

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



UNIVERSITE SAAD DAHLEB BLIDA 1  
INSTITUT D'AERONAUTIQUE ET DES ETUDES SPATIALE  
DEPARTEMENT DE LA NAVIGATION AERIENNE

## MEMOIRE

Pour l'obtention du diplôme de

### MASTER EN AÉRONAUTIQUE

Spécialité :

Communication Navigation Surveillance / Air Traffic Management

THEME

Etude et conception d'un réseau  
d'antennes imprimées conformes pour la  
communication par satellite

Réalisé par :

KELKEL YAHYA  
ABDA MOHAMMED

Encadré par :

Mr. HAMOUDA ZAHIR  
Mme. AZINE HOURIA

Soutenu le **14 juillet 2021**, devant le jury composé de :

Mr. KUIDER ELOUAHED BOULENOUAR  
Mr. KRIM MOHAMMED

Président  
Examineur

2020/2021



## Dédicace

Je dédie ce travail

A mes très chers parents, mes frères  
AHMED, SAIF et ma sœur GHOZZLANE  
qui m'ont doté d'une éducation digne, leur  
amour a fait de moi ce que je suis  
aujourd'hui.

Mes chers amis qui sont ma petite  
famille IMED, YAHYA, SALAH, YUCEF,  
DHIAA, HAROUN ET ABDELWADOUD qui  
m'avaient toujours soutenu et encouragé  
durant ces années d'études.

A tous les amis et les camarades pour tout le  
bon moment qui nous avons partagé  
ensembles, merci d'exister

A vous tous dédie ce travail en témoignage  
de mon profond respect et de toute  
ma gratitude.

MOHAMMED

## *Dédicace*

*A peine nous venons de terminer la rédaction du mémoire de fin d'étude, je voudrais très vite le dédier avec une immense joie, un grand honneur et un cœur chaleureux :*

*A mes très chers «PARENTS» en signe de ma profonde et affectueuse reconnaissance pour leur amour sans mesure, tous les sacrifices, les soutiens, les tolérances et les encouragements qu'ils ont bien voulu consentir pour moi. Tous les mots restent faibles pour*

*leur exprimer mes sentiments et qu'ils acceptent seulement ces lignes en guise de témoignage.*

*A mes frères Aymen ,Ishak et Yaakoub, que Dieu vous bénisse et vous garde.*

*A mes chères tantes Mahbouba et Aïcha et la belle Djamila que Dieu vous protège et vous garde.*

*A mon deuxième père Aziz que Dieu vous donne une vie pleine de joie et du bonheur*

*A ma petite famille. qui contient mes chers enfants*

*Youcef , Dïaa et Haroun*

*Mes chers frères Imed ,Hamza et Salah*

*Et mon petit Abdélwadoud*

*Je vous souhaite que du bons moments et que Dieu vous protège.*

*A tous ceux qui m'ont aidé à faire ce travail.*

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

*Yahya*

## **Remerciements**

*Nous tenons d'abord à remercier dieu tout puissant, de nous  
avoir armés de  
Courage, de patience et de santé pour y parvenir au bout de  
ce Modest travail.*

*à nos encadreur : **Mr HAMOUDA ZAHIR** et **Mme AZINE  
HOURIA** pour avoir bien su nous guider et nous conseiller  
tout au long de la préparation de notre mémoire.*

*Nos sincères gratitudes à tous nos professeurs  
pour nous avoir accompagnés tout le long de  
notre cursus universitaire avec tant de patience  
et de compréhension.*

*Je remercie également tous les membres de jury qui ont  
accepté d'examiner notre travail.*

---

# **RESUMES**

---

## **Résumé :**

Les réseaux d'antennes imprimées conformes particulièrement attractifs pour toutes les applications embarquées ou mobiles (véhicules, avions, drones, trains, bateaux, etc.) avec des avantages indéniables en termes d'intégration, de discrétion et d'aérodynamisme. Dans le domaine des liaisons de communication par satellite en bandes Ku et Ka, ces types d'antennes sont particulièrement intéressantes car elles présentent un intérêt en terme de gain, de suppression des contraintes mécaniques et électroniques et possèdent des propriétés électriques et mécaniques intéressantes pour une utilisation dans des applications nécessitant des propriétés de flexibilité.

Ce projet présente une conception de réseaux d'antennes imprimées conformes. Ces réseaux d'antennes seront conçus conformément à la structure du drone. L'intérêt d'intégrer ces antennes sur les drones est étudié en simulant les réseaux d'antennes imprimées sur l'empreinte d'une structure externe. De plus, un nouveau type de réseaux d'antennes imprimées conformes est introduit avec des caractéristiques intéressantes qui sont: un diagramme de rayonnement directif, un gain élevé et une réduction de la taille physique par rapport à d'autres réseaux d'antennes imprimées de la même gamme de fréquences. Comme cette antenne sera montée sur un drone, l'étude s'étalera sur la possibilité d'exploiter la forme de l'endroit de l'emplacement, dans le but d'améliorer les propriétés du rayonnement de l'antenne conforme.

## **Mots clés :**

- Antenne omnidirectionnelle.
- communication et navigation aéronautique.
- antenne lame.

## المخلص :

شبكة الهوائي المطبوعة المتوافقة جذابة بشكل خاص للجميع على متن الطائرة أو التطبيقات النقالة (المركبات، الطائرات، الطائرات بدون طيار، القطارات والقوارب، الخ). مع مزايا لا يمكن إنكارها من حيث التكامل التقدير والديناميكا الهوائية. في مجال وصلات الاتصالات الساتلية في نطاقات (ك ا) و(ك ش) هذه الأنواع من الهوائيات مفيدة بشكل خاص لأنها ذات أهمية من حيث الكسب والقضاء على الضغوط الميكانيكية والإلكترونية ولها خصائص كهربائية وميكانيكية مفيدة لاستخدامها في التطبيقات التي تتطلب خصائص المرنة

يقدم هذا المشروع تصميم شبكة الهوائي المطبوعة المتوافقة. سيتم تصميم شبكة الهوائي هذه وفقا لهيكل الطائرة بدون طيار الفائدة لدمج هذه الهوائيات على الطائرات بدون طيار يتم دراستها عن طريق محاكاة شبكة الهوائي مطبوعة على بصمة هيكل خارجي بالإضافة إلى نوع جديد من الشبكات من الهوائيات المطبوعة المتوافقة يتم تقديمها مع ميزات مثيرة للاهتمام هي:

نمط الإشعاع الاتجاهي، مكاسب عالية والحد من الحجم مقارنة مع غيرها من شبكة الهوائي المطبوعة من نفس النطاق من التردد.

نظرا لأنه سيتم تركيب هذا الهوائي على طائرة بدون طيار، ستركز الدراسة على إمكانية استغلال شكل الموقع، بهدف تحسين خصائص الإشعاع للهوائي المتوافق.

## الكلمات المفتاحية:

- هوائي متعدد الاتجاهات.
- الاتصالات والملاحة الجوية.
- هوائي الشفرة.

## **Abstract:**

Compliant printed antenna arrays particularly attractive for all on-board or mobile applications (vehicles, aircraft, drones, trains, boats, etc...). With undeniable advantages in terms of integration, discretion and aerodynamics. In the field of satellite communication links in Ku and Ka bands, these types of antennas are particularly advantageous because they are of interest in terms of the gain, elimination of mechanical and electronic stresses and have advantageous electrical and mechanical properties for use in applications requiring flexibility properties.

This project presents a design of compliant printed antenna arrays. These antenna arrays will be designed in accordance with the structure of the drone. Interest to integrate these antennas on drones is studied by simulating antenna arrays printed on the imprint of an external structure. In addition, a new type of networks of compliant printed antennas is introduced with interesting features that are: directional radiation pattern, high gain and size reduction Compared to other printed antenna arrays of the same range of frequency. Since this antenna will be mounted on a drone, the study will focus on the possibility of exploiting the shape of the location, with the aim of improving the radiation properties of the compliant antenna.

## **Key words:**

- Omnidirectional antenna
- Communication and aeronautical navigation
- Blade antenna

## Table des matières

<b>Introduction générale :</b> .....	<b>1</b>
<b>CHAPITRE 1</b> .....	<b>3</b>
<b>1.1 Introduction :</b> .....	<b>4</b>
<b>1.2 Le marché des services par satellites :</b> .....	<b>4</b>
<b>1.3 Origine des télécommunications par satellite :</b> .....	<b>6</b>
<b>1.4 Types de satellites :</b> .....	<b>7</b>
<b>1.5 Architecture d'un système de télécommunications par satellite :</b> .....	<b>7</b>
1.5.1 Le secteur spatial :.....	7
1.5.2 Le secteur terrien : .....	8
<b>1.6 Généralités sur les bilans de liaison :</b> .....	<b>8</b>
1.6.1 Principe du bilan de liaison :.....	8
1.6.1.1 La PIRE : .....	10
1.6.1.2 La sensibilité du récepteur : .....	10
1.6.1.3 La situation géographique de la station au sol : .....	10
1.6.1.4 Les pertes sur la liaison : .....	10
1.6.2 Qualité de la liaison montante et la liaison descendante :.....	12
1.6.2.1 Qualité de la Liaison montante: .....	12
1.6.2.2 Qualité de Liaison descendante :.....	12
<b>1.7 Antennes existantes:</b> .....	<b>13</b>
1.7.1 Antennes de réception fixes : .....	13
1.7.1.1 Antenne fixe pour la réception d'un seul satellite : .....	13
1.7.1.2 Antenne fixe pour réception multi-satellite :.....	14
1.7.2 Antennes de réception motorisées: .....	15
1.7.3 Antennes de réception autonomes : .....	15
1.7.4 Technologie des antennes : .....	17
<b>1.8 Conclusion :</b> .....	<b>23</b>
<b>CHAPITRE 2</b> .....	<b>24</b>
<b>2.1 Introduction :</b> .....	<b>25</b>
<b>2.2 Les antennes :</b> .....	<b>25</b>
2.2.1 Fonctionnement d'une antenne :.....	25

2.2.2	Techniques de réalisation d'antennes :.....	25
2.3	Le rôle des antennes [20] :.....	26
2.3.1	Antenne d'émission :.....	26
2.3.2	Antenne de réception :.....	26
2.3.3	Réciprocité :.....	26
2.4	Rayonnement d'une antenne :.....	26
2.4.1	Rayonnement électromagnétique :.....	27
2.4.2	La densité de puissance rayonnée par l'antenne :.....	28
2.4.2.1	Zone de Rayleigh :.....	28
2.4.2.2	Zone de Fresnel :.....	28
2.4.2.3	Zone de Fraunhofer :.....	28
2.5	Les caractéristiques de l'antenne :.....	29
2.5.1	Diagramme de rayonnement [23] :.....	30
2.5.1.1	Un lobe principal:.....	31
2.5.1.2	Un angle d'ouverture:.....	31
2.5.1.3	Des lobes secondaires:.....	31
2.5.1.4	Un lobe arrière (rayonnement arrière):.....	31
2.5.2	Directivité :.....	32
2.5.3	Impédance d'entrée :.....	32
2.5.4	Adaptation :.....	33
2.5.5	Coefficient de réflexion :.....	35
2.5.6	Rendement :.....	35
2.5.7	Polarisation :.....	35
2.5.8	Gain:.....	36
2.5.9	Bande passante (BP) :.....	36
2.6	Les différents types d'antenne :.....	38
2.6.1	Antenne dipolaire :.....	38
2.6.2	Antenne à boucle magnétique :.....	39
2.6.3	Antenne cornet :.....	39
2.6.4	Antenne à réflecteur parabolique :.....	40
2.6.5	Antennes de type Cassegrain :.....	41
2.6.6	Antennes patch imprimées :.....	42
2.6.6.1	Les différentes formes du patch :.....	43
2.6.6.2	Avantages et inconvénients des antennes patches :.....	44
2.6.6.3	Les applications des antennes patches:.....	44
2.6.6.4	Différents paramètres de l'antenne :.....	45
2.6.6.5	Techniques d'alimentation :.....	46

<b>2.7 Réseau d'antennes :</b> .....	<b>51</b>
2.7.1 Définition de réseau d'antenne : .....	51
2.7.2 Réseau d'antennes imprimées : .....	51
2.7.3 Association d'antennes en réseau : .....	52
2.7.4 Techniques d'alimentation d'un réseau d'antennes imprimées : .....	53
2.7.4.1 Alimentation parallèle : .....	53
2.7.4.2 Alimentation série : .....	54
2.7.4.3 Réseaux bidimensionnels : .....	54
<b>2.8 Conclusion :</b> .....	<b>56</b>
<b>CHAPITRE 3</b> .....	<b>57</b>
<b>3.1 Introduction :</b> .....	<b>58</b>
<b>3.2 L'outil de simulations le logiciel HFSS :</b> .....	<b>58</b>
3.2.1 Les avantages du logiciel HFSS : .....	59
3.2.2 Les inconvénients du logiciel HFSS : .....	60
<b>3.3 Simulation du réseau d'antennes :</b> .....	<b>60</b>
3.3.1 Les paramètres essentiels pour la conception d'une antenne patch rectangulaire : 60	
3.3.2 Simulation d'une seule antenne : .....	61
3.3.3 Résultat de la simulation : .....	61
3.3.3.1 Le coefficient de réflexion : .....	61
3.3.3.2 Le taux d'ondes stationnaires : .....	62
3.3.3.3 Le diagramme de rayonnement : .....	63
3.3.4 Études paramétriques d'une seule antenne : .....	63
3.3.4.1 Influence de la longueur, la largeur de l'antenne ainsi que la largeur de la ligne d'alimentation: .....	63
3.3.4.2 Résultats de l'étude paramétrique : .....	64
3.3.4.3 L'antenne patch optimisée: .....	66
3.3.5 Simulation d'un réseau d'antenne de deux éléments : .....	66
3.3.6 Résultat de la simulation : .....	67
3.3.6.1 Le coefficient de réflexion : .....	67
3.3.6.2 Le taux d'ondes stationnaires : .....	68
3.3.6.3 Le diagramme de rayonnement : .....	69
3.3.7 Études paramétriques : .....	69
3.3.7.1 Résultats de l'étude paramétrique : .....	69
3.3.7.2 Le réseau d'antenne patch optimisée: .....	72
3.3.8 Simulation d'un réseau d'antenne de quatre éléments : .....	72
3.3.9 Résultat de la simulation : .....	73
3.3.9.1 Le coefficient de réflexion : .....	73

3.3.9.2	Le taux d'ondes stationnaires : .....	74
3.3.9.3	Le diagramme de rayonnement : .....	75
3.3.10	Etude paramétrique : .....	75
3.3.10.1	Résultats de l'étude paramétrique : .....	75
3.3.10.2	Le réseau d'antenne patch optimisée: .....	78
3.3.11	Simulation d'un réseau d'antenne conforme de quatre éléments :.....	78
3.3.12	Résultat de la simulation : .....	80
3.3.12.1	Le coefficient de réflexion : .....	80
3.3.12.2	Le taux d'ondes stationnaires : .....	80
3.3.12.3	Le diagramme de rayonnement : .....	81
3.3.13	Etude paramétrique : .....	81
3.3.13.1	Résultat de l'étude paramétrique : .....	82
3.4	Conclusion : .....	83
	Conclusion générale : .....	84
	Références .....	85
	Sites web.....	86
	Bibliographie .....	87

## Liste des figures

<b>Figure 1.1</b> Extrait de l'étude concernant la croissance d'audience en Europe, Moyen-Orient et Afrique du Nord pour Eutelsat.....	4
<b>Figure 1.2</b> Répartition de la flotte de satellites d'Eutelsat.....	5
<b>Figure 1.3</b> Représentation de la flotte de satellites d'Intelsat.....	5
<b>Figure 1.4</b> Situation de l'orbite géostationnaire dans le plan de l'équateur et exemples d'emplacement de quelques satellites.....	7
<b>Figure 1.5</b> Composantes d'un système de télécommunications par satellite.....	8
<b>Figure 1.6</b> Bilan de liaison satellite-terre.....	9
<b>Figure 1.7</b> Angle d'élévation.....	11
<b>Figure 1.8</b> Angle d'azimut.....	11
<b>Figure 1.9</b> La géométrie d'une liaison montante.....	12
<b>Figure 1.10</b> La géométrie de la liaison descendante.....	13
<b>Figure 1.11</b> Vérin actionneur à rajouter à la parabole pour un balayage mécanique [6].....	15
<b>Figure 1.12</b> Antenne proposée et leurs performances.....	17
<b>Figure 1.13</b> Antenne proposée par Rammos.....	17
<b>Figure 1.14</b> Antenne proposée par [9] et performances associées en réflexion.....	18
<b>Figure 1.15</b> Antenne proposée par [10].....	18
<b>Figure 1.16</b> Antenne proposée par [10].....	19
<b>Figure 1.17</b> Patch élémentaire du réseau d'antennes proposé par [12] La directivité du réseau.....	19
<b>Figure 1.18</b> Antenne proposée par [13].....	20
<b>Figure 1.19</b> Antenne proposée par [14].....	20
<b>Figure 1.20</b> Antenne proposée par [15] et son coefficient de réflexion.....	21
<b>Figure 1.21</b> Prototype d'antenne proposée par [16], coefficient de réflexion et diagramme de rayonnement à 12 GHz.....	21
<b>Figure 1.22</b> Photo du prototype d'antenne proposé par [17] et son gain en élévation et en azimut.....	22
<b>Figure 1.23</b> Antenne proposée par [18] et la structure de son patch élémentaire.....	22
<b>Figure 1.24</b> Antenne proposée par [19] et la structure de son patch élémentaire.....	23
<b>Figure 2.1</b> Rayonnement d'une antenne.....	27
<b>Figure 2.2</b> Lignes de champs produites par une antenne demi-onde.....	27
<b>Figure 2.3</b> La densité de puissance rayonnée par l'antenne.....	29
<b>Figure 2.4</b> Limite des 3 zones de rayonnement.....	29
<b>Figure 2.5</b> Diagramme de rayonnement classique d'une antenne directive.....	31
<b>Figure 2.6</b> Circuit équivalent d'antenne d'émission.....	34
<b>Figure 2.7</b> Polarisation du champ électromagnétique.....	36
<b>Figure 2.8</b> Mesure de la bande passante à partir du tracé de coefficient de réflexion.....	37
<b>Figure 2.9</b> Antenne dipolaire.....	38
<b>Figure 2.10</b> Boucle magnétique.....	39
<b>Figure 2.11</b> Antenne cornet.....	40
<b>Figure 2.12</b> Antenne à réflecteur parabolique.....	41
<b>Figure 2.13</b> Antenne cassegrain.....	41
<b>Figure 2.14</b> Description d'une antenne imprimée.....	43
<b>Figure 2.15</b> Différentes formes du patch.....	43
<b>Figure 2.16</b> Alimentation par ligne micro-ruban.....	47
<b>Figure 2.17</b> Alimentation par sonde coaxiale.....	47
<b>Figure 2.18</b> Alimentation par fente.....	48

<b>Figure 2.19</b> Alimentation par couplage de proximité.....	49
<b>Figure 2.20</b> Alimentation du patch par un guide d'onde coplanaire .....	49
<b>Figure 2.21</b> Différents types de réseaux .....	52
<b>Figure 2.22</b> Alimentation parallèle d'un réseau linéaire .....	54
<b>Figure 2.23</b> Alimentation série d'un réseau linéaire .....	54
<b>Figure 2.24</b> Alimentation parallèle d'un réseau plan.....	55
<b>Figure 2.25</b> Alimentation série d'un réseau plan.....	55
<b>Figure 3.1</b> L'interface principale de HFSS .....	59
<b>Figure 3.2</b> Différents étapes de simulation .....	60
<b>Figure 3.3</b> Géométrie de l'antenne patch rectangulaire.....	61
<b>Figure 3.4</b> Coefficient de réflexion S11.....	62
<b>Figure 3.5</b> Taux d'ondes stationnaires TOS (VSWR).....	62
<b>Figure 3.6</b> Diagrammes de rayonnement en 3D .....	63
<b>Figure 3.7</b> Coefficient de réflexion S11 pour $W1=3.8, L2=5.9, Wf=0.41$ .....	64
<b>Figure 3.8</b> Coefficient de réflexion S11 pour $W1=3.8, L2=6, Wf=0.41$ .....	64
<b>Figure 3.9</b> Coefficient de réflexion S11 pour $W1=3.8, L2=6.1, Wf=0.41$ .....	65
<b>Figure 3.10</b> Coefficient de réflexion S11 pour $W1=3.8, L2=6.2, Wf=0.41$ .....	65
<b>Figure 3.11</b> Gain en 3D pour $W1=3.8, L2=6.2, Wf=0.41$ .....	66
<b>Figure 3.12</b> Conception du réseau d'antennes de deux éléments du logiciel HFSS.....	67
<b>Figure 3.13</b> Coefficient de réflexion S11 pour le réseau d'antenne de deux éléments.....	68
<b>Figure 3.14</b> Taux d'ondes stationnaires pour le réseau d'antenne de deux éléments.....	68
<b>Figure 3.15</b> Gain en 3D.....	69
<b>Figure 3.16</b> Résultat d'étude paramétrique .....	70
<b>Figure 3.17</b> Taux d'ondes stationnaires pour $W1=3.8, L2=6.4, Wf=0.61, Lf=10.4, h3=9$ .....	71
<b>Figure 3.18</b> Gain du réseau d'antennes.....	71
<b>Figure 3.19</b> Diagramme de rayonnement en 2D.....	72
<b>Figure 3.20</b> Conception du réseau de quatre éléments du logiciel HFSS.....	72
<b>Figure 3.21</b> Coefficient de réflexion S11 pour le réseau d'antenne de quatre éléments .....	74
<b>Figure 3.22</b> Taux d'ondes stationnaires pour le réseau d'antenne de quatre éléments .....	74
<b>Figure 3.23</b> Diagramme de rayonnement en 3D.....	75
<b>Figure 3.24</b> Résultats de l'étude paramétrique.....	76
<b>Figure 3.25</b> Taux d'ondes stationnaires.....	77
<b>Figure 3.26</b> Gain en 3D .....	77
<b>Figure 3.27</b> Diagramme de rayonnement en 2D.....	78
<b>Figure 3.28</b> Conception d'un réseau d'antennes conforme de quatre éléments du logiciel HFSS.....	79
<b>Figure 3.31</b> Diagrammes de rayonnement en 3D	
<b>Figure 3.29</b> Coefficient de réflexion S11 .....	80
<b>Figure 3.30</b> Taux d'ondes stationnaires TOS (VSWR).....	81
<b>Figure 3.31</b> Diagrammes de rayonnement en 3D.....	81
<b>Figure 3.32</b> Résultat d'étude paramétrique .....	82
<b>Figure 3.33</b> Gain en 3D .....	83

## Liste des tableaux

<b>Tableau 1.1</b> Services offerts par les satellites d'Intelsat .....	6
<b>Tableau 1.2</b> Antenne fixe pour la réception d'un seul satellite.....	14
<b>Tableau 1.3</b> Antenne fixe pour réception multi-satellite .....	15
<b>Tableau 1.4</b> Antennes de réception autonomes .....	16
<b>Tableau 2.1</b> Comparaison entre les méthodes d'alimentation [38].....	51
<b>Tableau 3.1</b> Paramètre de l'antenne patch rectangulaire.....	61
<b>Tableau 3.2</b> Différents paramètres de l'antenne à optimiser .....	63
<b>Tableau 3.3</b> Dimension d'antenne de base et l'antenne optimisée .....	66
<b>Tableau 3.4</b> Paramètre de l'antenne patch rectangulaire.....	67
<b>Tableau 3.5</b> Différents paramètres du réseau d'antenne à optimiser .....	69
<b>Tableau 3.6</b> Valeurs pour meilleur S11.....	70
<b>Tableau 3.7</b> Dimensions du réseau d'antenne de base et du réseau d'antenne optimisé .....	72
<b>Tableau 3.8</b> Paramètres du réseau d'antenne de quatre éléments.....	73
<b>Tableau 3.9</b> Différents paramètres du réseau d'antenne à étudier .....	75
<b>Tableau 3.10</b> Dimensions du réseau d'antenne de base et du réseau d'antenne optimisé .....	78
<b>Tableau 3.11</b> Dimension des différents paramètres du réseau d'antennes conforme....	80
<b>Tableau 3.12</b> Différents paramètres de l'antenne à optimiser .....	82

---

# INTRODUCTION GENERALE

---

### Introduction générale :

Actuellement avec accélération dans le développement des technologies de la communication spatiale et l'industrie spatiale et présente de très intéressantes perspectives avec plus de 1000 nouveaux satellites lancés d'ici 2023 [1] avec une moyenne de 115 satellites par an.

Une vingtaine d'entre eux est dédiée au marché des télécommunications, ce qui dénote de la bonne santé économique de ce secteur. En effet, sur le plan mondial, les liaisons hertziennes par satellites sont un support de communication universel.

Aussi, de nombreux marchés assurent leurs différentes liaisons au moyen d'une connexion satellite. L'industrie des satellites a su évoluer de façon très significative avec le progrès technologique. Par conséquent, les satellites ont permis de couvrir des secteurs variés de services comme la télédiffusion, les fournisseurs d'accès à internet haut débit, la téléphonie, la météorologie et bien d'autres applications encore.

