta (Theta=90)



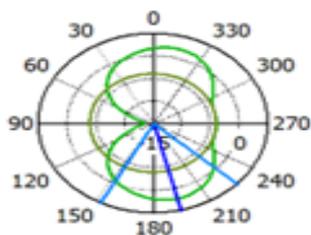
Phi / deg vs. dBi

— farfield (f=11.5)

Frequency = 11.5 GHz
 Main lobe magnitude = 3.2 dBi
 Main lobe direction = 90.0 deg.
 Angular width (3 dB) = 70.9 deg.
 Side lobe level = -5.8 dB

Gold/GaAs

Farfield Directivity Theta (Theta=90)



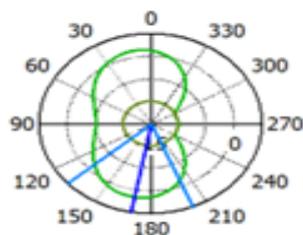
Phi / deg vs. dBi

— farfield (f=11.5)

Frequency = 11.5 GHz
 Main lobe magnitude = 2.22 dBi
 Main lobe direction = 194.0 deg.
 Angular width (3 dB) = 74.8 deg.
 Side lobe level = -6.2 dB

Gold/SiO2

Farfield Directivity Theta (Theta=90)



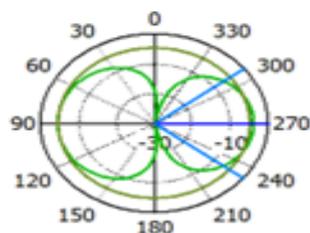
Phi / deg vs. dBi

— farfield (f=11.5)

Frequency = 11.5 GHz
 Main lobe magnitude = 1.49 dBi
 Main lobe direction = 170.0 deg.
 Angular width (3 dB) = 70.9 deg.
 Side lobe level = -11.5 dB

Gold/Si

Farfield Directivity Theta (Theta=90)

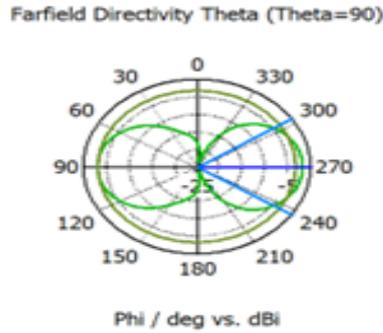


Phi / deg vs. dBi

Frequency = 11.5 GHz
 Main lobe magnitude = -3.97 dBi
 Main lobe direction = 270.0 deg.
 Angular width (3 dB) = 76.3 deg.
 Side lobe level = -0.6 dB

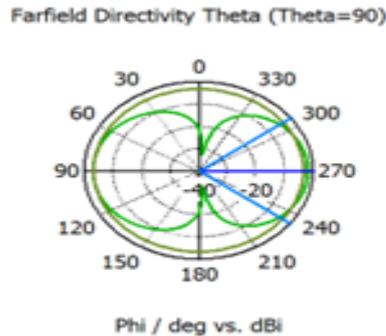
Chapitre III: Résultats et discussion

Gold/RO4003



Frequency = 11.5 GHz
 Main lobe magnitude = -1.94 dBi
 Main lobe direction = 270.0 deg.
 Angular width (3 dB) = 67.0 deg.
 Side lobe level = -1.2 dB

Gold/FR4



Frequency = 11.5 GHz
 Main lobe magnitude = -2.09 dBi
 Main lobe direction = 270.0 deg.
 Angular width (3 dB) = 73.1 deg.
 Side lobe level = -1.0 dB

Tableau III.4 : Diagramme de rayonnement simulé pour les différents matériaux pour theta=90

- Pour Theta= 90°

On remarque que :

- ✓ Largeur angulaire varie entre 67 et 76.3deg

« 67° < Largeur angulaire < 76.3° »

- ✓ Niveau des lobes latéraux varie entre -11.5 et -0.6 dB

« -11.5dB < Niveau des lobes latéraux < -0.6 dB »

