

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

المركز الجامعي بلحاج بوشعيب لعين تموشنت

Centre Universitaire de Ain Témouchent - BELHADJ Bouchaib -

Institut de Technologie

Département de Génie Electrique



## Mémoire de Fin d'Etudes

**En vue de l'obtention du diplôme de Master Académique**

Domaine : SCIENCES & TECHNOLOGIES

Filière : TELECOMMUNICATION

Spécialité : Réseaux et Télécommunications

### Thème :

Design d'une antenne TCR pour mini satellite de télécommunications en la bande Ku

**Présenté par :** RADJI Mohammed Ryad & LAGHA Ahmed Abdessamad

**Soutenu en Septembre 2020 devant le Jury :**

BENGANA Abdelfatih	M.C.B	C.U.B.B (Ain Temouchent)	Président
MERADI Abdelhafid	M.C.B	C.U.B.B (Ain Temouchent)	Examineur
SLIMANE Zohra	M.C.A	C.U.B.B (Ain Temouchent)	Encadrant
KOURDI Zakarya	M.R.A	CDS (Oran)	Co-encadrant

*Année universitaire 2019/2020*

## **REMERCIEMENT**

Nous remercions ALLAH le Tout Puissant de nous avoir donné le courage et la volonté de mener à terme ce travail dans le cadre de mémoire de master.

Le travail a été réalisé à la faculté de technologie, au département de génie Électrique de centre universitaire Belhadj Bouchaib – Ain Temouchent, sous la direction de Mme Slimane Slimane Maître de conférences au centre universitaire Belhadj Bouchaib – Ain Temouchent et Mr. KOURDI Zakarya Maître de recherche au centre développement des satellites à Oran.

Nous voudrions leur témoigner toute notre reconnaissance et toute notre gratitude pour nous avoir fait bénéficier de leurs compétences et leurs maîtrise en la matière. Nous voudrions aussi leur témoigner toute notre gratitude pour leurs qualités humaines et leur constante disponibilité.

Nous vous serions, toutes et tous, très reconnaissant.

Tous nos remerciements les plus sincères vont à Monsieur MeradiAbdelhafid, Maître de conférences au centre universitaire Belhadj Bouchaib – Ain Temouchent, pour nous avoir fait l'honneur d'examiner notre travail et de présider le jury.

Nous adressons nos sincères remerciements à Monsieur Bengana, Maître de conférences au centre universitaire Belhadj Bouchaib – Ain Temouchent, qui nous a donné de son temps précieux et a eu la gentillesse d'examiner le travail et d'être membre du jury.

Nous ne pourrions oublier de présenter nos vifs remerciements et notre sincère gratitude à toutes celles et tous ceux qui nous ont épaulé dans les moments durs et nous ont donné la force pour continuer et arriver au bout du travail.

Nous ne pouvons terminer sans exprimer toute notre gratitude à tous les membres de ma famille qui nous ont soutenu et conseillé tout le long de ce travail, plus particulièrement nos mères et nos pères.

**DEDICACE**

*En tout premier lieu, je remercie ALLAH le Tout Puissant, de m'avoir donné la force pour survivre, ainsi que l'audace pour dépasser toutes les difficultés.*

***Je dédie ce projet :***

*A ma chère mère, Fatima*

*A mon cher père, Rabah*

*Qui n'ont jamais cessé, de formuler des prières à mon égard, de me soutenir et de m'épauler pour que je puisse atteindre mes objectifs.*

*A mon frère, Yasser*

*A mes chères sœurs Bouchra et Naila*

*Pour ses soutiens moral et leurs conseils précieux tout au long de mes études.*

*A mon chère binôme, Lagha Abdessamed,*

*Pour son entente et son sympathie.*

*A Omari Ahmed et Boudjema Abdennour*

*Pour leurs indéfectibles soutiens et leurs patiences infinies.*

*A mes chères amis(es), Imad, Ibrahim et Fatima*

*Pour leurs aides et supports dans les moments difficiles.*

*A toute ma famille,*

*A tous mes autres ami(e)s,*

*A tous ceux que j'aime et ceux qui m'aiment.*

**DEDICACE**

*En tout premier lieu, je remercie ALLAH le Tout Puissant, de m'avoir donné la force pour survivre, ainsi que l'audace pour dépasser toutes les difficultés.*

***Je dédie ce projet :***

*A ma chère mère, Rahma*

*A mon cher père, Mohamed*

*Qui n'ont jamais cessé, de formuler des prières à mon égard, de me soutenir et de m'épauler pour que je puisse atteindre mes objectifs.*

*A mes frères, Khalil et Mehdi*

*A mes chères sœurs Maissa et Ikram*

*Pour ses soutiens moral et leurs conseils précieux tout au long de mes études.*

*A ma chère grand-mère et mes oncles et mes tantes .*

*A mon cher binôme, radji ryad ,*

*Pour son entente et son sympathie.*

*A mes chères amis(es) ,Omari, Rahila, Ibrahim, Yousef, Walid , nori et ileys.*

*Pour leurs aides et supports dans les moments difficiles.*

*A toute ma famille,*

*A tous mes autres ami(e)s,*

*A tous ceux que j'aime et ceux qui m'aiment.*

ABDESSAMED

## *RESUME*

Les résultats de cette étude sont intéressants sur la génération de technologie d'antenne utilisée dans les petits satellites. Un nouveau design optimisé de l'antenne TCR (poursuite, commande et télémétrie) a été présenté. Il a une bonne adaptation d'impédance à la ligne coaxiale de 50 Ohm qui a été radicalement améliorée avec différentes caractéristiques géométriques. Pour la bande de fréquences de la bande Ku, le VSWR de 1,15 n'est pas dépassé. Dans sa version optimisée, il est compact et esthétique et cette propriété réduit les distorsions d'antenne. Les considérations de conception pour les performances de cette antenne en termes de gain de couverture, d'isolation des lobes latéraux et d'isolation transpolaire sont discutées. Le document examine également les possibilités d'étendre la couverture de fréquence du système d'antenne dans le système en bande Ku peut augmenter les capacités et la flexibilité opérationnelle des stations terriennes existantes ainsi que l'adaptation aux nouvelles tendances technologiques actuelles et futures.

**Mots clés:** Suivi des commandes à distance; petit satellite; Bande Ku, antenne Omni.

## *ABSTRACT*

Abstract: The results of this study are interesting about antenna technology generation used in small satellite. A new design optimized of the TCR (tracking, command and ranging) antenna has been presented. It has a good impedance matching to the 50 Ohm coaxial line which has been radically enhanced with different geometric features. For the Ku band frequency band, the VSWR of 1.15 is not exceeded. In its optimized version, it is compact and aesthetic and this property reduces antenna distortions. Design considerations for this antenna performance in terms of coverage gain, side lobe isolation, and cross-polar isolation is discussed. The paper also discusses the possibilities of extending the frequency coverage of the antenna system into the Ku-band system can increase the capabilities and operational flexibility of existing earth stations as well as adapts with new current and future technology trends are presented.

**Keywords:** Tracking Command Ranging; small satellite; Ku-band, Omni Antenna.

## *المخلص:*

نتائج هذه الدراسة مثيرة للاهتمام حول توليد تقنية الهوائي المستخدمة في الأقمار الصناعية الصغيرة. تم تقديم تصميم جديد محسن لهوائي TCR (التتبع والتحكم والمدى). تتميز بمقاومة جيدة لمطابقة للخط المحوري 50 أوم الذي تم تحسينه بشكل جذري بميزات هندسية مختلفة. بالنسبة لنطاق تردد النطاق Ku، لا يتم تجاوز VSWR البالغ 1.15. في نسخته المحسنة، يكون مضغوطاً وجمالياً وتقلل هذه الخاصية من تشوهات الهوائي. تمت مناقشة اعتبارات التصميم الخاصة بأداء هذا الهوائي من حيث كسب التغطية وعزل الفص الجانبي والعزل عبر القطبية. تناقش المذكرة أيضاً إمكانيات توسيع تغطية التردد لنظام الهوائي في نظام Ku-band يمكن أن يزيد من القدرات والمرونة التشغيلية للمحطات الأرضية الحالية بالإضافة إلى التكيف مع اتجاهات التكنولوجيا الحالية والمستقبلية الجديدة.

**الكلمات الرئيسية:** تتبوع نطاق القيادة ؛ سائل صغير كو باند ، هوائي أومني.

## **LISTE DES FIGURES**

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

<b>Figure I. 1:</b> Rayonnement d'une antenne .....	4
<b>Figure I. 2 :</b> Schéma de principe d'un système de communication radio.....	5
<b>Figure I. 3:</b> Gain réalisé de l'antenne dans (a) le plan d'élévation et (b) le plan d'azimut.....	7
<b>Figure I. 4:</b> Illustration de la bande passante à -10 dB à partir du coefficient de réflexion .....	10
<b>Figure I. 5:</b> Différentes représentations du diagramme de rayonnement d'une antenne. ....	11
<b>Figure I. 6:</b> Angle d'ouverture à 3dB.....	12
<b>Figure I. 7:</b> Polarisation du champ électromagnétique.....	13

### **Chapitre II : L'antenne TCR dans la bande KU**

<b>Figure II. 1:</b> Différents exemples d'antennes à ouverture rayonnante (a) (b) et système focalisant (c) (d) (e) ....	18
<b>Figure II. 2:</b> Différents exemples d'antennes réseau. ....	19
<b>Figure II. 3:</b> Antenne de télémétrie, poursuite et de commande .....	20
<b>Figure II. 4:</b> Antenne bande X par RUAG .....	20
<b>Figure II. 5:</b> Antenne patch micro-ruban bande S pour microsatellite de Surrey SSTL.....	22
<b>Figure II. 6:</b> Antenne à réflecteur (AstroMesh) d'INMARSAT-4 .....	22
<b>Figure II. 7:</b> Réseaux d'antennes de SMOS SAT .....	23
<b>Figure II. 8:</b> antenne Indépendantes de la fréquence .....	23
<b>Figure II. 9:</b> Antenne biconique.....	24
<b>Figure II. 10:</b> Antenne discône .....	25
<b>Figure II. 11:</b> antenne cornet (modèle R&S HF906 1 – 18 GHz) et son Diagramme de rayonnement .....	27
<b>Figure II. 12:</b> Différents types de cornets .....	27
<b>Figure II. 13:</b> Système typique de suivi, de télémétrie, de commande et de surveillance. ....	30
<b>Figure II. 14:</b> Satellite avec TCR antenne.....	32
<b>Figure II. 15:</b> Géométrie conique antenne.....	33

### **Chapitre III : Simulation de l'antenne TCR**

<b>Figure III. 1:</b> L'interface graphique du simulateur CST studio 2014(A) et (B).....	40
<b>Figure III. 2:</b> Première étape de la simulation .....	41
<b>Figure III. 3:</b> Deuxième étape de la simulation .....	41
<b>Figure III. 4:</b> Troisième étape de la simulation .....	41
<b>Figure III. 5:</b> Quatrième étape de la simulation .....	42
<b>Figure III. 6:</b> Dernière étape de la simulation .....	42

<b>Figure III. 7:</b> Illustration de l'antenne simulée sous l'outil CST microwave studio(A)(B)(C)(D) .....	43
<b>Figure III. 8:</b> Le coefficient de réflexion de l'antenne dans la bande KU .....	44
<b>Figure III. 9:</b> Le taux d'onde stationnaire de l'antenne dans la bande KU .....	44
<b>Figure III. 10:</b> Le coefficient de réflexion des différentes hauteurs de l'antenne. ....	49
<b>Figure III. 11:</b> Le VSWR des différentes hauteurs de l'antenne.....	50
<b>Figure III. 12:</b> Le maximum de Gain des différentes hauteurs de l'antenne. ....	50

## *LISTE DES TABLEAUX*

### *Chapitre II : L'antenne TCR dans la bande KU*

<b>Tableau II. 1:</b> Les différentes orbites terrestres et leurs missions associées. ....	21
<b>Tableau II. 2:</b> Les bandes de fréquence.....	28
<b>Tableau II. 3:</b> Valeurs du rayon supérieur en termes de longueur d'onde pour les angles en spirale et coniques selon l'expérience Dyson .....	35
<b>Tableau II. 4:</b> Valeurs du rayon inférieur en termes de longueur d'onde pour les angles en spirale et coniques selon l'expérience Dyson .....	35
<b>Tableau II. 5:</b> Les paramètres de conception de TCR.....	36

### *Chapitre III : Simulation de l'antenne TCR*

<b>Tableau III. 1</b> .....	48
<b>Tableau III. 2:</b> Etude paramétrique sur les rayons .....	51

## *LISTE DES ACRONYMES*

<b>BP</b>	Bande passante
<b>dB</b>	Décibels
<b>GHz</b>	Giga Hertz
<b>IEEE</b>	Institute of electrical and electronics engineers
<b>3D</b>	Trois dimmensions
<b>2D</b>	Deux dimmensions
<b>CST</b>	Computer simulation technology
<b>HF</b>	Haute fréquence
<b>SNR</b>	Signal noise report
<b>KU</b>	Kurz-Unten
<b>TCR</b>	Telemetry command ranging
<b>ULB</b>	Ultra large band
<b>GPS</b>	Global Positioning System
<b>TTC</b>	Telemetry, Tracking& command
<b>LEO</b>	Lowearthorbit
<b>GEO</b>	Geostationaryorbit
<b>MEO</b>	Medium earthorbit

## **SOMMAIRE**

<b>REMERCIEMENT</b>	<b>I</b>
<b>DEDICACE</b>	<b>II</b>
<b>DEDICACE</b>	<b>III</b>
<b>LISTE DES FIGURES</b>	<b>IV</b>
<b>LISTE DES TABLEAUX</b>	<b>VI</b>
<b>LISTE DES ACRONYMES</b>	<b>VII</b>
<b>INTRODUCTION GENERALE</b>	<b>1</b>

### **CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES ANTENNES**

<b>I.1.INTRODUCTION</b>	<b>3</b>
<b>I.2.GENERALITES SUR LES ANTENNES</b>	<b>3</b>
I.2.1. DEFINITION DE L'ANTENNE	3
I.2.2. LE ROLE D'UNE ANTENNE	4
<b>I.3. LES ANTENNES DE SATELLITE</b>	<b>5</b>
<b>I.4.ANTENNE DANS L'ENVIRONNEMENT SPATIAL</b>	<b>6</b>
I.4.1. L'ENCOMBREMENT ET LA MASSE	6
I.4.2. L'ENVIRONNEMENT DYNAMIQUE	6
I.4.3. L'ENVIRONNEMENT SPATIAL ET THERMIQUE	6
<b>I.5.PARAMETRES IMPORTANTS DE L'ANTENNE</b>	<b>7</b>
I.5.1. DIRECTIVITE ET GAIN	7
I.5.2. EIRP	7
I.5.3. PERTE DANS L'ESPACE LIBRE	8
I.5.4. PERTE PAR ABSORPTION ATMOSPHERIQUE	8
<b>I.5.5. TEMPERATURE DE BRUIT</b>	<b>8</b>
I.5.6. BILAN DE LIAISON	9

<b>I.6.CARACTERISTIQUES DES ANTENNES SPATIALES</b>	<b>9</b>
<b>I.6.1. LA BANDE PASSANTE</b>	<b>9</b>
I.6.2. DIAGRAMME DE RAYONNEMENT	10
I.6.3. ANGLE D'OUVERTURE	11
I.6.4. LA POLARISATION	12
I.6.5. COEFFICIENT DE REFLEXION ET ROS	13
<b>I.7.CONCLUSION</b>	<b>14</b>

## CHAPITRE II : L'ANTENNE TCR DANS LA BANDE KU

<b>II.1.INTRODUCTION</b>	<b>17</b>
<b>II.2. LES ANTENNES SPATIALES</b>	<b>17</b>
<b>II.3. DIFFERENTS TYPES DES ANTENNES SPATIALES</b>	<b>17</b>
II.3.1. SELON LA DIRECTIVITE	17
II.3.1.1. ANTENNES DIRECTIVES	18
II.3.1.1.1.ANTENNES A OUVERTURE RAYONNANTE ET SYSTEME FOCALISANT	18
II.3.1.1.2.ANTENNES RESEAUX	19
II.3.1.2.ANTENNES OMNIDIRECTIONNELLES	19
II.3.1.3. ANTENNES HEMISPHERIQUES	20
II.3.2. SELON L'ORBITE	20
II.3.3. SELON LE GAIN[15]	21
II.3.3.1.ANTENNES A GAIN FAIBLE $G \leq 6dBi$	21
II.3.3.2.ANTENNES A GAIN ELEVE $G \geq 6dBi$	22
<b>II.4. CLASSIFICATION DES ANTENNES ULB</b>	<b>23</b>
II.4.1. LES ANTENNES INDEPENDANTES DE LA FREQUENCE	23
II.4.2. LES ANTENNES ELEMENTAIRES	24
II.4.3. LES ANTENNES BICONIQUES	24
II.4.4. LES ANTENNES DISCONES	25
<b>II.5. LES ANTENNES A TRANSITION PROGRESSIVE</b>	<b>25</b>
<b>II.6. LES DIRECTIVES DES ANTENNES ULB</b>	<b>25</b>
II.6.1. LES ANTENNES CORNETS	26
<b>II.7. LES BANDES DE FREQUENCES</b>	<b>27</b>

IX

## Sommaire

---

II.7.1. LA BANDE C _____	28
II.7.2. LA BANDE KU _____	28
<b>II.8. LES ANTENNES DE TELEMETRIE ET DE COMMANDE (ANTENNE TCR)_</b>	<b>28</b>
<b>II.9. TTC_____</b>	<b>29</b>
II.9.1. TRACKING _____	30
II.9.2. TELEMETRIE _____	30
II.9.3.COMMANDE _____	31
II.9.4. RANGING (SUIVI)_____	31
<b>II.10. LA GEOMETRIE DE L'ANTENNE TCR CHOISIE _____</b>	<b>32</b>
II.10.1. DESCRIPTION DE L'ANTENNE TCR _____	32
<b>II.11. EQUATIONS GOUVERNANTES TCR ANTENNE _____</b>	<b>33</b>
<b>II.12. CONCEPTION THEORIQUEPRELIMINAIRE DE TCR ANTENNE _____</b>	<b>34</b>
<b>II.13.CONCLUSION_____</b>	<b>36</b>

## CHAPITRE III : SIMULATION DE L'ANTENNE TCR

<b>III.1. INTRODUCTION _____</b>	<b>39</b>
<b>III.2. OUTIL DE SIMULATIONS CST MICROWAVE STUDIO _____</b>	<b>39</b>
<b>III.3. DESIGN DE L'ANTENNE TCR _____</b>	<b>40</b>
<b>III.4. DISCUSSION DES RESULTATS _____</b>	<b>43</b>
III.4.1. LE COEFFICIENT DE REFLEXION _____	43
III.4.2. VSWR _____	44
<b>III.5.LE DIAGRAMME DE RAYONNEMENT DE L'ANTENNE : _____</b>	<b>45</b>
<b>III.6.LE GAIN : _____</b>	<b>48</b>
<b>III.7.OPTIMISATIONS DE L'ANTENNE SIMULEE : _____</b>	<b>48</b>
<b>III.8. RESULTATS DE L'ETUDE : _____</b>	<b>49</b>
III.8.1. LE COEFFICIENT DE REFLEXION : _____	49
III.8.2. LE VSWR : _____	50
III.8.3. LE MAXIMUM DE GAIN DE L'ANTENNE : _____	50
	X

<b>III.9.ETUDE PARAMETRIQUE SUR LES RAYONS DE L'ANTENNE :</b>	<b>51</b>
III.9.1. LE COEFFICIENT DE REFLEXION :	51
III.9.2. LE VSWR :	52
III.9.3. LE MAXIMUM DE GAIN DE L'ANTENNE :	52
<b>III.10. CONCLUSION</b>	<b>53</b>
<b>CONCLUSION GENERALE</b>	<b>54</b>

# **Introduction**

## **générale**

## **INTRODUCTION GENERALE**

L'industrie du spatial a largement évolué, depuis la mise en orbite du premier satellite artificiel de la Terre par l'URSS en 1957. La seule fonction de ce satellite était l'émission d'un signal sonore deux tons. L'industrie du spatial a également vu se multiplier ses domaines d'application. Autour de la Terre il y a des milliers de satellites en orbite, ils couvrent un spectre très large. Parmi leurs tâches il y a aussi l'observation météorologique et celle de la Terre en général, la scrutation de l'Univers, la géo localisation et la reconnaissance militaire, et enfin les télécommunications de manière générale.