Dans le domaine de la télédiffusion (TV) par exemple, son importance se manifeste par le grand nombre de foyers qui reçoivent les chaînes de télévision directement chez eux via les satellites. Ces derniers diffusent plusieurs programmes de télévision dans différents formats y compris les plus évolués comme la TV très Haute Définition (Ultra High Définition TV). Ainsi, la télédiffusion très haute qualité gagne de plus en plus de terrain et atteint les zones isolées dans lesquelles les réseaux filaires ne sont pas déployés ou déplorables, comme pour les liaisons avec les plateformes pétrolières, les navires, les avions et les zones blanches. La diffusion de télévision par satellite permet de véhiculer les informations, l'ouverture sur différentes cultures et permet de garder les liens avec le pays d'origine pour les personnes expatriées. En d'autres termes, la diffusion d'informations vidéo de très bonne qualité, dans des langues variées permet de couvrir une audience très large et hétéroclite. Par le biais d'une antenne de réception satellite, des vidéos sont acheminées jusqu'au récepteur devenant en quelque sorte des fenêtres ouvertes sur le monde et les différentes cultures. On pense, à tort, qu'un satellite n'est autre qu'un système de télédiffusion ou même un moyen de téléphonie pour les lieux les plus déserts. Il représente aussi un atout considérable dans l'évolution des télécommunications permettant un accès instantané et rapide sans déploiement de réseaux câbles au sol, à Internet haut débit à prix compétitif à celui de l'ADSL. Depuis quelques années, en France, l'offre satellite est concurrencée par les réseaux câblés (ADSL, câble, fibre optique). Cependant, les coûts de déploiement associés à ces réseaux sont élevés et peuvent s'avérer prohibitifs pour couvrir certaines zones rurales où le potentiel marché n'est pas suffisant pour assurer leur rentabilité.

Nous avons structuré notre mémoire en trois chapitres.

Le premier chapitre met le point sur les notions de base de la communication satellitaire en présentant le bilan de liaison et les différentes antennes existantes ,dans le deuxième chapitre on a parlé sur les antennes de plusieurs cotés en présentant leurs différents types, rôles, caractéristiques et leurs technique d'alimentations , par la suite on a destiné notre chapitre vers les antennes imprimées on parlant de leurs avantages et inconvénients, leurs application, après on a passé la partie de conception et de simulation qui est incluse dans le chapitre trois , ici on a fait une simulation d'une seule antenne et d'un réseau de deux , quatre éléments et après un réseau d'antennes conforme avec une étude paramétrique à fin d'avoir des bon résultats et pour arriver à réaliser notre objectif.

---

# CHAPITRE 1

## Généralité et Intérêt de l'étude

---

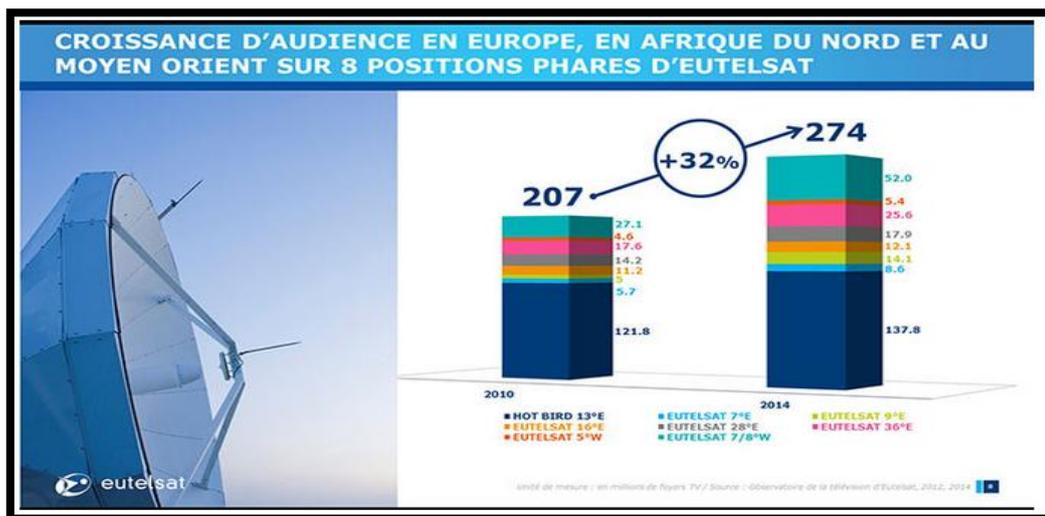
## 1.1 Introduction :

Dans ce chapitre, on introduit des généralités sur les services offerts par les satellites d'Intelsat, les opérateurs se partagent le marché des services par satellites .Ce travail se concentre principalement sur l'application des antennes pour les systèmes communications.

## 1.2 Le marché des services par satellites :

Plusieurs opérateurs se partagent le marché des services par satellites .Les plus connus sont Intelsat, mis en service par les américains, et Eutelsat, par les pays européens. Nous allons voir dans cette section l'évolution du marché mondial et des services assurés par satellites.

Une étude réalisée par « TNS Sofrs » et « IPSOS » publiée en 2015 [2] pour le compte d'Eutelsat communications du groupe Eutelsat, premier opérateur satellite en Europe, en Afrique du Nord et au Moyen-Orient, estime à 274 millions le nombre de foyers bénéficiant des programmes de télévision diffusés par l'un des satellites d'Eutelsat, confirmant ainsi l'importance de la réception TV directe par satellite.



**Figure 1.1** Extrait de l'étude concernant la croissance d'audience en Europe, Moyen-Orient et Afrique du Nord pour Eutelsat

La (Figure 1.2) montre la répartition des satellites de la constellation Eutelsat sur le plan de l'équateur (un ensemble de points blancs sur la carte) telle qu'elle est fournie sur le site de l'opérateur [3].

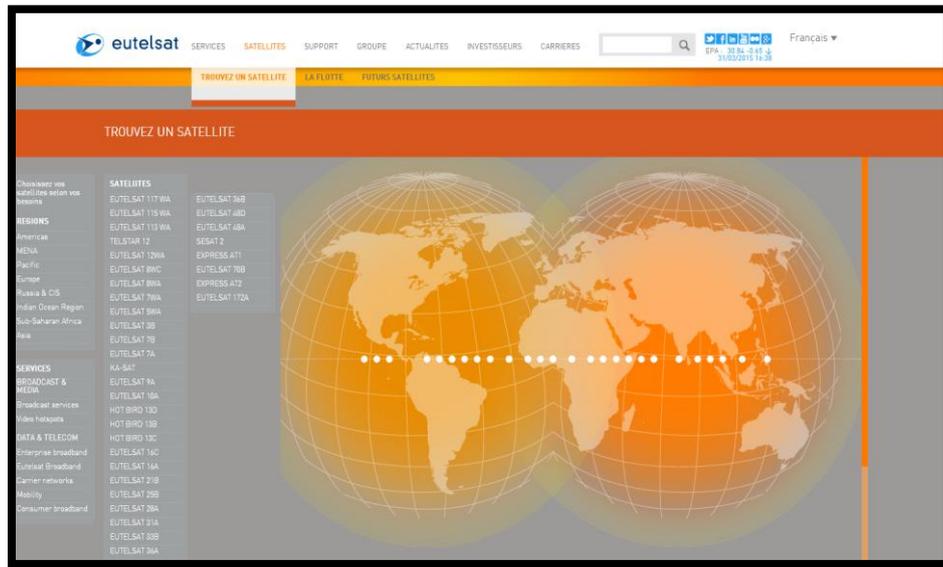


Figure 1.2 Répartition de la flotte de satellites d'Eutelsat

Eutelsat est classé premier en Europe et troisième mondial par miles fournisseurs de services par satellites. La place de leader mondial est, quant à elle, occupée par l'opérateur américain Intelsat.

La (Figure 1.3), montre la répartition des satellites d'Intelsat dans le monde et sur la ligne équatoriale.

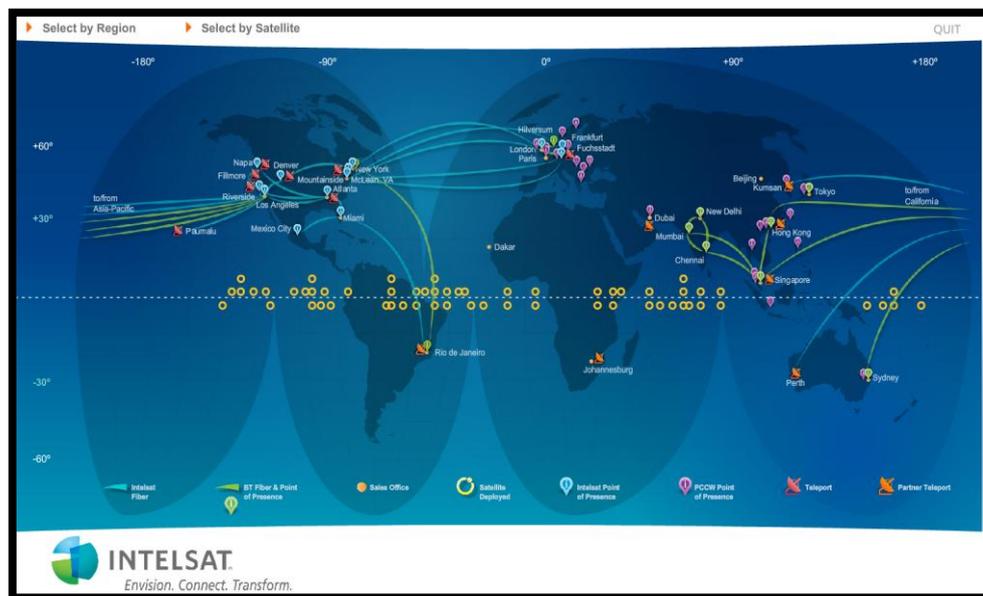


Figure 1.3 Représentation de la flotte de satellites d'Intelsat

Toutes les zones géographiques du globe sont ainsi couvertes par au moins un satellite de la flotte Intelsat. Le Tableau 1.1 permet de résumer la diversité de services offerte par le groupe Intelsat [4].

SERVICE	Rôle
<b>Média</b>	Les diffuseurs d'information et de divertissement, les plateformes de service de télédiffusion autour du globe utilisant les liaisons satellites pour émettre les programmes de la télé
<b>Mobilité</b>	Les clients ayant constamment besoin d'une connectivité à large bande partout où ils vont, sur terre, sur mer ou même en l'air
<b>Broadband</b>	Les fournisseurs de services commerciaux grâce à un réseau de données efficace et rapide
<b>Gouvernemental</b>	Les militaires, les commerciaux et les gouvernements en développant des solutions de pointe pour les communications mobiles et fixes et aussi dans les communications point-à-point

**Tableau 1.1** Services offerts par les satellites d'Intelsat

### 1.3 Origine des télécommunications par satellite :

L'évolution des télécommunications par satellite est l'aboutissement de la recherche de capacités de communication toujours plus grande entre les hommes, en réduisant au maximum les coûts de ces dernières. Les précurseurs de cette évolution sont sans hésiter les grandes puissances mondiales qui, lors des deux guerres mondiales, ont compris la nécessité de développer des techniques de communication, secrète notamment.

Les débuts de l'ère spatiale sont marqués par le lancement du premier satellite artificiel Soviétique, SPOUTNIK, et l'on assiste alors pendant les années qui suivent à l'explosion de services offerts par les satellites :

- service de courrier par satellite en 1958,
- transmission TV au monde entier en 1962,
- satellite de communications mobiles (TACSAT) en 1968,
- satellite avec service de communications mobiles commerciales (MARISAT) en 1976.

Puis, en 1965, le premier satellite géostationnaire commercial Intelsat I (Early Bird) est lancé [2].

Les critères de caractérisation d'un système satellitaire sont généralement :

- La couverture du système.
- Les bandes de fréquence utilisées.
- La puissance et la capacité d'émission du satellite.
- La capacité des transpondeurs.

- Les techniques d'accès.
- Les techniques de modulations et de codages.

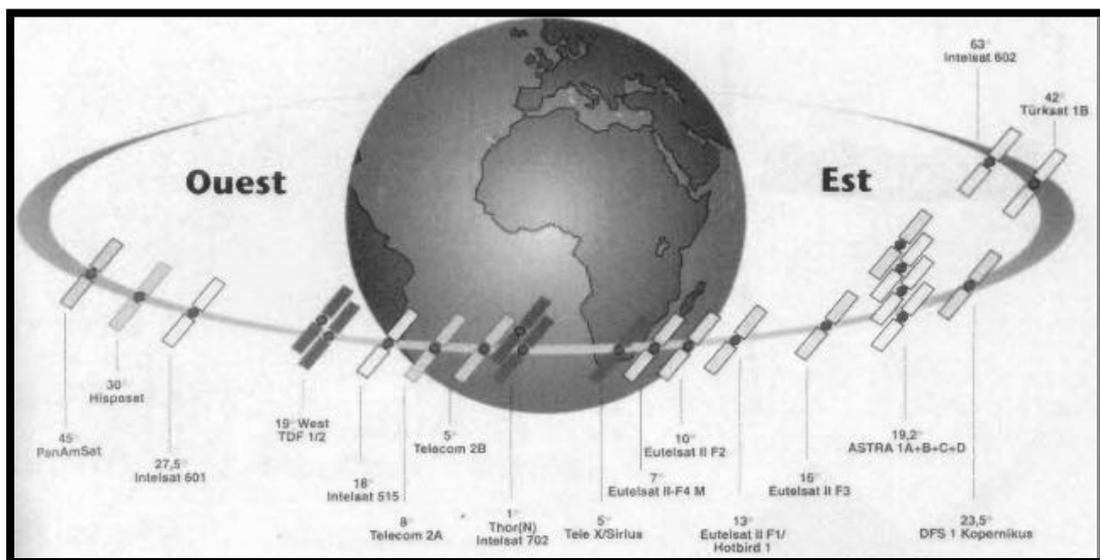
**1.4 Types de satellites :**

Il existe plusieurs types de satellites qui sont définis selon leur orbite. Nous rappelons qu'une orbite est la trajectoire d'un satellite autour d'une planète.

On peut distinguer les orbites elliptiques ou circulaires à différentes altitudes : basse, moyenne ou élevée. Parmi les orbites circulaires à altitude élevées, on peut distinguer les orbites géosynchrones et une orbite géostationnaire.

L'orbite du satellite est définie selon l'application visée. Généralement, les services de communications sont assurés par des satellites géostationnaires.

L'immobilité du satellite vis-à-vis de la Terre est l'avantage incontestable des satellites géostationnaires [4].



**Figure 1.4** Situation de l'orbite géostationnaire dans le plan de l'équateur et exemples d'emplacement de quelques satellites

**1.5 Architecture d'un système de télécommunications par satellite :**

Un système de télécommunications par satellite comprend le(s) satellite(s) (secteur spatial) et des stations terriennes (secteur terrien). Les stations terriennes pouvant être à la fois émettrices et réceptrices ou spécialisées les unes en émission et les autres en réception.

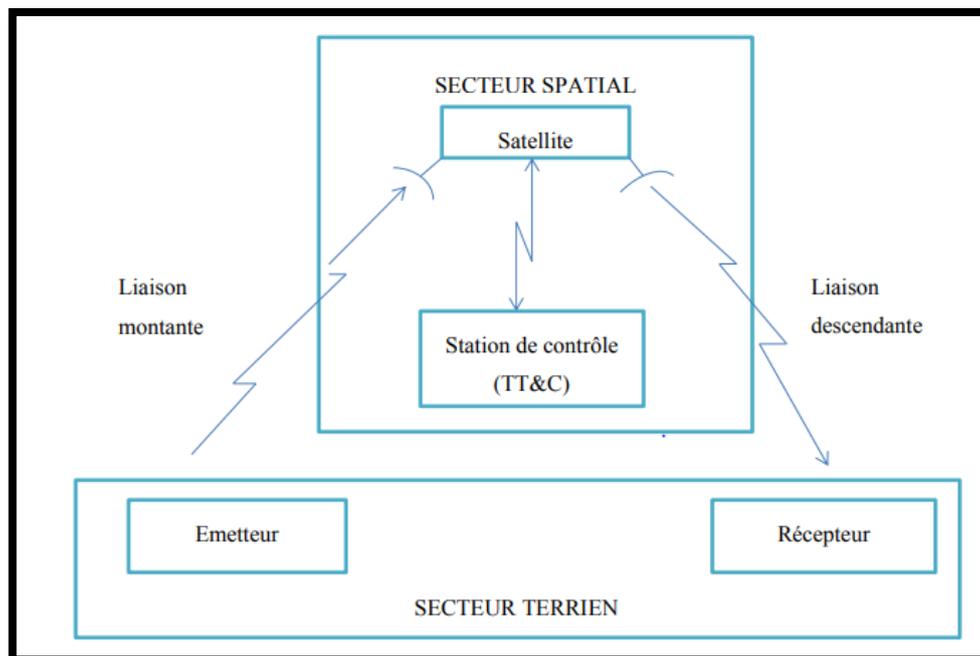
**1.5.1 Le secteur spatial :**

Celui-ci est constitué principalement du satellite et de l'ensemble des stations de poursuite, de télémétrie et de télécommande ou stations TT&C (Tracking, Telemetry and

Command), du centre de contrôle du satellite, où sont décidées toutes les opérations traitant du maintien à poste et de la vérification des fonctions vitales du satellite.

### 1.5.2 Le secteur terrien :

Il est constitué de l'ensemble des stations terriennes, raccordées aux terminaux des utilisateurs par un réseau Terrestre pour la plupart. Les stations, bien que jouant le même rôle, se distinguent par leurs tailles, qui varient en fonction du volume du trafic à acheminer et du type de trafic (téléphone, télévision, données). Certaines stations sont à la fois émettrices et réceptrices tandis que d'autres sont uniquement réceptrices.



**Figure 1.5** Composantes d'un système de télécommunications par satellite

Plusieurs types d'antennes sont utilisés pour la réception des signaux satellites, mais la plus connue est l'antenne à réflecteur souvent de forme parabolique.

## 1.6 Généralités sur les bilans de liaison :

### 1.6.1 Principe du bilan de liaison :

Afin d'analyser les performances d'un système de communications en général et du système de communications par satellite en particulier, il est nécessaire d'évaluer, en fonction des paramètres de fonctionnement du système, la liaison établie entre les différentes parties du système. En d'autres termes, il s'agit d'évaluer la qualité de la liaison entre l'émetteur et le récepteur dans un système particulier.

Le bilan de liaison satellitaire est de manière basique la somme des pertes entre l'émetteur et le récepteur, et vice versa. Il s'évalue donc autant pour la liaison montante

(émetteur de la station au sol et équipements de réception du satellite) que pour la liaison descendante (émetteur du satellite et équipement de réception du récepteur). Ces pertes sont soustraites de la somme des gains sur la liaison. Le niveau du signal obtenu en sortie du système doit posséder un certain seuil afin que ce dernier puisse être perçu par les appareils de réception de la station au sol. L'importance de l'évaluation de la liaison se retrouve au niveau du récepteur car c'est la qualité du signal reçu qui témoigne de la qualité de la liaison établie. Plus la qualité du signal est bonne, plus la liaison est fiable et performante.

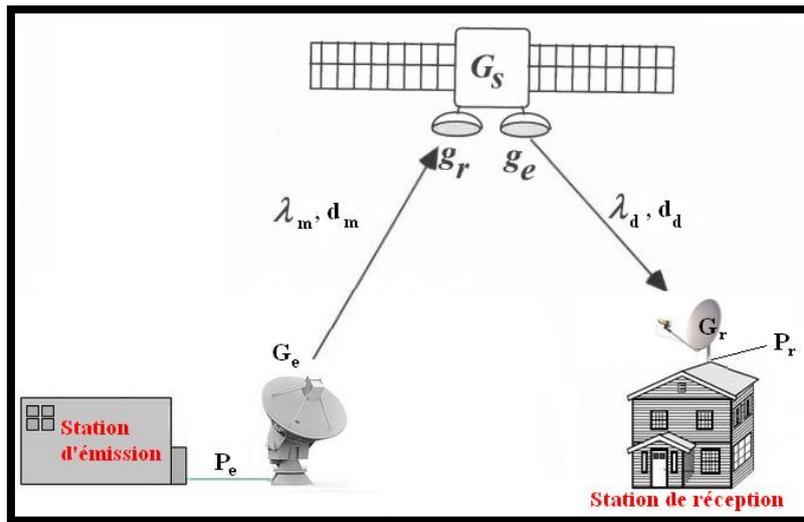


Figure 1.6 Bilan de liaison satellite-terre

Le bilan de liaison dans ce contexte revient donc à la puissance reçue par le récepteur, qui correspond à la puissance isotrope rayonnée en direction du récepteur, divisée par les pertes sur le trajet de réception [5].

Il s'exprime par l'équation suivante :

$$P_r = P_e * G_e * G_r * \frac{1}{L_t} \quad (1.1)$$

Où :

$P_e$  est la puissance fournie à l'antenne d'émission (en Watt)

$G_e$  est le gain de l'antenne d'émission

$G_r$  est le gain de l'antenne de réception

$L_t$  est la somme des pertes de la liaison

Le bilan des pertes sur la liaison s'exprime comme suit :

$$L_t = L_{FS} * L_{atm} * L_{pol} * L_{rec} \quad (1.2)$$

Où:

$L_{FS}$  : représente l'atténuation due à la propagation en espace libre

Latm : représente les pertes atmosphériques

Lpol : représente les pertes de polarisation

Lrec : représente les pertes dues au récepteur

Les différents paramètres dont il faut tenir compte dans l'évaluation d'un bilan de liaison sont les suivants :

### **1.6.1.1 La PIRE :**

La PIRE (Puissance Isotrope Rayonnée Equivalente) est la puissance effectivement rayonnée après avoir soustrait de la puissance en entrée de l'émetteur, les pertes dues aux composants de l'émetteur. Le paramètre fondamental qui permet de réduire l'effet des pertes sur la liaison est le gain de l'antenne. Le gain s'évalue tant sur les antennes d'émission que les antennes de réception. Lorsque l'antenne d'émission est la même que l'antenne de réception, ce gain a la même valeur moyennant la condition que la fréquence d'émission soit la même que la fréquence de réception.

### **1.6.1.2 La sensibilité du récepteur :**

La sensibilité du récepteur est exprimée par le paramètre G/T qui indique la qualité de l'émetteur en termes de niveau de bruit. Il est calculé en faisant le ratio entre le gain total de l'émetteur, incluant l'amplificateur, l'antenne et les autres équipements d'émission, et le bruit total sur le lien montant.

### **1.6.1.3 La situation géographique de la station au sol :**

La latitude et la longitude indiquent la localisation des équipements terminaux de l'émetteur, ou du récepteur, à la surface de la Terre. Ces différents paramètres sont exprimés en degrés. Lorsqu'un satellite est situé près de l'équateur, à une latitude de 0 degré, seule la longitude est suffisante pour identifier la localisation du satellite dans l'espace. L'angle d'élévation quant à lui indique l'angle comparativement à l'angle de référence qui vaut 0 degrés, dans l'optique d'avoir une vue directe entre la station au sol et le satellite. Tandis que l'azimut est l'angle entre le nord magnétique et la direction du satellite.

### **1.6.1.4 Les pertes sur la liaison :**

Les pertes enregistrées sur le trajet de l'onde radio font référence au niveau d'atténuation entre le signal émis par l'antenne de la station d'émission (après le système d'antennes), en comparaison au niveau du signal en réception au niveau de l'antenne du récepteur (avant le système d'antenne). Ces pertes peuvent être déterminées de plusieurs manières, mais la manière la plus simple de les évaluer est en évaluant les pertes en espace libre subies par le signal car

celles-ci ne dépendent que des paramètres de liaison. Elles s'expriment par la formule :

$$L_{FS} = \left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right)^2 = \left(\frac{4\pi d f}{c}\right)^2 \quad (1.3)$$

Ces pertes sont évaluées pour un signal dans les conditions de propagation en ligne de vue directe entre le satellite et la station au sol, c'est-à-dire sans obstacle sur le trajet du signal, pouvant causer des atténuations supplémentaires ou des réflexions du signal.

**a. Elévation :**

L'élévation est l'angle formé entre l'horizontale du point de réception une ligne reliant ce point au satellite (Figure 1.7).

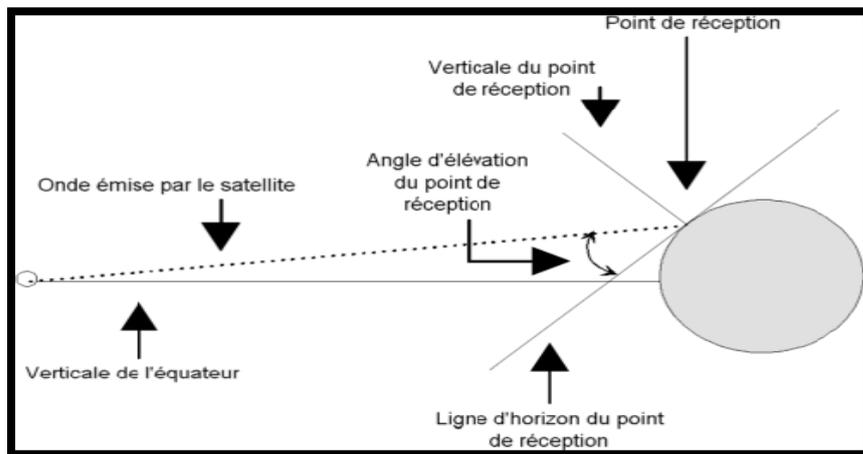


Figure 1.7 Angle d'élévation

**b. Azimut :**

L'azimut est l'angle formé par le nord géographique et la direction du satellite. C'est à peu de chose près ce qu'on mesure avec une boussole (nord magnétique).