V.5. Comparaison entre les performances des matériaux

En résumé, le tableau III.5 présente une comparaison (S_{11} , gain max) entre les performances de ces antennes. Nous constatons que notre antenne proposée réalisée sur des différents matériaux de substrat. Il dispose également d'une très large bande passante pour les applications de communication par satellite

Les	Constante de	La bande passante		Max de
-----	--------------	-------------------	--	--------

Chapitre III: Résultats et discussion

		matériaux	diélectrique	[GHz]	S ₁₁ [dB]	Gain [dB]
1 ^{er} cas	Substrat 1	BCB	2.51	[10-10.5] GHz	-30 dB	5.5 Db
2 -ème cas	Substrat 2	SiO ₂	3.82	[11.5-12] GHz	-34 dB	4.5 dB
3 -ème cas	Substrat 3	GaAS	12.9	[13-13.5] GHz	-28 dB	2 dB
4 -ème cas	Substrat 4	Si	11.8	[15-15.5] GHz	-16 dB	4 dB
5 -ème cas	Substrat 5	RO4003	3.55	[12-12.5] GHz	-25 dB	6.5 dB
6ème cas	Substrat 6	Fr4	3.75	[11.5-12] GHz	-29 dB	9.5 dB

Tableau III.5 : Compression entre les performances de ces antennes des différents matériaux de substrat utilisé

L'étude comparative a montré une meilleure performance obtenue pour la 2ème cas (matériaux utilisés de substrat est le (SiO₂))

VI. Conclusion

Un gain élevé a été réalisé par (gold/sio₂) dans la bande Ku est démontré par simulation par le logiciel du studio CST. Les résultats sont en bon accord. Les patches rayonnants et le réseau d'alimentation du guide d'ondes sont conçus pour donner un bon coefficient de réflexion sur la bande de fonctionnement.

Un gain stable de 10 dB sur toute la bande de fonctionnement avec un rayonnement large. L'antenne proposée fonctionnera en communication par satellite sur la fréquence de résonance en bande Ku.

Dans ce travail, une structure d'antenne miniaturisée à patch d'antenne en bande Ku, ayant une simplicité de construction à faible coût d'antennes patches et une meilleure performance, a été

Chapitre III: Résultats et discussion

proposée pour des applications de communication en bande Ku. Ce patch a un substrat l'oxyde de silicium (SiO_2) à faible coût avec un epsilon diélectrique constant $\xi_r = 4,3$. Cette antenne offre un gain de 10dB. Un faible coût de mise en œuvre et une simplicité de fabrication.

Conclusion Générale

CONCLUSION GÉNÉRALE

La communication par satellite est en constante évolution au quotidien et c'est le résultat d'études et de recherches continues et de colossaux efforts à travers le développement de tout ce qui concerne les méthodes de diffusion par satellite et les dispositifs d'accompagnement, en particulier les antennes imprimées. L'étude examine l'évolution de ce domaine de communication.

Compte tenu de la multiplication des standards dans le domaine des télécommunications, l'accordabilité au sein des systèmes est devenue une priorité en termes d'intégration et de coût.

Il est ainsi possible de faire varier au moins une des caractéristiques du dispositif (fréquence centrale et/ou bande passante pour la fréquence de résonance, diagramme de rayonnement ou mode de polarisation pour les antennes). L'antenne distribuée, pour assurer la propagation de l'onde, un matériau diélectrique faible pertes est généralement utilisé.

Ce mémoire, Pour s'affranchir de tous les problèmes, nous proposons une nouvelle démarche de conception sur un substrat semi-conducteur, tel que le silicium (compromis en termes de performances et de coût). Il est peu propice, à priori, à la propagation des ondes, mais l'utilisation de différents matériaux semi-conducteurs associés à une montée en fréquence, permettent de minimiser les pertes.