Les avantages du satellite dans le domaine des télécommunications sont évidents. Le relais entre plusieurs stations terrestres dispersées dans une zone de couverture (échelle continentale) peut être assuré par un seul satellite. En effet, un satellite peut remplacer avantageusement une infrastructure terrestre lourde et coûteuse et en terme de maintenance.

La maîtrise technologique ne tolérait pas les émissions à très fortes puissances, au début des premières communications par satellite. La difficulté afin de garantir le bilan de liaison était alors reportée sur les antennes au sol qui avaient une surface de captation très grande, ceci a pour but de garantir le gain nécessaire. La puissance d'émission au niveau des satellites a augmenté de manière importante grâce au développement technologique successive.

Par contre pour la taille des antennes, les contraintes sur le gain ont été considérablement relaxées. Ces évolutions ont ainsi permis d'adresser des marchés de masse comme la télédiffusion, l'Internet haut débit et bien d'autres encore. La réception individuelle de signaux satellites implique donc la mise en œuvre de solutions bon marché. La conception de tel système s'appuie sur un critère très important qui est la dimension Coût, elle joue un rôle crucial.

La multiplication des systèmes de réception au sol a été entraînée par la démocratisation des systèmes terrestres de réception satellite. Les contingents d'un tel étalage de masse demeurent donc dans la potentielle détérioration visuelle du paysage. Spécialement, les antennes placées sur les toits ou dans les jardins des pavillons, ou encore aux balcons des immeubles, ont saturé notre paysage urbain. Ces antennes sont de plus en plus gênantes au point d'être considérées comme une nuisance publique voire une pollution visuelle.

Au-delà de la maîtrise des coûts, la notion de discrétion et donc d'intégration dans le paysage urbain, devient de plus en plus primordial. Donc, ces dernières années, ce n'est pas

seulement le critère coût qui est mis en valeur mais le critère discrétion pour éviter la nuisance publique. Ainsi, de nouvelles solutions antennaires à faible impact visuel ont progressivement vu le jour ces dernières années.

Dans un premier temps nous allons aborder les généralités sur les antennes pour définir l'antenne ainsi que leurs caractéristiques ensuite au niveau du deuxième chapitre donner un aperçu sur leurs différents types d'antennes spatiales puis on a définis notre antenne TCR ( Tracking Command Ranging ) et sa géométrie et sa description.. Et enfin au niveau du dernier chapitre présenter les différents outils de simulations ainsi que les résultats de la parties simulation et leurs interprétations.

# **Chapitre I :**

**Généralités sur les antennes**

### **I.1.INTRODUCTION**

Les domaines d'application des systèmes spatiaux sont très vastes, leur domaine d'activités sont par exemple : les télécommunications, la localisation et la navigation, l'observation de la Terre, les sciences de l'Univers, etc.

La diversité de ces applications implique l'utilisation d'une large gamme de concepts d'antennes allant des structures simples (antennes imprimées, hélices, . . .) jusqu'aux architectures complexes (antennes actives à rayonnement direct, réseau focal, réflecteur formes, réseau réflecteur, . . .).

Les antennes sont des dispositifs utilisés pour rayonner le champ électromagnétique dans l'espace ou pour le capter. Le chapitre I de notre travail est destiné à présenter dans le cas général la description d'une antenne, ces caractéristiques, la liaison satellitaire employée pour les radiocommunications.

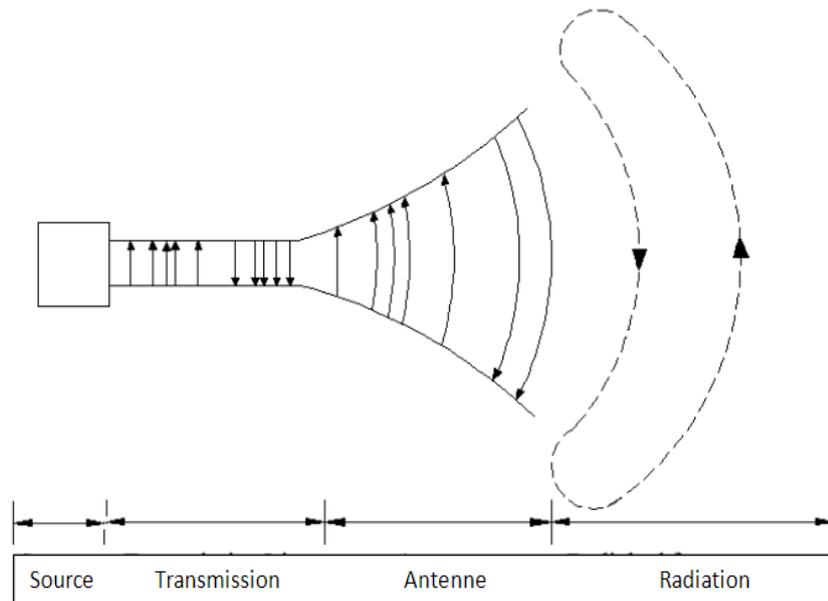
Ce chapitre est dédié aux principes fondamentaux des antennes, en premier temps on a donné une définition des antennes avec leur fonctionnement suivi par une entrée sur les antennes de satellite. Dans un second temps on va parler sur les antennes dans l'environnement spatiale Puis on passe aux paramètres et caractéristique essentiel de ces antennes. Et on finira avec une conclusion de ce chapitre.

### **I.2.GENERALITES SUR LES ANTENNES**

Les antennes sont des dispositifs permettant de rayonner ou de capter les ondes électromagnétiques, ou, En d'autres termes une structure de transition entre espace libre et onde guidée. L'antenne d'émission transforme le courant modulé d'excitation en ondes électromagnétiques capables de se déplacer dans l'atmosphère. Tandis que l'antenne de réception convertit les ondes électromagnétiques reçues en courant susceptible d'être traité par le récepteur. [1 , 2].

#### **I.2.1. DEFINITION DE L'ANTENNE**

L'une des définitions les plus justes d'une antenne est donnée dans la norme IEEE des définitions des termes pour les antennes. D'après cette norme, une antenne est un moyen de rayonnement ou de réception des ondes radio [3]. Plus concrètement, c'est un dispositif qui reçoit des signaux d'une ligne de transmission, les convertit en ondes électromagnétiques et les diffuse dans l'espace libre lorsque l'antenne est en mode d'émission. En mode de réception, elle capte tout simplement les ondes électromagnétiques incidentes et les reconvertit en signaux. La figure (I.1) en fait une illustration très simple [4].



Activer

**Figure I. 1:** Rayonnement d'une antenne [4]

L'antenne peut être utilisée (en particulier dans un système de communication) pour diriger l'énergie du rayonnement dans une direction, et de la réduire ou l'annuler dans d'autres directions selon les fréquences. Ceci dit, l'antenne n'est plus seulement un outil de transmission, mais également un dispositif de transition. En conséquence la forme d'une antenne est commandée par un besoin particulier. C'est pourquoi, les antennes prennent tantôt les formes d'ouverture, de patch, de réflecteurs, de lentilles, d'ensemble d'éléments, etc. Une bonne conception de l'antenne peut assouplir les exigences du système et améliorer la performance globale du système [4]

Le rôle d'une antenne est de convertir l'énergie électrique d'un signal en énergie électromagnétique transportée par une onde électromagnétique (ou inversement). Les antennes sont utilisées sur une large gamme de fréquence (ou de longueur d'onde) pour un grand nombre d'applications différentes [5].

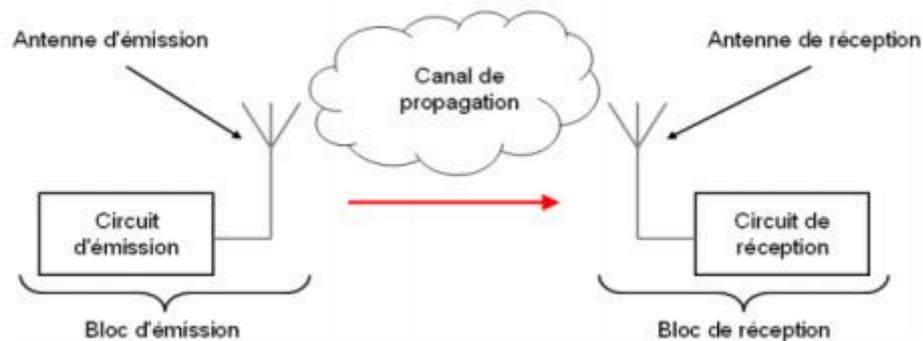
### **I.2.2. LE ROLE D'UNE ANTENNE**

L'antenne a plusieurs rôles dont les principaux sont les suivants :

- \*Permettre une adaptation correcte entre l'équipement radioélectrique et le milieu de propagation.
- \*Assurer la transmission ou la réception de l'énergie dans des directions privilégiées
- \*Transmettre le plus fidèlement possible une information [6].

Si nous considérons un système de communication sans fil le plus simple qui soit, celui-ci serait composé d'un bloc d'émission et d'un bloc de réception. Ces deux blocs seraient

séparés par un canal de propagation dans lequel le signal émis transite avant d'être reçu comme le montre la figure I-2 :



**Figure I. 2 :**Schéma de principe d'un système de communication radio.[7]

### **I.3. LES ANTENNES DE SATELLITE**

Parmi la conception des éléments du satellite, le sous-système d'antenne constitue l'un des composants les plus critiques. Tout d'abord à cause de sa taille, qui d'une part ne peut être infiniment grande pour des difficultés liées au montage et également au repliement durant les phases de lancement et d'injection orbitale, mais qui d'autre part est reliée au gain de l'antenne, élevé pour les applications spatiales [8]. Ensuite, il ne faut pas oublier les nombreuses contraintes mécaniques et thermiques qui s'exercent sur le système d'antenne durant sa durée de vie. De surcroît, ces exigences doivent s'intégrer dans un système dont le poids et le coût sont déterminants.

Par conséquent, dans le domaine spatial, certains types d'antennes sont privilégiés, car regroupant les caractéristique nécessaires et permettant notamment d'obtenir des gains élevés. C'est particulièrement le cas des antennes cornets, antennes à haute efficacité, largement utilisées en tant qu'antennes à couverture globale, antennes à formation de faisceau, et depuis quelques décennies antennes à faisceau multiples [9]. Cependant, avec leurs nombreux avantages les antennes réflecteurs dominent le marché spatial.

Effectivement, pouvant atteindre des gains de 40 dB voire 50 dB [10] et permettant d'obtenir tout diagramme de rayonnement, les systèmes d'antennes réflecteurs offset présentent une structure simple et légère [9], deux critères fondamentaux dans le secteur spatial. En outre, ses simulations désormais aisées et fiables, donnent de très bonnes prédictions des performances pour la vie active du satellite [11].

## **I.4. ANTENNE DANS L'ENVIRONNEMENT SPATIAL**

### **I.4.1. L'ENCOMBREMENT ET LA MASSE**

La masse de l'antenne par unité de surface déployée doit de plus être inférieure à 500 g/m<sup>2</sup>. Pour un réflecteur de 10 m de diamètre (78,5 m<sup>2</sup>), cela représente donc une masse totale de 40 kg. La masse du tricot réflecteur étant évaluée à 10 kg, la masse de la structure porteuse ne doit donc pas excéder 30 kg [12].

### **I.4.2. L'ENVIRONNEMENT DYNAMIQUE**

L'antenne doit résister sans dommage à l'environnement mécanique vibratoire durant la phase de lancement. Les essais et vérifications ont mené simulent cet environnement en le décomposant selon un niveau d'accélération quasi-statique égal à vingt fois l'accélération gravitationnelle, couvrant l'environnement aléatoire, et un niveau dynamique de déplacement ou d'accélération.

Cette spécification dynamique est appliquée à l'antenne pliée suivant les trois directions, à l'aide d'un pot vibrant, par des niveaux « sinus » de  $\pm 10$  mm dans une plage de fréquences allant de 5 à 16 Hz et de  $\pm 10$  G (accélération gravitationnelle) pour des fréquences allant de 16 à 100 Hz. De plus, les fréquences des modes propres de l'antenne en configuration pliée doivent toutes être supérieures à 80 Hz.

Par ailleurs, le réflecteur déployé ne doit pas être sensible aux excitations fréquentielles des messages de commande du Système de Contrôle d'Altitude et d'Orbite (SCAO) dont la fréquence nominale se situe entre 0,8 Hz et 1 Hz. Cela signifie que la fréquence du premier mode propre du réflecteur doit être supérieure à cette plage. Cette spécification est déterminante pour sa conception car elle va orienter les choix en termes de rigidité et de masse.

### **I.4.3. L'ENVIRONNEMENT SPATIAL ET THERMIQUE**

Le secteur spatial induit de nombreuses exigences à différents niveaux, des contraintes mécaniques et thermiques s'appliquant sur les structures, à la fiabilité, au coût et à la taille de tous ses composants.

Dans l'espace, l'antenne est non seulement en apesanteur et dans un environnement de vide mais aussi soumise à des rayonnements ultraviolets et corpusculaires. Ainsi, en configuration déployée, le réflecteur doit être capable de fonctionner sans subir de trop fortes distorsions dues aux dilatations thermiques différentielles dans une plage de températures entre -180°C et +150°C. Ces variations de température sont en fonction de l'exposition au rayonnement solaire et peuvent être très rapides. De plus, un gradient thermique important, de

l'ordre de 150°C, peut apparaître entre les zones du réflecteur éclairées par le soleil et celles à l'ombre.[12].

## I.5.PARAMETRES IMPORTANTS DE L'ANTENNE

Avant d'en arriver à la performance des antennes, il pourrait être intéressant de définir au préalable les différents paramètres d'une antenne. Parmi ces paramètres, les plus courants sont notamment le diagramme de rayonnement, la directivité, le gain et perte dans l'espace libre et bilan de liaison.

### I.5.1. DIRECTIVITE ET GAIN

La directivité dans une certaine direction,  $D(\theta, \phi)$ , est définie par le rapport de l'intensité de puissance rayonnée dans une certaine direction sur l'intensité de puissance rayonnée totale d'une antenne isotrope [13].

$$D(\theta, \phi) = 4\pi * \frac{\text{intensité de puissance rayonnée dans la direction}(\theta, \phi)}{\text{puissance rayonnée total}} (I - 1)$$

Le gain d'une antenne dans une certaine direction,  $G(\theta, \phi)$ , est quant à lui donné par le rapport de l'intensité de puissance rayonnée dans une certaine direction sur l'intensité de puissance acceptée par l'antenne qui serait rayonnée par une antenne isotrope sans pertes .

$$G(\theta, \phi) = 4\pi * \frac{\text{intensité de puissance rayonnée dans la direction}(\theta, \phi)}{\text{puissance rayonnée acceptée}} (I - 2)$$

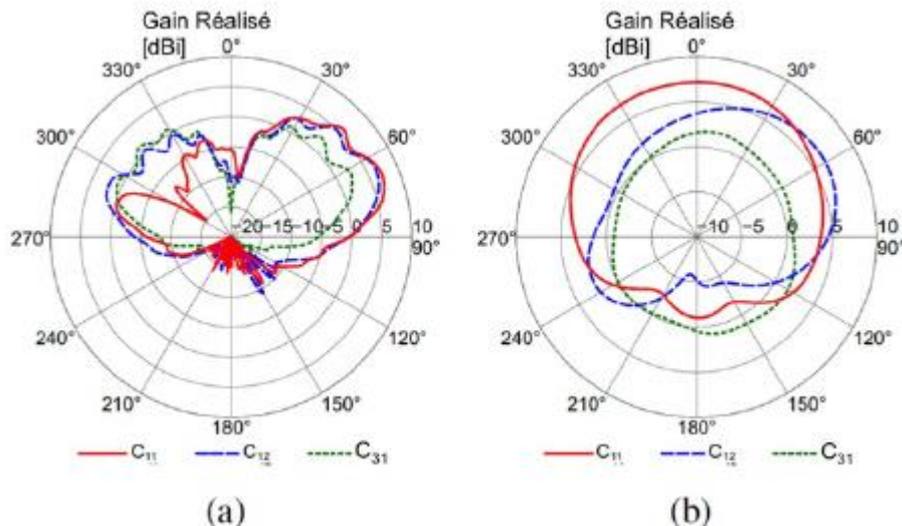


Figure I. 3: Gain réalisé de l'antenne dans (a) le plan d'élévation et (b) le plan d'azimut [14].

### I.5.2. EIRP

Le produit  $P_t \cdot G_t$  de la puissance transmise par le gain de l'antenne de transmission est appelé la puissance équivalente rayonnée isotropiquement et souvent notée EIRP (Equivalent

Isotropically Radiated Power). Il est souvent utilisé comme indice de la capacité de transmission d'une station de base [15].

### **I.5.3. PERTE DANS L'ESPACE LIBRE**

Le calcul des pertes dans l'espace libre est une étape de base pour le calcul d'une liaison de communication par satellite.

Dans ce type de systèmes de communication, on suppose que l'antenne de transmission et l'antenne de réception sont alignées face à face dans l'espace libre et sont séparées par une distance suffisamment élevée,  $d$ , exprimée en mètres. Soit  $G_t$  et  $G_r$  les gains respectifs des antennes de transmission et de réception,  $A_r$  la surface effective de l'antenne de réception,  $P_t$  la puissance transmise et  $\lambda$  la longueur d'onde. La puissance reçue  $P_r$  peut être exprimée selon l'équation de Friis :

$$P_r = P_t \times G_t \times \frac{A_r}{4\pi d^2} = P_t \times G_t \times G_r \times \frac{\gamma^2}{4\pi d^2} \quad (I - 3)$$

$$A_r = G_r \times \frac{\gamma^2}{4\pi d^2} \quad (I - 4)$$

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 supposons que les antennes de transmission et de réception sont isotropes nous pouvons exprimer les pertes de transmission comme suit :

$$L_{fs} = \frac{4\pi d^2}{\gamma^2} \quad (I - 5)$$

### **I.5.4. PERTE PAR ABSORPTION ATMOSPHERIQUE**

Les molécules gazeuses dans la troposphère telle que l'oxygène et la vapeur d'eau sont les principaux facteurs de l'atténuation des ondes radio sous forme d'absorption par résonance. L'atténuation peut être provoquée par les phénomènes d'absorption et de dispersion causés par les particules de glace ou les gouttelettes d'eau. Les pertes de propagation ( $L_p$ ) sur les ondes radio dues aux effets atmosphériques dépendamment de la fréquence.