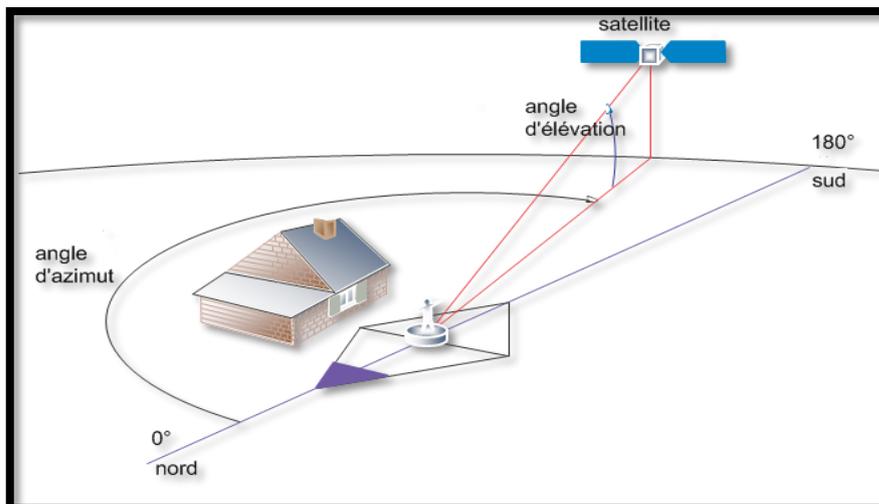


Figure 1.8 Angle d'azimut

**1.6.2 Qualité de la liaison montante et la liaison descendante :**

Les performances de la liaison est évaluée comme le rapport de la puissance de la porteuse reçue  $C$ , sur la puissance du bruit de la densité spectrale  $N_0$ .

Ou :  $C/N$  : représente la puissance de la porteuse sur la puissance du bruit.

Ou :  $C/N = (C/N_0) (1/B_N)$  ou  $B_N$  est le bruit de la bande passante du récepteur.

$$C/N_0 = (PIRE) (1/L_S) (G_R/T) (1/K) (Hz) \tag{1.4}$$

Ou :  $C/N_0$  : peut aussi être exprimée en fonction de la densité de puissance  $\Phi$

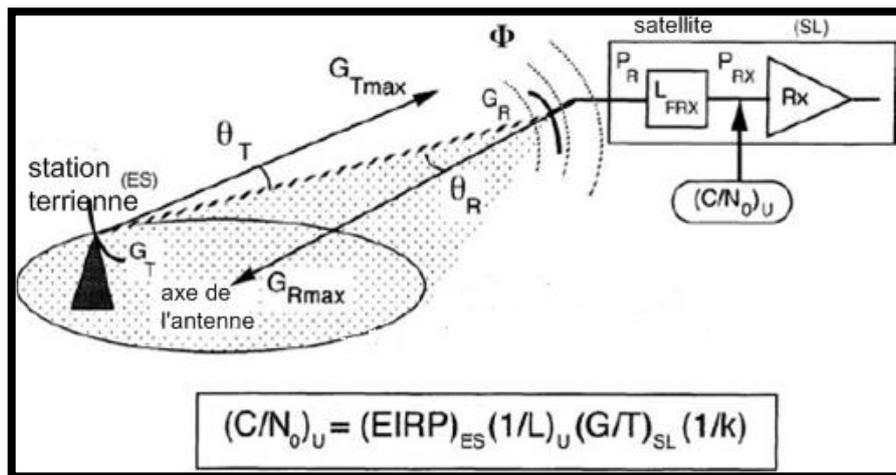
$$C/N_0 = \Phi (\lambda^2/4\pi) (G_R/T) (1/K) (Hz) \tag{1.5}$$

$$\Phi = PIRE/4\pi R^2 (W/m^2) \tag{1.6}$$

$R$  : distance entre la station terrienne et le satellite.

**1.6.2.1 Qualité de la Liaison montante:**

La (Figure 1.9) représente la géométrie d'une liaison montante.



**Figure 1.9** La géométrie d'une liaison montante

Avec

$\theta_T, \theta_R$  : L'erreur maximum de pointage.

$L_{FRX}$  : pertes de réception entre l'antenne et le récepteur.

$L = L_f L_a$  (en dB)

$L_f$ : perte en espace libre.

$L_a$  : atténuation atmosphérique.

$P_{RX}$  : puissance de réception de l'amplificateur.

**1.6.2.2 Qualité de Liaison descendante :**

La (Figure 1.10) représente la géométrie d'une la liaison descendante.

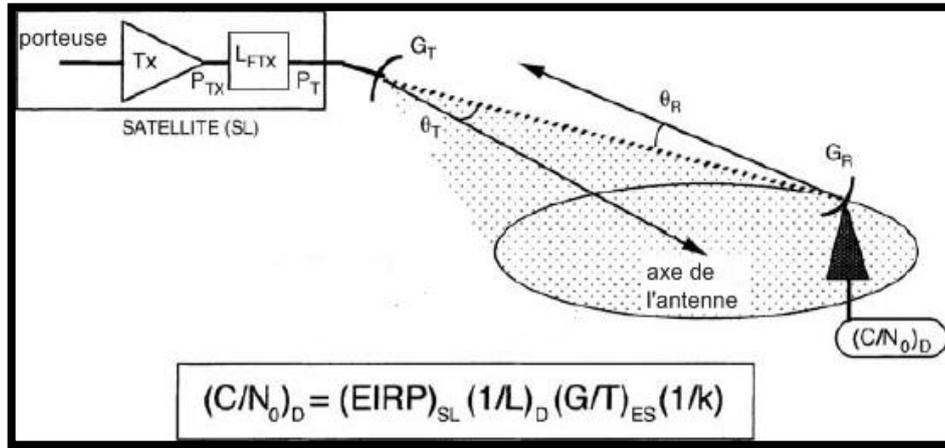


Figure 1.10 La géométrie de la liaison descendante

Avec :

$L_{FTX}$  : pertes de transmission entre l'antenne et le récepteur.

$P_{TX}$  : puissance de transmission de l'amplificateur.

$K$  : constante de Boltzmann

### 1.7 Antennes existantes:

À ce niveau, nous proposons de dresser un panorama des solutions actuellement disponibles. Il est cependant impossible de faire une classification complète d'antennes de réception.

#### 1.7.1 Antennes de réception fixes :

Une étude de marché sur les différentes antennes de réception fixes, nous permet de citer quelques exemples vendus dans le marché.

##### 1.7.1.1 Antenne fixe pour la réception d'un seul satellite :

Le tableau suivant représente quelque type Antenne fixe pour la réception d'un seul satellite

Antenne de réception pour un seul satellite	Caractéristiques
	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Qualité de réception : Analogique et numérique</li> <li>-Dimensions en cm :85×75</li> <li>-Tête LNB : Universelle</li> <li>-Polarisation : Horizontale et verticale</li> <li>-Gain : 38.5dBi</li> <li>- Prix : 57.98 €</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Qualité de réception : Analogique et numérique</li> <li>-Dimensions en cm :58×63</li> <li>-Tête LNB : Universelle</li> <li>-Polarisation : Horizontale et verticale</li> <li>-Gain : 35dBi</li> <li>-Prix : 39.90 €</li> </ul>
 <p style="text-align: center; font-size: small;">Metronic 498155</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Qualité de réception : Analogique et numérique</li> <li>-Dimensions en cm :43×54</li> <li>-Tête LNB : Universelle</li> <li>-Polarisation : Horizontale et verticale</li> <li>-Gain : &gt;30dBi</li> <li>- Prix : 46.79 €</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Qualité de réception : Analogique et numérique</li> <li>-Dimensions en cm : 33×33, existe aussi en45×45</li> <li>-Tête LNB : Universelle à deux sorties</li> <li>-Polarisation : Horizontale et verticale</li> <li>-Gain : &gt;30dBi</li> <li>-Prix : 49.90 €</li> </ul>
 <p style="text-align: center; font-size: small;">Selfsat H30D</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Qualité de réception : Analogique et numérique</li> <li>-Dimensions en cm :33×55</li> <li>-Tête LNB : Universelle à deux sorties</li> <li>-Polarisation : Horizontale et verticale</li> <li>-Gain : 34dBi</li> <li>-Prix : 89.00 €</li> </ul>

**Tableau 1.2** Antenne fixe pour la réception d'un seul satellite

**1.7.1.2 Antenne fixe pour réception multi-satellite :**

Le tableau suivant représente quelque type Antenne fixe pour réception multi-satellite :

Antenne de réception multi-satellite	Caractéristiques
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Qualité de réception : Analogique et numérique</li> <li>Dimensions en cm :64×75</li> <li>Tête LNB : 2 têtes LNB universelles</li> </ul>

 <p>Visosat BISAT G2</p>	<p>Polarisation : Horizontale et verticale                  Gain : 37dBi                  - Prix : 105.60 €</p>
 <p>Visosat BISAT G3</p>	<p>-Qualité de réception : Analogique et numérique                  -Dimensions en cm : 64×75                  -Tête LNB : 3 têtes LNB universelles                  -Polarisation : Horizontale et verticale                  -Gain : 37dBi                  -Prix : 125 €</p>

Tableau 1.3 Antenne fixe pour réception multi-satellite

**1.7.2 Antennes de réception motorisées:**

Les antennes de réception fixes classiques comme les paraboles peuvent, au moyen d'un moteur, opérer le dépointage du faisceau de façon mécanique et sans l'intervention de l'utilisateur.

L'antenne est associée à un vérin électromécanique permettant, à partir d'une commande, d'orienter le faisceau principal dans la direction du satellite visé, (**Figure 1.11**)

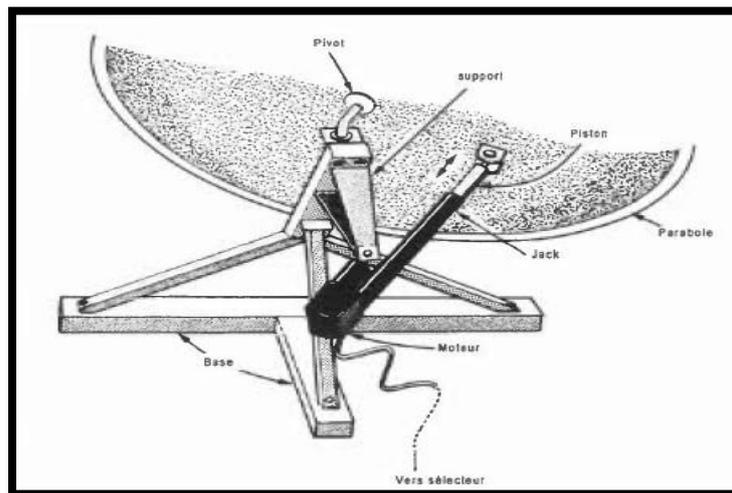


Figure 1.11 Vérin actionneur à rajouter à la parabole pour un balayage mécanique [6]

**1.7.3 Antennes de réception autonomes :**

Cette catégorie d'antennes recouvre la nouvelle génération d'antennes de réception par satellite. La particularité de ces antennes de réception est leur capacité à chercher les positions des satellites sans intervention de la part de l'utilisateur.

Nouvelle génération des antennes de réception satellite	Caractéristiques
	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Nom : SNIPSEDEA</li> <li>-Dimensions en cm: longueur 45, largeur 32, hauteur 19</li> <li>-Bande passante : 10.7 – 12.75GHz</li> <li>-Polarisation : Horizontale et verticale</li> <li>-Gain : 33.7 dBi 12.7GHz</li> <li>-Faisceau ajustable en élévation : mécaniquement entre 15° et 90° de façon continue</li> <li>-Poids : 17Kg</li> <li>-Prix : 800 €</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Nom : NATANIA</li> <li>-Dimensions en cm : diamètre de 20</li> <li>-Bande passante : 10.7 – 12.75GHz</li> <li>-Polarisation : Circulaire</li> <li>-Gain : nom communiqué</li> <li>-Faisceau ajustable élévation: électronique entre 20° et 60° avec un pas de 4°</li> <li>- Prix : 1000 €</li> </ul>

Tableau 1.4 Antennes de réception autonomes

**- État de l'art au Technologie des Antennes :**

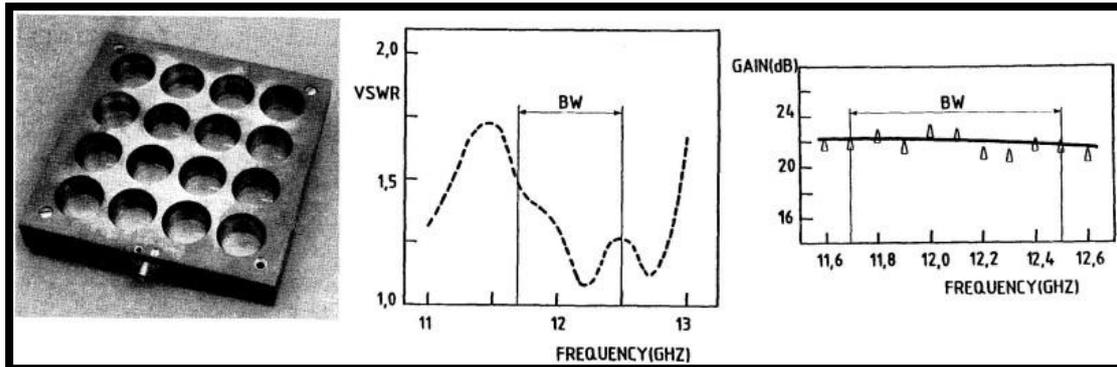
Actuellement, l'antenne la plus utilisée dans ce domaine est la parabole. Comme nous venons de le montrer, ce type d'antenne possède plusieurs inconvénients et limitations tels que son installation délicate et aussi son manque d'esthétique lié à sa forme géométrique et son encombrement peu discret.

Par ailleurs, l'incapacité des paraboles à assurer un dépointage automatique est devenu une véritable limitation, un axe de développement et d'innovation important pour les fournisseurs de services avec la multiplication du nombre de satellites permettant ainsi d'enrichir les offres existantes.

### 1.7.4 Technologie des antennes :

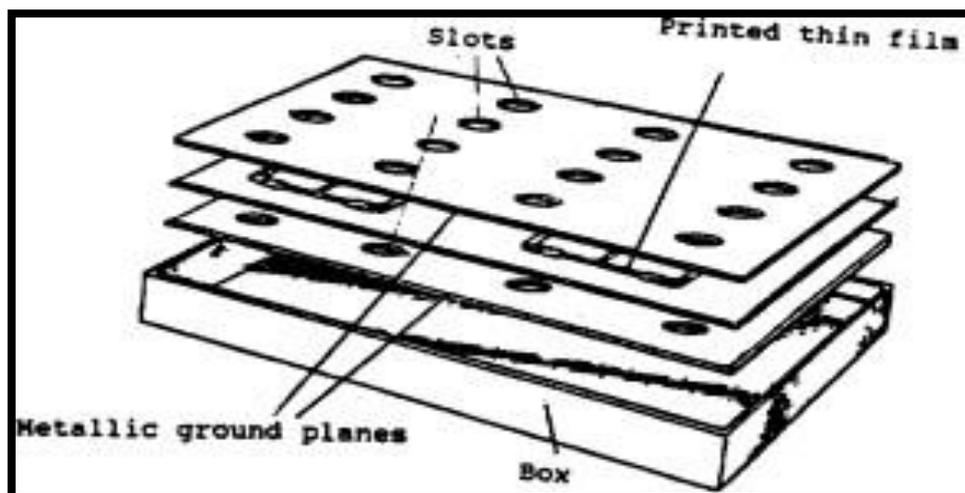
Ramos [7] a proposé en 1983 une structure d'antenne planaire à large bande passante, sous forme d'un réseau de 16 éléments rayonnants et d'une empreinte de  $10 \times 10 \text{cm}^2$ . Ce dernier est composé de deux plans métalliques avec chacun des ouvertures circulaires correspondantes aux résonateurs excités suivant la technique de la ligne suspendue.

La figure suivant représente antenne proposée par [6] et ses performances.



**Figure 1.12** Antenne proposée et leurs performances

➤ En 1991, Ramos [8] propose un autre type d'antenne plate cette antenne caractéristique par la technique de la ligne suspendue avec un réseau d'alimentation par couplage électromagnétique à faibles pertes (**Figure 1.13**). La bande passante de cette solution couvre la partie haute de la bande Ku soit [11.7–12.5GHz].



**Figure 1.13** Antenne proposée par Ramos

➤ Dans [8], Kitao et al décrivent le design d'un réseau de 256 antennes de forme annulaire. Il est possible avec ce réseau aux dimensions de  $30 \times 30 \text{cm}^2$  d'atteindre 30 dBi de gain.

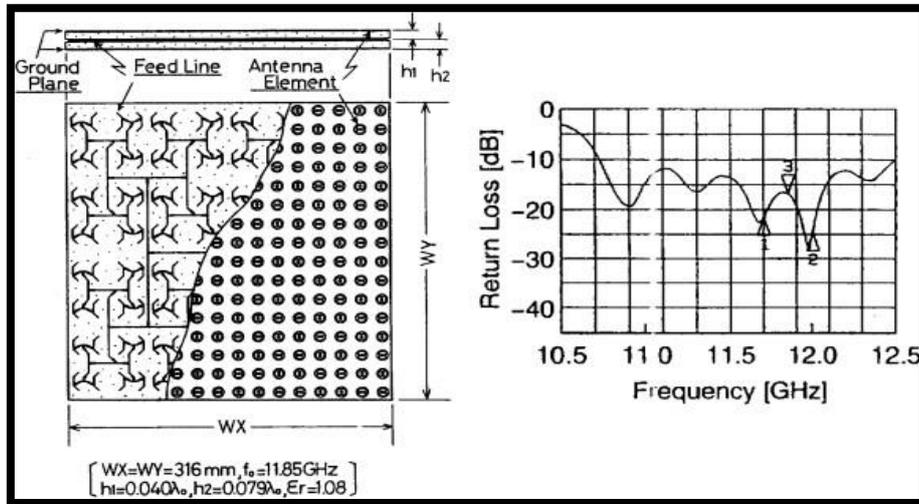


Figure 1.14 Antenne proposée par [9] et performances associées en réflexion

➤ En 1993, les japonais Takao Murata et Masaru Fujita ont développé un réseau d'antennes actives [10]. Le dépointage dans le plan azimutal peut atteindre 360°.

Dans cette section, le réseau de dimensions 15×22cm<sup>2</sup> est constitué de 216 éléments regroupés par cellules unitaires de 9 éléments de 13.4 dBi de gain. Chaque sous-réseau est alimenté par une arborescence micro ruban mixte série et parallèle.

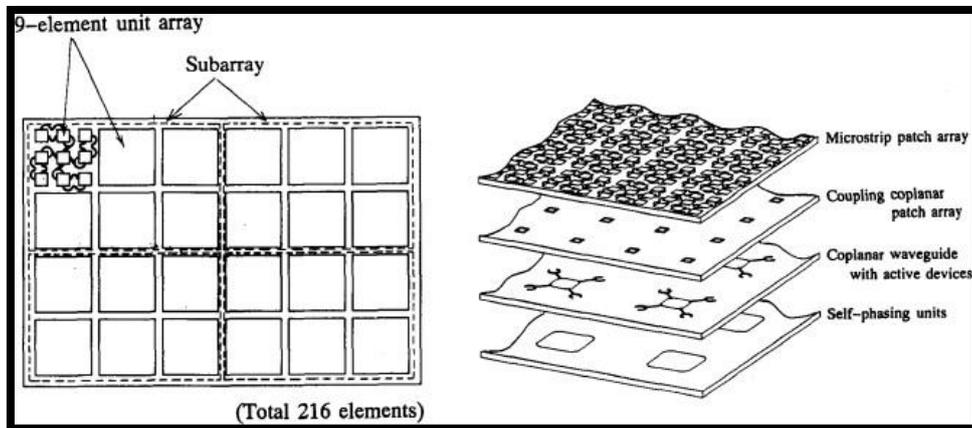


Figure 1.15 Antenne proposée par [10]

➤ En 1996, dans [11], les auteurs présentent une antenne plate d'émission/réception présentant des dimensions de 60×60cm<sup>2</sup>. Cette antenne fonctionne dans la bande [11.7–12.7GHz] et 14GHz en émission pour un gain pouvant atteindre 36.5 dBi.

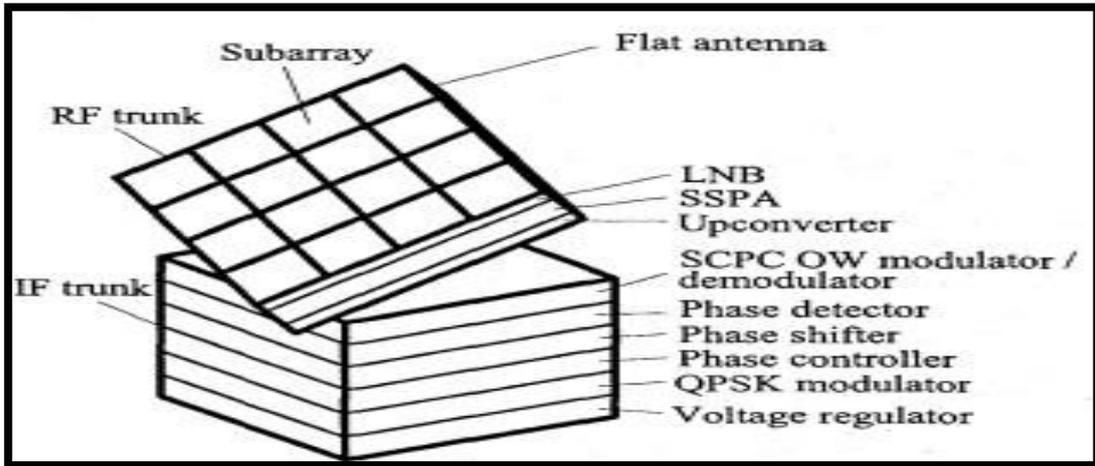


Figure 1.16 Antenne proposée par [10]

➤ L'antenne SkyGate, d'après [12], est une antenne à balayage électronique fonctionnant dans une bande de fréquence allant de 12.2 et 12.7GHz. Elle est conçue en technologie imprimée afin de réduire sa taille (42×45cm<sup>2</sup>). Cette antenne est constituée de 576 patches assurant une directivité mesurée de l'ordre de 33.5 dBi en fonction de l'angle de pointage couvrant ±15° sur le plan azimutal et environ 4° en élévation.

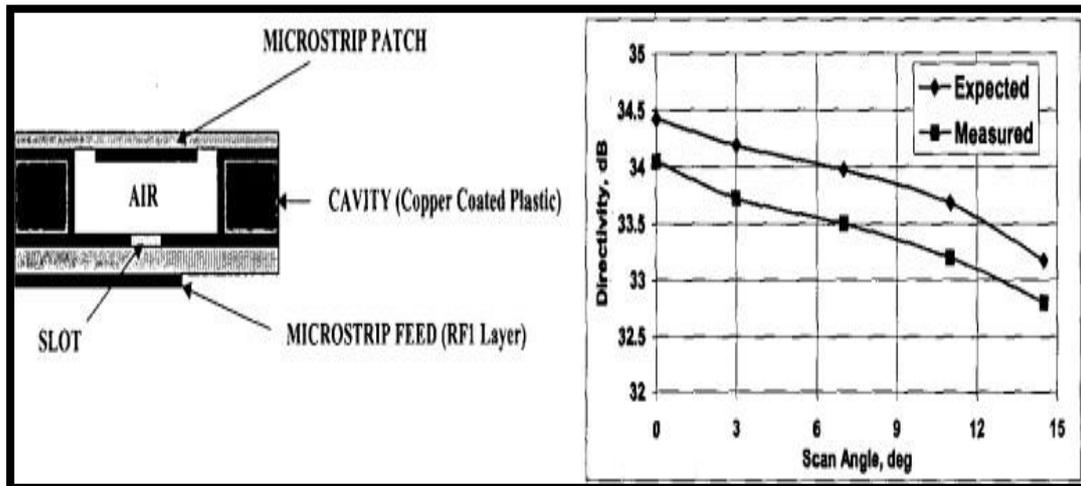


Figure 1.17 Patch élémentaire du réseau d'antennes proposé par [12] La directivité du réseau

➤ Une antenne réceptrice-émettrice mobile pour les communications multimédias en bande Ku pour les satellites géostationnaires coréens, KOREASAT-3 et JSAT 2A, est présentée dans [13]. Il s'agit de 14 sous-réseaux lacunaires linéaires dans une dimension d'éléments imprimés disposés en réseau non périodique dans l'autre dimension. L'angle d'élévation est ainsi assuré mécaniquement tandis que l'angle d'azimut est géré par l'adjonction de déphaseurs linéaires au niveau de chaque sous réseau.