L'utilisation de substrats à haute résistivité, diminuant les pertes liées au silicium, trouvent également leurs places dans la conception d'antennes. Des surfaces hautes impédances qui se comportent comme des réflecteurs à la fréquence de rayonnement, diminuent également les pertes liées au silicium, ce qui entraîne une amélioration de l'adaptation, du gain et de la bande passante de l'antenne.

Dans la suite de l'étude, le substrat choisi est l'oxyde de silicium (SiO_2). Il présente un bon compromis coût / performances. Les procédés de fabrication sont connus et maîtrisés que ce soit dans la réalisation des antennes imprimées ou bien d'autres éléments. Il permet ainsi la validation de concepts par la réalisation de prototypes bas coût et des performances élevées.

Références Bibliographiques

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] T. Itsuji, "Active antenna oscillator," U.S. Patent 7 884 764 B2, Feb. 16,2011
- [2] Donald M. Jansky. "Communication Satellites in the Geostationary Orbit".1987
- [3] 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.
- [4] Z. H. Bark, Q. Wali, A. frakharuddin, L.M. Schmidt-Mende, T. Brown, and R. Jose, "Advances in hole transport materials engineering for stable and efficient perovskite solar cells," *Nano Energy*, vol. 34, no. 34, pp. 271–305, 2017.
- [I.1] K. BENAID and T. BOUMEDDANE, "Etude des antennes planaires avec le modèle de la cavité et le modèle de la ligne de transmission," Master Mémoire de Master, Université Mouloud MAAMERI, TIZI-OUZOU, 2013.
- [I.2] M. Braham, S. Pierard, and M. Van Droogenbroeck, "Semantic background subtraction," in *2017 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*, 2017: Ieee, pp. 4552-4556.
- [I.3] D. Angès, "Nouveau concept d'antenne B.I.E. agile développée pour une application spatiale de "TéléMesure Image" (T.M.I.)," Thèse de doctorat, Université de Limoges, 2009.
- [I.4] O. Ringar, "Utilisation des techniques avancées d'Emission / Réception multi-antennes pour une transmission optique large bande," Université de Limoges/Université Cheikh Anta Diop (Dakar), 2015LIMO0100, 2015. [Online]. Available:<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01271419>
- [I.5] I. Zahzah, "Conception d'une antenne CLSA de la bande Ku- Vsat pour une application satellite," Master Mémoire de Master, Université AbouBakrBelkaid, 2020.
- [I.6] Lamouri marwa Khaouni Madjida "Etude et conception des antennes micro ruban pour la technologie ULB", mémoire de master, 2020.
- [I.7] M.H.Awida, "Substrate-integrated waveguide Ku-band cavity backed 2£2 microstrip patch array antenna," *Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 8, 2009, pp.1054-1056.
- [I.8] I. Zahzah, "Conception d'une antenne CLSA de la bande Ku- Vsat pour une application satellite," Master Mémoire de Master, Université AbouBakrBelkaid, 2020.
- [I.9] MiraouiAbdelfettah, "Implémentation de quelques algorithmes de détection et de localisation d'objets par imagerie micro-onde", doctor of engineering researchgate. 2018
- [I.10] Brahmi Ali,"Etude de la Technologie des Antennes Multi-bandes pour les Applications Spatiales", mémoire de magister, université USTO-Oran, 2009
- [I.11] Emmanuel DREINA, «Conception, optimisation et intégration RF ; un système ; antennes miniatures multi capteurs utilisant la diversité en vue ; augmenter les performances radio ; un terminal mobile 4G», Thèse de Doctorat, Institut Polytechnique de Grenoble, 2010