### **I.5.5. TEMPERATURE 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 du 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  $50 \Omega$  à une température absolue  $T$  [15].

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 température). Il est souvent recommandé d'exprimer  $N_0$  en décibel selon l'équation suivante :

$$[N_0]_{dB} = 10 * \log k + 10 * \log T = -228.6 + 10 * \log T_{dB_{HZ}} \quad (I - 6)$$

### I.5.6. 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 [16].

$$SNR = \frac{P_r}{N} = \frac{EIRP \cdot G_r}{N L_{fs}} = \frac{EIRP \cdot G_r}{B N^0 L_{fs}} \quad (I - 7)$$

$$N_0 = \frac{N}{B} \quad (I - 8)$$

$$\frac{p_R}{N_0} = \frac{EIRP \cdot G_r / T}{K L_{TOT}} \quad (I - 9)$$

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

$GR/T$  représente le figure de mérite.

## I.6. CARACTERISTIQUES DES ANTENNES SPATIALES

### I.6.1. LA BANDE PASSANTE

La largeur de bande ou la bande passante en adaptation d'une antenne peut être définie comme une bande de fréquences pour laquelle le coefficient de réflexion est inférieur à un seuil donné. Elle est souvent considérée comme une gamme de fréquences positionnée de part et d'autre de la fréquence centrale . Elle peut aussi être définie comme correspondant à la

bande de fréquences où le transfert d'énergie de l'alimentation vers l'antenne (ou de l'antenne vers le récepteur) est supérieur à un seuil. On parle alors de bande passante absolue, est donnée par [17]:

$$\Delta f = f_2 - f_1 \quad (I.10)$$

On déduit souvent la bande passante d'une antenne à partir de la courbe de son coefficient de réflexion. Certains critères typiques sont pris comme un coefficient de réflexion inférieur à -6 dB ou à -10 dB. Souvent, on l'exprime en termes de bande passante relative par rapport à la fréquence centrale [17], est donnée par :

$$BP(\%) = \frac{\Delta f}{f_0} \cdot 100 \quad (I.11)$$

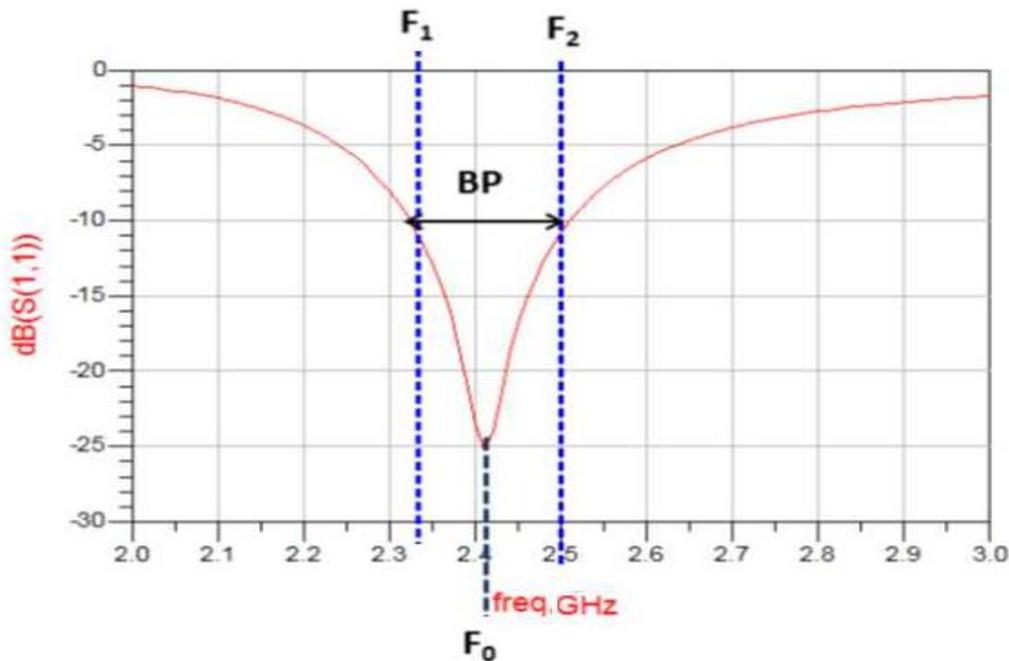


Figure I. 4: Illustration de la bande passante à -10 dB à partir du coefficient de réflexion[18]

### I.6.2. DIAGRAMME DE RAYONNEMENT

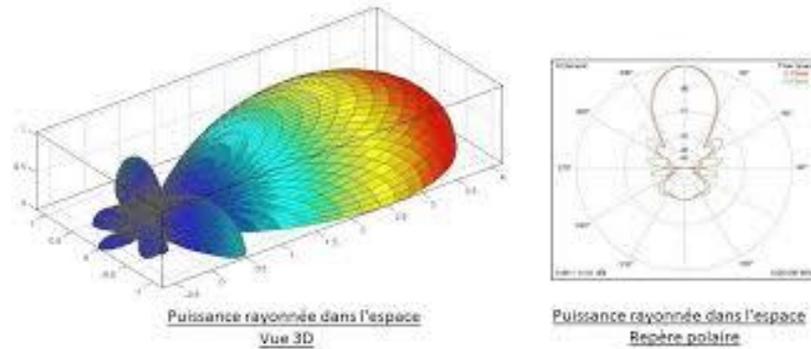
Les antennes sont rarement omnidirectionnelles et émettent ou reçoivent dans des directions privilégiées. Le diagramme de rayonnement représente les variations de la puissance rayonnée par l'antenne dans les différentes directions de l'espace. Il indique les directions de l'espace dans lesquelles la puissance rayonnée est maximale.

On trace dans le diagramme de rayonnement la fonction caractéristique de rayonnement  $r(\theta, \varphi)$ , qui varie entre 0 et 1 selon la direction. En général, le diagramme de rayonnement d'une antenne est représenté dans les plans horizontaux (H-plan) et verticaux (E-plan) :

$$r(\theta, \varphi) = \frac{P(\theta, \varphi)}{P_0(\theta_0, \varphi_0)} \quad (I.12)$$

Avec  $P(\theta, \varphi)$  La puissance rayonnée dans une direction quelconque.

$P_0(\theta_0, \varphi_0)$  La puissance rayonnée maximale.



**Figure I. 5:** Différentes représentations du diagramme de rayonnement d'une antenne.

Le diagramme de rayonnement d'une antenne est principalement relié à sa géométrie mais peut aussi varier avec la fréquence. Hormis les antennes omnidirectionnelles, les antennes ne rayonnent pas la puissance de manière uniforme dans l'espace. Dans le cas d'une antenne omnidirectionnelle, la fonction caractéristique de rayonnement est égale à 1 quel que soit la direction considérée. En général, la puissance est concentrée dans un ou plusieurs « lobes ». Le lobe principal correspond à la direction privilégiée de rayonnement. Les lobes secondaires sont généralement des lobes parasites. Dans ces directions, l'énergie rayonnée est perdue donc on cherche à les atténuer. [19]

### I.6.3. ANGLE D'OUVERTURE

L'angle d'ouverture (beamwidth) caractérise la largeur du lobe principal. L'angle d'ouverture représente la portion de l'espace dans lequel la majeure partie de la puissance est rayonnée. On définit un angle d'ouverture comme étant l'angle à partir duquel l'onde a perdu 3 dB de puissance.

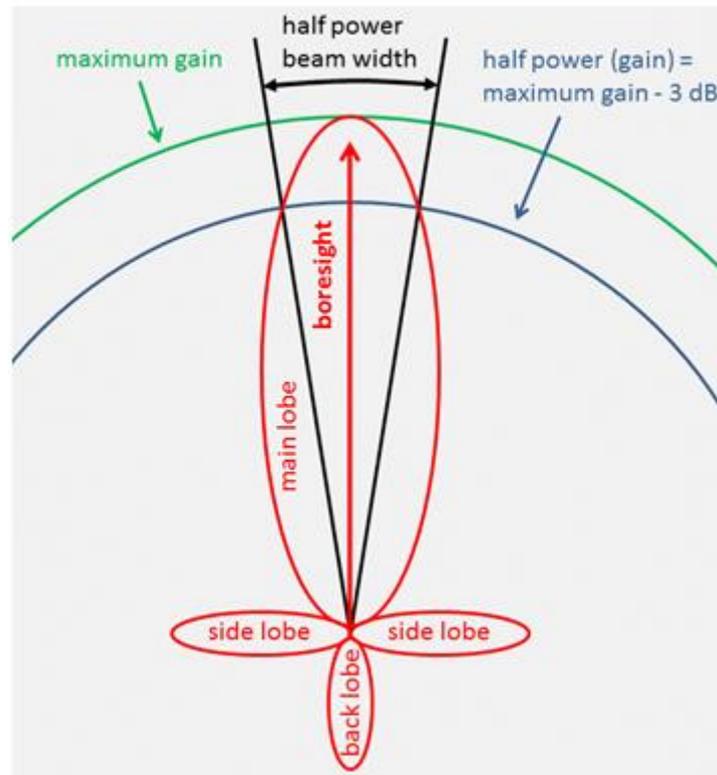


Figure I. 6: Angle d'ouverture à 3dB [19].

#### I.6.4. LA POLARISATION

La polarisation est définie comme étant l'orientation du champ électrique d'une onde électromagnétique. La polarisation d'une onde est une donnée fondamentale pour l'étude des antennes. En effet selon la constitution de l'antenne, elle ne recevra qu'une certaine forme de polarisation. La polarisation du champ électromagnétique rayonné par une antenne est donnée par la direction du champ électrique  $E$ . Si  $E$  garde une direction constante dans le temps, on dit que l'on a une polarisation rectiligne (voir la Figure I.7). Si la direction varie avec le temps de telle sorte que si, en un point donné, on schématise les positions successives de  $E$ , l'extrémité du vecteur représentatif décrit un cercle ou une ellipse. On dit alors que le champ rayonné est à polarisation circulaire ou elliptique [20,21].

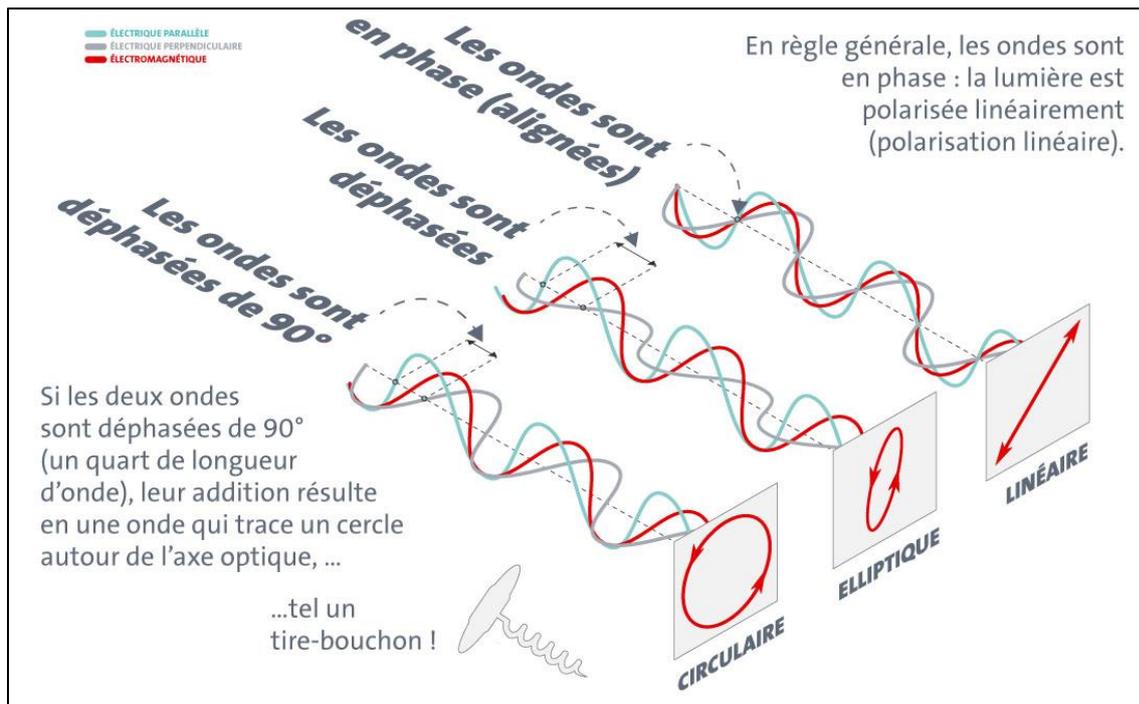


Figure I. 7: Polarisation du champ électromagnétique [20]

### I.6.5. Coefficient de réflexion et ROS

Le coefficient de réflexion (RetunLoss : RL) est un paramètre qui indique la quantité d'énergie perdue à la charge, et qui n'est pas réfléchi. Comme il est expliqué dans le paragraphe précédent, les ondes réfléchies entraînent la formation d'ondes stationnaires, lorsque l'impédance de l'émetteur et de l'antenne ne sont pas égaux. D'où le coefficient de réflexion est un paramètre semblable à la VSWR pour indiquer la correspondance entre l'émetteur et l'antenne.

Le coefficient de réflexion est donnée par;  $RL = -20 \log_{10}(\tau)(dB)$

Pour une correspondance parfaite entre l'émetteur et l'antenne,  $\Gamma = 0$  et  $RL = \infty$  signifie qu'il n'aura aucune énergie réfléchi, tandis qu'une  $\Gamma = 1$  a une  $RL = 0$  dB, ce qui implique que toute la puissance incidente est réfléchi. Pour les cas pratiques, un VSWR de 2 est acceptable, qui correspond à un RL de -9,54 dB.[22]

## **I.7.CONCLUSION**

L'environnement spatial est un milieu agressif aux engins spatiaux. Il provoque des contraintes sévères thermiques et mécaniques qui dégradent les matériaux constructifs, particulièrement sur certains composants tels que les antennes et les panneaux solaires à cause de leurs comportements physiques importants.

Afin de protéger les antennes de ces contraintes, plusieurs techniques sont utilisées telles que les revêtements thermiques les radômes et les pare-soleils.

Au cours de ce chapitre, on peut aussi conclure que la puissance équivalente rayonnée isotropiquement (EIRP) des antennes d'émission et la figure de mérite (Gr/T) pour les antennes de réception jouent un rôle très important pour améliorer la qualité de la liaison spatiale.

Par conséquent, la conception de ces antennes sera basée sur l'amélioration du gain et l'apaisement de la température de bruit (élimination des lobes secondaires).

Dans la suite, des techniques d'augmentation du gain seront utilisées dans la conception des antennes proposées. En fin, l'analyse de la mission et les caractéristiques du sous-système d'antenne à embarquer ont été définis.

La diversité des applications spatiales implique l'utilisation de large gamme des antennes. Afin de réduire le nombre total des antennes embarquées au bord du satellite, des techniques sont utilisées pour assurer à l'antenne de fonctionner dans plusieurs bandes. Pour cela, le deuxième chapitre sera consacré à l'étude des antennes TCR en bande Ku.

# **Chapitre II :**

**L'antenne TCR dans la  
bande KU**

## **II.1.INTRODUCTION**

Un satellite de télécommunications est un satellite artificiel placé dans l'espace pour des besoins de télécommunications. Le développement des télécommunications spatiales est confié initialement à des organismes internationaux (Intelsat et Inmarsat). Le secteur des télécommunications spatiales fait vivre en 2016 une poignée de constructeurs de satellites qui se partagent un marché relativement stable d'une vingtaine de satellites géostationnaires par an et plusieurs dizaines d'opérateurs de satellites. Pour chaque communication sans fil nécessite l'utilisation des antennes qui sont la base de la télécommunication spatiale.

Dans ce chapitre nous allons parler des antennes spatiales avec leurs différents types, en suite on parlera un peu des fréquences utilisées pour les communications satellitaires. On passera par la suite à notre sujet qui est l'antenne TCR (tracking command and ranging) et sa géométrie de base, puis on donnera une classification des antennes ULB. Ce chapitre ce terminera par une conclusion.

## **II.2. LES ANTENNES SPATIALES**

L'utilisation des satellites est essentielle dans notre société moderne. Inconsciemment, nous utilisons quotidiennement des informations venant de l'espace. Afin d'illustrer ce fait, nous pouvons citer plusieurs exemples d'applications de l'espace :

- Les missions de télécommunications : télédiffusion, télécommunication avec les mobiles, transmission multimédia haut débit.
- Les missions de localisation/navigation : GPS, Galileo, Argos.
- Les missions d'observation de la Terre : météorologie, étude des océans, étude de l'atmosphère, climatologie.
- Les missions de défense et les missions scientifiques.

Quelque soient leurs applications, les satellites utilisent des ondes électromagnétiques pour assurer la liaison avec la terre ou pour remplir leurs missions. Les antennes utilisées sont donc des composants vitaux de ce système [23].

## **II.3. DIFFERENTS TYPES DES ANTENNES SPATIALES**

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

### **II.3.1. SELON LA DIRECTIVITE**

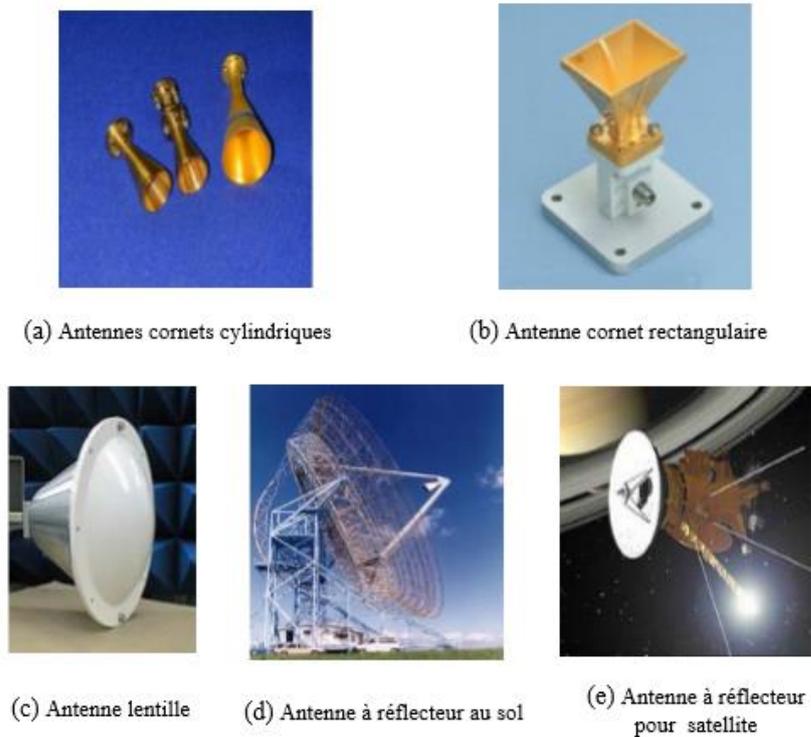
Trois types des antennes spatiales peuvent être distingués :

### II.3.1.1. ANTENNES DIRECTIVES

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

#### II.3.1.1.1. ANTENNES A OUVERTURE RAYONNANTE ET SYSTEME FOCALISANT

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



**Figure II. 1:** Différents exemples d'antennes à ouverture rayonnante (a) (b) et système focalisant (c) (d) (e) [24]

Le cornet (Figure II-1.a et Figure II-1.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 II-1.d et II-1.e) sont des systèmes focalisant en réflexion. Elles sont constituées d'une source qui illumine un réflecteur métallique. [25]

### II.3.1.1.2.ANTENNES RESEAUX

Une antenne réseau est constituée d'un groupement de plusieurs antennes identiques. Ce groupement d'antennes peut être formé de dipôles, de patches, de fentes, ou même de cornets (Figure II.2). 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). Lorsque l'on double le nombre d'éléments rayonnants, on augmente (en théorie) de 3 dB la puissance de rayonnement de l'ensemble.