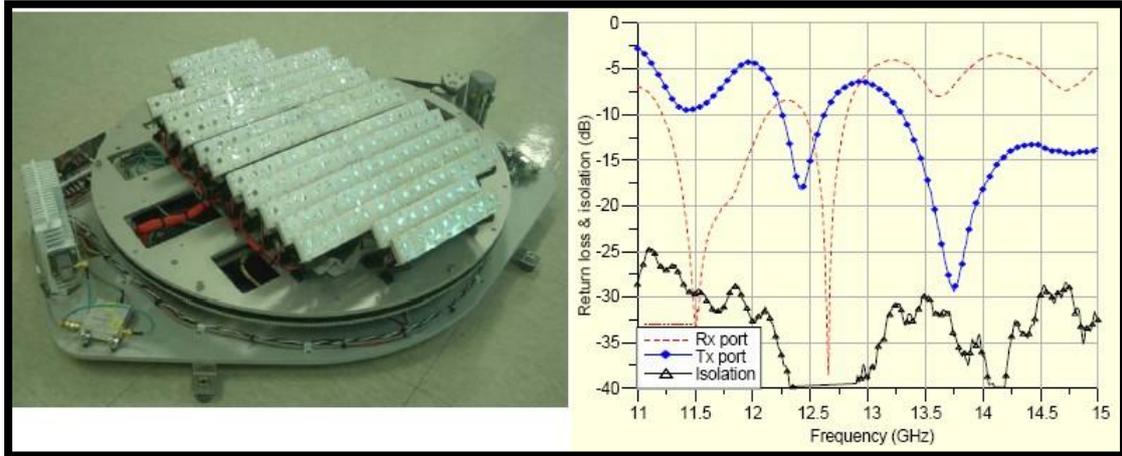


Figure 1.18 Antenne proposée par [13]

➤ Nouvelle technologie des types d'antenne proposée dans [14], publiée en 2006, présente un réseau d'antennes patchs fonctionnant dans la bande [10.7–12.75] GHz avec un système de pointage hybride où le balayage en azimut se fait mécaniquement alors que l'élévation est contrôlée par déphasage électronique. L'antenne aux dimensions  $75 \times 60 \text{ cm}^2$  permet d'atteindre un gain maximal de 21.4 dB pour une fréquence de 12.75 GHz. L'antenne de polarisation linéaire est ainsi constituée de 12 sous-réseaux de 24 éléments.

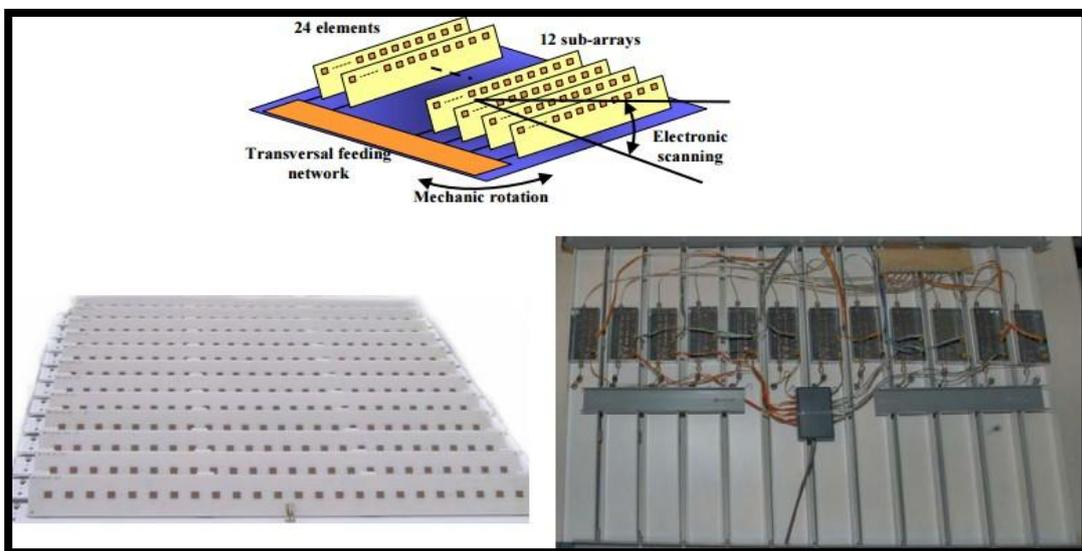


Figure 1.19 Antenne proposée par [14]

➤ Dans [15] en 2007, un réseau de  $16 \times 16$  patchs rectangulaires est proposé pour une taille inférieure à  $400 \text{ cm}^2$ . Cette antenne permet d'atteindre un gain de 22.25 dBi à 10.7 GHz et de 26.15 dBi à la fréquence 12.7 GHz. C'est une antenne plate convenable seulement pour la réception d'un seul satellite.

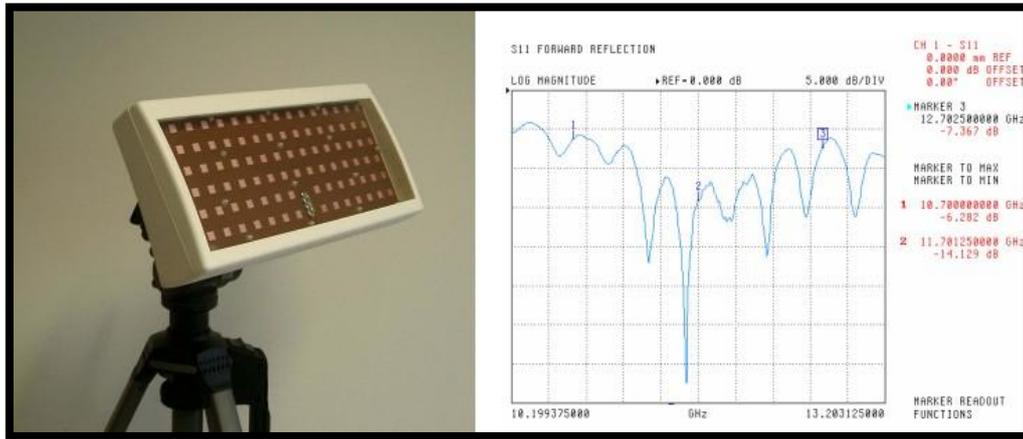


Figure 1.20 Antenne proposée par [15] et son coefficient de réflexion

➤ Un Antenne sous-réseau de 4×4 éléments est présentée dans [16], en 2009. L'élément rayonnant de base est un patch carré avec troncature alimenté par couplage au moyen d'une fente en "H". Une bande passante relative de 14% a ainsi été obtenue pour une fréquence centrale à 11.87 GHz. L'angle d'ouverture du lobe principal est de 18° et le premier lobe de réseau apparaît 14dB en dessous du lobe principal. Les auteurs proposent d'utiliser 16 cellules formées par ce sous-réseau pour pouvoir obtenir le gain plus élevé requis pour ce type d'application.

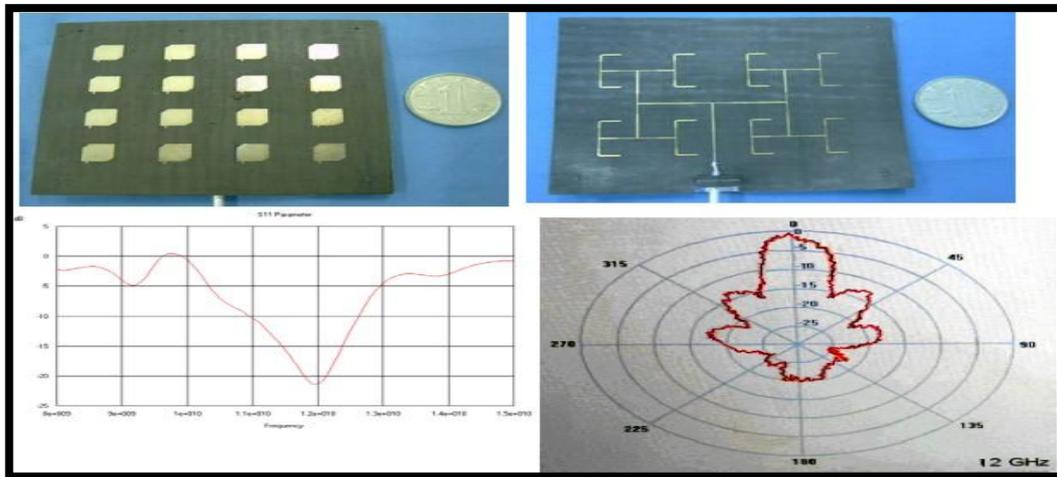
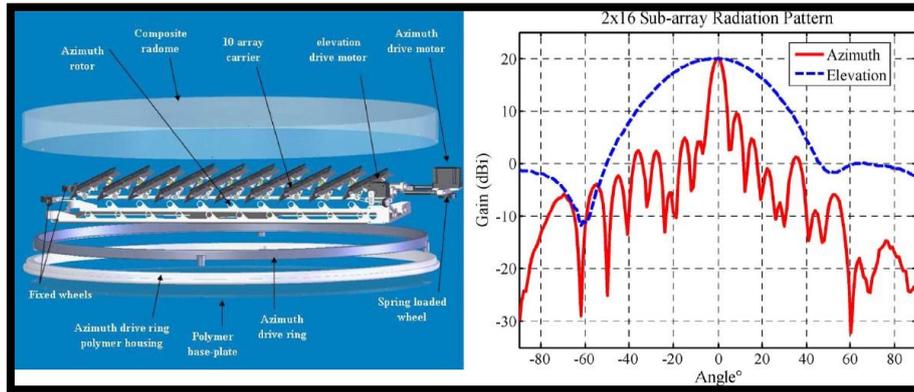


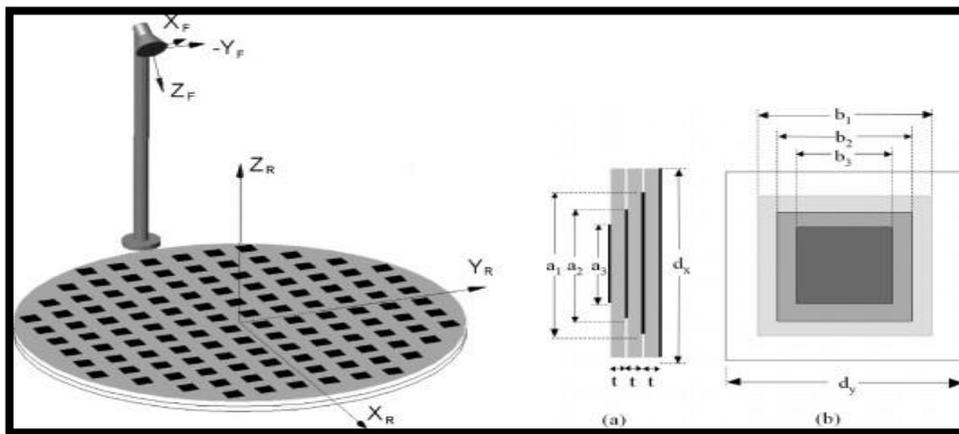
Figure 1.21 Prototype d'antenne proposée par [16], coefficient de réflexion et diagramme de rayonnement à 12 GHz

➤ La conception d'un réseau d'antennes à déphaseurs pour l'application Direct Broad casting Satellite(DBS) [17], dans la bande de fréquence de [12.2 – 12.7] GHz (en 2010). Les techniques et les configurations proposées permettent une réduction significative des dimensions de l'antenne. Le système de balayage est assuré par des mouvements mécaniques associés à un dépointage de faisceau de façon électronique.



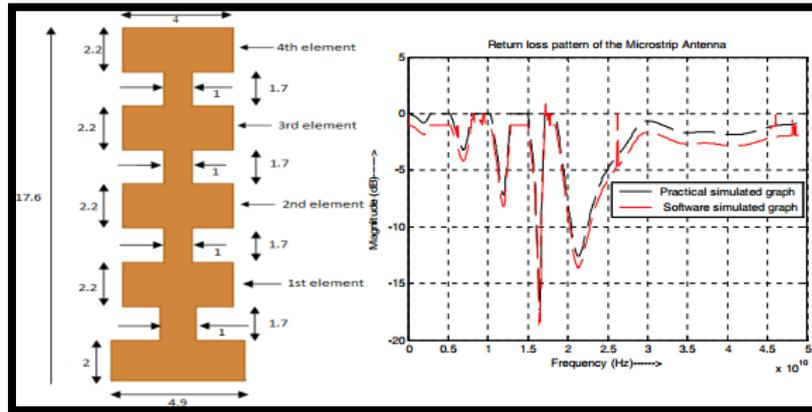
**Figure 1.22** Photo du prototype d'antenne proposé par [17] et son gain en élévation et en azimut

➤ Dans [18], les auteurs, en 2011, présentent une antenne réflecteur de 1.2 mètre d'émission/réception pour le broadcast satellite en bande Ku, en Amérique du sud. L'antenne proposée permet d'atteindre 28.82 dBi à la réception et 27.32 dBi à l'émission. La bande passante de ce réflecteur en transmission va de 11.4 à 12.8 GHz par contre l'émission se fait dans la bande de fréquence entre 13.7 et 14.5 GHz.



**Figure 1.23** Antenne proposée par [18] et la structure de son patch élémentaire

➤ D'autres type antenne multi bande (X, Ku et K) [19] Il s'agit d'un réseau d'antennes dont la capacité de réception des signaux multi bande repose sur l'utilisation d'un ensemble de patches superposés où chacun est calé sur une des bandes désirées.



**Figure 1.24** Antenne proposée par [19] et la structure de son patch élémentaire

Enfin, récemment (mars 2015), un accord a été signé entre le géant des satellites Intelsat et la compagnie PHASOR spécialisée dans la conception et la fabrication d'antennes à balayage électronique afin de proposer une antenne en bande Ku petite, discrète et autonome pour apporter plus de connectivité à bord des avions civils et gouvernement aux [5]. L'idée est alors de proposer plus de services (téléphonie, Internet, télévision) aux voyageurs sur les lignes longs et moyens courriers. La dynamique de recherche autour de cette problématique est donc bien actuelle et ouvre des perspectives très intéressantes.

## 1.8 Conclusion :

Ce chapitre avait comme objectif l'introduction de quelques notions élémentaires concernant les antennes, la liaison satellites ainsi caractéristique de cette liaison, par la suite nous avons présenté la route vers la nouvelle technologie des types antennes et nous avons cité différentes types des antennes du système de télécommunication par satellites.

Le chapitre suivant est donc consacré à la description des techniques de conception et de réalisation d'antennes.

---

# CHAPITRE 2

## Généralité sur les antennes

---

## **2.1 Introduction :**

Les premières antennes sont apparues à la fin du XIXe siècle, à une époque où les travaux sur l'électromagnétisme ont connu un développement considérable. Depuis, leur réalisation n'a cessé d'évoluer, d'abord, grâce aux progrès scientifiques de l'électromagnétisme, plus tard, sous la pression de nombreuses demandes technologiques dans des domaines d'application variés. L'essor actuel des communications impose des innovations importantes au niveau de la conception des systèmes et des antennes associées, dont les formes aujourd'hui très diverses varient beaucoup selon les utilisations : télécommunications mobiles, satellites, télévision, radio, identification, objets communicants, etc.

Dans ce chapitre, concernant les systèmes de communication entraîne des études poussées dans le domaine des antennes. En suite nous avons présenté les techniques de conception et de réalisation d'antennes, Ainsi comment une antenne rayonne, voyons d'abord comment le rayonnement se produit.

## **2.2 Les antennes :**

Les antennes sont des dispositifs utilisés pour rayonner le champ électromagnétique dans l'espace ou pour le capter. Comme nous le verrons dans ce chapitre, il existe de nombreux types d'antennes.

### **2.2.1 Fonctionnement d'une antenne :**

Le fonctionnement normal d'une antenne est d'émettre ou de recevoir le rayonnement à grande distance. Un grand nombre de paramètres permettent de classer les antennes tels que la directivité, le diagramme de rayonnement, la bande passante, la polarisation, etc. Alors la performance d'une antenne peut être évaluée à partir de ses paramètres qui sont présentées ci-dessous.

### **2.2.2 Techniques de réalisation d'antennes :**

Les techniques de conception et de réalisation d'antennes se sont affinées au fur et à mesure que le domaine de l'électromagnétisme s'est développé. C'est un domaine relativement récent, puisque c'est en s'appuyant sur les équations de Maxwell que tous les développements théoriques et techniques ont pu progresser. Les avancées dans ce domaine

ont été rapides car touchant aux transmissions radioélectriques dont le nombre d'applications est considérable.

## 2.3 Le rôle des antennes [20] :

Les antennes jouent un rôle très important sont :

### 2.3.1 Antenne d'émission :

Afin d'assurer la propagation dans l'air, il est nécessaire qu'un dispositif génère une onde rayonnée.

Le rôle de l'antenne d'émission est de transformer la puissance électromagnétique guidée, issue d'un générateur en une puissance rayonnée. Dans ce sens, c'est un transducteur.

### 2.3.2 Antenne de réception :

De façon inverse, la puissance rayonnée peut être captée par une antenne de réception. Dans ce sens, l'antenne apparaît comme un capteur et un transformateur de puissance rayonnée en puissance électromagnétique guidée. Elle joue le même rôle qu'un télescope qui capte la lumière issue des étoiles et la transforme.

### 2.3.3 Réciprocité :

Dans la plupart des cas, une antenne peut être utilisée en réception ou en émission avec les mêmes propriétés rayonnantes. On dit que son fonctionnement est réciproque. Ceci est une conséquence du théorème de réciprocité. Dans quelques cas exceptionnels pour lesquels les antennes comportent des matériaux non linéaires ou bien anisotropes, elles ne sont pas réciproques.

Du fait de la réciprocité des antennes, il ne sera pratiquement jamais fait de différence entre le rayonnement en émission ou en réception. Les qualités qui seront annoncées pour une antenne le seront dans les deux modes de fonctionnement, sans que cela soit précisé dans la plupart des cas.

## 2.4 Rayonnement d'une antenne :

Le rayonnement d'une antenne peut être expliqué comme montré la (**Figure 2.1**) qui présente une source de tension connecté à une ligne de transmission à deux conducteurs. Quand une tension sinusoïdale est appliquée à travers la ligne de transmission, un champ électrique est créé qui est sinusoïdal dans la nature et il en résulte la création de lignes de

force électriques qui sont tangentielle du champ électrique. L'amplitude du champ électrique est indiquée par la concentration des lignes de force électriques.

Les électrons libres sur les conducteurs sont déplacées par les lignes électriques de force et le mouvement de ces charges provoque la circulation du courant qui à son tour conduit à la création d'un champ magnétique.

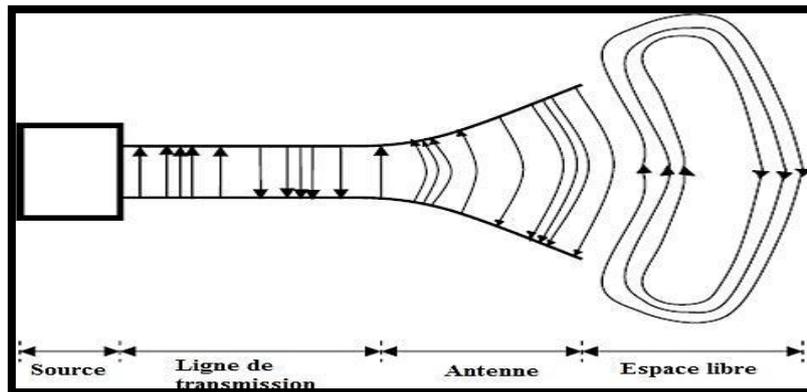


Figure 2.1 Rayonnement d'une antenne

### 2.4.1 Rayonnement électromagnétique :

Les champs dans la proximité de l'antenne sont extrêmement complexes à analyser. (La Figure 2.2) montre un exemple des lignes de champ produites par une antenne demi-onde [21,22, 23].

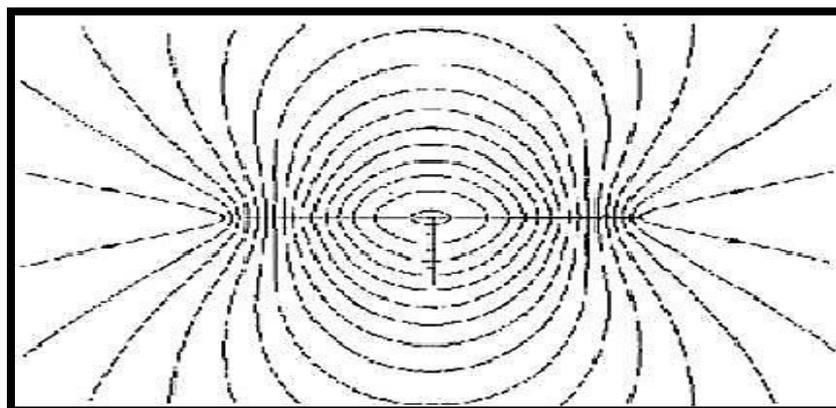


Figure 2.2 Lignes de champs produites par une antenne demi-onde

$D_{es}$  est le diamètre de la surface équivalente de l'antenne et  $r$  la distance à l'antenne. Les physiciens ont défini plusieurs zones autour de l'antenne.

## 2.4.2 La densité de puissance rayonnée par l'antenne :

### 2.4.2.1 Zone de Rayleigh :

Dans cette zone de champ proche (ou zone de Rayleigh), il y a échange d'énergie réactive entre l'antenne et le milieu extérieur. A courte distance (par rapport à la longueur d'onde) pour  $r < Dse^2/2\lambda$ , la densité de puissance est quasi constante (tube d'énergie).

Les champs varient peu en fonction de la distance mais ils sont très complexes à analyser.

### 2.4.2.2 Zone de Fresnel :

Elle se situe entre les deux extrêmes. Ici les champs varient avec de fortes oscillations. Dans cette zone  $Dse^2/2\lambda < r < 2 Dse^2/\lambda$  : la densité de puissance est fluctuante.

### 2.4.2.3 Zone de Fraunhofer :

Dans la zone du champ lointain (ou de Fraunhofer), à grande distance par rapport à la longueur d'onde, les champs sont rayonnés sous la forme d'une onde quasiment plane. Dans cette zone,  $r > 2 Dse^2/\lambda$ , la densité de puissance décroît en  $1/r$ .

Quel que soit le type d'antenne, on obtient invariablement des champs dont les expressions mathématiques indiquent des variations en  $1/r$ ,  $1/r^2$  et  $1/r^3$ . On interprète ces variations des champs selon la distance comme ceci :

- les termes en  $1/r$  correspondent au rayonnement.
- les termes en  $1/r^2$  de E sont reliés à l'induction.
- les termes en  $1/r^3$  de E et en  $1/r^2$  de H proviennent de l'électrostatique.

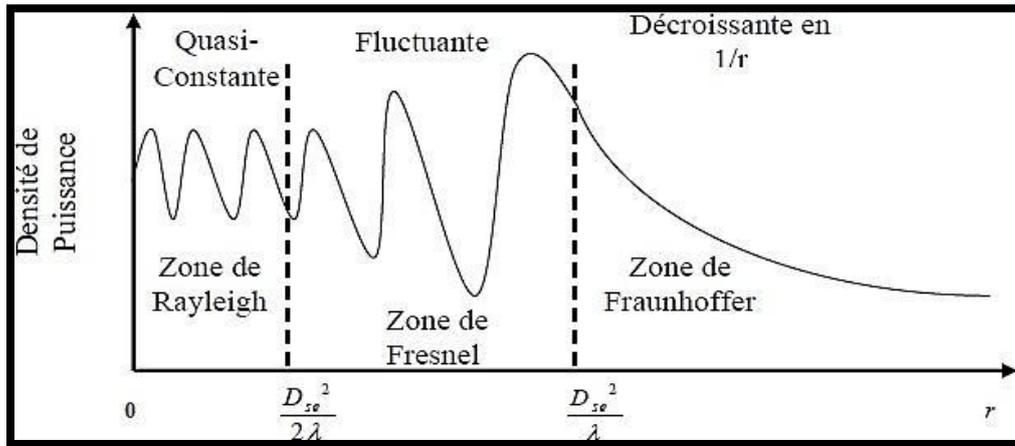


Figure 2.3 La densité de puissance rayonnée par l'antenne

Donc l'espace environnant d'une antenne est divisé en trois parties qui sont présentés dans la (Figure 2.4) :

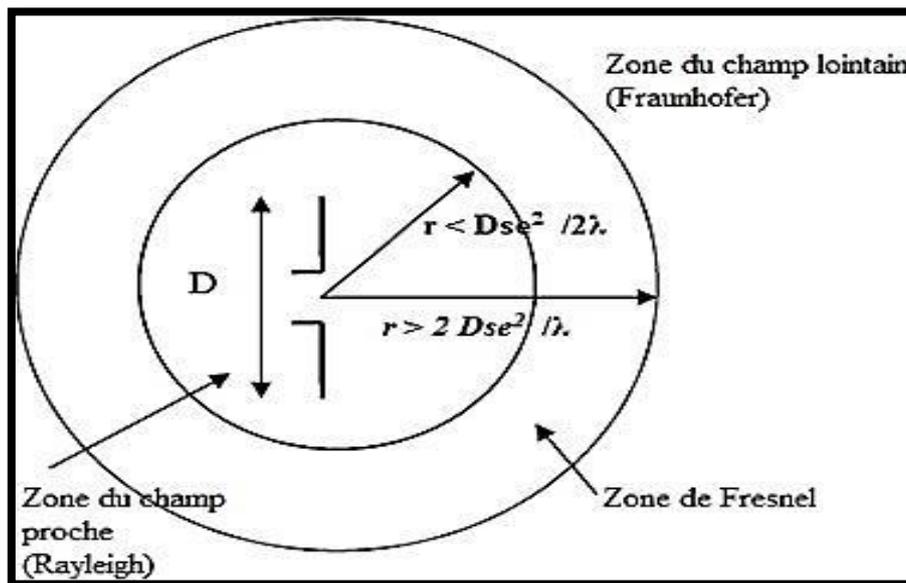


Figure 2.4 Limite des 3 zones de rayonnement

### 2.5 Les caractéristiques de l'antenne :

Les caractéristiques des antennes sont utilisées pour le dimensionnement des systèmes d'émission réception. Ces derniers sont essentiellement liés à la forme du rayonnement dans l'espace.