Références

- [I.12] CHETOUAHFAROUK, «Etude et modélisation des antennes miniatures basées sur des matériaux diélectriques », thèse de doctorat, université Ferhat Abbas SETIF-1, 2018.
- [I.13] Livre (antenna theory third edition analysis and design)
- [I.14] S. H. Yeung, K. F. Man, K. M. Luk, and C. H. Chan, “A trapeziform U-slot microstrip patch antenna,” *IEEE Trans. Antennas Propag* , vol. 56, pp. 571-557, Feb. 2008.
- [I.15] Marc Van Droogenbroeck, M Braham, S Piérard, M Van Droogenbroeck, "Semantic Background Subtraction, *IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*, 4552-4556, 2017.
- [I.16] Leila Chouitti, « contribution à l'étude d'antenne imprimées rectangulaires doubles bandes et multi-bandes tenant compte de l'effet de couplage», Thèse magistère, Institut d'électronique, Université de Constantine, 2009
- [I.17] Oumy Diop, thèse de doctorat << Etude de miniaturisation du facteur de qualité d'antenne miniature conçue pour des petits objets communiquant >>, de l'Université de Nice.2013
- [I.18] Jalilvand, M.; Li, X.; Zwirello, L.; Zwick, T. Ultra wide band compact near-field imaging system for breast cancer detection. *IET Microw. Antennas Propag.* 2015, 9, 1009–1014. [Google Scholar] [CrossRef]
- [I.19] John P. Stang, “A 3D Active Microwave Imaging System for Breast Cancer Screening”, Dissertation submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy in the Department of Electrical and Computer Engineering in the Graduate School of Duke University, 2008
- [I.20] J. R. Mosing, Fred E. Gardiol, "Rayonnement d'une antenne micro-ruban de forme arbitraire " *Ann. Télécommum.* 40, N° 3-4, 1985.
- [I.21] B .Zaoui , "Modélisation d'une antenne micro-ruban compacte", Master académique, Université Echahid Hamma Lakhdar El oued, 06/2015.
- [II.1] K. Kuhl, S. Schrading, C. C. Leutner, N. Morakkabati-Spitz, E. Wardelmann, R. Fimmers, W. Kuhn and H. H. Schild, “Mammography, Breast Ultrasound, and Magnetic Resonance Imaging for Surveillance of Women at High Familial Risk for Breast Cancer”, *Journal of Clinical Oncology*, Volume 23, Issue 33, pp: 8469-8476, 2005.
- [II.2] Zhi Ning Chen. Experiments on input impedance of planar bow-tie monopole antennas. *IEEE Electronics Letters*, 2000.

Références

- [II.3] Li, X., S. K. Davis, S. C. Hagness, D. W. Weide, and B. D. Veen, "Microwave imaging via space-time beam forming: Experimental investigation of tumor detection in multilayer breast phantoms," *IEEE Trans. Microwav. Theory Tech.*, Volume 52, pp: 1856–1865, 2004.
- [II.4] Lue, W.M.; Boyden, P.A. Abnormal electrical properties of myocytes from chronically infarcted canine heart. alterations in V_{max} and the transient outward current. *Circulation* 1992, 85, 1175–1188. [Google Scholar] [CrossRef] [PubMed]
- [II.5] E. Weisstein, "Wolfram Math World", Mathematica Technology, 1995. [En ligne]. Disponible <http://mathworld.wolfram.com/BesselFunctionoftheFirstKind.html>. [Accès le Avril 2015]
- [II.6] ChorfiHamid , thèse de doctorat << conception d'un nouveau système d'antenne réseau en onde millimétrique >> , Université du Québec ,2012
- [II.7] Oumy Diop, thèse de doctorat << Etude de miniaturisation du facteur de qualité d'antenne miniature conçue pour des petits objets communiquant >>, de l'Université de Nice.2013
- [II.8] Arab Tarik, diplôme de Magister:<< Etude des matériaux composites (Titanate oxyde): application pour la réalisation des substrats d'antennes miniature >> , Université de Sétif,2014
- [II.9] Sarah Sufyar,Thèse de doctorat :<< Contribution à l'étude d'antenne Miniature Reconfigurables en fréquence par association d'élément actifs>>,Université de Grenoble,2011
- [II.10] G. Prigent, E. Rius, F. LePenne, S. LeMaguer, C. Quendo, G. Six et H. Happy, " Design of Narrow-Band DBR Planar Filters in Si-BCB Technology for Millimeter-Wave Applications," *IEEE Trans. Applications*," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* vol. 52, no. 3, pp. 1045-1051, mars 2004
- [II.11] R. Islam et R. Henderson, "Millimeter-wave coplanar waveguide series stubs on BCB and low resistivity silicon," *Microw. Opt. Technol. Lett.* vol. 56, n° 2, p. 375-380, février 2014.
- [II.12] L. L. W. Leung, K. J. Chen, X. Huo, et P. C. H. Chan, "Low-loss microwave filters on CMOSgrade standard silicon substrate with low-k BCB dielectric,"