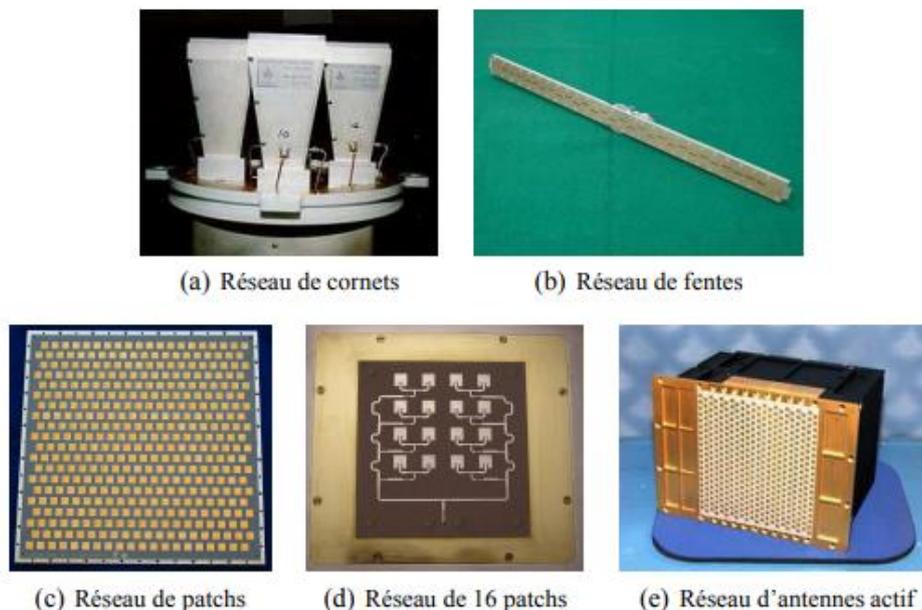


Figure II. 2: Différents exemples d'antennes réseau[24].

### II.3.1.2.ANTENNES OMNIDIRECTIONNELLES

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

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

Dans le domaine spatial, ce type d'antenne a été généralement utilisé dans le sous-système télémétrie, poursuite et de commande TTC (Telemetry, Tracking & Command), parce que ce dernier doit être opérationnel pendant toutes les phases de la mission, même si le contrôle d'attitude est perdu. La Figure II-3 représente quelques exemples sur l'antenne omnidirectionnelle.



**Figure II. 3:** Antenne de télémétrie, poursuite et de commande  
(Courtesy of RUAG Aerospace Sweden)[15]

### **II.3.1.3. ANTENNES HEMISPHERIQUES**

Pour répondre à la nécessité d'une fréquence unique à profil bas et de faible poids antennes hémisphériques ou quasi-hémisphérique, le travail à S, C, ou de la bande X, antennes patch-tassent excités ont été mis au point à RUAG Aerospace Suède Figure II-4. Elles sont constituées d'une coupelle cylindrique courte, avec une section transversale circulaire et un excitateur. La coupe est excitée l'aide des deux éléments patchs circulaire, ou un seul patch. La partie inférieure patch ou le patch unique est alimenté à un moment donné et le patch à deux perturbations opposées pour générer la polarisation circulaire.



**Figure II. 4:**Antenne bande X par RUAG [26]

### **II.3.2. 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 36 000 km et les orbites moyennes, dites MEO (Middle EarthOrbit) 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.

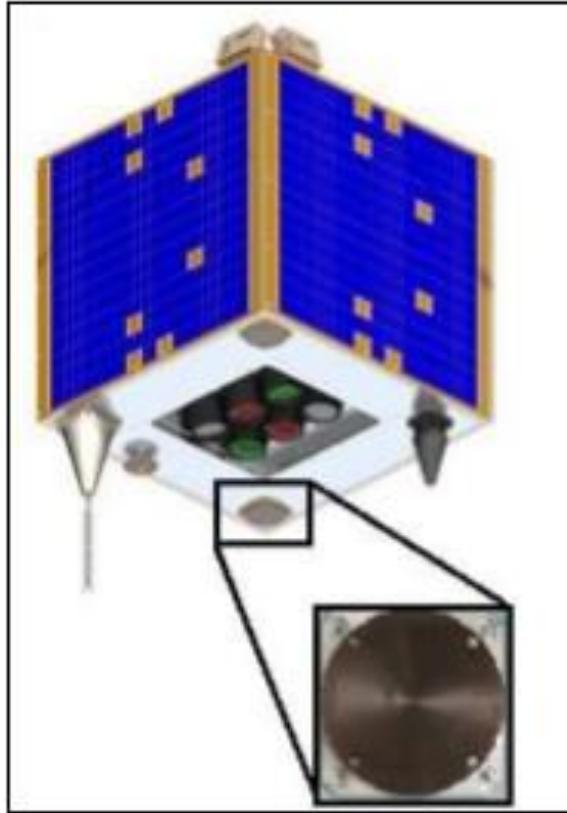
Orbite	Altitude	Missions possibles
Orbite basse LEO	600 – 1600 Km	Observation de la terre, météo Télécommunications (constellations)
Orbite moyenne MEO	10 000-20 000 km	Télécommunications (constellations), positionnement par satellites, missions scientifiques
Orbite géostationnaire GEO	35 786 km	Télécommunications,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

**Tableau II. 1:**Les différentes orbites terrestres et leurs missions associées.[27]

### **II.3.3. SELON LE GAIN [15]**

#### **II.3.3.1.ANTENNES A GAIN FAIBLE $G \leq 6\text{dBi}$**

L'antenne patch est une pastille métallique à la surface d'un substrat diélectrique dont la face inférieure est métallisée, Figure II.5. 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 II. 5:**Antenne patch micro-ruban bande S pour microsatellite de Surrey SSTL

### II.3.3.2.ANTENNES A GAIN ELEVE $G \geq 6\text{dBi}$

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. (Figures II.6 et II.7).



**Figure II. 6:** Antenne à réflecteur (AstroMesh) d'INMARSAT-4



Figure II. 7: Réseaux d'antennes de SMOS SAT

## II.4. CLASSIFICATION DES ANTENNES ULB

Les antennes ultra large bande (ULB) peuvent être réparties en quatre classes différentes, selon leurs formes et leurs spécificités:

### II.4.1. LES ANTENNES INDEPENDANTES DE LA FREQUENCE

Théoriquement, les antennes indépendantes de la fréquence sont composées d'éléments susceptibles de se déduire les uns des autres par homothétie. Elles ont la particularité de présenter un diagramme de rayonnement, une impédance d'entrée ainsi qu'une polarisation virtuellement inchangée sur une bande de fréquences quasiment infinie. Leur géométrie permet d'avoir une bande passante de l'ordre d'une décade. Pour cette classe d'antennes, il existe plusieurs groupes mais les plus connus sont : les antennes équi-angulaires et les antennes log- périodiques. [28]



a)- Antenne spirale équi-angulaire conique



b)-Antenne log périodique

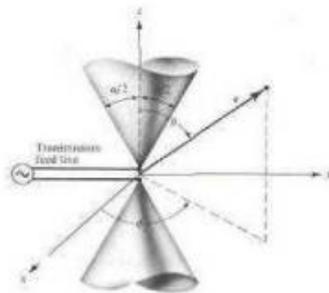
Figure II. 8: antenne Indépendantes de la fréquence [29]

## II.4.2. LES ANTENNES ELEMENTAIRES

Cette catégorie d'antennes ULB est sûrement la plus représentée et utilisée en télécommunications. Elles représentent une évolution de simples dipôles ou monopôles qui ont des comportements très bien étudiés et développés dans plusieurs ouvrages. En effet, l'une des caractéristiques principales des dipôles est la variation de leur bande passante qui augmente en fonction du diamètre et de la surface de leur cylindre rayonnant. Cette particularité a abouti à plusieurs formes géométriques d'antennes, évasées, coniques, rondes, elliptiques, triangulaires et rectangulaires. Ces antennes sont relativement compactes, ont des caractéristiques de rayonnement omnidirectionnel, et suivent les principes de dimensionnement des antennes monopôles et dipôles [30].

## II.4.3. LES ANTENNES BICONIQUES

Les antennes biconiques ont été imaginées en 1943 par Schelkun-off. Le concept de l'antenne biconique est basé sur le fait qu'un dipôle construit à l'aide d'un fil épais offre une bande passante plus grande que s'il est construit avec un fil fin. Ce concept peut être étendu pour obtenir une bande passante encore plus importante en utilisant des conducteurs évasés. La structure biconique est montrée sur la figure (II-9). Ces antennes sont très peu directives et présentent donc de faibles gains, inférieurs à 5dB. Leur diagramme de rayonnement est très proche de celui des dipôles [31].



B- antenne biconique infinie



A- antenne biconique finie

Figure II. 9:Antenne biconique [32].

En pratique, l'antenne biconique est tronquée (Figure II-4-b), En effet, lorsque les cônes sont tronqués, une partie de l'énergie est réfléchi en bout d'antenne et donc l'antenne biconique finie par être considérée comme un guide d'onde se terminant par une charge. L'antenne biconique finie possède une bande passante plus de 100%, un diagramme de rayonnement omnidirectionnel [33].La polarisation est linéaire et le gain maximum typique pour ce type d'antenne est de 4 dBi.

#### **II.4.4. LES ANTENNES DISCONES**

L'antenne discône (figure II.10) est une antenne biconique dont l'un des cônes est remplacé par un plan de masse infini qui peut être circulaire ou rectangulaire remplaçant le second cône de l'antenne biconique. Ce qui fait que la structure totale de l'antenne est constituée d'un disque et d'un cône (d'où son appellation) [30].

Le diagramme de rayonnement est omnidirectionnel dans le plan horizontal, mais favorise le demi-espace contenant le cône en élévation, ce qui permet d'avoir une directivité plus importante que l'antenne biconique. Son gain est légèrement plus élevé que celui d'une antenne biconique finie du fait de l'utilisation d'un plan de masse fini [34].



**Figure II. 10:** Antenne discône [35]

#### **II.5. LES ANTENNES A TRANSITION PROGRESSIVE**

Les antennes à transition progressives s'appuient sur l'idée selon laquelle, une antenne peut être considérée comme étant une région de transition entre un guide d'onde ou tout autre système d'alimentation et l'espace libre. Ainsi cette catégorie est inspirée des lignes de transmission dont l'impédance caractéristique est constante sur une très large bande de fréquences. L'augmentation d'impédance caractéristique de cette structure jusqu'à celle du vide est assurée par adaptation de la ligne au circuit d'alimentation d'antenne, suivie d'une région de transition. [35].

#### **II.6. LES DIRECTIVES DES ANTENNES ULB**

Les antennes ULB directives peuvent être décrites comme des systèmes de transition entre un guide d'onde et l'espace libre. On part d'une ligne de transmission dont l'un des paramètres est une impédance caractéristique constante quelque soit la fréquence, puis les

lignes de transmission s'évasent pour amener graduellement la structure à l'impédance du vide. L'onde peut maintenant rayonner.

L'antenne ULB directive est souvent utilisée dans des applications particulières ; par exemple dans le cas d'une station de base en communication avec des stations fixes. D'autres systèmes requièrent que l'antenne rayonne plutôt dans un demi-espace. On peut citer comme exemple l'antenne de point d'accès accrochée au mur ou encore une antenne en façade d'appareils électroniques. Certaines antennes ULB directives sont aussi couramment utilisées dans le cadre de mesure d'antennes en chambre anhoïade. Contrairement aux antennes étudiées précédemment, il est très difficile de miniaturiser ce type d'antenne.

### II.6.1. LES ANTENNES CORNETS

Avec des propriétés intrinsèques large bande, les antennes cornets servent de transition, d'élargissement du guide d'onde, afin de rayonner efficacement le signal dans l'espace libre. [35].

Un dispositif très utilisé pour la propagation d'ondes guidées est le guide d'onde rectangulaire. Sa qualité de transmission est excellente. Pour cette raison, il est utilisé en haute fréquence. Son utilisation est très répandue en hyperfréquences. Le transformateur de puissance électromagnétique guidée en puissance rayonnée est l'antenne cornet (figure II.11) [36]. Sa forme permet de passer graduellement des dimensions du guide d'onde à l'espace libre. L'onde est ainsi naturellement projetée dans l'espace libre. De façon très naturelle, le rayonnement a lieu dans l'axe du guide d'onde. Cette antenne est plus directive que les précédentes, dans la mesure où la puissance n'est émise que dans une région de l'espace limitée. Elle a de nombreux avantages, en termes de qualité et de puissance. Elle a une largeur de bande supérieure à celle des dipôles ou des antennes à fentes. Elle présente une bonne adaptation au guide d'onde en s'évasant lentement à partir de celui-ci. Son rapport d'onde stationnaire (TOS) est de l'ordre de 1,05 à 1,2 [37, 36, 38].

L'inconvénient majeur de ce type d'antennes est son poids et son coût, car elle est entièrement métallique. Les antennes satellites sont essentiellement de ce type et, dans ce cas, le poids est un inconvénient majeur qui est contrebalancé par la solidité et le gain de ces antennes. Ce sont aussi les antennes utilisées dans les systèmes radar en raison de la puissance élevée qu'elles supportent. Du fait de leur constitution métallique, elles présentent peu de pertes et du fait de leur forme, elles sont très directives.

Les antennes cornets de forme cylindrique, conique ou pyramidale sont utilisées comme des antennes sources pour éclairer un réflecteur parabolique. Suivant la forme du

cornet, il est possible d'obtenir un diagramme de rayonnement fin soit dans le plan E, soit dans le plan H, soit dans les deux. La figure (II.12) présente un exemple d'antenne cornet ainsi que son diagramme de rayonnement.

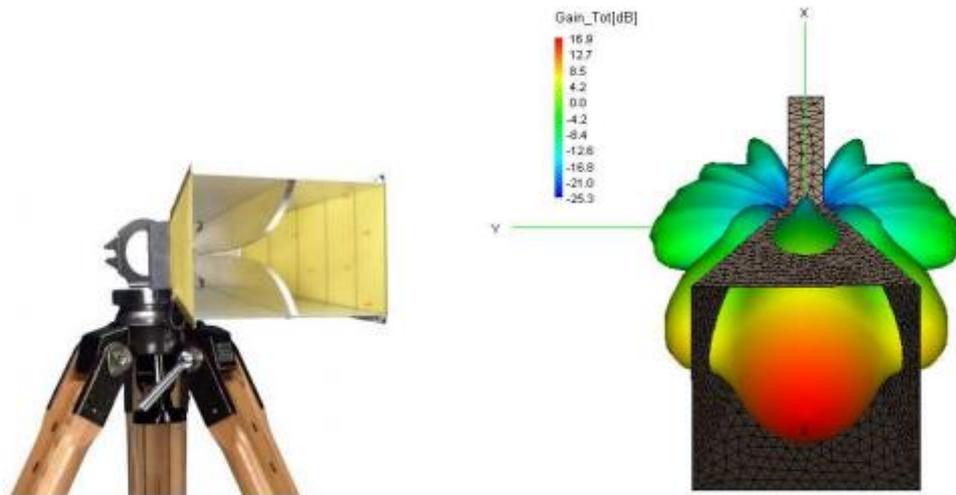


Figure II. 11: antenne cornet (modèle R&S HF906 1 – 18 GHz) et son Diagramme de rayonnement [39].

Les cornets présentent les avantages suivants [36-38] :

- \* La pureté de leur polarisation permet de caractériser d'autres antennes.
- \* Une large bande passante et un gain important.

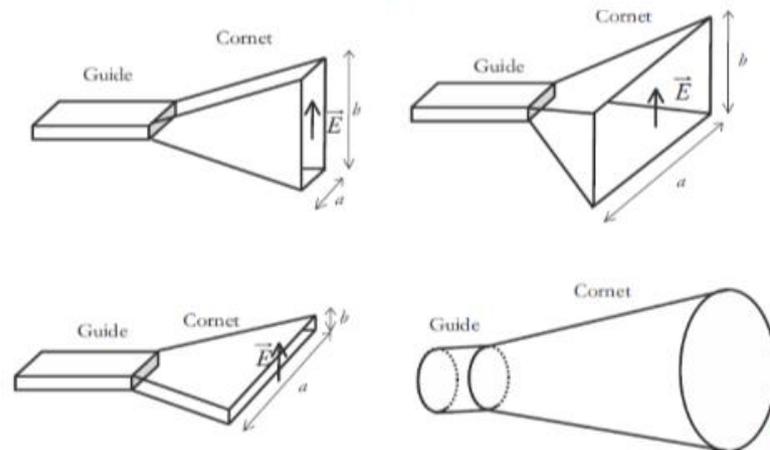


Figure II. 12: Différents types de cornets [36]

## II.7. LES BANDES DE FREQUENCES

Les bandes de fréquences mises en œuvre pour les communications par satellite sont les plus souvent comprises entre 1 et 30 GHz. En dessous de 1 GHz les ondes sont principalement réfléchies et diffusées par l'atmosphère. Au-dessus de 30 GHz les liaisons

satellites sont possibles mais l'absorption atmosphérique est importante et la technologie d'amplification plus complexe.

La bande de fréquence 1-30 GHz est divisée en sous bandes désignées par des lettres :

Bande	Fréquences	Services
L	1-2 GHz	communications avec les mobiles
S	2-3 GHz	communications avec les mobiles
C	4-6 GHz	communications civiles internationales et nationales
X	7-8 GHz	communications militaires
Ku	11-14 GHz	communications civiles internationales et nationales
Ka	20-30 GHz	nouveaux systèmes d'accès au réseau large bande
EHF	21-45 GHz	communications militaires

**Tableau II. 2:** Les bandes de fréquence

Globalement on peut "résumer" les phénomènes de propagation en considérant que plus la fréquence est basse meilleure est la propagation, car l'atténuation due aux précipitations croît avec la fréquence. Cette atténuation, causée par l'absorption d'énergie par les gouttes d'eau est ainsi pratiquement inexistante en bande L et devient sensible à partir de 4 GHz.[40]

### II.7.1. LA BANDE C

Le sens montant (terre vers satellite) est compris entre 5.9 et 6.4 GHz, le sens descendant entre 3.7 et 4.2 GHz. Cette bande est partagée avec d'autres systèmes (faisceaux hertziens) et demande une coordination. La pluie n'a que peu d'effet. Il y a par contre des interférences provenant de systèmes terrestres (les radars par exemple).

### II.7.2. LA BANDE KU

Le sens montant (terre vers satellite) est compris entre 14 et 14.5 GHz, le sens descendant entre 10.7 et 11.7 GHz ainsi que 12.5 GHz et 12.75 GHz. Cette bande est partiellement dédiée aux systèmes de transmission par satellites et ne nécessite pas de coordination. Il y a peu d'interférences de systèmes terrestres. Par contre l'atténuation par la pluie peut-être importante (> à 10 dB).