### 2.5.1 Diagramme de rayonnement [23] :

La représentation graphique de la fonction caractéristique de l'antenne porte le nom de « diagramme de rayonnement ». C'est une représentation du rayonnement en 2-D ou 3-D de la puissance, du gain ou du champ électrique rayonné à grande distance qui est en fonction de  $\theta$  (angle de Site : plan vertical) et  $\varphi$  (angle d'Azimut : plan horizontal).

Classiquement, on a pris l'habitude de représenter le diagramme de rayonnement dans deux plans perpendiculaires qui sont : le plan E et le plan H. Le plan E (plan vertical) est défini comme le plan contenant l'axe de l'antenne et le champ électrique. Le plan H (plan Horizontal) est défini comme le plan contenant l'axe de l'antenne et le champ magnétique.

C'est un diagramme qui représente les variations de la puissance que rayonne l'antenne par unité d'angle solide dans les différentes directions de l'espace.

Prenons le cas d'une antenne isotrope, c'est à dire rayonnant de la même façon dans toutes les directions, soit  $P$  la puissance totale rayonnée par l'antenne isotrope, la puissance rayonnée par unité de surface à la distance  $r$ , ou la densité de puissance  $S$  à cette distance dans n'importe quelle direction est donnée par :

$$S = \frac{P}{\text{area}} = \frac{P}{4\pi r^2} \quad (2.1)$$

Alors l'intensité de rayonnement de l'antenne isotrope  $U_i$  peut être écrite comme :

$$U_i = \frac{P}{4\pi} = r^2 S \quad (2.2)$$

L'antenne isotrope n'existe pas et n'est pas réalisable. En réalité, l'énergie rayonnée par une antenne est répartie inégalement dans l'espace, certaines directions sont privilégiées : ce sont les lobes de rayonnement.

Un type plus pratique est l'antenne directionnelle qui rayonne plus de puissance dans certaines directions et moins de puissance dans d'autres directions. Un cas particulier de l'antenne directionnelle est l'antenne omnidirectionnelle, dont le diagramme de rayonnement peut être constant dans un seul plan (plan E), et varie dans le plan orthogonal (horizontal) (plan H). Le diagramme de rayonnement de l'antenne directive est montré dans la (**Figure 2.5**) ci-dessous :

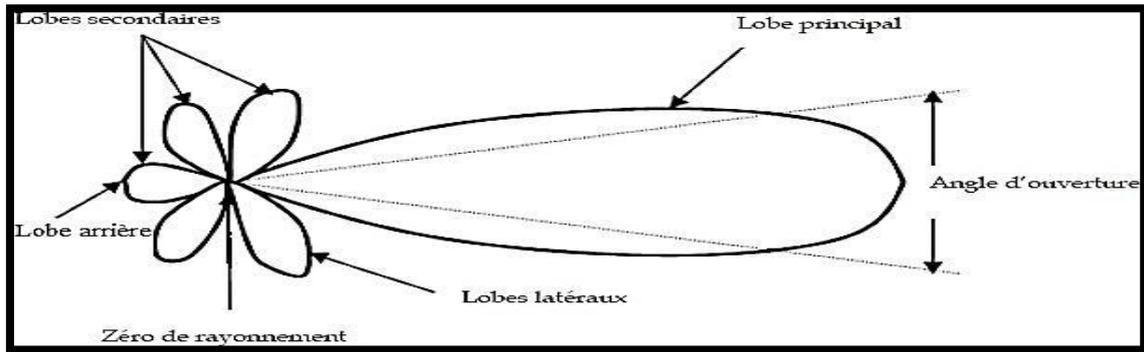


Figure 2.5 Diagramme de rayonnement classique d'une antenne directive

### 2.5.1.1 Un lobe principal:

C'est le lobe de rayonnement contenant le maximum d'énergie et la direction du maximum de rayonnement.

### 2.5.1.2 Un angle d'ouverture:

L'angle d'ouverture d'une antenne est l'angle de direction pour lequel la puissance rayonnée est la moitié de la puissance rayonnée dans la direction la plus favorable. Il est donc représentatif de la directivité de l'antenne. Plus cet angle est étroit plus l'antenne est directive.

### 2.5.1.3 Des lobes secondaires:

Tous les autres lobes sont appelés lobes secondaires. Ils représentent le rayonnement de l'antenne dans les directions indésirables. Le niveau du lobe secondaire est en général exprimé sous forme de rapport entre la densité de puissance dans le lobe en question et celle du lobe principal. Ce rapport est appelé le niveau des lobes secondaires et il est exprimé en dB.

### 2.5.1.4 Un lobe arrière (rayonnement arrière):

C'est le lobe secondaire présent dans la direction opposée à  $180^\circ$  du lobe principal. Le rapport avant/arrière est le rapport en dB de la puissance rayonnée dans la direction du maximum de rayonnement par rapport à celle rayonnée dans la direction opposée. Dans la plupart des systèmes antennaires, les lobes secondaires sont indésirables. Une bonne conception d'antenne doit permettre de minimiser les lobes secondaires.

### 2.5.2 Directivité :

La directivité d'une antenne caractérise la manière dont cette antenne concentre son rayonnement dans certaines directions de l'espace. La directivité est définie comme [24] : le quotient de l'intensité de rayonnement dans une direction de l'antenne par la valeur moyenne de cette intensité de rayonnement pour toutes les directions de l'espace.

Une antenne isotrope rayonne uniformément la même densité de puissance quelque soit la direction.

$$D = \frac{U}{U_i} = \frac{4\pi U}{P} \quad (2.3)$$

Ou :

$D$  : est la directivité de l'antenne.

$U$  : est l'intensité de rayonnement de l'antenne.

$U_i$  : est l'intensité de rayonnement d'une source isotrope.

$P$  : est la puissance totale rayonnée.

Parfois, la direction de la directivité n'est pas spécifiée. Dans ce cas, la direction de l'intensité de rayonnement maximale est implicite et la directivité maximale est donnée par:[24]

$$D_{max} = \frac{U_{max}}{U_i} \quad (2.4)$$

Ou :

$D_{max}$  : est la directivité maximale.

$U_{max}$  : est l'intensité de rayonnement maximal.

### 2.5.3 Impédance d'entrée :

Pour évaluer l'impédance d'une antenne, on assume une antenne en émission. L'antenne est alors considérée comme une charge à l'entrée de laquelle existent un courant  $I_{in}$  et une tension  $V_{in}$ . Le rapport [23] de ces deux quantités fournit l'impédance  $Z_{in}$  (ou mieux encore,  $Z_a$ ).

$$Z_a = \frac{V_{in}}{I_{in}} = R_a + jX_a \quad (2.5)$$

On considère simplement l'antenne comme un circuit électrique ayant cette même

impédance lors des calculs de transfert de puissance.

Cela semble facile mais l'impédance que présentent les antennes est une fonction complexe et ce même pour les structures les plus simples. Comme toute impédance, celle de l'antenne comprend une partie réelle  $R_a$  (active) et une partie imaginaire  $X_a$  (réactive) telle que:

- La partie réactive (réactance) : est due aux champs d'induction au voisinage de l'antenne ; elle est capacitive pour les antennes électriquement courtes (un peu comme l'impédance vue près d'un circuit ouvert en régime sinusoïdale permanent) autrement, elle est inductive ou capacitive. Autrement dit elle est liée à la puissance réactive stockée au voisinage de l'antenne.
- La partie active est reliée aux champs (ou puissance) rayonnés et a puissance perdue par effet de joules, elle est constituée de deux composantes, une résistance de rayonnement  $R_r$  et une résistance de perte  $R_L$ .

La puissance associée à la résistance  $R_r$  est la responsable du rayonnement de l'antenne, tandis que la puissance dissipée par la résistance de perte  $R_L$  est perdu en chaleur dans l'antenne.

#### 2.5.4 Adaptation :

Pour qu'une antenne fonctionne efficacement, le transfert maximum de puissance doit être entre l'émetteur et l'antenne. Ce transfert ne s'effectue pas que s'il y'a adaptation entre l'impédance de l'antenne ( $Z_{in}$ ) et celle de l'émetteur ( $Z_s$ ). Selon le théorème de transfert de puissance maximale, cette dernière peut être transféré que si l'impédance de l'émetteur est un conjugué complexe de l'impédance de l'antenne et vice-versa.

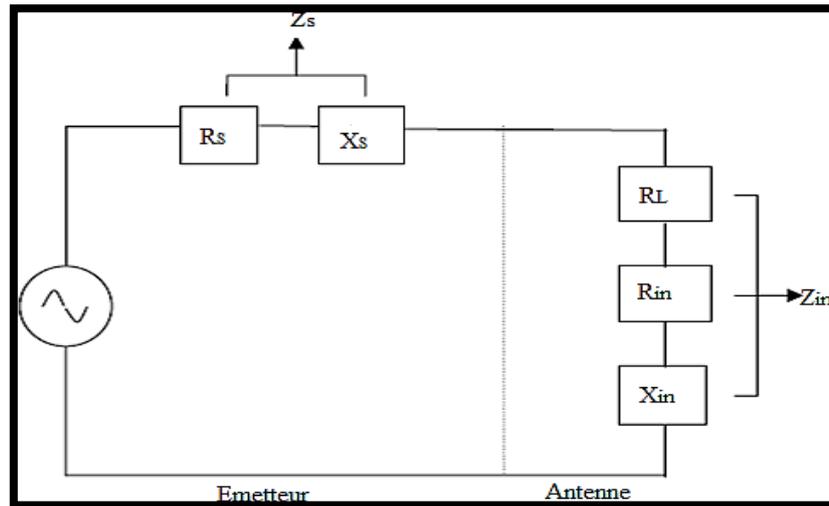


Figure 2.6 Circuit équivalent d’antenne d’émission

Ainsi, la condition pour la correspondance est la suivante :

$$Z_{in} = Z^*_{s} \quad (2.6)$$

Ou :

$$Z_{in} = R_{in} + jX_{in} \quad (2.7)$$

Comme montré dans la Figure (2.6).

Si cette condition n'est pas satisfaite, et une partie de la puissance est réfléchie, cela conduit à la création d'ondes stationnaires, qui peut être caractérisé par un paramètre appelé le rapport d'ondes stationnaires de tension (Voltage Standing Wave Ratio : VSWR).

Le VSWR est donné par Makarov [25] par:

$$VSWR = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} \quad (2.8)$$

Ou :

$\Gamma$  : est appelé le coefficient de réflexion.

$V_r$ : est l’amplitude d’onde réfléchie.

$V_i$ : est l’amplitude d’onde incidente.

Le VSWR est essentiellement une mesure de la différence d'impédance entre l'émetteur et l'antenne. Plus le VSWR est grand plus la différence d'impédance est grande.

Le VSWR minimale correspond à une adaptation parfaite. Une conception pratique de l'antenne doit avoir une impédance d'entrée égale à 50  $\Omega$  ou 75  $\Omega$ , la plupart des équipements radio sont construit pour cette impédance.

### 2.5.5 Coefficient de réflexion :

Le coefficient de réflexion (Return Loss : RL) est un paramètre qui indique la quantité d'énergie perdu 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 que par [25] que:

$$RL = -20 \log[\Gamma] \quad (2.9)$$

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.

### 2.5.6 Rendement :

Le rendement est le rapport entre l'énergie rayonnée par une antenne et celle que lui fournit l'alimentation. Elle est exprimée par:

$$\eta = \frac{R_r}{R_r + R_p} \quad (2.10)$$

Ou :

$R_r$  : Résistance liée à son rayonnement.

$R_p$  : Résistance liée aux pertes de l'antenne

### 2.5.7 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  $\vec{E}$ . Si  $\vec{E}$  garde une direction constante dans le temps, on dit que l'on a une polarisation rectiligne voir (**la Figure 2.7**). Si la direction varie avec le temps

de telle sorte que si, en un point donné, on schématise les positions successives de  $\vec{E}$ , l'extrémité du vecteur représentatif décrit un cercle ou une ellipse. On dit alors que le champ rayonné est à polarisation circulaire ou elliptique.

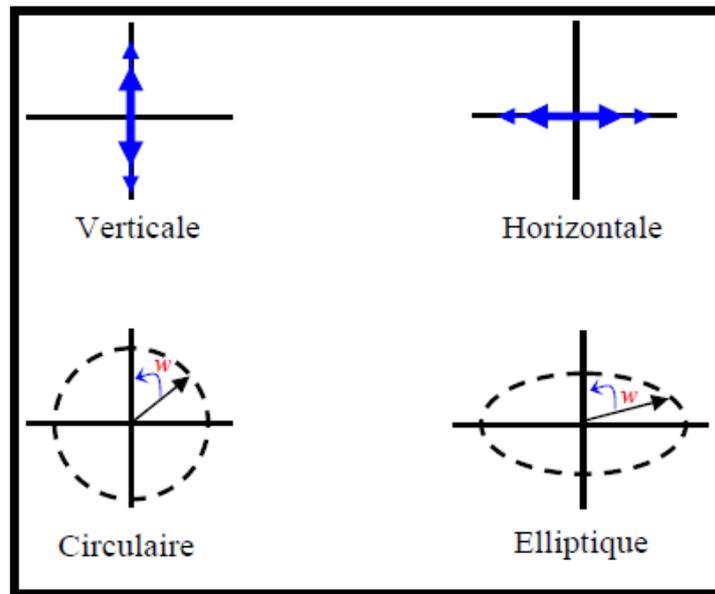


Figure 2.7 Polarisation du champ électromagnétique

### 2.5.8 Gain:

Le gain n'est pas une quantité qui peut être définie en termes de quantité physique tel que le Watt ou l'Ohm, c'est plutôt un rapport sans dimensions.

Le gain d'une antenne dans une direction donnée [26] est « la quantité d'énergie rayonnée dans cette direction comparée à l'énergie qu'une antenne isotrope rayonnerait dans la même direction avec la même puissance d'entrée ». Habituellement nous sommes uniquement intéressés par le gain maximum, qui est le gain dans la direction dans laquelle l'antenne rayonne la majeure partie de la puissance.

Le rapport de gain est donné par :

$$G(\Theta, \phi) = \eta D(\Theta, \phi) \quad (2.11)$$

### 2.5.9 Bande passante (BP) :

La largeur de bande, appelée aussi bande passante, d'une antenne définit le domaine de fréquences dans lequel le rayonnement de l'antenne présente les caractéristiques requises. Elle peut être considérée comme la plage de fréquences qui se situent de part et d'autres d'une

fréquence centrale et ou les caractéristiques de l'antenne (Impédance d'entrée, diagramme de rayonnement, angle d'ouverture, polarisation, niveau du lobe mineur, gain, direction du faisceau) sont acceptables par rapport à celles obtenues avec la fréquence centrale (fréquence de référence).

La valeur des limites sur les critères de fonctionnement de l'antenne définit un domaine de fréquences situé entre une valeur minimale  $f_{min}$  et une valeur maximale  $f_{max}$ . La bande passante [23] est donnée par :

$$BP_{LB} = \frac{f_{max}}{f_{min}} \quad (2.12)$$

$$BP_{BE}(\%) = \left[ \frac{f_{max} - f_{min}}{f_c} \right] 100 \quad (2.13)$$

Ou :

$f_{max}$ : la fréquence maximale.

$f_{min}$ : la fréquence minimale.

$f_c$ : la fréquence centrale.

Une antenne est dite à large bande si  $f_{max}/f_{min} = 2$ . Une méthode pour juger l'efficacité de l'antenne qui fonctionne sur toute la gamme de fréquence est la mesure du VSWR. Un  $VSWR < 2$  (RL > -9,5 dB) assure une bonne performance.

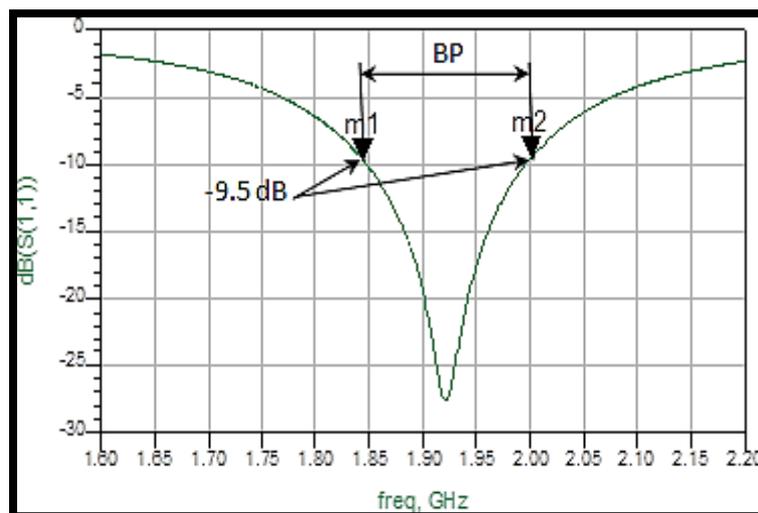


Figure 2.8 Mesure de la bande passante à partir du tracé de coefficient de réflexion

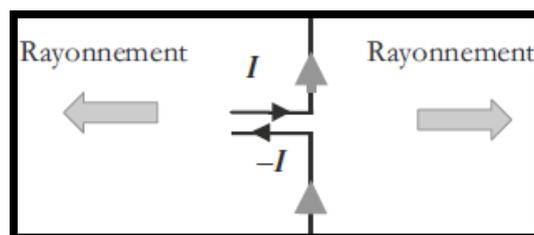
## 2.6 Les différents types d'antenne :

Afin de comprendre comment s'effectue cette transformation entre la puissance guidée et la puissance rayonnée, nous allons présenter un certain nombre d'antennes. Elles sont classées ici selon un ordre qui suit approximativement leur chronologie d'apparition. Il n'est pas question dans ce paragraphe de présenter tous les types d'antennes, mais d'en introduire certains des plus utilisés.

### 2.6.1 Antenne dipolaire :

L'antenne dipolaire est constituée de deux fils alignés, très courts et reliés chacun à deux fils parallèles et très proches constituant une ligne bifilaire (**Figure 2.9**). En émission, cette ligne est reliée à un générateur alternatif, caractérisé par sa fréquence et son impédance interne. À la réception, la ligne bifilaire est branchée sur un récepteur.

Dans la ligne bifilaire, les courants sont de sens contraire, alors que dans le dipôle les courants sont dans le même sens. L'influence de ces deux courants s'annule dans la ligne bifilaire. Ce sont les courants variables, de même sens, qui rayonnent et créent l'onde électromagnétique dans l'espace. Étant donnée la symétrie du dipôle, le rayonnement s'effectue autour de l'axe, matérialisé par le fil. Il est isotrope dans un plan perpendiculaire à cet axe. Le rayonnement est nul dans la direction du fil. On ne peut donc pas parler d'un rayonnement isotrope.



**Figure 2.9** Antenne dipolaire

À l'extrémité de chaque fil apparaissent des charges de signes opposées dont l'existence s'explique par la conservation de la charge. En effet, la relation de conservation suivante lie les charges au courant :

$$I = \frac{dq}{dt} \quad (2.14)$$

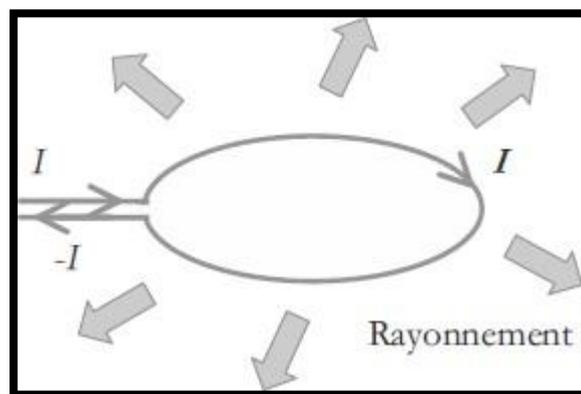
D'autres antennes de même type sont obtenues avec des fils rayonnants plus longs. Ces antennes de type filaires ont de nombreuses applications. Citons rapidement les antennes pour récepteurs radio, les antennes des talkies walkies, etc.

### 2.6.2 Antenne à boucle magnétique :

La boucle magnétique est constituée d'un fil conducteur ayant une forme qui permet le retour du fil sur lui-même (**Figure 2.10**). La boucle est ainsi branchée sur une ligne bifilaire reliée au générateur.

Le rayonnement, à grande distance, est maximal dans le plan de la boucle et s'effectue de façon radiale. Le courant circulant dans le fil crée un champ magnétique qui se propage. Sa variation engendre le champ électrique associé, d'où le rayonnement électromagnétique associé.

En champ lointain, les boucles magnétiques ont été très utilisées pour les récepteurs de grandes ondes radio sous forme d'un cadre sur lequel étaient enroulées plusieurs spires de fil. En champ proche, on les utilise dans tous les dispositifs RFID (identification radio fréquence). Les cartes à puce sans contact sont munies de ce type d'antenne, incluse dans le support plastique. Les détecteurs d'objets métalliques sont aussi des boucles magnétiques sensibles au champ magnétique.



**Figure 2.10** Boucle magnétique

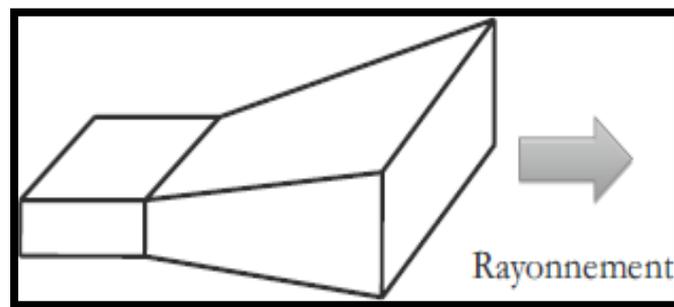
### 2.6.3 Antenne cornet :

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 son utilisation est très répandue en hyperfréquences. Le transformateur de puissance électromagnétique guidée en puissance rayonnée est l'antenne cornet (**Figure 2.11**). 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. C'est le même principe que le cornet acoustique.

Les transitions présentent des formes variées : linéaires, exponentielles .etc

Le cornet sert de dispositif d'adaptation entre l'impédance du cornet et celle du vide. 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.

Le guide d'onde est un dispositif hyperfréquence très utilisé du fait des pertes très faibles engendrées par la propagation dans celui-ci, même à hautes fréquences et de sa capacité à supporter de la puissance. Les antennes cornets qui lui sont associées sont donc aussi très utilisées comme moyen de transformation de l'onde guidée en onde rayonnée. On les retrouve, dans toutes les bandes de fréquences, dans de nombreux systèmes tels que les radars, les antennes satellites .etc



**Figure2.11** Antenne cornet

#### **2.6.4 Antenne à réflecteur parabolique :**

L'antenne à réflecteur est constituée de la source d'émission associée à une partie métallique réfléchissante, souvent de forme parabolique (**Figure 2.12**)

La source, placée au foyer de la parabole envoie l'onde vers le réflecteur parabolique. Selon la propriété bien connue de la parabole, tous les rayons sont réfléchis parallèlement. Ce type d'antenne est utilisé pour viser dans une direction très précise, puisque tous les rayons passant par le foyer sortent parallèles. Par décalage de la source dans le plan focal, les rayons parallèles à la sortie du réflecteur, peuvent présenter une inclinaison par rapport à l'axe de la parabole.

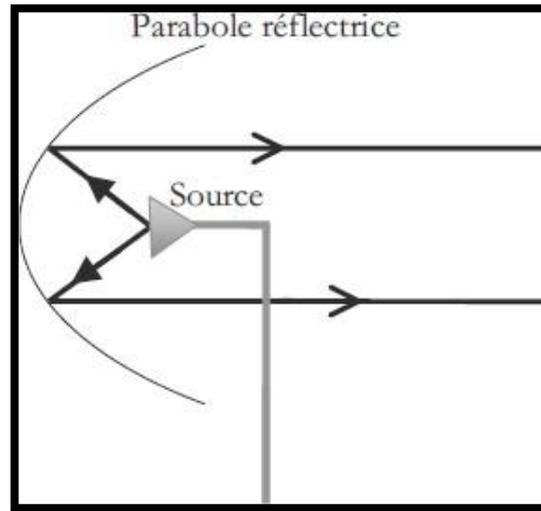


Figure 2.12 Antenne à réflecteur parabolique

### 2.6.5 Antennes de type Cassegrain :

Une variante des antennes précédentes consiste à utiliser un réflecteur principal et un réflecteur secondaire, comme dans le montage Cassegrain (**Figure 2.13**).

Ce nom provient du télescope du même nom reposant sur le même principe.

Les rayons issus de la source se réfléchissent sur un premier réflecteur de forme hyperbolique, puis sur le réflecteur principal de forme parabolique. Les rayons ressortent parallèlement. La propriété de l'antenne parabolique est ainsi conservée. L'intérêt de ce type d'antenne est d'être moins sensible aux parasites provenant de l'extérieur de la parabole. De plus, les câbles reliant la source à l'électronique sont plus courts que dans les systèmes d'alimentation d'une antenne parabolique. La qualité du signal s'en trouve améliorée.

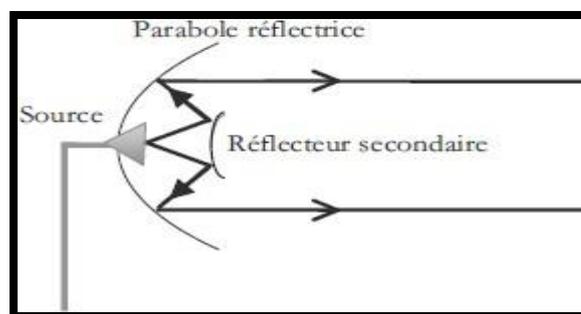


Figure 2.13 Antenne Cassegrain

### 2.6.6 Antennes patch imprimées :

Une antenne à éléments rayonnants imprimés voire (**Figure2.14**), communément appelée antenne patch est une ligne micro-ruban (micro strip) de forme particulière. Elle effectue ainsi deux fonctions fondamentales qui définissent le principe d'antenne de manière générale, il s'agit bien du rayonnement (émission) et de la réception d'une onde électromagnétique. Elle se compose de trois parties :

- Le plan de masse (ground plane) :

Est une surface conductrice (cuivre) recouvrant la partie inférieure du substrat. Elle permet de faire rayonner la partie supérieure.