Références

- Microw. Opt. Technol. Lett, vol. 40, no. 1, pp. 9-11, Jan. 2004
- [II.13] K. T. Chan, A. Chin, Y. B. Chen, Y.-D. Lin, T. S. Duh et W. J. Lin. Lin, T. S. Duh, et W. J. Lin, "Integrated antennas on Si,proton-implanted Si and Si-on-quartz," in International Electron DevicesMeeting.Technical Digest (Cat. No.01CH37224), 2001, pp. 40.6.1-40.6.4.
- [II.14] S. Nagane et al, " Lead-Free Perovskite Semiconductors Based on Germanium-Tin Solid Solutions: Structural and Optoelectronic Properties," J. Phys. Chem. C,vol. 122, no. 11, pp. 5940-5947, mars 2018.
- [II.15] X.Rong et al, "Impact of metal electrode work function of CH₃NH₃PbI₃/p-Si planar heterojunction perovskite solar cells," Sol. Energy, vol. 158, no. 158, pp.424-431, 2017.
- [II.16] K. So and C. H. Chan, "Circularly Polarized Patch Antenna Array for Satellite Communication in Ku Band", IEEE conference, 2016.
- [II.17] Saini, Gurpreet Singh, Kumar, Rajeev, "A low profile patch antenna for Ku-band applications", International Journal of Electronics Letters, 2019.
- [II.18] A . D . Khaleel, " Design and simulation Microstrip patch antenna using CST Microwave,"2019.
- [II.19] J. Butler, R. Lowe, "Beam-Forming Matrix Simplifies Design of Electronically Scanned Antennas," Electronic Design, Avril 1961, pp. 170-173
- [II.20] V.Rumsey, Frequency independent antennas. NY, USA: Academic Press, 1966.
- [II.21] Anna Niang « Antennes miniatures et structures électromagnétiques avec circuits nonFoster» Thèse de doctorat présenté à l'Université de Paris-Saclay, 2017.
- [II.22] Guennach Mohamed « Conception d'une antenne ''PIFA'' multi-bandes pour applications sans fil » Mémoire d'Ingénieur présenté à l'Université Sidi Mohamed Ben Abella, 2016.
- [II.23] K. Konstantinidis, A. P. Feresidis, and P. S. Hall, "Broadband SubWavelength Profile High-Gain Antennas Based on Multi-LayerMetasurfaces," *IEEE Trans. AntennasPropag.*, vol. 63, pp. 423-427,2015.
- [II.24] Nigarura Dieudonné «Etude et Conception d'un réseau d'antennes imprimées log-périodique multicouches » Mémoire de Master présenté à l'Université de Abou BekrBelkaid de Tlemcen juillet 2012
- [III.1] M. A. Green, "Silicon solar cells: evolution, high-efficiency design and efficiency