## II.8. LES ANTENNES DE TELEMETRIE ET DE COMMANDE (ANTENNE TCR)

Les satellites représentent un gros investissement et il est essentiel de s'assurer qu'ils restent sur la cible et fonctionnent le plus longtemps possible. Les systèmes d'antennes TT&C

sont essentiels à la maintenance et au traitement des éléments des satellites afin d'assurer des performances optimales. Les antennes peuvent tout faire : ajuster l'orbite du satellite, réaligner les panneaux solaires, effectuer une sauvegarde du système, etc.

Le système de télémétrie et de contrôle (TCR) appelé en anglais (tracking, command and ranging) fournit une connexion entre l'engin spatial et les installations sur le terrain terrestre, Le but majeur de la fonction TCR est d'assurer le bon fonctionnement de l'engin spatial.

Donc pour bien comprendre, voici une définition de chaque fonctionnement de ce système.

### **II.9. TTC**

Le sous-système de télémétrie, de poursuite et de contrôle (TT&C) d'un satellite assure une connexion entre le satellite lui-même et les installations au sol.

Le but de la fonction TT&C est de s'assurer que le satellite fonctionne correctement. Ce système assure la surveillance de l'état du satellite grâce à la collecte, au traitement et à la transmission de données à partir des différents sous-systèmes d'engins spatiaux, la détermination de l'emplacement exact du satellite ce fait par la réception, le traitement et la transmission de signaux de télémétrie, ainsi que le contrôle approprié du satellite ce fait par la réception, le traitement et la mise en œuvre des commandes transmises depuis le sol. Certaines conceptions avancées d'engins spatiaux ont évolué vers des «opérations autonomes», de sorte que plusieurs fonctions de contrôle ont été automatisées et ne nécessitent donc pas d'intervention au sol, sauf en cas d'urgence.

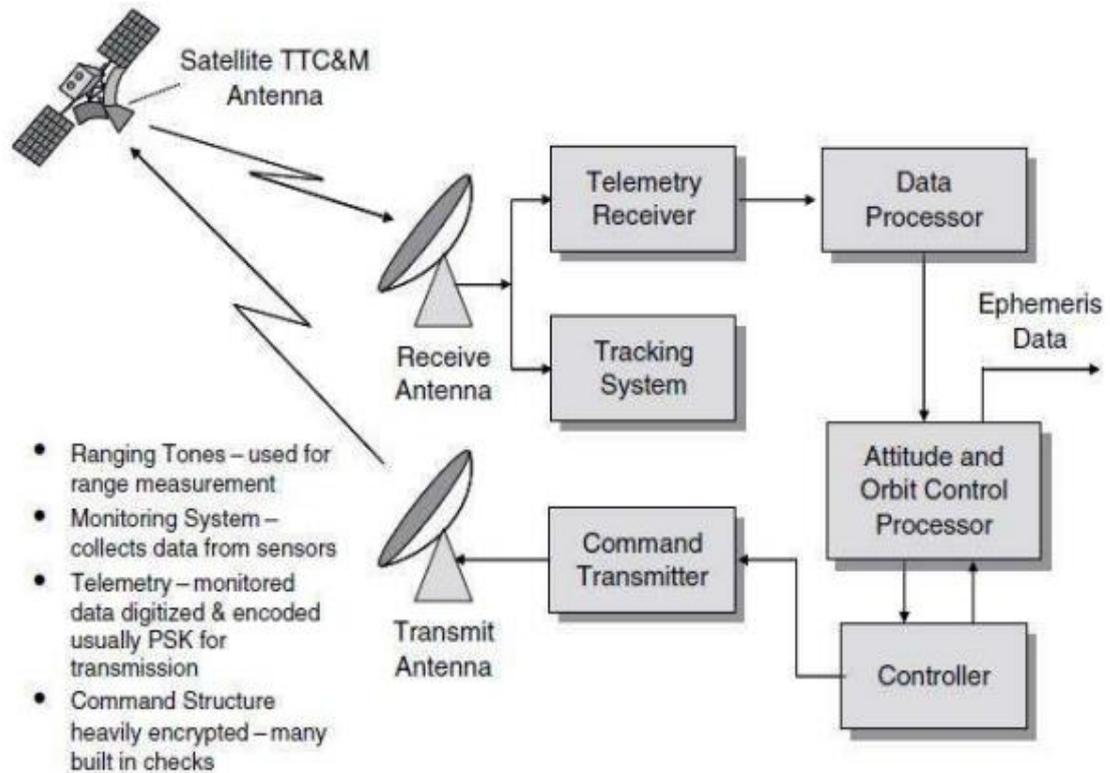


Figure II. 13: Système typique de suivi, de télémétrie, de commande et de surveillance.[41]

### II.9.1. TRACKING

Se réfère à la détermination du courant orbite, position et mouvement de l'engin spatial. La fonction de suivi est accomplie par un certain nombre de techniques, impliquant généralement des signaux de balises satellites, qui sont reçus à la station terrienne du satellite.

Le décalage Doppler de la balise (ou du support de télémétrie) est surveillé pour déterminer la vitesse à laquelle la gamme change (le taux de gamme). Mesures angulaires d'une ou plusieurs bornes de terre peut être utilisées pour déterminer l'emplacement de l'engin spatial.

La plage peut être déterminée en observant l'heure retard d'une impulsion ou d'une séquence d'impulsions émise du satellite. Les capteurs d'accélération et de vitesse sur le satellite peuvent être utilisés pour surveiller la position orbitale et les changements de l'orbite : Emplacement.

### II.9.2. TELEMETRIE

Sa fonction implique la collecte de données à partir de capteurs à bord du vaisseau spatial et le relais de ces informations au sol. Les données télémétrées incluent les paramètres suivants :

-Les conditions de tension et de courant dans le sous-système de puissance ;

- Température des sous-systèmes critiques ;
- Statut des interrupteurs et relais dans les communication set sous-systèmes d'antennes ;
- Pression du réservoir de carburant et état du capteur de contrôle d'attitude.

### **II.9.3.COMMANDE**

C'est la fonction complémentaire de la télémétrie. Le système de commande relaie des commandes spécifiques et des informations sur les opérations depuis le sol jusqu'à l'engin spatial. Les paramètres impliqués dans les liens de commande typiques incluent :

- changements et corrections de contrôle d'attitude et d'orbite contrôle ;
- pointage et contrôle de l'antenne;
- mode de fonctionnement du transpondeur;
- contrôle de la tension de la batterie.

### **II.9.4. RANGING (SUIVI)**

Comme nous savons tous les satellites ne sont pas fixes, cela nous oblige à maintenir leur amplitude de mouvement sur l'orbite dans lequel ils se trouvent.

C'est pourquoi nous utilisons la fonction de suivi de ces satellites.

Les récepteurs GPS calculent les distances aux satellites en fonction du temps nécessaire aux signaux des satellites pour atteindre le sol. Pour effectuer un tel calcul, le récepteur doit être capable de dire précisément quand le signal a été transmis et quand il a été reçu. Les satellites sont équipés d'horloges atomiques extrêmement précises, de sorte que la synchronisation des transmissions est toujours connue. Les signaux diffusés par les satellites, appelés «codes pseudo-aléatoires», sont accompagnés des données d'éphémérides diffusées qui décrivent les formes des orbites des satellites.[42]

La séquence habituelle des fonctions TCR peut être décrite comme suit :

- La réception et démodulation (parfois décodage) des signaux de commande destinés à maintenir le satellite opérationnel et adapter la charge utile aux besoins de la mission ;
- La collecte, mise en forme et émission de signaux de télémétrie pour le contrôle permanent de l'ensemble du Satellite ;
- Le transfert, après démodulation et modulation, des signaux utilisés pour la télémétrie.

Le système TCR doit fonctionner de manière fiable pendant toutes les phases de la vie d'un satellite et nécessite une redondance pour certains de ses équipements. Une antenne omnidirectionnelle est utilisée pour le transfert ou en cas de désorientation du satellite. Pendant les opérations normales en station, des antennes de communication à gain élevé sont utilisées pour la transmission et la réception de signaux TCR. Le fabricant de satellites conçoit

généralement le système TCR à partir des normes existantes dont il dispose. Les bandes de fréquences utilisées pour les signaux TCR proviennent généralement des bords des bandes FSS opérationnelles (6/4 GHz, 14 / 10-12 GHz, etc.), bien que le système d'antenne omnidirectionnelle peut utiliser une bande de fréquence inférieure (2 GHz) pour minimiser les besoins en puissance de liaison.[43]

Pendant la phase de lancement et les procédures d'orientation de l'engin spatial, des antennes omnidirectionnelles spéciales sont nécessaires pour les opérations de télémétrie, de commande et de ranging. Les Antennes bi-cônes avec des faisceaux de forme annulaire sont généralement utilisées pendant le cycle de rotation de l'engin spatial, lorsque la stabilité est requise. Une fois sur la station, la télémétrie ou les fonctions de commande sont transférées aux antennes de communication à gain élevé. Les antennes bi-cônes deviennent alors des unités de secours en cas de réanimation ou de désorientation du vaisseau spatial.[43]

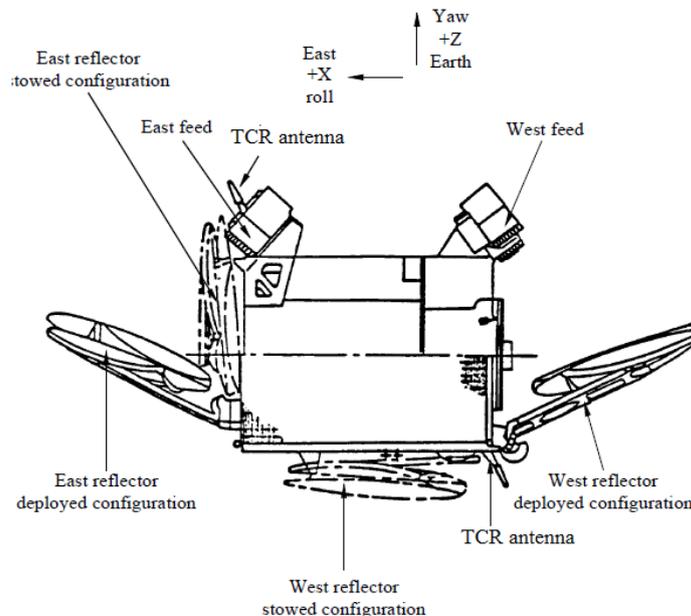


Figure II. 14:Satellite avec TCR antenne.[43]

### II.10. LA GEOMETRIE DE L'ANTENNE TCR CHOISIE

Pour notre travail nous avons choisie d'utiliser l'antenne discône grâce accès caractéristique électromagnétique (gain, diagramme de rayonnement directivité..) convenable au besoin des antennes TCR.

#### II.10.1. Description de l'antenne TCR

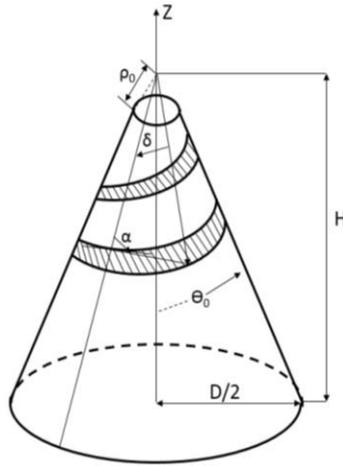
Les procédures théoriques de conception d'une antenne en conique sont décrites de manière générale. Dans un premier temps, la géométrie et les expressions mathématiques de

l'antenne en conique sont présentées. Après cela, l'étude paramétrique TCR et son influence sur les caractéristiques sont discutées.

Enfin, basé sur l'étude le processus de sélection des paramètres en ce qui concerne les exigences de l'antenne TCR est présenté dans ce qui suite.

**II.11. EQUATIONS GOUVERNANTES TCR ANTENNE**

La discône est également connue sous le nom de modification de la conique. Il peut être représenté mathématiquement et l'équation doit être projetée en trois dimensions.



**Figure II. 15:Géométrie conique antenne[44].**

En utilisant l'équation équiangulaire, la conique peut être exprimée comme la distance radiale, qui est une fonction de l'angle  $\phi$ . Basé sur cette relation, il peut être écrit comme:

$$\rho(\phi) = \rho_0^{\beta\phi} \quad \dots II - 7$$

Où  $\beta$  est défini comme:

$$\beta = \frac{\sin(\theta_0)}{\tan(\alpha)} \quad \dots II - 8$$

Dans l'équation ci-dessus,  $\theta_0$  et  $\alpha$  sont respectivement des angles coniques et d'enroulement.

De l'équation directrice, on voit que la distance radiale augmente avec  $\phi$  qui se trouve sur n'importe quel point du bras spiral et trace la spirale équiangulaire sur la face conique. Sur cette base, la distance radiale initiale à partir du sommet du cône  $\rho_0$  peut être exprimée comme suit:

$$\rho_0 = \frac{\tau_u}{\sin(\theta_0)} \quad II - 9$$

La distance radiale  $\rho_0$  est un paramètre important car elle détermine le rayon supérieur de TCR antenne et le diagramme de rayonnement est grandement influencé par le rayon supérieur.

D'autre part, le rayon inférieur du TCR antenne peut être trouvé par les bras spiraux à l'angle  $\varphi_{\max}$  et il n'affecte pas le diagramme de rayonnement de façon significative. Les fréquences inférieures et supérieures sont déterminées respectivement par les rayons inférieurs et supérieurs de TCR antenne.

D'autres paramètres utiles de TCR antenne peuvent être trouvés en utilisant la géométrie simple qui est très utiles pour la conception de TCR. La hauteur du cône mesurée du sommet du cône à la grande extrémité peut s'écrire:

$$H = \frac{D}{2 \tan(\theta_0)} \quad II - 10$$

La hauteur du cône mesurée de la petite extrémité à la grande extrémité peut s'écrire comme suit:

$$H = \frac{D - d}{2 \tan(\theta_0)} \quad II - 11$$

Et la longueur totale des bras spiraux peut être exprimée comme:

$$L = \frac{D - d}{2 \cos(\alpha) \sin(\theta_0)} \quad II - 12$$

## **II.12. CONCEPTION THEORIQUE PRELIMINAIRE DE TCR ANTENNE**

Les paramètres de TCR ANTENNE sont étudiés selon l'expérience Dyson. Sur la base de cette étude, le tableau II-1 et le tableau II-2, qui montre les valeurs du rayon supérieur et inférieur en termes de longueur d'onde correspondant à l'angle conique et spiral. Ces valeurs sont utiles pour déterminer la taille de l'antenne en termes de rayon, hauteur et angle. Il existe deux solutions pour identifier la bande de fréquence inférieure. Ce sont les rayons  $a_{10}^+$  et  $a_{15}^+$  qui indiquent la partie inférieure de la région active.

Dans ce cas, la partie qui est identifiée par  $a_{10}^+$  est choisie à partir de la figure II-19 pour trouver le rayon de bord inférieur de TCR antenne afin d'obtenir une taille compacte de l'antenne. De même, le rayon supérieur de l'antenne peut être déterminé par des rayons  $a_{3}^+$  qui indiquent la région active supérieure et donc, en utilisant cette valeur, nous pouvons calculer le rayon du cône supérieur de l'antenne.

Le tableau II-1 représente les valeurs du rayon supérieur en longueur d'onde pour différentes valeurs d'angle en spirale et conique et le tableau II-2 représente la valeur inférieure du rayon en longueur d'onde.

Afin d'obtenir la performance requise par l'antenne, les valeurs de l'angle de la spirale et de l'angle conique ont été respectivement :  $\theta = 10^\circ$  et  $\alpha = 80^\circ$ . Avec ces valeurs d'angle, la HPBW devrait être de  $75^\circ$  avec une directivité  $< 7$  dB. Maintenant, en utilisant ces valeurs, le rayon supérieur peut être calculé en multipliant la bande de fréquence supérieure par la valeur du rayon supérieur, qui est tirée du tableau II-2 et il peut être écrit comme :

$$\tau_u = 0.079 * \lambda_u = \frac{0.079 * c}{f_u} \quad \dots II - 13$$

De même, un rayon inférieur peut être calculé en multipliant la bande de fréquence inférieure par une valeur de rayon inférieure, qui est tirée du tableau II-1 et peut s'écrire comme suit:

$$\tau_L = 0.157 * \lambda_u = \frac{0.157 * c}{f_L} \quad \dots II - 14$$

Enveloppe en spirale $\alpha$	Angle conique total $2\theta$			
	$10^\circ$	$15^\circ$	$20^\circ$	$30^\circ$
$60^\circ$	0.054	0.051	0.043	0.055
$70^\circ$	0.069	0.065	0.060	0.056
$80^\circ$	0.089	0.083	0.079	0.070

**Tableau II. 3:** Valeurs du rayon supérieur en termes de longueur d'onde pour les angles en spirale et coniques selon l'expérience Dyson [45].

Enveloppe en spirale $\alpha$	Angle conique total $2\theta$			
	$10^\circ$	$15^\circ$	$20^\circ$	$30^\circ$
$60^\circ$	0.133	0.146	0.157	0.243
$70^\circ$	0.130	0.144	0.160	0.183
$80^\circ$	0.132	0.151	0.157	0.163

**Tableau II. 4:** Valeurs du rayon inférieur en termes de longueur d'onde pour les angles en spirale et coniques selon l'expérience Dyson [45]

On remarque de l'équation II-10, que le rayon supérieur est 1.66 millimètre qui est trop petit.

Les inconvénients d'avoir un petit rayon est qu'il est difficile de connecter les lignes d'alimentation à travers lesquelles l'antenne est excitée. De plus, il sera difficile de fabriquer un très petit rayon car il est nécessaire d'utiliser une technologie de pointe qui demande un coût élevé. Afin d'éviter ce problème, le rayon supérieur est sélectionné à 12.75 GHz au lieu de 14.75 GHz, ce qui donne  $r_u = 2$  mm.

Cependant, cela a causé une dégradation des performances au-dessus de 12.50 GHz en termes de HPBW et de rapport axial, ce qui est observé dans les résultats de simulation. Cette dégradation des performances n'est pas significative par rapport aux exigences de notre antenne TCR. Par conséquent, ces performances sont acceptables.

D'autre part, le rayon inférieur est choisi 10.75 GHz à la place de 12.25 GHz, ce qui résulte  $r_L = 23.5$  mm. Les résultats de la simulation montrent que cette valeur donne de meilleurs résultats que le rayon à 2 GHz. Les détails des paramètres de conception théoriques sont présentés dans le tableau II-3. TCR est simulé par logiciel CST en utilisant les valeurs ci-dessus, puis analysé les résultats, qui sont présentés dans le chapitre suivant.

Les paramètres de conception	Valeur
Angle de la spirale $\theta(^{\circ})$	10
Angle conique $\alpha(^{\circ})$	80
Largeur de bras $\delta(^{\circ})$	90
Rayon supérieur du cône $r_u$ (mm)	2
Rayon inférieur du cône $r_L$ (mm)	23.5
Distance radiale initiale $\rho_0$ (mm)	11.5
Hauteur H (mm)	124

**Tableau II. 5:**Les paramètres de conception de TCR [45].

### II.13.CONCLUSION

Dans ce chapitre nous avons essayé d'englober toutes les notions théoriques sur les antennes spéciales en générale et l'antenne TCR qui est le sujet de notre projet on a expliqué comment les satellites peuvent appliquer ce système de télémétrie, puis on a parlé sur les antennes qui fonctionnent en ULB pour qu'on puisse choisir une forme pour la simulation de notre antenne.

Nous avons essayé de résumer les avantages et les inconvénients de chaque type d'antenne afin de choisir l'optimum et d'étudier l'étendue de son efficacité et de sa compatibilité avec nos besoins. La simulation de la structure et de la forme de l'antenne seront achevés dans le chapitre suivant.