- Un substrat diélectrique (diélectrique substrat) :

Composé d'un matériau isolant, d'épaisseur généralement faible devant la longueur d'onde et de permittivité relative ( $2,2 < \epsilon_r < 12$ ). Il est utilisé pour augmenter la puissance rayonnée par l'antenne et réduire les pertes par effet de joule et améliorer la bande passante de l'antenne. Parfois, il est préférable d'utiliser des substrats diélectriques d'épaisseur importante et de faible permittivité pour avoir une grande efficacité et une large bande passante.

- L'élément rayonnant (patch) :

Est une partie métallique de forme et de taille à définir selon l'application, à géométrie variable (circulaire, rectangulaire, triangulaire ...etc.). Il doit être relié au reste du circuit par une ligne de transmission qui doit être adaptée d'impédance à l'antenne et au reste du circuit afin d'éviter le phénomène de réflexion. Dans la pratique, le rectangle et le disque représentent les formes de l'élément rayonnant les plus utilisées. Il est constitué d'une partie conductrice qui va rayonner. La forme et les dimensions conditionnent la fréquence de fonctionnement de l'antenne. [27]

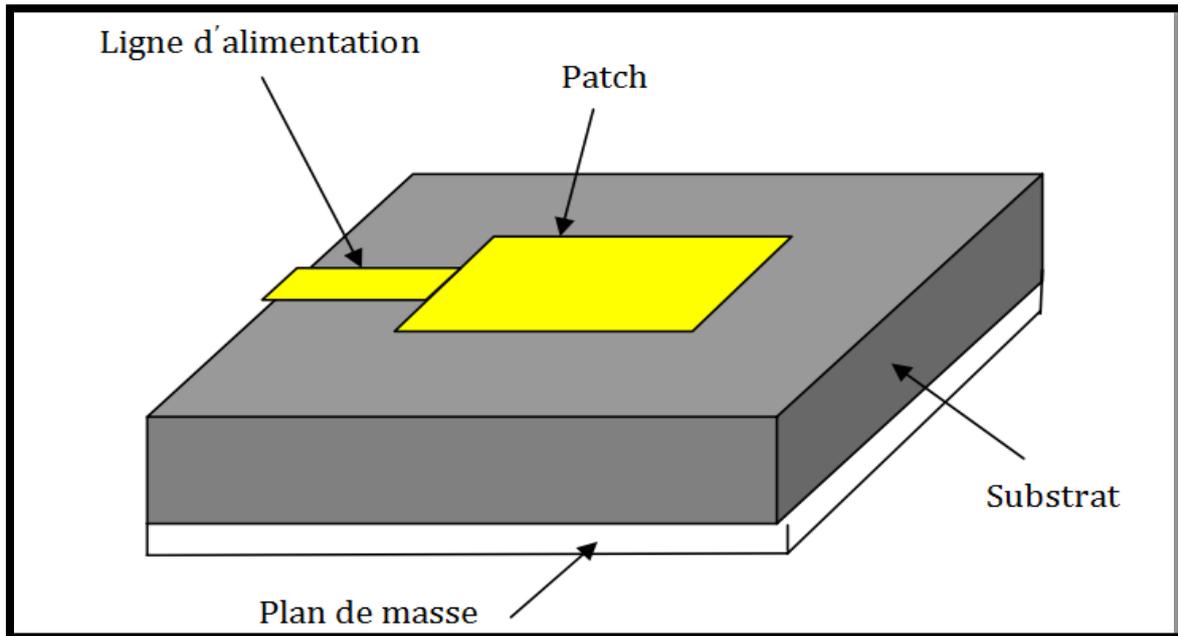


Figure 2.14 Description d'une antenne imprimée

**2.6.6.1 Les différentes formes du patch :**

En pratique, L'élément rayonnant peut prendre plusieurs formes, Les formes les plus utilisées sont montrées dans la figure ci-dessous (Figure 2.15).

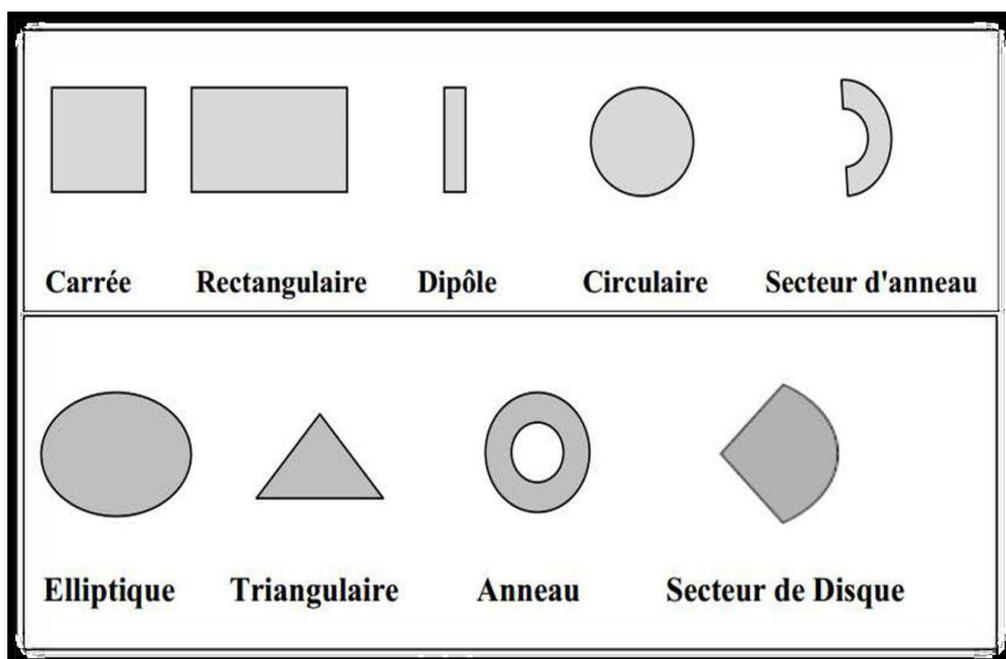


Figure 2.15 Différentes formes du patch

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

### 2.6.6.2 Avantages et inconvénients des antennes patches :

- Faible poids et volume réduit, encombrement réduit donc possibilité d'être intégrées dans des systèmes mobiles.
- Faible cout de fabrication et possibilité de production en masse.
- Possibilité d'avoir une polarisation diversité (circulaire et linéaire).
- Possibilité de fabriquer des antennes multi-bandes et multi polarisation.
- Profil plat et compatible avec les circuits hybrides et MMIC (Microwave Monolithic Integrated circuit).
- L'alimentation et l'adaptation et fabriquer simultanément avec l'antenne.

Cela dit, les antennes à micro-ruban ne sont pas non plus une panacée, car elles ne sont pas sans inconvénients, et parmi ces inconvénients, on peut citer:

- Bande passante étroite souvent associée avec le problème de tolérance géométrique et physique.
- Rayonnement parasite du réseau d'alimentation.
- Circuit d'alimentation parfois très complexe, difficile à réaliser.

Donc la conception de ce type d'antenne doit répondre aux compromis entre les performances attendues et la conception de réalisation.

### 2.6.6.3 Les applications des antennes patches:

Vu l'explosion technologique dans la télécommunication et les recherches scientifiques continues concernant les antennes imprimés, et vu les exigences multiples dans le domaine de communication, l'utilisation des antennes micro-ondes classiques devient incapable de répondre à ces exigences. Pour cette raison, les antennes microbandes remplacent les antennes classiques dans la plupart des applications [28], [29]. Parmi ces applications on cite:

- Les télécommunications par satellites.
- La commande et contrôle.
- La télémessure par missile.

- Les équipements portatifs.
- Les éléments d'alimentation dans les antennes complexes.
- Les antennes d'émission utilisées en médecine.
- Les récepteurs satellite de navigation.

### 2.6.6.4 Différents paramètres de l'antenne :

#### a. Largeur de l'antenne patch :

La largeur de l'antenne patch (W) est donnée par l'équation suivante :

$$W = \frac{c}{2f_r \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}}} \quad (2.15)$$

Avec:

C : la vitesse de la lumière (C= 3.10<sup>8</sup> m/s)

$\epsilon_r$  : la constante diélectrique

$f_r$  : la fréquence de résonance

#### b. Le constant diélectrique effectif :

Le constant diélectrique effectif ( $\epsilon_{reff}$ ) est donnée par l'équation suivante :

$$\epsilon_{reff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[ 1 + 12 \frac{h}{W} \right]^{-1/2} \quad (2.16)$$

Avec :

h: la hauteur de substrat

#### c. La longueur effective :

La longueur effective ( $L_{eff}$ ) est donnée par l'équation suivante :

$$L_{eff} = \frac{c}{2f_r \sqrt{\epsilon_{reff}}} \quad (2.17)$$

#### d. L'extension de la longueur :

L'extension de la longueur ( $\Delta L$ ) est donnée par l'équation suivante :

$$\Delta L = 0.412h \frac{(\epsilon_{reff} + 0.3) \left( \frac{W}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon_{reff} - 0.258) \left( \frac{W}{h} + 0.8 \right)} \quad (2.18)$$

#### e. Longueur de l'antenne patch:

Longueur de l'antenne patch(L) est donnée par l'équation suivante :

$$L = L_{eff} - 2\Delta L \quad (2.19)$$

**f. Largeur de la ligne d'alimentation :**

Largeur de la ligne d'alimentation ( $W_f$ ) est donnée par l'équation suivante :

$$W_f = \frac{7.48h}{e^{(Z_0 \frac{\sqrt{\epsilon_r + 1.41}}{87})}} - 1.25t \quad (2.20)$$

Avec :

$Z_0$  : L'impédance d'entrée

t : La hauteur du plan de masse

**2.6.6.5 Techniques d'alimentation :**

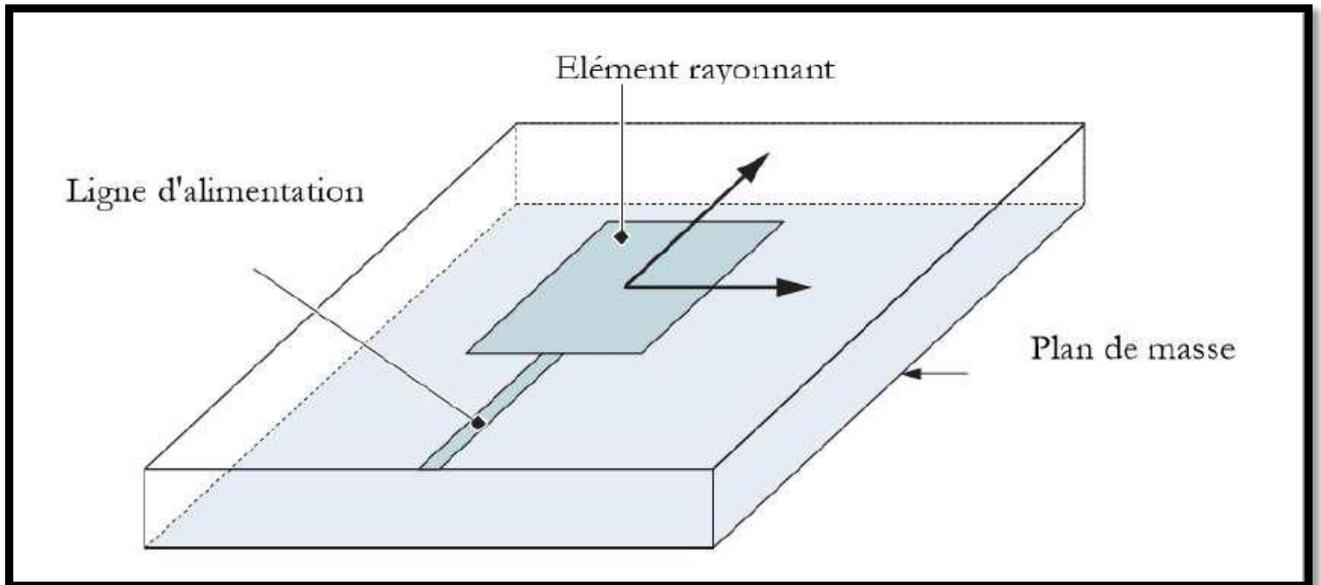
L'alimentation des antennes patch est l'une des parties les plus importantes dans le processus de la conception. Pour cela, plusieurs techniques ont été considérées dans ce but. En effet, elles peuvent être classées en deux grandes catégories [30], [31]:

- Par contact : sonde coaxial, ligne micro ruban.
- Sans contact : ligne micro ruban en sandwich, guide d'onde coplanaire, couplage par fente.
- 

**a) Alimentation par contact :**

**- Alimentation par ligne micro-ruban :**

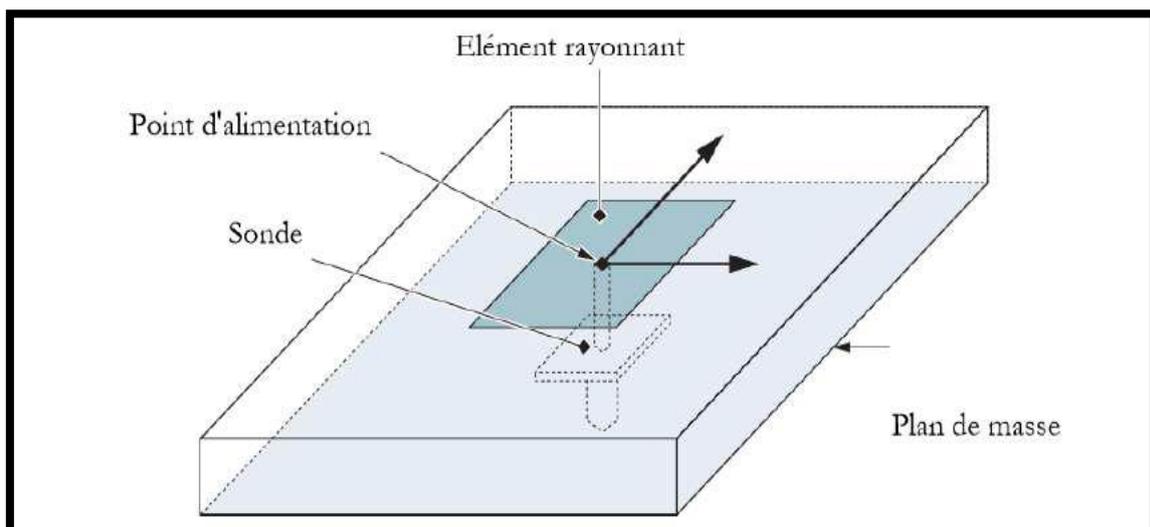
L'alimentation peut être établie par la connexion directe à une ligne microbande (**Figure. 2.16**), dont le point de jonction est sur l'axe de symétrie de l'élément ou décalé par rapport à cet axe de symétrie si cela permet une meilleure adaptation d'impédance [32].



**Figure 2.16** Alimentation par ligne micro-ruban

- **Alimentation par sonde coaxiale :**

Le câble traverse le plan de masse et le substrat. Le conducteur central est soudé sur l'élément rayonnant. Le conducteur extérieur quant à lui est soudé au plan de masse, (**Figure 2.17**). Cette alimentation est très utilisée dans les antennes imprimées qui ont des patches de formes circulaire et annulaire [33].

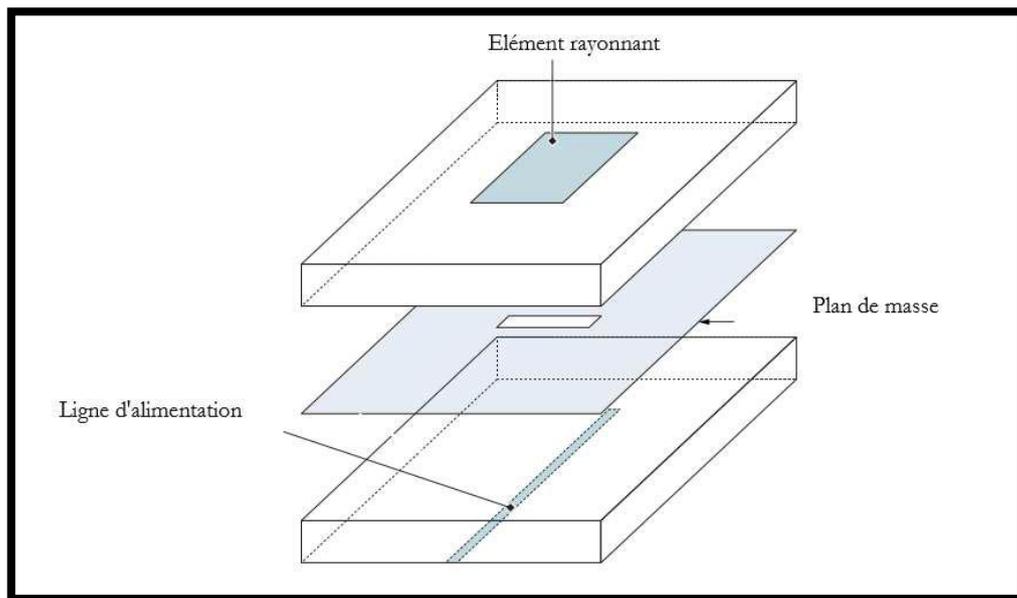


**Figure 2.17** Alimentation par sonde coaxiale

## b) Alimentation par proximité :

### - Alimentation par fente :

Cette structure (**Figure 2.18**) est constituée par deux substrats séparés par un plan de masse, le patch est imprimé sur le substrat supérieur et le ruban d'alimentation est imprimé sur le substrat inférieur, avec une fente non résonnante fendue dans le plan de masse [34].



**Figure 2.18** Alimentation par fente

### - Alimentation par couplage de proximité :

Cette technique d'alimentation est connue également sous le nom de couplage électromagnétique. Deux substrats diélectriques sont employés tels que la ligne d'alimentation est située entre les deux substrats et le patch est imprimé sur le substrat supérieur (**Figure 2.19**). L'avantage principal de cette technique est qu'elle élimine le rayonnement parasite due à l'alimentation et fournit une largeur de bande élevée, en raison de l'augmentation globale de l'épaisseur de l'antenne microbande. Cette technique fournit également des choix entre deux milieux diélectriques différents, un pour le patch et un pour la ligne d'alimentation pour optimiser les performances de l'antenne [35].

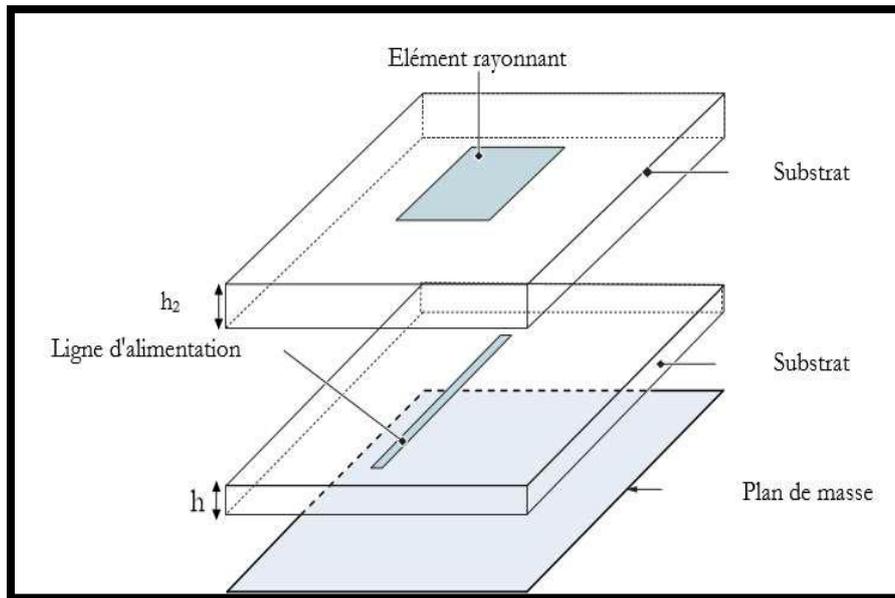


Figure 2.19 Alimentation par couplage de proximité

- Guide d'onde coplanaire :

L'élément rayonnant se trouve sur la face supérieure du substrat de fente rayonnante. La ligne d'alimentation et le plan de masse se trouvent à la même façade inférieure du substrat (Figure 2.20).

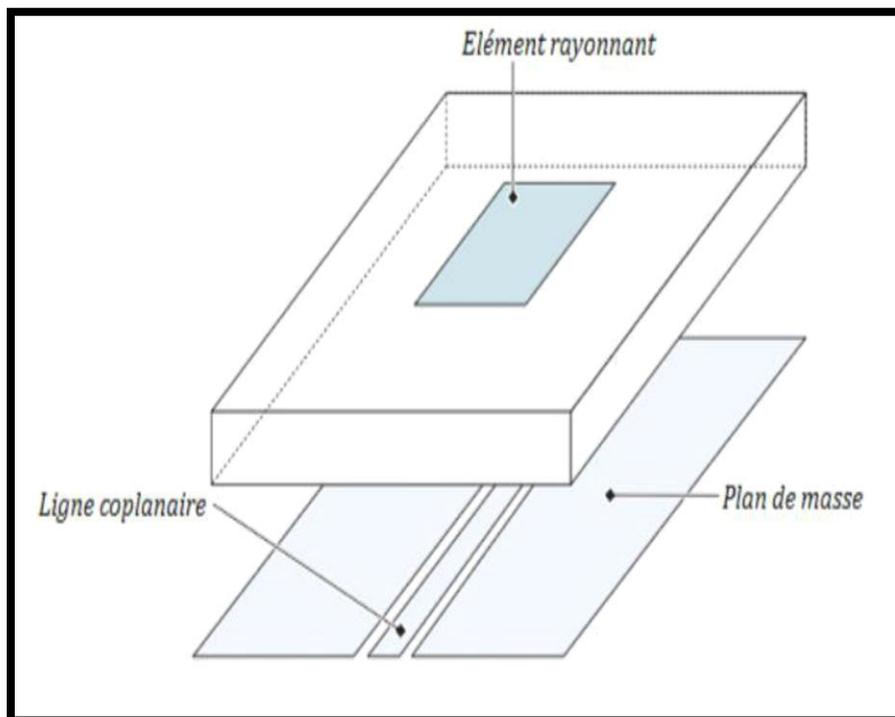


Figure 2.20 Alimentation du patch par un guide d'onde coplanaire

Une comparaison entre l'alimentation avec contact (sonde coaxiale et la ligne microbande) et l'alimentation sans contact (par couplage, guide d'onde coplanaire, et le couplage par fente), est résumée dans le (Tableau 2.1) :

Méthode		Avantages	Inconvénients
Alimentation avec contact	Sonde coaxiale	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Pas de pertes par rayonnement de ligne</li> <li>-Sélection possible d'un mode privilégié</li> <li>-Obtention d'une impédance d'entrée adéquate par positionnement de la sonde</li> <li>-Prédiction aisée de l'impédance d'entrée pour des substrats faible hauteur</li> <li>-Technique de perçage simple jusqu'à 10 GHz</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Rayonnement parasite de la sonde de type mono polaire.</li> <li>-Partie selfique ramenée par l'âme du connecteur à prendre en compte.</li> <li>-Technique de perçage et de soudure plus délicate en millimétrique.</li> <li>-Rapidement cher et compliqué industriellement pour exciter chaque élément d'un réseau à forte directivité.</li> </ul>
	Ligne microbande	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Procédé technologique le plus simple par gravure sur la même face de l'antenne et du circuit d'alimentation</li> <li>-Adaptation de l'aérien possible par contact pénétrant</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Rayonnement parasite de la discontinuité ligne aérien</li> <li>-Rayonnement parasite possible du circuit de distribution en millimétrique</li> <li>-Structure figée après gravure</li> </ul>
Alimentation Sans contact	Par couplage	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Dessin du circuit d'alimentation modifiable par rapport aux aériens</li> <li>-Bande passante plus large par augmentation de la hauteur (<math>h1+h2&gt;h1</math>)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Deux couches de substrat requises</li> <li>-Difficulté pour l'intégration de dispositifs actifs et pour la dissipation de chaleur</li> </ul>
	Guide d'onde coplanaire	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Procédé technologique simple</li> <li>-Facilités pour intégrer des dispositifs actifs et dissiper la chaleur résultante</li> <li>-Faible rayonnement arrière</li> <li>-Transitions simples pour l'intégration de dispositifs actifs et circuits MMIC</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Génération de modes de propagation parasites sur les guides d'onde coplanaire</li> </ul>

	<p><b>Couplage par fente</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>-Réalisation du circuit de distribution et de l'aérien indépendantes</li> <li>-Séparation électromagnétique des deux couches</li> <li>-Possibilité d'élargir la bande passante en associant la résonance de l'élément rayonnant à celle de la fente</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Technologie plus couteuse et complexe (positionnement des 2 couches, 4 faces de métallisation)</li> <li>-Intégration sur un support mécanique nécessitant des précautions</li> <li>-Rayonnement arrière parasite de la fente lorsque celle-ci résonne au voisinage de l'élément</li> </ul>
--	--	--

Tableau 2.1 comparaison entre les méthodes d'alimentation [36]

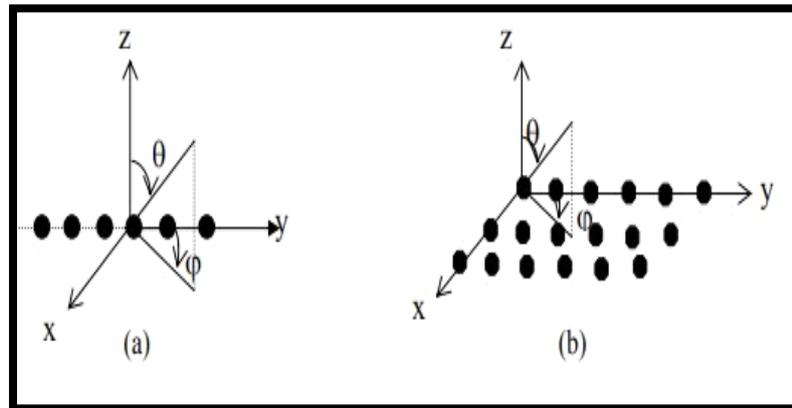
## 2.7 Réseau d'antennes :

### 2.7.1 Définition de réseau d'antenne :

Un réseau d'antennes est un ensemble d'antennes séparées et alimentées de façon synchrone. C'est-à-dire que le déphasage du courant entre deux paires d'antennes est fixe ,un réseau peut comporter des éléments non alimentés directement par une source (éléments parasites) mais qui sont alimentés par le champ produit par le reste des éléments (c'est le cas des antennes Yagi-Uda).Le champ électromagnétique produit par un réseau d'antennes est la somme vectorielle des champs produits par chacun des éléments .En choisissant convenablement l'espacement entre les éléments et la phase du courant qui circule dans chacun ,on peut modifier la directivité du réseau grâce à l'interférence constructive dans certaines directions et à l'interférence [37].