Références

- enhancements," *Semicond. Sci. Technol.*, vol. 8, no. 1, p. 1, 1993.
- [III.2] H. J. Hovel, "Semiconductors and semimetals. Volume 11. Solarcells," 1975
- [III.3] A.Chovet,P.Masson , *PHYSIQUE DES SEMI-CONDUCTEURS,ECOLE POLYTECHNIQUE UNIVERSITAIRE DE MARSEILLE*, Département Micro-électronique et Télécommunications, Première année – 2004/2005
- [III.4] Belgacem Nassima, Mémoire de fin d'étude de master académique:< Conception des antennes PIFA mono-bande et multi-bande GSM, DCS, PCS, UMTS et WIFI> Université de Tlemcen, 2013
- [III.5] Dominique Garnier, "Antenne et propagation radio" (GEL 202/ GEL7019), hiver 2016.
- [III.6] MACOM, "MA4SWx10series.pdf." [Online]. Available: [http://cdn.macom.com/datasheets/MA4SWx10 series.pdf](http://cdn.macom.com/datasheets/MA4SWx10%20series.pdf).
- [III.7] Silvaco. [Online]. Available: <http://www.silvaco.com/examples/tcad/index.html>.
- [III.8] Djamel. Bennjima et Tarek. Rahmani "Etude, conception et réalisation d'un réseau d'antennes patches", Institut supérieur des études technologiques en communication de Tunis, 2002.

Résumé

Les semi-conducteurs sont bien connus pour présenter une résistance négative, c'est-à-dire qu'ils gagnent des propriétés similaires à celles du milieu à hautes fréquences. Afin d'exploiter ces propriétés de type gain, il faut compenser une très grande impédance inductive. Dans ce travail, nous présentons une nouvelle antenne patch intégrée de type actif pour concevoir l'antenne semi-conductrice pour satellite d'application. Dans ce modèle intégré, la source active est intégrée dans une cavité diélectrique prise en sandwich entre des couches de métal doré.

Le principe de conception simulé dans CST Studio est basé sur la satisfaction de la relation d'impédance auto-cohérente, ainsi que sur le rayonnement efficace du mode cavité résonante. Les configurations d'antennes actives de type proposées sont capables d'adapter l'impédance à quelques ohms près tout en obtenant le meilleur gain d'antenne.

Mots-clés : Satellite, antenne patch, Ultra large band, Semiconducteur, CST Studio.

Abstract

Semiconductors are well known for exhibiting negative resistance, i.e., they gain similar properties to the medium at high frequencies. In order to exploit these gain-like properties, a very large inductive impedance must be compensated. In this work, we introduce a new active-type integrated patch antenna to design the semiconductor antenna for satellite application. In this integrated design, the active source is embedded in a dielectric cavity sandwiched between layers of gold metal.

The design principle simulated in CST Studio is based on the satisfaction of the self-consistent impedance relation, as well as the effective radiation of the resonant cavity mode. The proposed type active antenna configurations are able to match the impedance within a few ohms while obtaining the best antenna gain.

Keywords: Satellite, patch antenna, Ultra-wide band, Semiconductor, CST Studio..

تلخيص

تشتهر أشباه الموصلات بإظهارها مقاومة سلبية ، أي أنها تكتسب خصائص مماثلة للوسط عند الترددات العالية. من أجل استغلال هذه الخصائص الشبيهة بالكسب ، يجب تعويض ممانعة استقرائية كبيرة جداً. في هذا العمل ، قدمنا هوائي تصحيح متكامل جديد من النوع النشط لتصميم هوائي أشباه الموصلات لتطبيقات الأقمار الصناعية. في هذا التصميم المتكامل ، يتم تضمين المصدر النشط في تجويف عازل محصور بين طبقات من المعدن الذهبي. يعتمد مبدأ التصميم الذي تمت محاكاته في CST Studio على إرضاء علاقة المعاوقة الذاتية المتسقة ، فضلاً عن الإشعاع الفعال لوضع تجويف الرنين. إن تكوينات الهوائي النشط المقترحة قادرة على مطابقة الممانعة في غضون بضعة أوم مع الحصول على أفضل كسب للهوائي.

الكلمات المفتاحية: الأقمار الصناعية ، هوائي التصحيح ، النطاق العريض للغاية ، أشباه الموصلات ،

استوديو CST.