# **Chapitre III :**

**Simulation de l'antenne**

**TCR**

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

Pour les antennes TCR, les exigences principales de caractéristiques d'antennes sont précisées par une couverture omnidirectionnelle associée à un faible gain, une robustesse mécanique et une résistance aux effets environnementaux tels que les rayons ultraviolets, les charges diélectriques profondes et les charges de surface différentielles.

Pour obtenir une couverture quasi omnidirectionnelle, plusieurs antennes sont souvent nécessaires. En inspectant simplement le diagramme de faisceau d'une seule antenne, on peut être induit en erreur en pensant que plusieurs antennes produiront un diagramme de rayonnement également lisse parce que cela n'est pas nécessaire. Mais ces dernières étaient exploitées dans des directions opposées et séparées les unes des autres par dix longueurs d'onde.

Pour concevoir une configuration d'antenne adaptée à un mini satellite, il faut tenir en compte l'ensemble des objectifs du protocole de recherche. Les majeures parties des données utiles requises et le débit de transmission, ainsi que la puissance satellitaire disponible, permettent de définir le gain requis pour l'antenne. Les antennes à gain élevé nécessitaient un mécanisme de direction d'antenne. Les configurations des paramètres déjà calculés doivent être incluses dans la simulation pendant la phase de conception et doivent prendre en compte les effets des plans de masse limités, des structures adjacentes et des systèmes d'antennes Co-implantées.

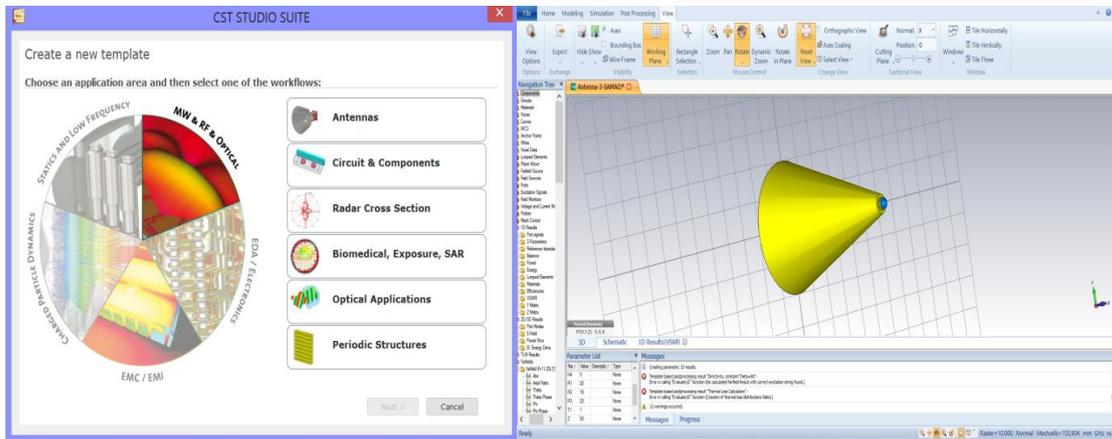
Le but de ce chapitre est de mettre en œuvre le modèle théorique de notre antenne par CST Microwave studio. Un processus de la simulation étape par étape de l'antenne était présenté en détail. De plus, l'optimisation proposée par rapport à l'antenne discône est également décrite. Enfin, les résultats de la simulation en termes de perte de retour, de largeur de faisceau, d'impédance d'entrée et de performances est affichée et validée avec les valeurs théoriques, et parfois avec les autres travaux expérimentaux si cela est possible.

### **III.2. OUTIL DE SIMULATIONS CST MICROWAVE STUDIO**

CST MICROWAVE STUDIO (CST MWS) est un outil spécialisé pour la simulation 3D EM de composante haute fréquence, il permet une analyse rapide et précise des appareils haute fréquence (HF) tels que les antennes, les filtres, les coupleurs, les structures planes et multicouches. Les utilisateurs de ce logiciel bénéficient d'une grande flexibilité pour aborder une large gamme d'applications grâce à la variété des technologies de solveurs disponibles celle du domaine temporel qui est largement utilisé et aussi du domaine fréquentiel.

## CHAPITRE III : Simulation de l'antenne TCR

Son fonctionnement est basé sur la résolution des équations de Maxwell suivant la technique des équations intégrales (FIT, Finité Intégration Technique). Cette méthode numérique offre une digitalisation de l'espace permettant la description directement en 3D de tous les composants des systèmes simulés, ce qui lui permet d'être une très bonne solution de nombreux problèmes électromagnétiques allant de la statique aux hyperfréquences [46].



(A)

(B)

Figure III. 1: L'interface graphique du simulateur CST studio 2014

Les avantages se présentent pour ce logiciel, et qui résident dans les points suivants :

- ❖ Quelle que soit la technologie demandée, il y a une possibilité de traiter toutes sortes de structures homogènes et inhomogènes.
- ❖ Le logiciel exige des moyens informatiques importants.
- ❖ Les calculs nécessitent la résolution de systèmes matriciels de grandes dimensions.
- ❖ Il faut d'abord bien maîtriser le logiciel avant d'entamer le projet, surtout si ce projet contient des opérations compliquées, il s'agit de concevoir des structures n'ayant pas une forme géométrique bien déterminée. Aussi aux conditions aux limites pour éviter le conflit entre une surface de radiation et une surface conductrice

### III.3. DESIGN DE L'ANTENNE TCR

La première étape dans la simulation de notre antenne était le design de la première « Cône » en introduisant les valeurs  $H_1$ ,  $R_1$  et  $Z_1$ .

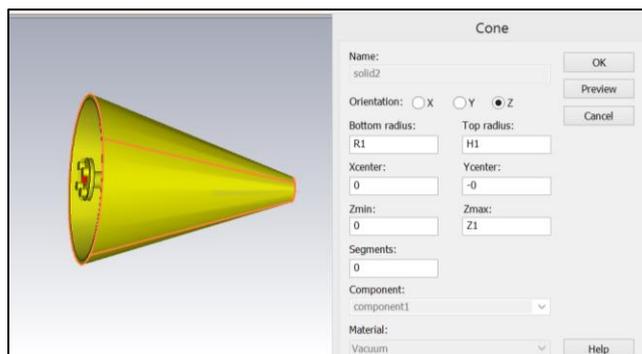


Figure III. 2: Première étape de la simulation

Puis nous avons vidé le premier « cône » avec les dimensions  $R_2$ ,  $H_2$  et  $Z_1$  comme le montre la figure suivante .

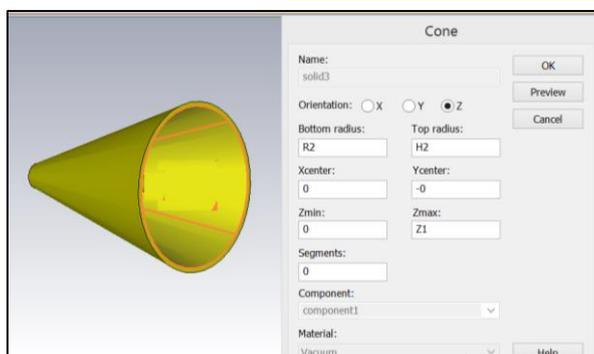


Figure III. 3: Deuxième étape de la simulation

L'étape suivante était de créer un petit cylindre comme le montre la figure (III.4) et le trouser au milieu pour placer le tube de l'antenne .

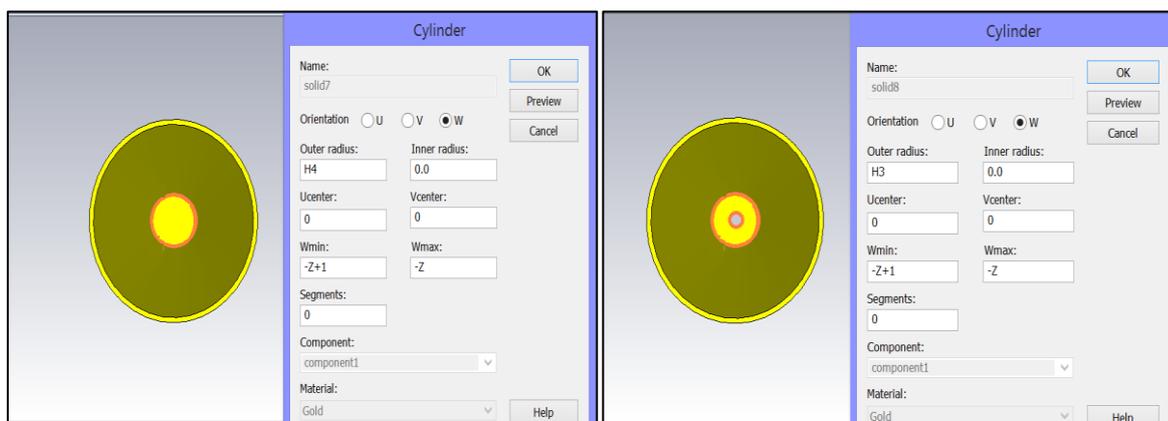


Figure III. 4: Troisième étape de la simulation

Après avoir troué le petit cylindre on a placé le tube de l'antenne

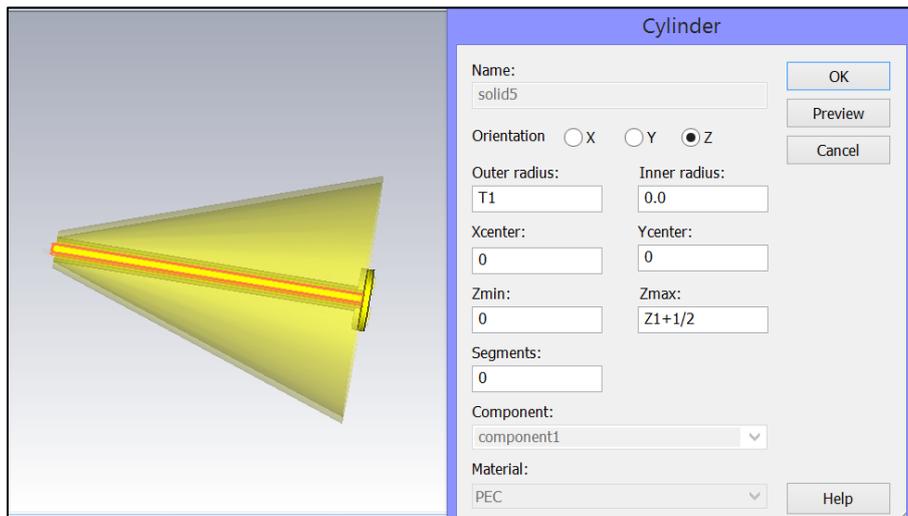


Figure III. 5: Quatrième étape de la simulation

A la fin et avant de lancer la simulation de notre antenne on a placé le waveguide port au-dessous du cylindre comme le montre la figure suivante.

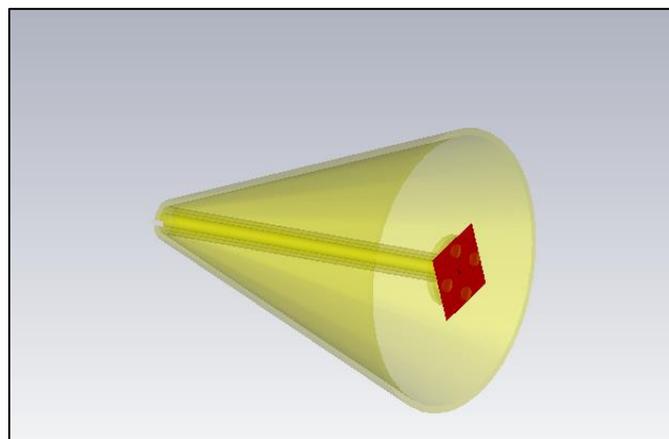
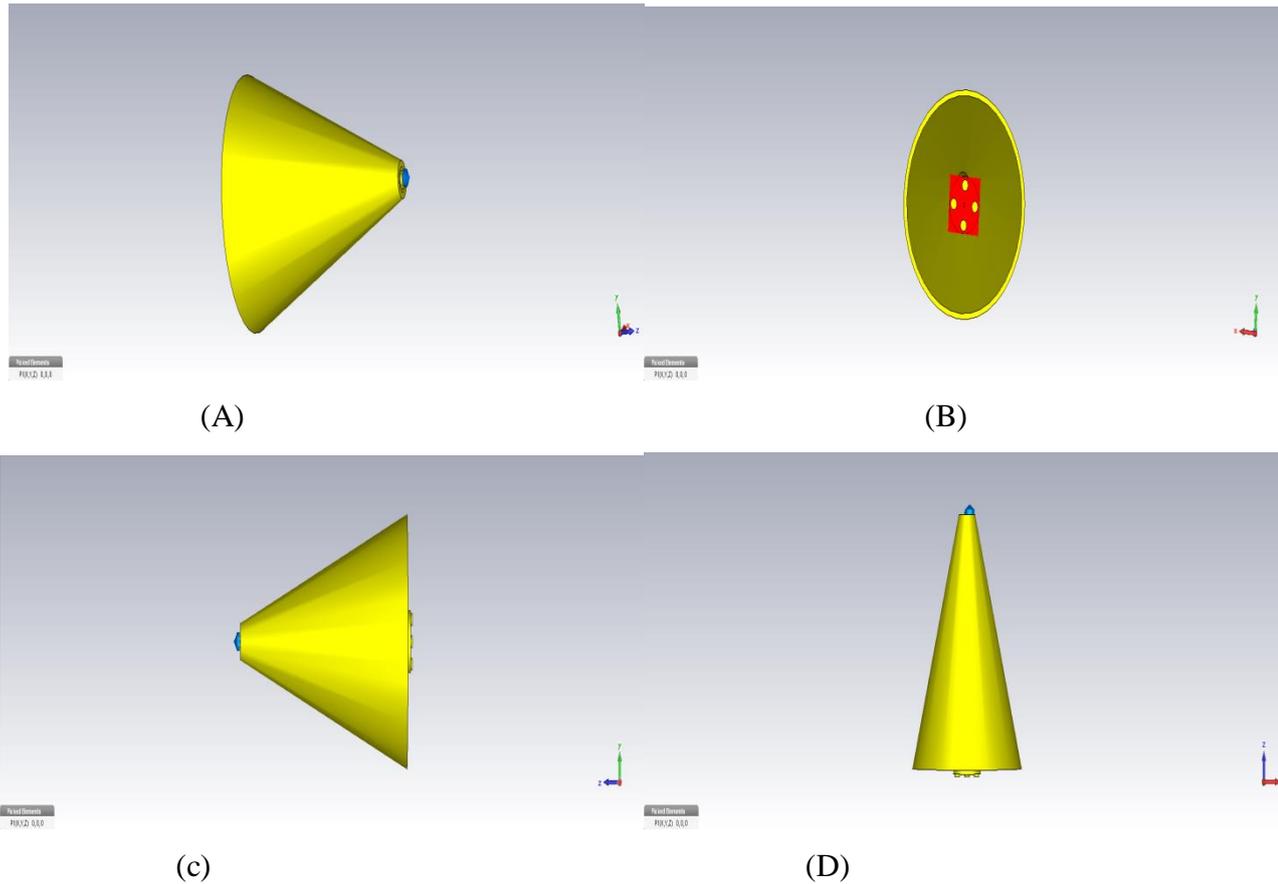


Figure III. 6: Dernière étape de la simulation

Après avoir introduit les différentes paramètres de l'antenne discone sur l'ogiciel CST microwave studio voici une illustration de l'antenne simulé présenté sur la figure suivante .



**Figure III. 7:** Illustration de l'antenne simulée sous logiciel CST microwave studio. Coupes transversales.

### III.4. DISCUSSION DES RESULTATS

Les performances simulées d'antenne dans le domaine temporel à partir des outils Microwave Studio de CST (Computer Simulation Technology) basés sur la méthode de la technique d'intégration finie (FIT) ont été utilisées pour la conception et l'analyse de ce travail.

Selon la différente direction angulaire qui variée avec une fonction de transfert soit dans l'émission ou dans la réception.

Quand le canal de la transmission devient actif, la télémétrie et le ranging sont fournis simultanément sur la même porteuse de liaison descendante.

#### III.4.1. LE COEFFICIENT DE REFLEXION

Toutes les transitions sont correctement conçues pour éliminer les réflexions même marginales et offrent une bonne adaptation d'antenne à  $50\Omega$  dans la bande de fréquences de 11 GHz à 14 GHz, comme l'illustre la figure III. 8.

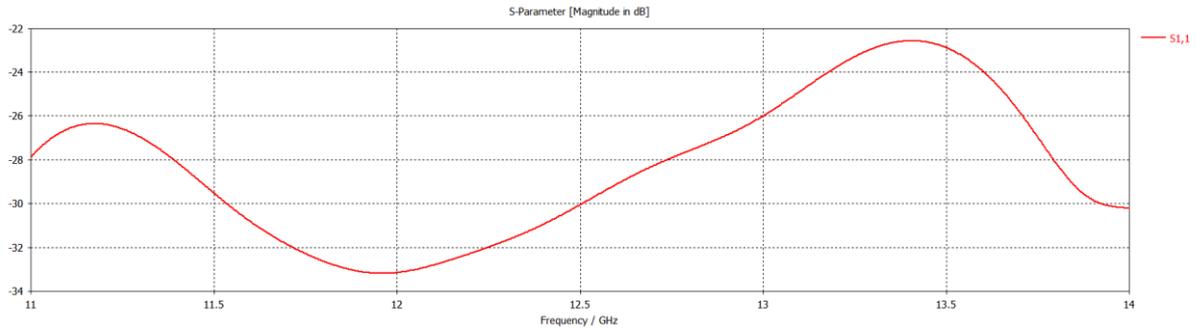


Figure III. 8: Le coefficient de réflexion de l'antenne dans la bande KU

La majorité des antennes dédiées aux systèmes de télécommunications d'aujourd'hui sont considérées bien adaptées si leur coefficient de réflexion est inférieur de -10 dB, et c'est le cas pour notre antenne on remarque que le coefficient de réflexion est entre -23dB et -33dB dans la bande de fréquence de 11GHz à 14GHz, l'impédance est adaptée dans toute la gamme de fréquence de bande Ku. Sinon, un bon accord avec d'autres résultats obtenus [47] [48].

### III.4.2. VSWR

Dans la figure III.9 sont présentés la VSWR de notre projet d'antenne TCR

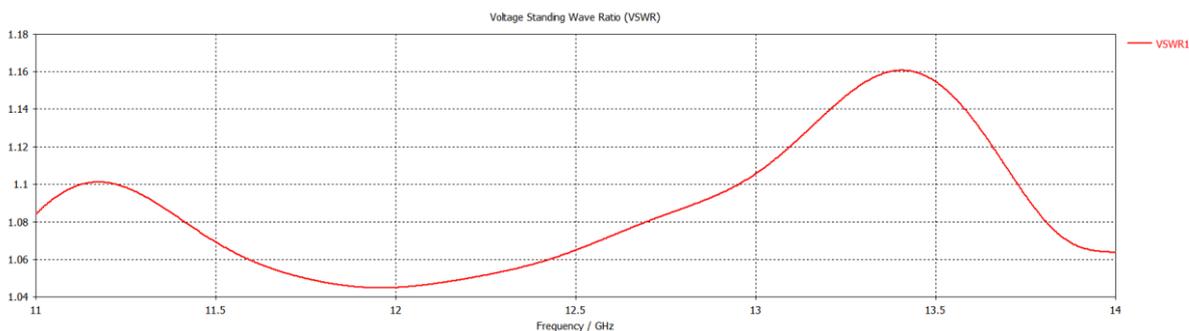


Figure III. 9: Le taux d'onde stationnaire de l'antenne dans la bande KU

Le rapport d'onde stationnaire (VSWR) qui est inférieur de 1.16 montre une bonne adaptation de l'antenne, sa valeur varie entre 1.05 et 1.16 dans la gamme de fréquence de 11GHz à 14GHz.