### 2.7.2 Réseau d'antennes imprimées :

L'utilisation d'une antenne plaque unitaire s'avère souvent insuffisante pour répondre aux contraintes de rayonnement imposées. Le réseau d'antennes imprimées est constitué par des éléments rayonnants reliés en chaîne les uns aux autres par des tronçons de ligne microbandes. Les antennes élémentaires fonctionnent à la même fréquence et sont disposées périodiquement selon une ou plusieurs directions. Les réseaux d'antennes sont actuellement utilisés dans de nombreuses applications radars, radio mobile ou spatial. Les antennes réseaux peuvent avoir différentes géométries : réseaux linéaires et réseaux planaires (bidimensionnels) [38].



**Figure 2.21** Différents types de réseaux

a) Linéaire b) Bidimensionnels

Le champ total rayonné par le réseau est déterminé par l'addition des vecteurs champs rayonnés par les différents éléments. La forme du rayonnement global doit prendre en considération les paramètres suivants :

- La géométrie du réseau : linéaire, plan...
- L'espacement relatif entre chaque élément.
- L'amplitude de l'excitation de chaque élément.
- La phase appliquée à chaque excitation.
- Le diagramme de rayonnement propre à chaque élément.

### 2.7.3 Association d'antennes en réseau :

Le regroupement de plusieurs pavés rayonnants élémentaires forme ce que l'on appelle un réseau d'antennes. Le dispositif qui les excite et appelé réseau d'alimentation. Il est constitué d'une part, d'un répartiteur (ou distributeur) de puissance, qui affecte à chaque source une pondération en amplitude et d'autre part, d'un ensemble de déphaseurs qui imposent une phase particulière à chaque élément. L'ensemble constitue ce que l'on appelle la loi d'illumination (ou d'alimentation). Lorsque la phase varie avec le temps, on réalise la fonction de balayage électronique. Les dispositifs mécaniques utilisés par les paraboles habituelles pour la fonction de dépointage, deviennent donc obsolètes. On diminue ainsi considérablement le coût global du système tout en réduisant le temps d'acquisition d'informations, du fait de l'absence d'inertie. C'est à partir de la disposition spatiale de chaque élément et des phases et amplitudes appliquées, qu'il est possible de produire des diagrammes de rayonnement particuliers. On peut agir sur la directivité des lobes de rayonnement, sur la

présence de "zéros" (réjections d'interférences) dans des directions particulières ou tout simplement effectuer une synthèse de réseau permettant d'imposer un gabarit à ce rayonnement [39].

#### **2.7.4 Techniques d'alimentation d'un réseau d'antennes imprimées :**

Le réseau d'alimentation de l'antenne aura pour objectif d'amener l'énergie aux différentes sources en respectant les lois de pondération. La technique la plus simple consiste à alimenter les éléments rayonnants par des lignes microbandes. Le réseau d'excitation peut avoir des architectures variées selon le besoin. Le principe de répartition d'énergie se fait par utilisation des lignes microbandes et des transformateurs d'impédances quartes d'ondes. Les déphaseurs dans le circuit d'alimentation peuvent être formés d'éléments supraconducteurs.

Toutes les structures d'alimentations sont supposées uniformes de point de vue distribution de puissance (les patches doivent être alimentés avec la même puissance). Il faut mettre en considération que les signaux émis par les sources sont tous avec la même fréquence en fonction du temps [40] [41].

Le circuit d'excitation peut prendre plusieurs architectures, on distingue deux types:

- Alimentation en série.
- Alimentation en parallèle.

Le choix du type d'alimentation se fait en fonction de différents paramètres qui sont:

- La loi de pondération souhaitée, en amplitude et/ou en phase.
- La bande passante souhaitée.

Un réseau série aura une bande passante plus faible dans la mesure où la loi de pondération sera plus sensible à la fréquence que dans le cas d'une alimentation parallèle.

##### **2.7.4.1 Alimentation parallèle :**

Réseau parallèle présente des longueurs de lignes supérieures et un plus grand nombre de coudes ce qui engendre d'avantage de pertes, en particulier dans le domaine millimétrique. Un autre choix important dans la conception d'une antenne imprimée est celui du substrat diélectrique.

Si la structure du réseau à  $2n$  éléments rayonnants qui peuvent être alimentés en parallèle par  $n$  étages de  $(2^{n-1})$  diviseurs de puissance à chaque étage  $m$ . Afin que cette alimentation soit totalement adaptée, il est judicieux d'utiliser des diviseurs de type Wilkinson.

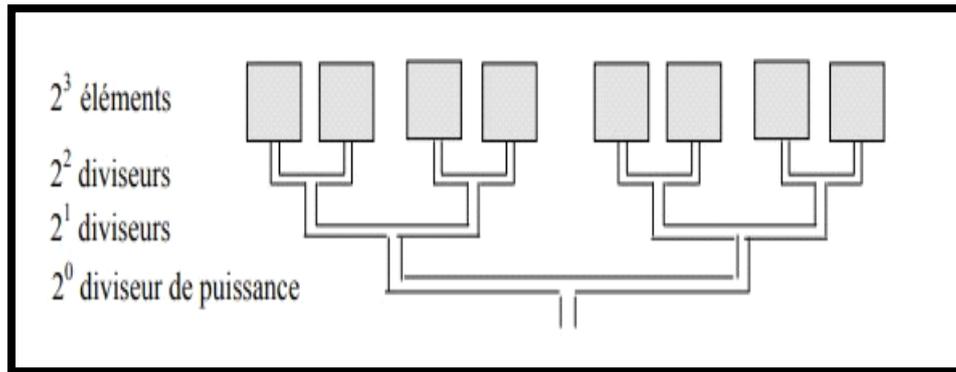


Figure 2.22 Alimentation parallèle d'un réseau linéaire

### 2.7.4.2 Alimentation série :

Dans la (Figure 2.23) nous avons une ligne de transmission excitée en série les éléments rayonnants. Chaque ligne présente à son entrée un déphaseur, qui lui-même est lié de façon orthogonale à un guide commun d'alimentation. La distance des branchements des lignes sur la ligne principale doit être uniforme, et les signaux doivent arriver en phase jusqu'aux déphaseurs pour ne pas s'induire dans des erreurs de phase.

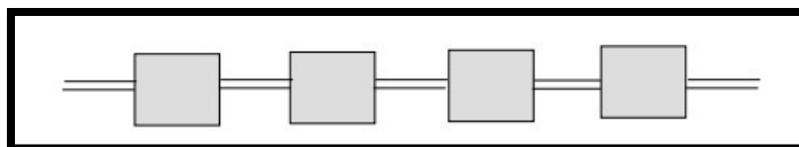


Figure 2.23 Alimentation série d'un réseau linéaire

### 2.7.4.3 Réseaux bidimensionnels :

Les réseaux linéaires permettent de conformer le diagramme de rayonnement dans un plan passant par les sources du réseau. Afin d'obtenir un effet de réseau dans tout l'espace et en particulier dans les plans E et H, il est nécessaire d'avoir recours à des réseaux bidimensionnels (Figures 2.24-2.25). Ils peuvent être obtenus en mode non résonant à partir des réseaux linéaires à alimentation série ou parallèle [40] [41].

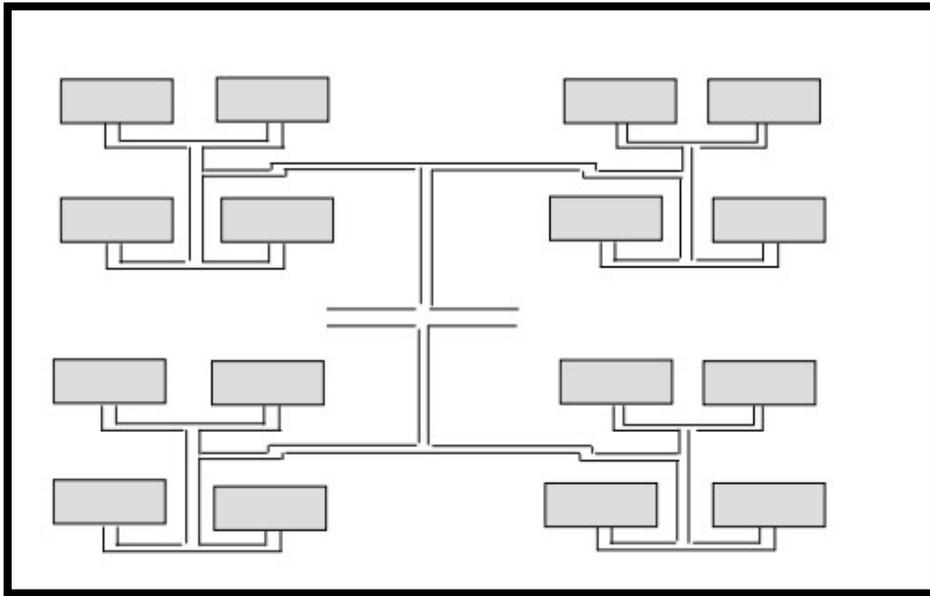


Figure 2.24 Alimentation parallèle d'un réseau plan

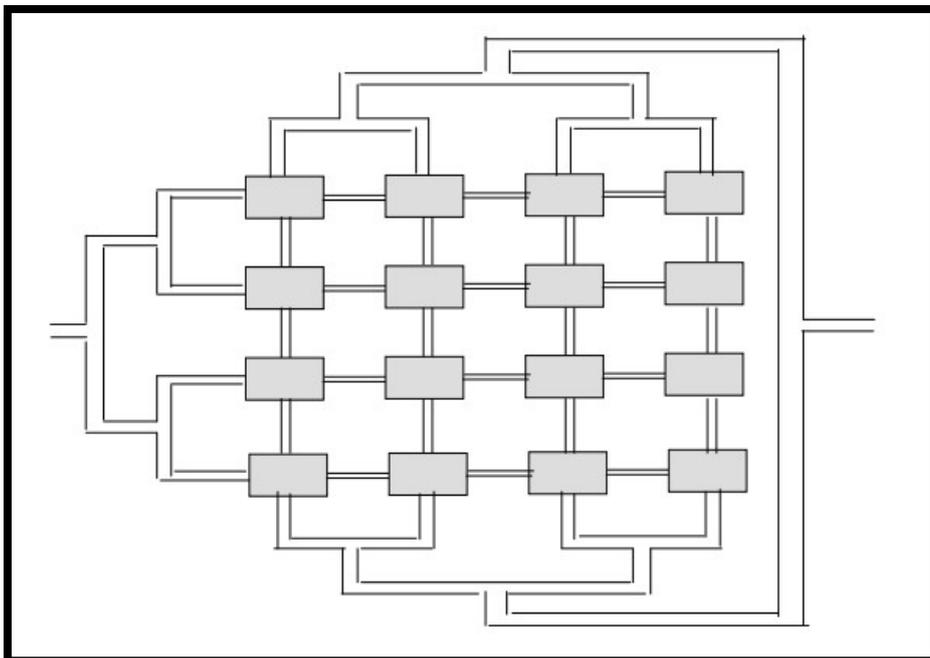


Figure 2.25 Alimentation série d'un réseau plan

**2.8 Conclusion :**

L'objectif de ce chapitre était d'introduire les techniques de conception et de réalisation d'antennes. Ils ont des points forts différents et sont tous aussi importants. Nous avons donné quelques types d'Alimentation d'antennes, et les caractéristiques des antennes qui existent.

Dans le chapitre suivant nous allons présenter la simulation et l'optimisation d'un réseau d'antenne qui utilise la gamme de fréquence ku de réception satellitaire [12-18] GHz.

---

# CHAPITRE 3

## Conception et simulation d'un réseau d'antennes conforme

---

### **3.1 Introduction :**

Ce chapitre est consacré, à la conception, la simulation et l'optimisation d'un réseau d'antenne dans la gamme de fréquence ku [12-18] GHz.

Les étapes suivies lors de la simulation du réseau sont les suivantes :

Dans un premier temps nous nous sommes intéressés à la simulation d'une seule antenne patch de forme rectangulaire prise comme référence.

Par la suite on a fait un réseau de : 2,4 éléments afin d'augmenter le gain

Enfin, on l'a installé sur l'aile du drone pour avoir un réseau d'antennes imprimées conforme qui assure la réception des signaux satellitaires.

La conception et la simulation des antennes est faite par des logiciels de simulation électromagnétique.

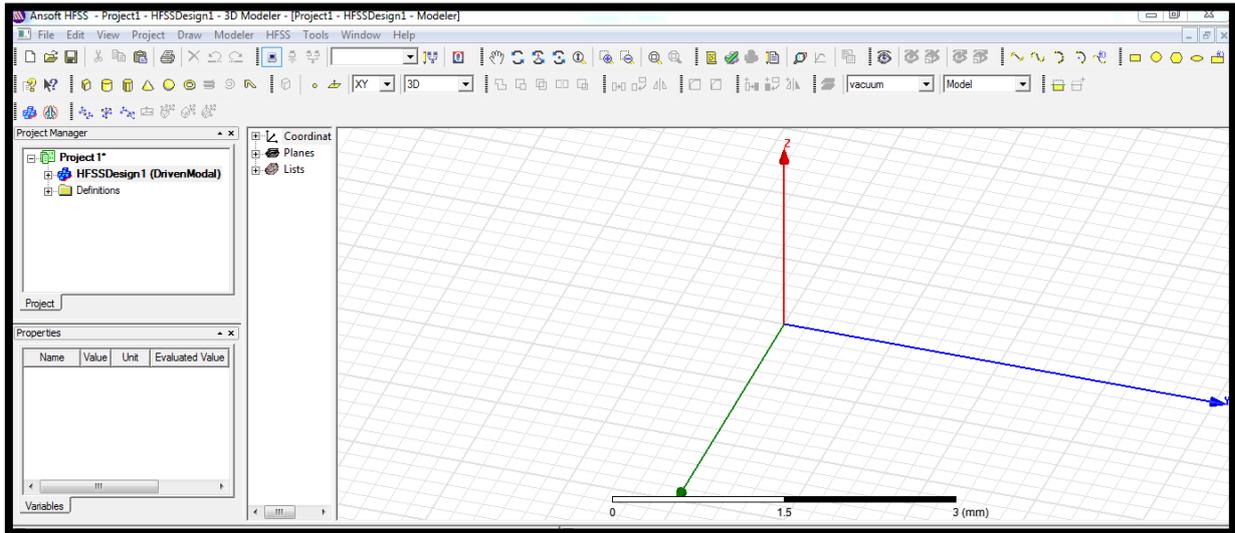
Ces logiciels permettent soit une conception multicouche en 2D (c'est le cas, par exemple, de Momentum développé par Keysight Technology) soit une conception 3D comme (comme HFSS d'Ansys, FEKO d'Altair et CST Microwave studio).

La différence entre ces logiciels, hormis l'Interface Homme Machine (IHM), réside dans les méthodes numériques qu'ils utilisent pour calculer la réponse électromagnétique des structures modélisées.

Pour notre cas le logiciel utilisé pour la simulation du réseau est le HFSS (High Frequency Structure Simulation).

### **3.2 L'outil de simulations le logiciel HFSS :**

Le logiciel HFSS (High Frequency Structure Simulator) est un simulateur électromagnétique de haute performance pour les problèmes en 3D. Il intègre des simulations, des visualisations et une interface automatisée facile à utiliser pour résoudre rapidement et de façon efficace les problèmes électromagnétiques en 3D. Son code de calcul est basé sur la méthode des éléments finis (méthode fréquentielle) (FEM : Finite Element Method). En général, cette méthode divise l'espace de résolution du problème en plusieurs milliers de régions plus petites et représente le champ dans chaque sous-région (élément) avec une fonction locale. Il permet d'obtenir des graphiques performants pour donner à l'utilisateur des résultats et une perspicacité aux problèmes électromagnétiques en trois dimensions comme s'affiche dans la **(Figure 3.1)**



**Figure 3.1** L'interface principale de HFSS

Le HFSS peut être utilisé pour calculer des paramètres tels que les paramètres S, les fréquences de résonance et les champs. C'est un outil permettant le calcul du comportement électromagnétique d'une structure. Le simulateur possède des outils de post traitement pour une analyse plus détaillée. Il permet le calcul des :

- Quantités de base dans le champ proche et le champ lointain.
- Impédances caractéristiques des ports et leurs constantes de propagation.
- Les paramètres S normalisés par rapport à une impédance de port spécifique afin de générer une solution du champ électromagnétique.

Un projet HFSS est un dossier qui contient un ou plusieurs modèles appelés design, chaque modèle contient une structure géométrique, ses conditions aux limites et les matériaux utilisés, ainsi que les solutions de champs électromagnétiques et les interprétations post-traitement. Tous ces composants peuvent être atteints par la fenêtre Project Manager dans l'environnement HFSS.

### 3.2.1 Les avantages du logiciel HFSS :

HFSS travaille sur plusieurs accessoires de communication, on cite les guides d'ondes, les filtres, les câbles coaxiaux, les connecteurs et divers types d'antennes.

D'autres avantages résident dans la génération d'un maillage adaptatif à la structure, durant la simulation le volume et la position de chaque tétraèdre sera modifiée d'une manière à aboutir à une convergence des résultats et une bonne précision avec une marge d'erreur réduite

Etude de structures très complexes, prise en compte simple de la dépendance fréquentielle ou temporelle.

### 3.2.2 Les inconvénients du logiciel HFSS :

La création des structures géométriques compliquées peut prendre une grande durée de temps, même chose pour la définition de la fonctionnalité de chaque face et objet élémentaire. La modélisation des objets volumiques et surfaciques recommande une maîtrise d'utilisation des différents outils de base et leur manipulation par des opérations arithmétiques, Les conflits entre les faces géométriques provoquent l'arrêt de simulation avec une notification d'erreur, difficultés pour modéliser l'espace libre.

Le processus de la simulation pourra prendre plusieurs jours avant de produire les résultats et tracer les graphes, ce qui augmente le coût de fabrication pour des projets industriels, et le délai de l'étude pour un projet universitaire.

### 3.3 Simulation du réseau d'antennes :

La simulation est une étape indispensable pour la réalisation réelle d'un objet, puisqu'elle nous guide et nous oriente vers la bonne sélection des paramètres statiques et des conditions de fonctionnement selon l'objectif fixé par la réalisation.

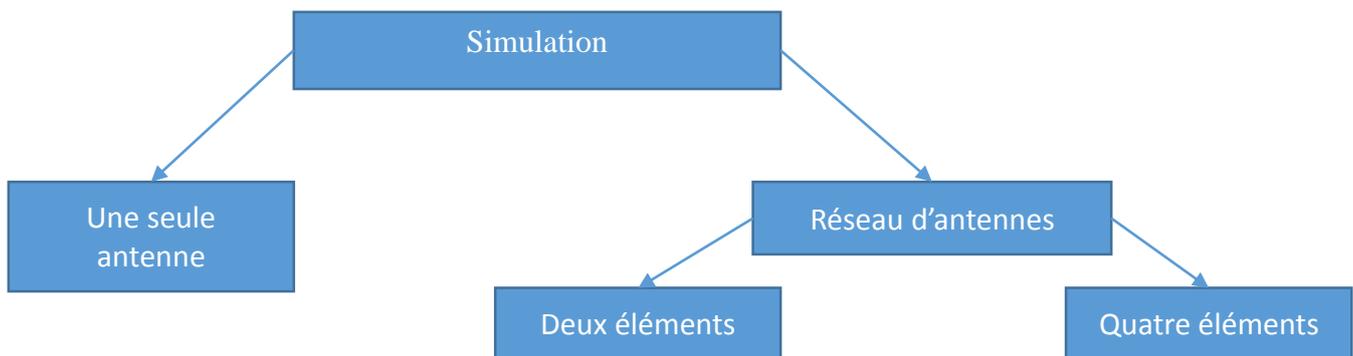
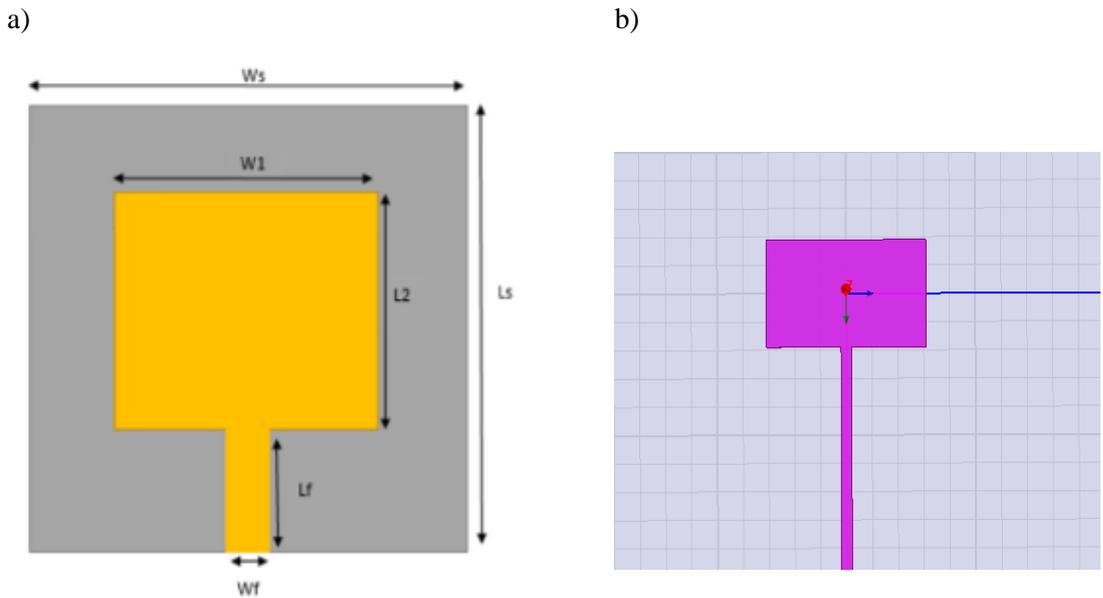


Figure 3.2 Différents étapes de simulation

#### 3.3.1 Les paramètres essentiels pour la conception d'une antenne patch rectangulaire :

- Fréquence de résonance ( $f_r$ ) : pour notre application la fréquence de résonance est de 15 GHz (le centre de la bande de fréquence pour la réception satellitaire [12-18]GHz).
- La constante diélectrique du substrat ( $\epsilon_r$ ) : Le matériau diélectrique sélectionné pour cette conception est du «"FR4\_epoxy"» ayant une ( $\epsilon_r$ ) égale à 4.4 et «"Rogers RT/duroid 5870 (tm)" » ayant une ( $\epsilon_r$ ) égale à 2.3
- La hauteur du substrat diélectrique (hs): dans ce cas  $hs=1.6\text{mm}$ .