**III.5.LE DIAGRAMME DE RAYONNEMENT DE L'ANTENNE :**

La directivité des diagrammes de rayonnement avec  $\theta = 90^\circ$  des antennes a été simulée à différentes fréquences.

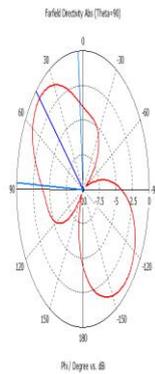
**Liaison descendante**

**Liaison montante**

$\varphi=90^\circ$

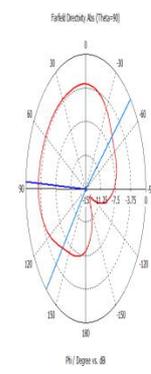
**11.00 GHz**

**12.75 GHz**



Farfield (Phi=11.0) [1]

Frequency = 11.0  
Main lobe magnitude = -0.74 dB  
Main lobe direction = -63.8 deg.  
Angular width (3 dB) = 63.1 deg.

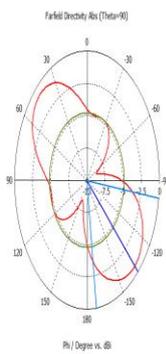


Farfield (Phi=12.75) [1]

Frequency = 12.75  
Main lobe magnitude = -2.3 dB  
Main lobe direction = -67.8 deg.  
Angular width (3 dB) = 38.9 deg.

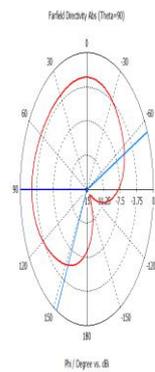
**11.25 GHz**

**13.00 GHz**



Farfield (Phi=11.25) [1]

Frequency = 11.25  
Main lobe magnitude = -0.67 dB  
Main lobe direction = -155.0 deg.  
Angular width (3 dB) = 74.4 deg.  
Side lobe level = -4.1 dB



Farfield (Phi=13) [1]

Frequency = 13  
Main lobe magnitude = -2.66 dB  
Main lobe direction = -93.0 deg.  
Angular width (3 dB) = 128.1 deg.

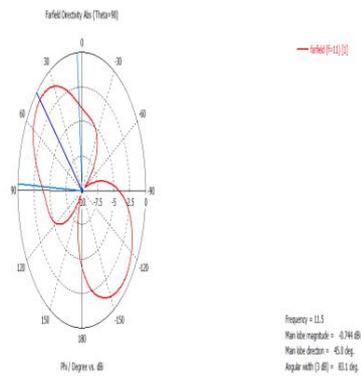
### CHAPITRE III : Simulation de l'antenne TCR

CST permet de visualiser les diagrammes de rayonnement de l'antenne simulée. C'est une représentation qui nous informe sur la directivité de l'antenne.

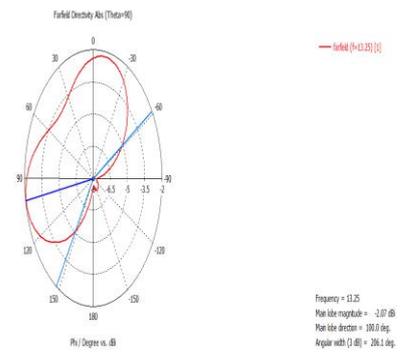
Les figures suivantes montrent les diagrammes de rayonnements 2D de notre simulation pour la gamme de fréquences de 11.00 à 14.00 GHz avec un pas de 0.25.

On remarque que la représentation polaire de notre antenne montre que cette antenne peut rayonner dans plusieurs directions ou le diagramme de rayonnement est parfois omnidirectionnel ou bipolaire (11.5GHz).

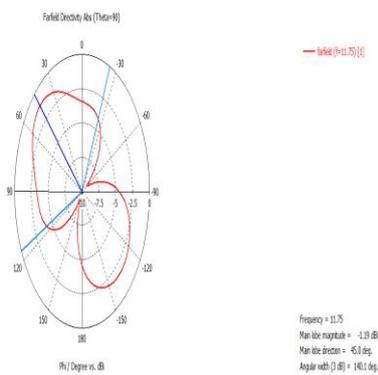
**11.50 GHz**



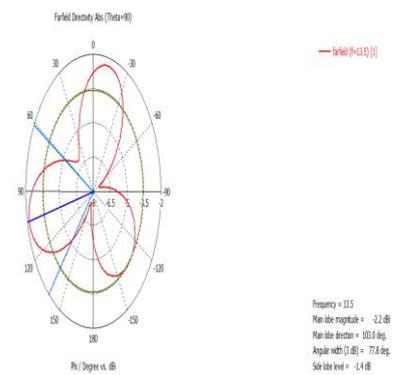
**13.25 GHz**



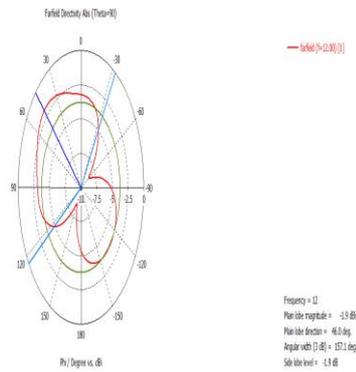
**11.75 GHz**



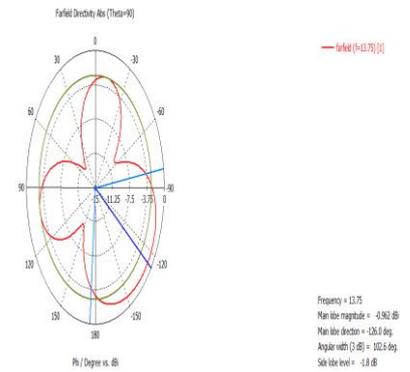
**13.50 GHz**



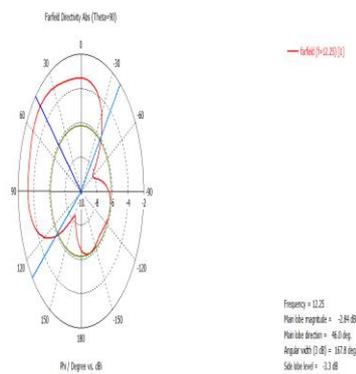
**12.00 GHz**



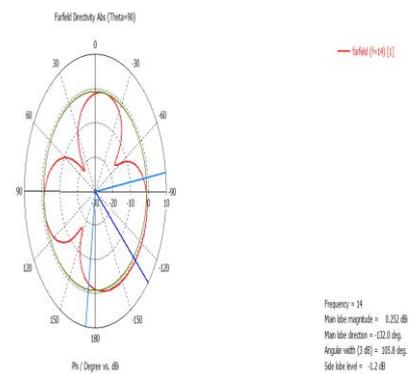
**13.75 GHz**



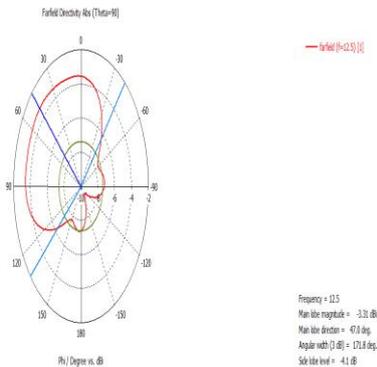
**12.25 GHz**



**14.00 GHz**



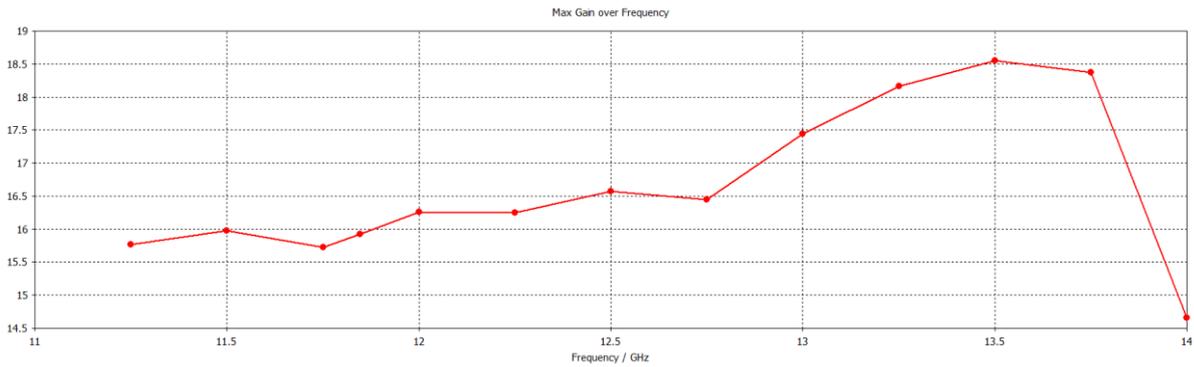
**12.50 GHz**



On remarque une bonne efficacité globale de l'antenne ce qui confirme que l'antenne proposée fonctionne correctement dans la bande souhaitée. Les principales différences sont la directivité qui est légèrement plus grande en liaison descendante et l'augmentation du lobe arrière.

L'une des raisons de ce léger changement aux fréquences plus élevées est la nature du guide d'ondes de l'antenne TCR à polarisation circulaire.

**III.6.LE GAIN :**



Nous remarquons que l'antenne présente un rayonnement omnidirectionnel avec des valeurs de gain qui varie entre 14.65 dB et 18.55 dB qui est une bonne valeur pour des communications satellitaire dans la plage de fréquence en bande Ku, et que l'antenne a gardé ces performance dans toute les fréquences qui couvre cette bande comme le montre par les figures précédentes.

On remarque que la valeur du gain augmente de 11GHz à 13.5GHz cela est acceptable car le gain du réflecteur parabolique augmente avec l'augmentation de la fréquence puis elle commence à se diminuer vers 14 GHz.

Cela est acceptable car le gain augmente avec l'augmentation de la fréquence [49], les performances sont dégradées après la fréquence de 14,5 GHz.

**III.7.OPTIMISATIONS DE L'ANTENNE SIMULEE :**

Afin d'atteindre de meilleure résultat nous avons décidé de modifier les paramètres de l'antenne pour faire une étude paramétrique.

La première étape était d'augmenter la valeur de l'ensemble des hauteurs de cette antenne ( $H_1, H_2, H_3$  et  $H_4$ ) le tableau suivant présente les différentes valeurs utilisées.

	$H_1$	$H_2$	$H_3$	$H_4$
$S_{11}$ (1)	4	3	2.5	6
$S_{11}$ (2)	5	4	3.5	7
$S_{11}$ (3)	6	5	4.5	8
$S_{11}$ (4)	7	6	5.5	9

**Tableau III. 1 : Les différentes valeurs de l'hauteur de l'antenne TCR.**

III.8. RESULTATS DE L'ETUDE :

III.8.1. LE COEFFICIENT DE REFLEXION :

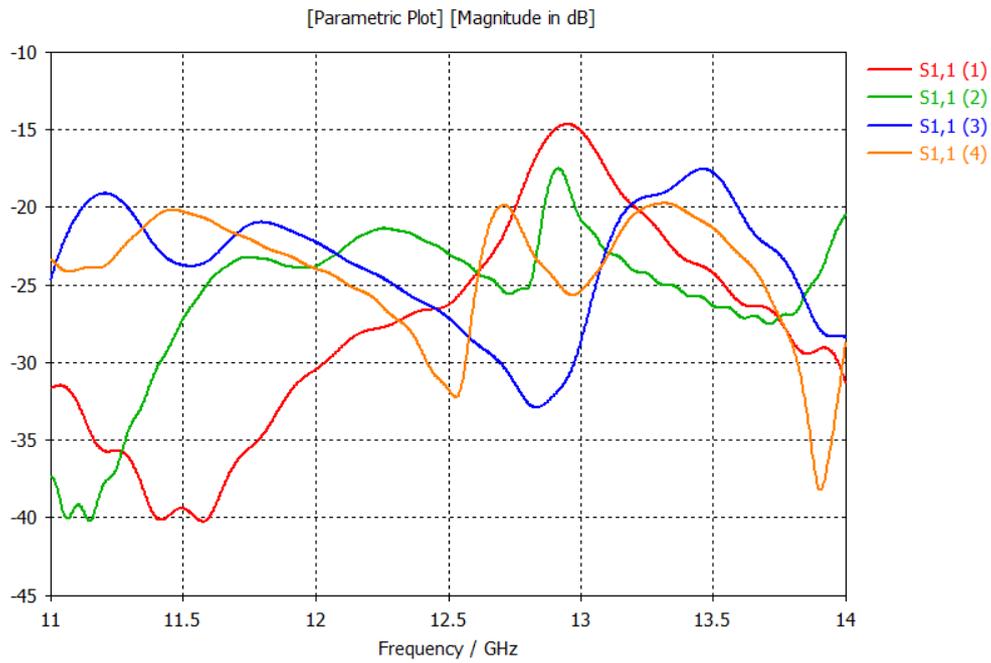


Figure III. 10: Le coefficient de réflexion des différentes valeurs des hauteurs de l'antenne.

On remarque que le coefficient de réflexion a gardé des bonnes valeurs entre -15 dB à -40 dB, mais le meilleur résultat c'est celui en rouge  $S_{11}(1)$  qui adapté en -40 dB à 11.5 GHz.

### III.8.2. LE VSWR :

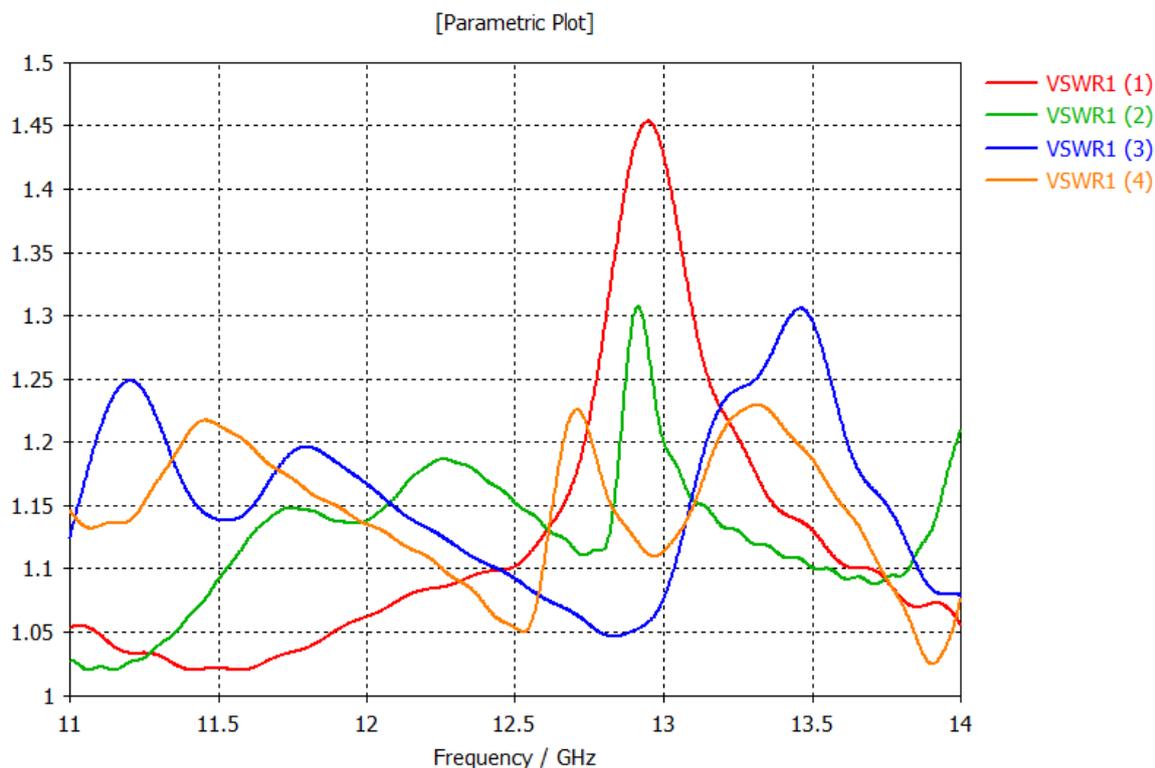


Figure III. 11:Le VSWR des différentes valeurs des hauteurs de l'antenne.

On remarque que le VSWR de toute la variation de ce paramètre est entre 1.02 et 1.45 ce qui indique que l'antenne est toujours adaptée à nos besoins désirés.

### III.8.3. LE MAXIMUM DE GAIN DE L'ANTENNE :

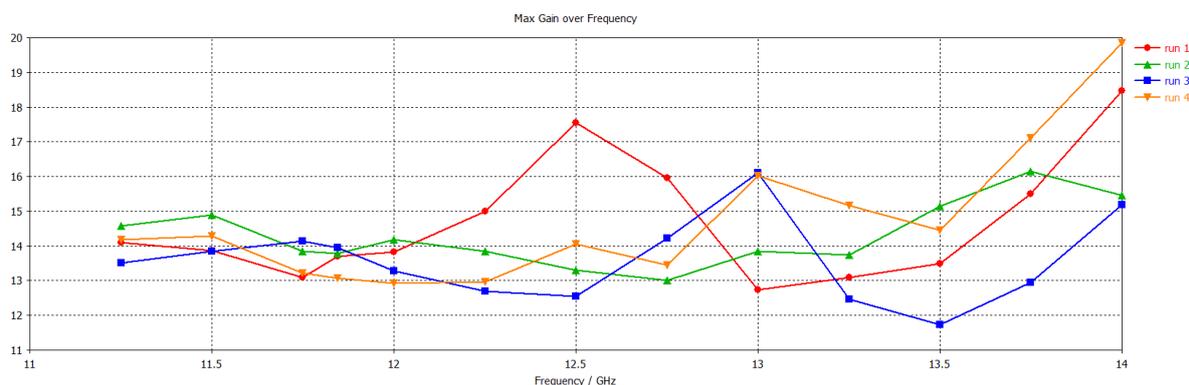


Figure III. 12:Le maximum de Gain des différentes valeurs des hauteurs de l'antenne.

Le gain de cette variation de paramètres montre que le résultat montré en rouge (run1) présente une meilleure adaptation de l'antenne.

### III.9.ÉTUDE PARAMÉTRIQUE SUR LES RAYONS DE L'ANTENNE :

Cette étude a touché les valeurs ( $R_1, R_2$  et  $R_3$ ) pour avoir de bons résultats par rapport au gain coefficient de réflexion et VSWR.

Le tableau suivant montre les différentes valeurs prises pour atteindre notre objectif.

	$R_1$	$R_2$	$R_3$
$S_{11}$ (1)	20.5	19.5	20.5
$S_{11}$ (2)	21.0	20.0	21.0
$S_{11}$ (3)	21.5	20.5	21.5
$S_{11}$ (4)	22.0	21.0	22.0
$S_{11}$ (5)	22.5	21.5	22.5

Tableau III. 2: Etude paramétrique sur les rayons.

#### III.9.1. LE COEFFICIENT DE REFLEXION :

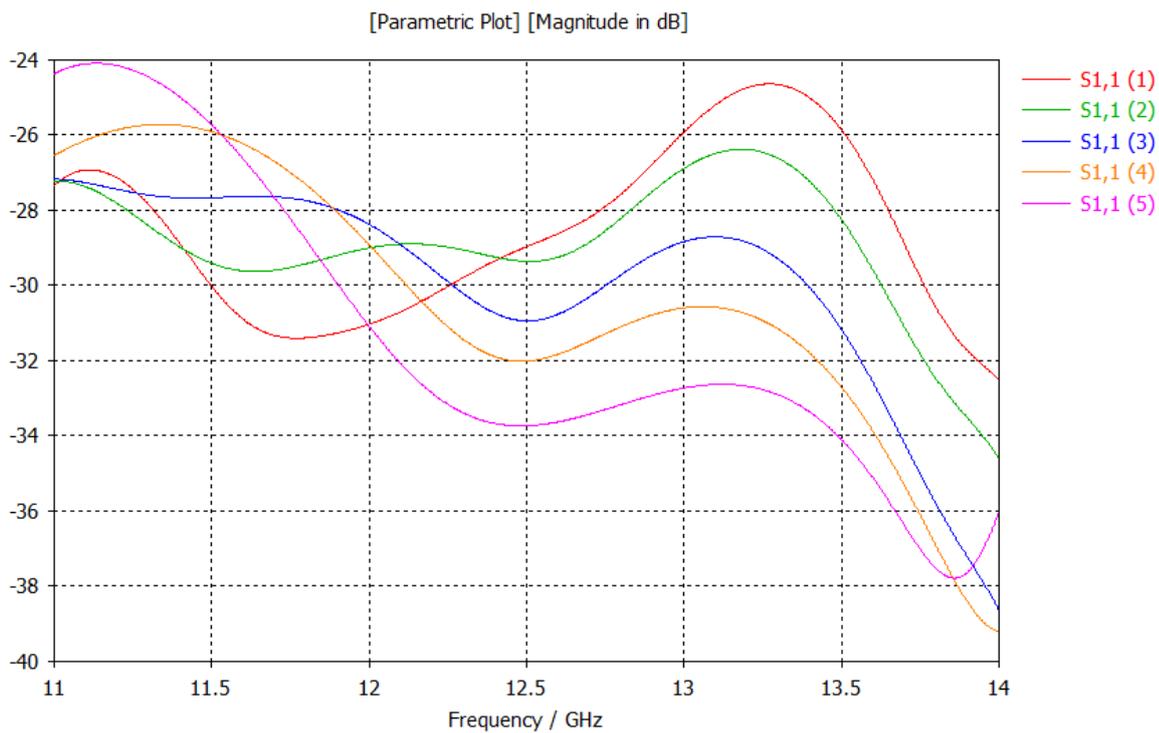


Figure III. 13: Le coefficient de réflexion des différentes valeurs des rayons de l'antenne.

On remarque que le coefficient de réflexion a gardé des bonnes valeurs entre -40dB à -24dB, mais le meilleur résultat c'est celui en violet  $S_{11}$  (5) qui adapté en -38 dB à 13.75 GHz.

III.9.2. LE VSWR :

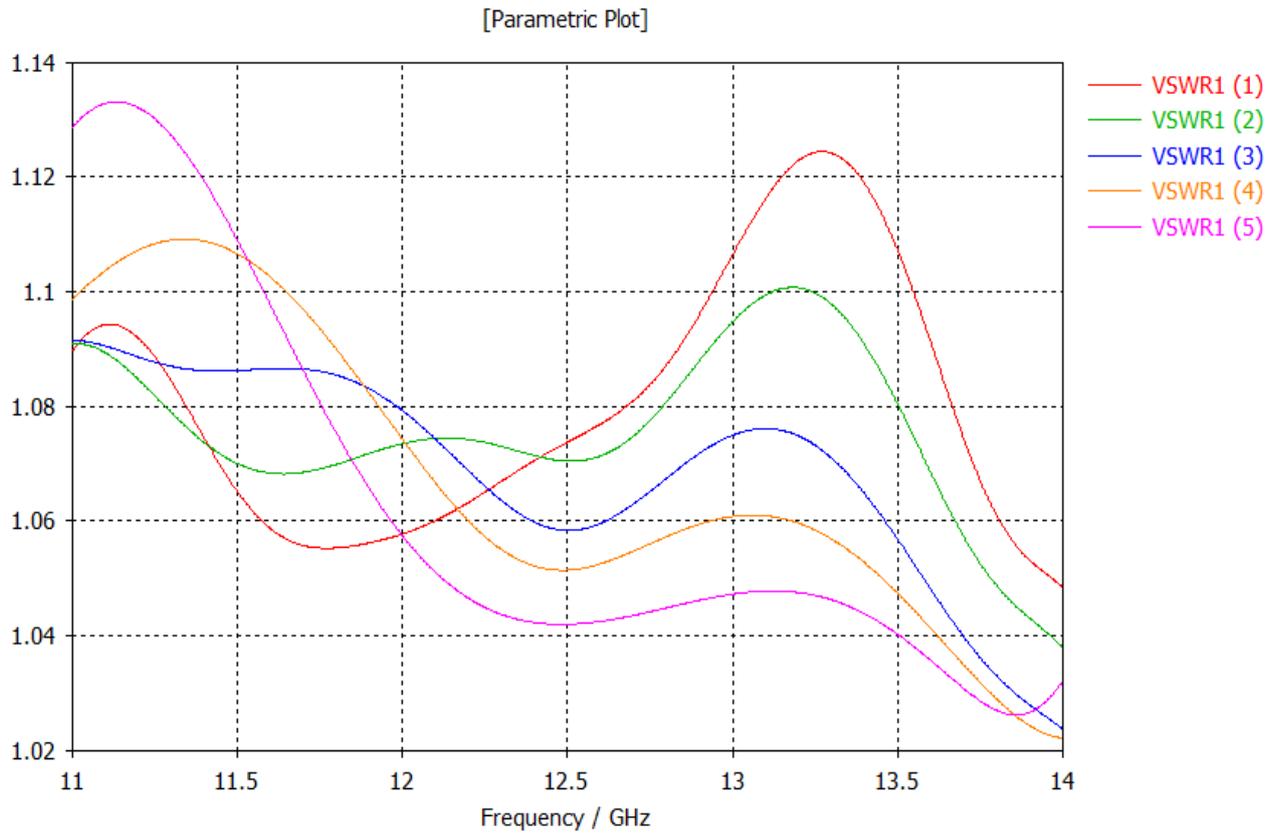


Figure III. 14:Le VSWR des différentes valeurs des hauteurs de l'antenne.

On remarque que le VSWR de toute la variation de ce paramètre est entre 1.02 et 1.14 ce qui indique que l'antenne est toujours adaptée à nos besoins désirés, la variation des rayons sont pas vraiment influence sur les performances.

III.9.3. LE MAXIMUM DE GAIN DE L'ANTENNE :

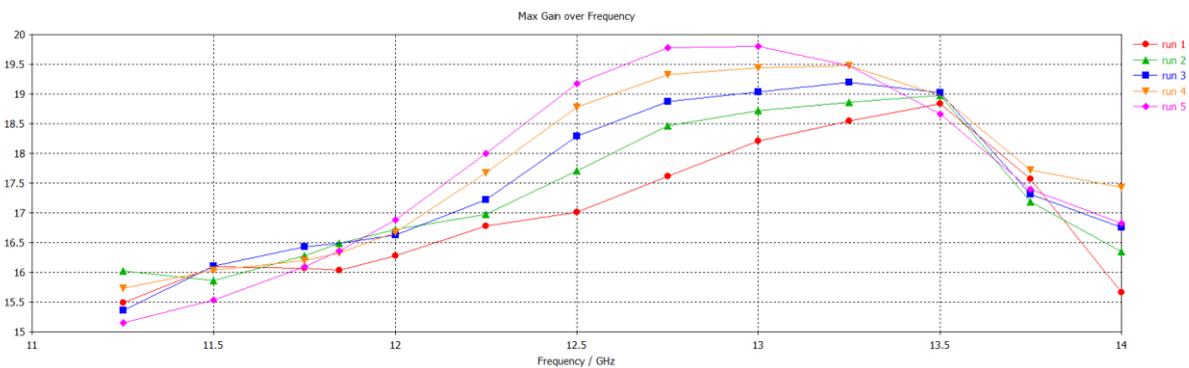


Figure III. 15:Le maximum de Gain des différentes valeurs des rayons de l'antenne.

Le gain de cette variation de paramètres montre que le résultat montré en rouge (run5) présente une plus d'adaptation pour l'antenne TCR de 19.8 dB à 12.75 GHz.

#### **III.10. CONCLUSION**

Dans ce chapitre on a réussi a simulé une antenne discone pour qu'elle soit utilisée comme une antenne TCR dans la plage de fréquence de 11 GHz à 14 GHz, nous avons vérifié que les capacités de notre antenne peuvent satisfaire le besoin de cette communication satellitaire, on remarque les valeurs de ces performances électromagnétiques (Gain et directivité) ainsi le coefficient de réflexion et le taux d'onde stationnaire. Donc on peut dire qu'on a réussi à atteindre notre objectif.

## CONCLUSION GENERALE

L'utilisation des satellites est essentielle dans notre société moderne et pour garantir le transfert de l'information de l'espace, plusieurs antennes ont été proposés. Dans notre mémoire on a basé sur les antennes TCR grâce à ces performances et ces capacités pour accomplir des missions tel que l'ajustement des orbites du satellite, réaligner les panneaux solaires, effectuer une sauvegarde du système.

Dans le présent travail on a réussi à simuler une antenne TCR discone qui rayonne dans la bande KU et avant d'aboutir aux résultats finaux, on a présenté dans le premier chapitre les antennes et leurs caractéristiques d'une manière générale, ensuite on a parlé des antennes spatiales avec leurs différents types et les fréquences utilisées pour les communications satellitaires, de ce fait on a introduit des antennes TCR (tracking commande and ranging) et leurs géométrie de base. Et pour la partie pratique on a simulé le modèle théorique de notre antenne par CST Microwave studio. L'antenne a été présentée en détail avec une optimisation des performances pour garantir un transfert maximal d'énergie. Enfin, les résultats de la simulation ont été donnés en termes de coefficient de réflexion, VSWR et de diagramme de rayonnement qui donne une vue sur le gain et la directivité.

Les résultats obtenus de design et simulation d'une antenne TCR pour mini satellite de télécommunications en la bande Ku sont très satisfaisants.

# Bibliographie

## REFERENCES

- [1] IEEE standard definitions of terms for antennas .IEEE std 145-1993.IEEE press,1993
- [2] CA.Blanis,Modern Antenna Handbook. John Wiley and Sons,2008.
- [3] Constantine A. Balanis, “Antenna Theory Analysis and Design”, 2005,John Wiley & Sons, INC.
- [4] A. Kamil, Conception d’une antenne patch ultra-large bande (3.1 GHz-10.6 GHz), grade du Maitre ès sciences (M.Sc), Université du Québec, 2011.  
Thème Dimensionnement et planification des liens de transmission dans les réseaux de téléphonie mobile Réalisé par: Mme. Asmaa BOULAKAKEZ Mme. Mme. Zineb OGGAD  
Promotion: 2015/2016
- [5] Md. Ashikur Rahman, Moinul Hossain, IbnulSanjid Iqbal, Syed Sobhan, ” Design and Performance Analysis of A Dual-band Microstrip Patch Antenna for Mobile WiMAX, WLAN, Wi-Fi and Bluetooth Applications’’, 3rd international conference on informatics, electronics & vision 2014.
- [6] Mémoire de fin d’étude pour l’obtention du diplôme master en télécommunication THEME Etude et simulation d’un antenne SIW Par : MADOUN AMINA Promotion : 2016/2017  
Université Dr Tahar Moulay
- [7] A. K. Maini and V. Agrawal. Satellite Technology : Principles and Applications. 2nde Edition edition, 2011
- [8] T.Kitsuregawa. Advanced Technology in Satellite Communication Antennas. Electrical Mechanical Design. 1990
- [9] O. Picon, L. Cirio, C. Ripoll, and M. Bellanger. Les Antennes. Théorie, conception et applications. 2009.
- [10] V. J. Leonidas. Antenna engineering handbook. 4th Edition edition, 2007.
- [11] T H E S E pour obtenir le grade de DOCTEUR DE L'UNIVERSITE MONTPELLIER 2 Ecole doctorale : Information Structures Systèmes par Sébastien MORTEROLLE le 18 octobre 2011  
Mémoire de fin d’études thèmeAntenne de Téléphonie mobile, caractérisation et optimisationPrésenté par : Mell . MelihiSouhilaMell .Fengal Tine-hinanePromotion 2016En vue d’obtention du diplôme Master en Télécommunication
- [12] Article Antenne reconfigurable pour application Car-to-CarArticle June 2015 L. H. Trinh, L. Lizzie, F. Ferrero,R. StarajetJ.-M. RiberoUniversitéNice Sophia Antipolis, CNRS, LEAT, UMR 7248, 06903 Sophia Antipolis, FranceUniversité Nice Sophia Antipolis, CNRS, LEAT, UMR 7248, 06903 Sophia Antipolis, France
- [13] Brahimi Ali, Thèse de doctorat, « Etude de la Technologie des Antennes Multibandes pour les Applications Spatiales », année 2009
- [15]

- [16] W. A. Imbriale, Spaceborne antennas for planetary exploration, California, USA: Wiley Online Library, 2006
- [17] OUMY DIOP, "Etude Et Minimisation Du Facteur De Qualité d'Antennes Miniatures Conçues Pour De Petits Objets Communicants", Thèse De Doctorat, Université De Nice-Sophia Antipolis, Septembre 2013
- [18] thème Etude et Simulation d'une Antenne Micro-ruban Ultra Large Bande Soutenu publiquement le /06/ 2018 par : MAALLOUL Elhadi et HAMADOU Akram
- [19] Mémoire de Stage de Arthur CROSSE Titre du stage : Etude des contraintes pour le contrôle d'attitude du satellite étudiant UnivEarths pour effectuer une mesure complète d'occultation ~ Année Universitaire 2012-2013 ~
- [20] Yu-Ming Lee, Shuming T. Wang, Hsien-ChiaoTeng, and ShenCherng, "AFunctionalMicrostrip Circuit Module For Annular Slot Antenna", Progress InElectromagnetics Research, Vol. 136, pp255-267, 2013
- [21] Vaudon Patrick, « Les antennes imprimées » ; Master RechercheTélécommunication Hautes Fréquences et Optiques, IRCOM- Université deLimoges,2004
- [22] THESE DE DOCTORAT Spécialité : " Télécommunications" Présentée par : Mme. AZZAZ RAHMANI Salima année 2013
- [23] La modélisation électromagnétique d'antennes spatiales ´ Thierry KOLECK ESAIM: PROCEEDINGS, October 2007, Vol. 22, 83-87 Gabriel Caloz& Monique Dauge, Editors
- [24] D. Agnès, «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.
- [25] Marc THEVENOT. Analyse Comportemental et Conception de Matériaux Diélectriques à Bande Interdite Photonique. Application à l'Etude et à la Conception de Nouveaux Types d'Antennes. PhDthesis, Université de Limoges, 1999.
- [26] S. Gao, K. Clark, M. Unwin, J. Zackrisson, W. Shiroma, J. Akagi et K. Maynard, «Antennas for modern small satellites,» Antennas and Propagation Magazine, IEEE, vol. 51, n° 14, pp. 40-56, 2009.
- [27] Octave RINGAR, Thèse de Doctorat, Université de Limoges-Université Cheikh AntaDiop 2015.
- [28] C. Requin, «Antennes quasi-auto-complémentaires pour terminaux mobiles multi-standards,» 2013.
- [29] Examen Probatoire en Electronique présenté par Alex BELARBI Lors de la session de septembre 2003 Centre régional de Marseille.
- [30] N. Fortino, « conception et caractérisation d'antenne imprimées pour les systèmes ULB impulsionnels », thèse de doctorat, université de Nice-Sophia Antipolis, 2006

- [31] L.BABOUR « Etude et conception d'antennes ultra large bande miniaturisées en impulsional » thèse de doctorat, Institut Polytechnique de Grenoble, juin 2009
- C. N. Deshmukh, and V. T. Ingole, « Amplify and Forward Cooperative Diversity for Modified
- [32] SV Model Based UWB Communication System », International Journal of Scientific Research Engineering & Technology (IJSRET), 2015.
- W. C. K.F.LEE, "Advances in microstrip and printed antennas," J. Wiley & sons, pp. 433-513,
- [33] 1997.
- Zitouni Ahmed, « Etude et conception d'antennes ULB standards et à bandes rejetées », Thèse de doctorat, Université de Abou BakrBelkaid Tlemcen, juin 2014.
- N. Fortino, «Conception et caracterisation d'antennes imprimees pour systemes Ultra-Large-
- [35] Bande impulsional» Nice, 2010.
- R. Garg, P. Bhartia, I. Bahl, A. Ittipiboon, "Microstrip Antenna Design Handbook," ArtechHouse, London, 2001
- [36]
- O. Picon ,coll., "Les antennes Théorie, conception et applications", Dunod, Paris, 2009
- P. Vaudon, "Les antennes cornets," mémoire de maitrise en Télécommunication, IRCOM
- [38] université de Limoges. Web:<http://patrick.vaudon.pagesperso-orange.fr/ouverture>, 11 mars 2014 .
- [39] [<http://www2.rohde-schwarz.com/en/>]
- [40] Michel TerréSystèmes satellites.
- International Journal of Electrical and Electronics Engineers 02, July-Dec., 2014 Alish1
- [41] ,Ritambhara Pandey2 (India)
- Joshua Stevens, Jennifer M. Smith, and Raechel A. Bianchetti (2012), Mapping Our Changing
- [42] World, Editors: Alan M. MacEachren and Donna J. Peuquet, University Park, PA: Department of Geography, The Pennsylvania State University.
- HANDBOOK ON SATELLITE COMMUNICATIONS (HSC) (Edition3)CHAPTER 6 Space
- [43] segment P378
- T. W. H. a. G. S. Smith, «The conical spiral antenna over the ground,» *IEEE Transactions on*
- [44] *Antennas and Propagation*, vol. 5, n° 1112, p. 1668– 1675, 2002.
- A. K. M. M. Alam, *Design and Analysis of a Wideband Feed for Metsähovi Compact Array*,
- [45] Finland: Mémoire de Master, Aalto university, school of electrical engineering, 2017.
- [46] <https://www.3ds.com/fr/produits-et-services/simulia/produits/cst-studio-suite/>.
- [47] B. JR, «On the design of broadband omnidirectional compact antennas,» *Microw Opt Technol Lett*, vol. 39, n° 15, p. 418–422, 2003.
- [48] H. K. X. X. Chen X, «Novel planar slot array antenna with omnidirectional pattern,» *IEEE Trans Antennas Propag*, vol. 59, n° 112, p. 4853–4857, 2011.
- [49] K. J. P. S. Kim. KH, «An ultrawide-band double discone antenna with the tapered cylindrical

wires,» *IEEE Trans Antennas Propag* , vol. 53, n° 110, p. 3403–3406, 2005.

- [50] T. A. Milligan, *Modern antenna design, 2nd Edition*, New Jersey, USA: A Jhon Willy Sons, INC, 2005.