**3.3.2 Simulation d'une seule antenne :**



**Figure 3.3** Géométrie de l'antenne patch rectangulaire

a) paramètre géométrique b) conception du logiciel HFSS

Les différents paramètres de notre antenne donnés dans le (**Tableau 3.1**) sont calculés à l'aide des formules mentionnées dans le chapitre 2

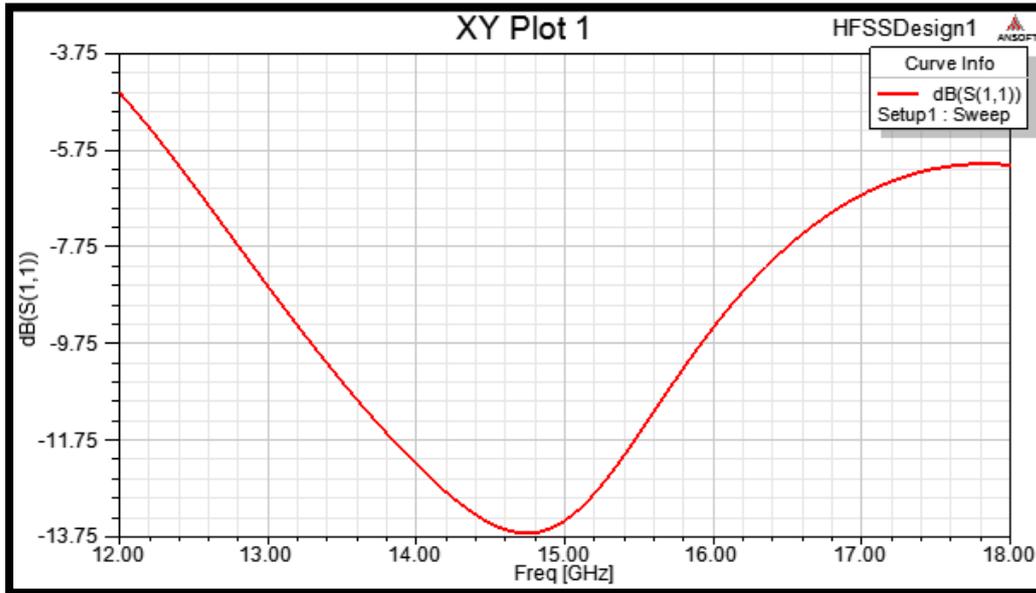
Paramètre	Symbole	Valeur
Longueur de substrat, plan de masse	$L_s$	20mm
Largeur de substrat, plan de masse	$W_s$	20mm
Longueur de patch	$L_2$	6mm
Largeur de patch	$W_1$	4mm
Longueur de ligne d'alimentation	$L_f$	8.1mm
Largeur de la ligne d'alimentation	$W_f$	0.71mm
Hauteur de substrat	$h_s$	1.6mm
Hauteur du patch, plan de masse	$h$	0.035mm
Impédance d'entrée	$Z_0$	100 ohms

**Tableau 3.1** Paramètre de l'antenne patch rectangulaire

**3.3.3 Résultat de la simulation :**

**3.3.3.1 Le coefficient de réflexion :**

La (**Figure 3.4**) présente le coefficient de réflexion  $S_{11}$  (dB) de l'antenne en fonction de la fréquence dans la bande [12-18] GHz.



**Figure 3.4** Coefficient de réflexion S11

On remarque que notre antenne n'est pas bien adaptée.

### 3.3.3.2 Le taux d'ondes stationnaires :

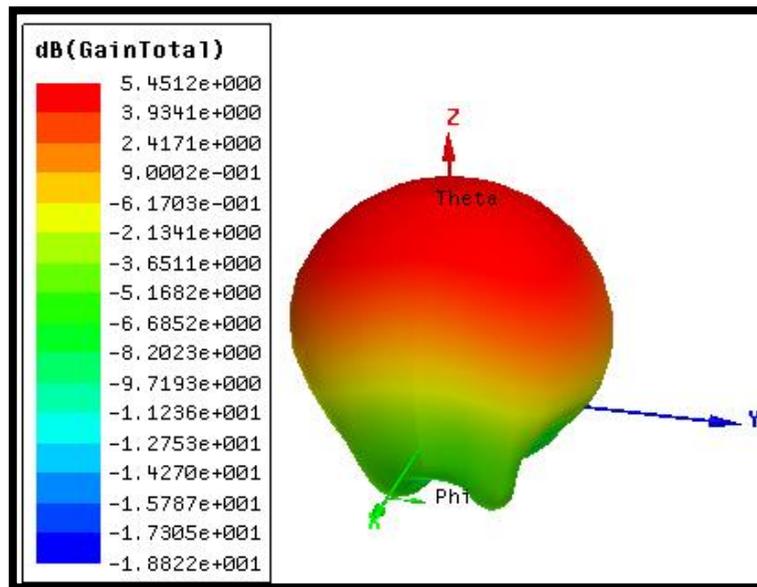
La (Figure 3.5) montre les valeurs du rapport d'ondes stationnaires calculées en fonction de la fréquence.



**Figure 3.5** Taux d'ondes stationnaires TOS (VSWR)

**3.3.3.3 Le diagramme de rayonnement :**

La (Figure 3.6) présente le diagramme de rayonnement en 3D :



**Figure 3.6** Diagrammes de rayonnement en 3D

**3.3.4 Études paramétriques d'une seule antenne :**

Une étude sous HFSS sera menée par la suite pour voir l'influence des dimensions des différents paramètres sur les caractéristiques de l'antenne.

L'analyse paramétrique s'est concentrée sur la recherche de la meilleure magnitude du coefficient de réflexion. Ensuite, il est décrit l'influence des variables du projet, et la recherche des dimensions optimales de l'antenne.

**3.3.4.1 Influence de la longueur, la largeur de l'antenne ainsi que la largeur de la ligne d'alimentation:**

Dans cette section, on va voir l'influence des paramètres cités précédemment dans des intervalles autour de la valeur de base afin d'avoir un meilleur résultat pour le coefficient de réflexion le gain et le taux d'onde stationnaire.

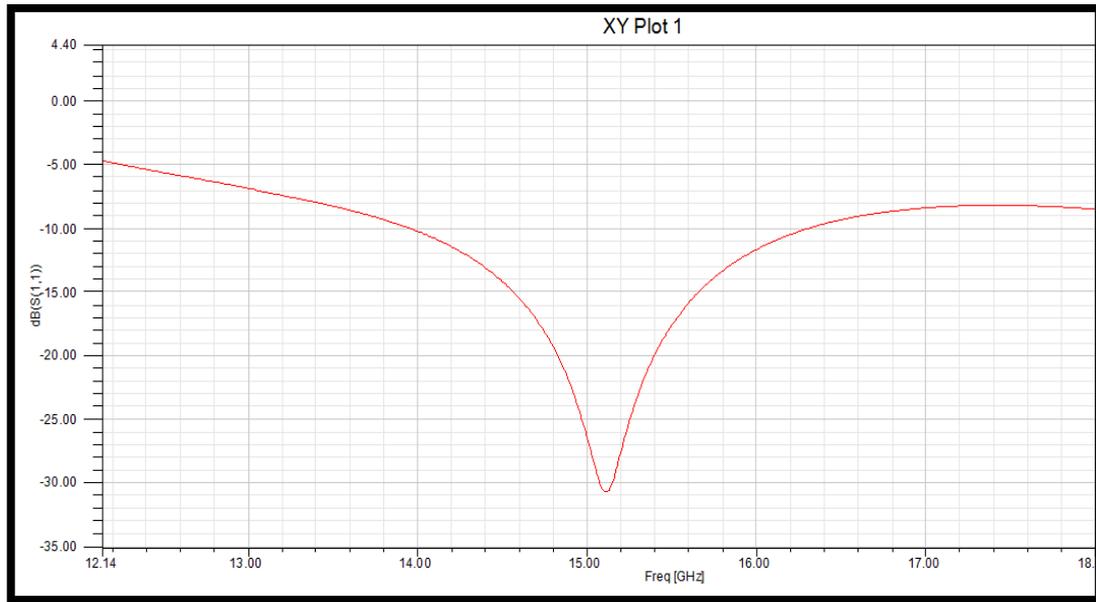
Le (Tableau 3.2) montre l'intervalle de variation de chaque paramètre :

Paramètre	Intervalle de variation
W1	[3.7-4.3] mm
L2	[5.7-6.4] mm
Wf	[0.41-1] mm

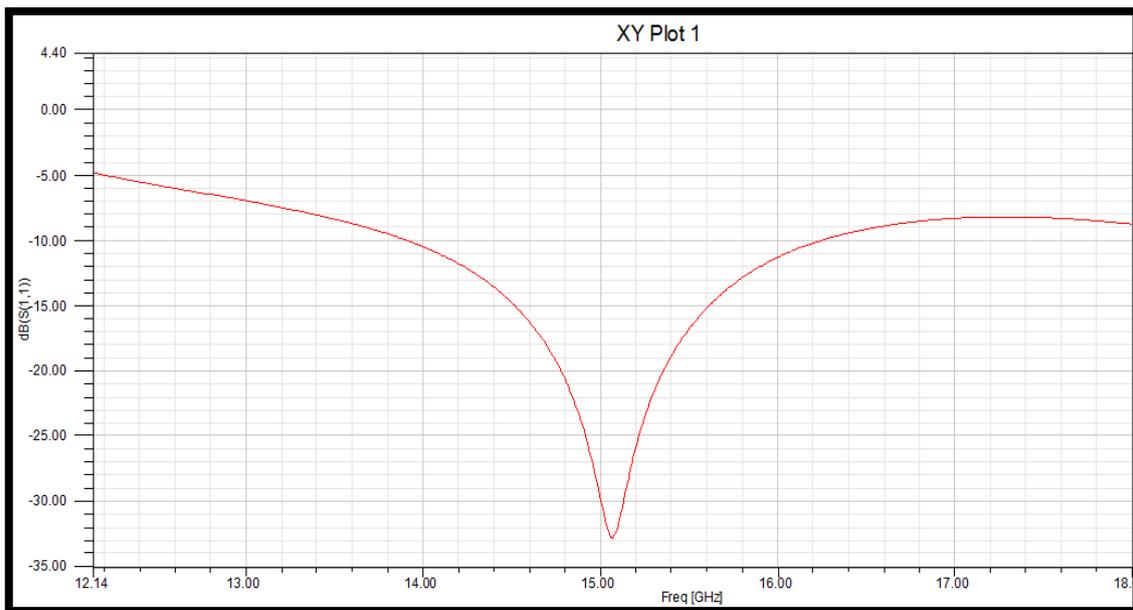
**Tableau 3.2** Différents paramètres de l'antenne à optimiser

Tous les paramètres sont variés avec un pas de 0.1 mm.

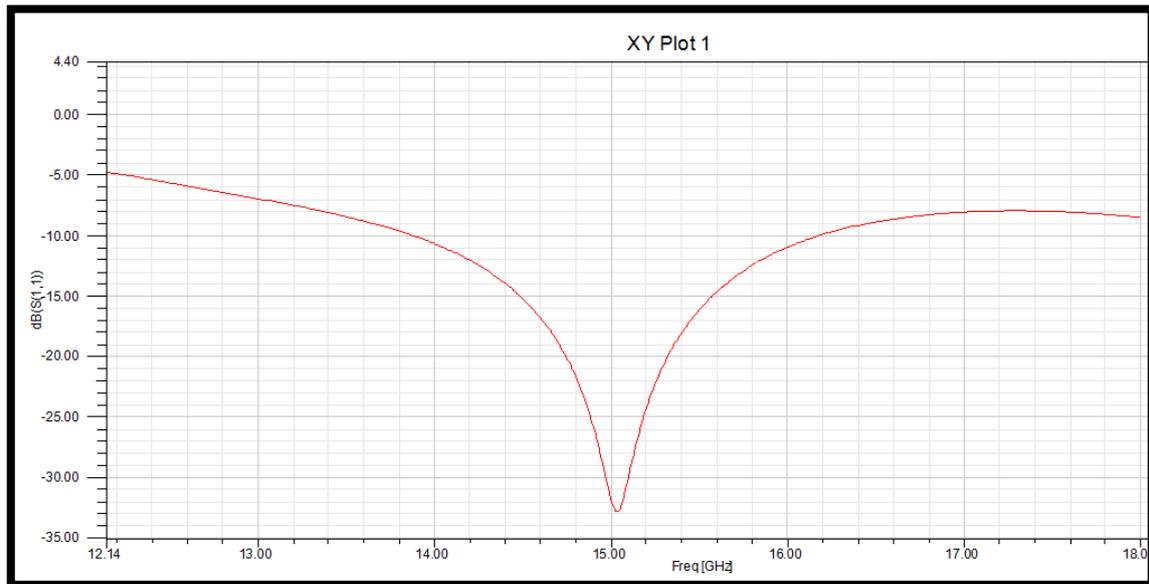
**3.3.4.2**      **Résultats de l'étude paramétrique :**



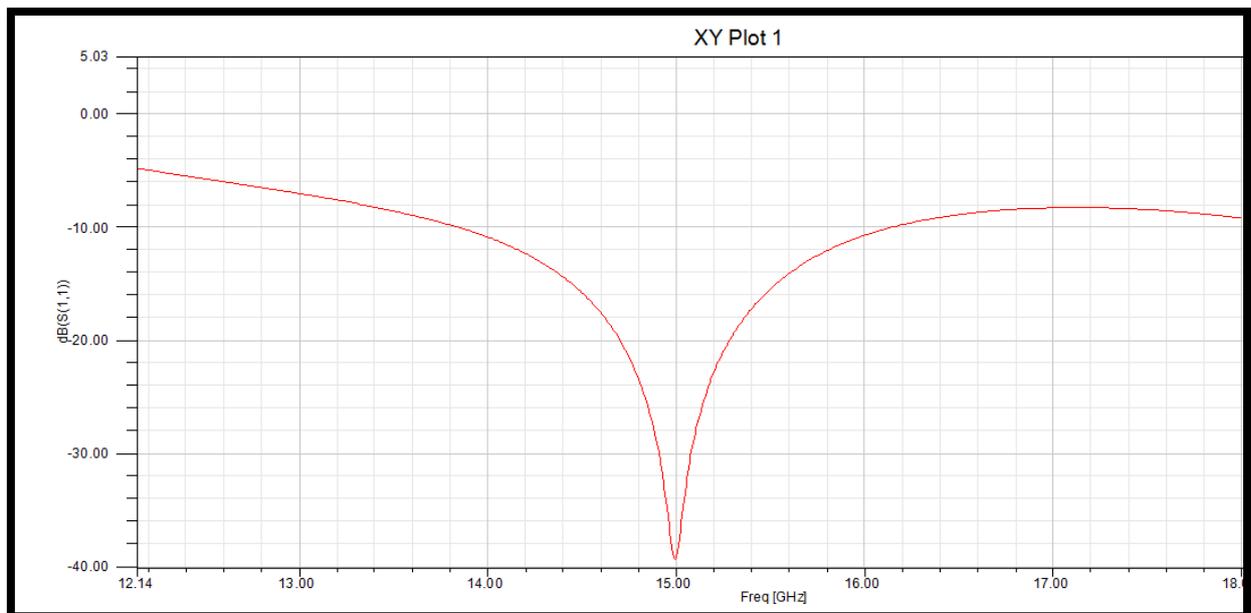
**Figure 3.7** Coefficient de réflexion S11 pour  $W1=3.8$ ,  $L2=5.9$ ,  $Wf=0.41$



**Figure 3.8** Coefficient de réflexion S11 pour  $W1=3.8$ ,  $L2=6$ ,  $Wf=0.41$



**Figure 3.9** Coefficient de réflexion  $S_{11}$  pour  $W_1=3.8$ ,  $L_2=6.1$ ,  $W_f=0.41$



**Figure 3.10** Coefficient de réflexion  $S_{11}$  pour  $W_1=3.8$ ,  $L_2=6.2$ ,  $W_f=0.41$

### ➤ **Interprétation :**

Ici on remarque que les trois paramètres cités précédemment ont une influence sur :

- Le décalage du pique vers la fréquence de résonance.
- L'amplitude du coefficient de réflexion.

D'après l'étude paramétrique qu'on fait on trouve que la meilleur largeur  $W_1=3.8\text{mm}$  Et  $W_f=0.41$ .

La variation de la longueur  $L_2$  nous permet d'observer un décalage du pique vers la fréquence de résonance.

## Chapitre 3 Conception et simulation d'un réseau d'antennes conforme

En fin on arrive aux valeurs optimisées de l'antenne qui nous donne un coefficient de réflexion S11 biens adapté.

Par la suit on obtient le gain en 3D et le diagramme e rayonnement en 2D de l'antenne avec les paramètres optimisés.

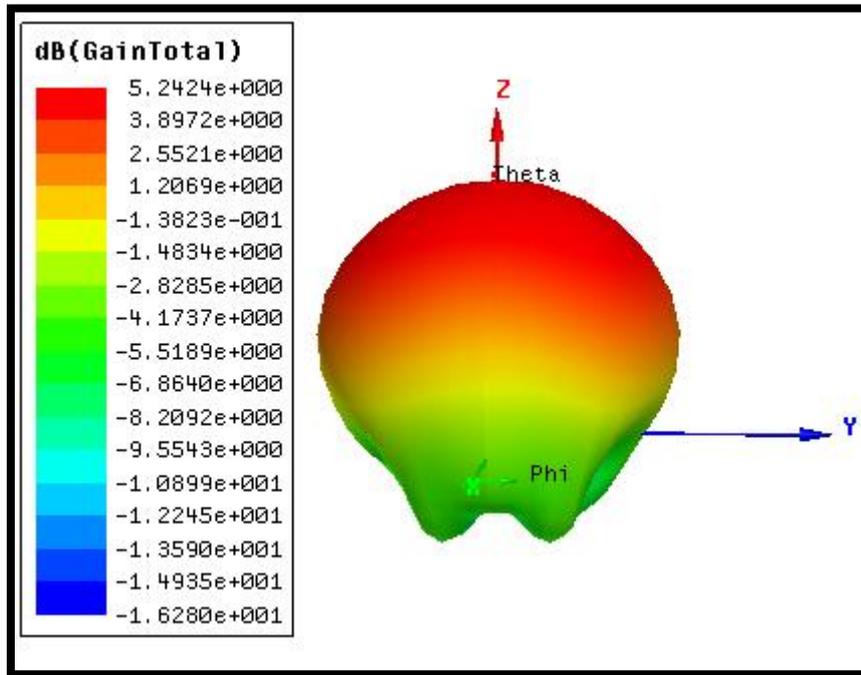


Figure 3.11 Gain en 3D pour W1=3.8, L2=6.2, Wf=0.41

### 3.3.4.3 L'antenne patch optimisée:

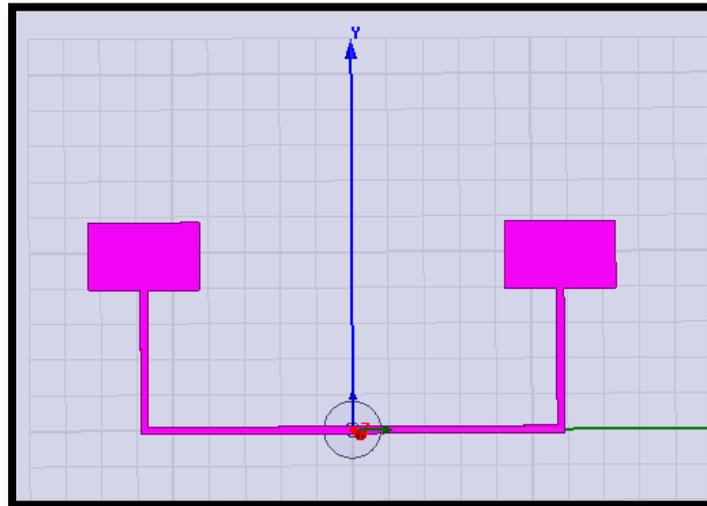
A partir des études et simulations paramétriques menées précédemment, nous avons réussie à déduire les paramètres finaux qui donnent les résultats souhaités, qui sont paramétré dans le tableau ci-dessous.

Paramètre	W1	L2	Lf	Wf
Antennes de base	6.1	4	8.1	0.71
Antenne optimisée	6.2	3.8	8.1	0.41

Tableau 3.3 Dimension d'antenne de base et l'antenne optimisée

### 3.3.5 Simulation d'un réseau d'antenne de deux éléments :

Après avoir obtenu les résultats de l'étude paramétrique d'une seule antenne on passe maintenant à simuler un réseau d'antennes de deux éléments alimentées par un câble coaxial ayant les mêmes paramètres obtenus à l'étude précédente avec une distance de couplage  $h3=0.57*\lambda$  avec  $\lambda=20\text{mm}$ , comme le montre la figure ci-dessous.



**Figure 3.12** Conception du réseau d'antennes de deux éléments du logiciel HFSS

Paramètre	Symbole	Valeur
Longueur de substrat, plan de masse	Ls	50mm
Largeur de substrat, plan de masse	Ws	40mm
Longueur de patch	L2	6.2mm
Largeur de patch	W1	3.8mm
Longueur de ligne d'alimentation	Lf	8.1mm
Largeur de la ligne d'alimentation	Wf	0.41mm
Hauteur de substrat	hs	1.6mm
Hauteur de patch, plan de masse	h	0.035mm
Impédance d'entrée	Z0	50 ohm
Impédance caractéristique de la ligne d'alimentation	Zt	Zt=2Z0 Zt=100ohm
Distance de couplage	h3	11.4mm

**Tableau 3.4** Paramètre de l'antenne patch rectangulaire

### 3.3.6 Résultat de la simulation :

#### 3.3.6.1 Le coefficient de réflexion :

La (Figure 3.13) présente le coefficient de réflexion S11 (dB) de l'antenne en fonction de la fréquence dans la bande [12-18] GHz.

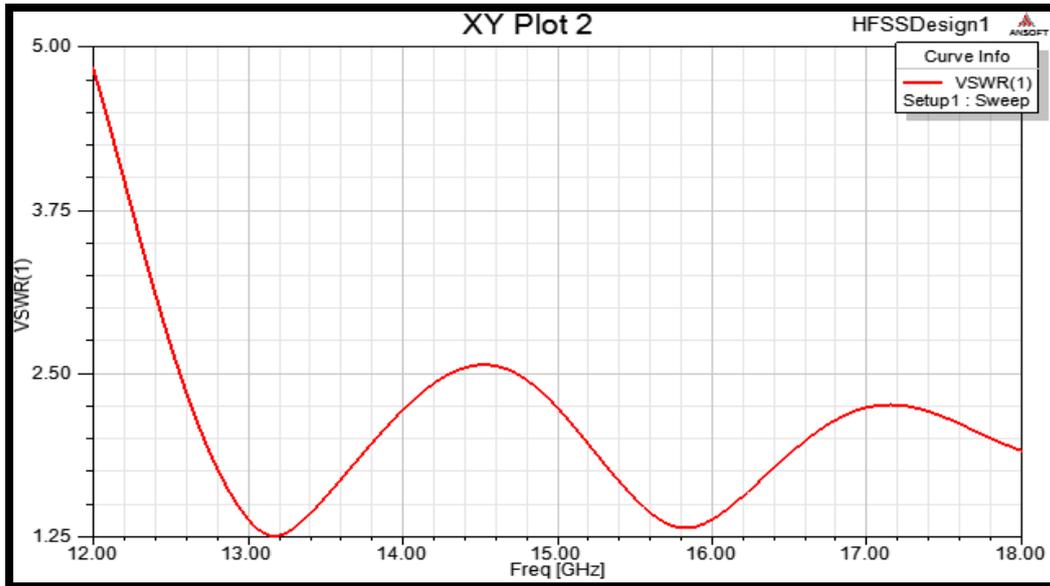


**Figure 3.13** Coefficient de réflexion  $S_{11}$  pour le réseau d'antenne de deux éléments

Le réseau d'antennes de deux éléments n'est adaptés donc on a besoin de l'étude paramétrique pour le faire adapter.

### 3.3.6.2 Le taux d'ondes stationnaires :

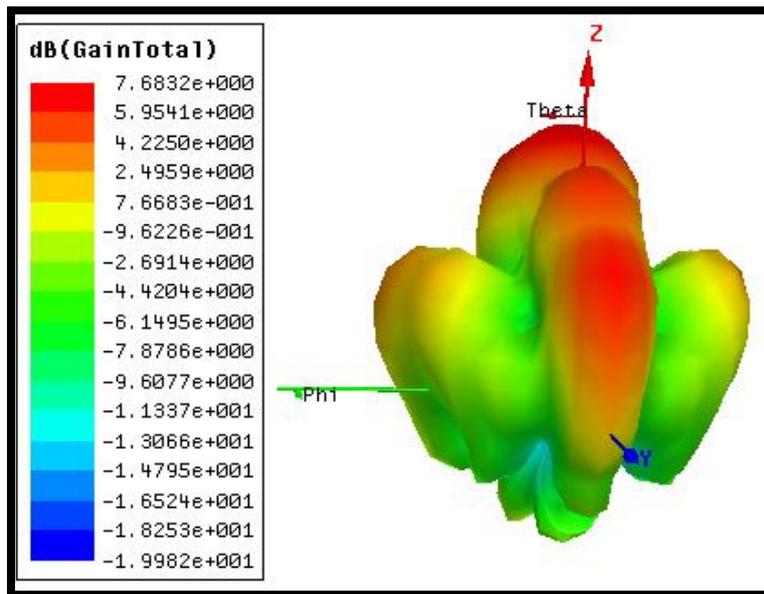
La (Figure 3.14) montre les valeurs du rapport d'ondes stationnaires calculées en fonction de la fréquence.



**Figure 3.14** Taux d'ondes stationnaires pour le réseau d'antenne de deux éléments

**3.3.6.3 Le diagramme de rayonnement :**

La (Figure 3.15) présente le gain en 3D :



**Figure 3.15** Gain en 3D

Pour un réseau d'antennes de deux éléments le gain  $G=7.6832$  est un peu faible donc il faut l'améliorer en faisant l'étude paramétrique.

**3.3.7 Études paramétriques :**

Dans cette partie on va optimiser les paramètres qui influent sur l'adaptation et aussi sur le couplage pour avoir un bon gain et un bon coefficient de réflexion.

Les paramètres optimisés sont mentionnés dans le (Tableau 3.5) :

Paramètre	L2	W1	Wf	h3	Lf
intervalle	[6-6.4]	[3.6-4]	[0.41-0.71]	[9-11]	[8.1-11.1]

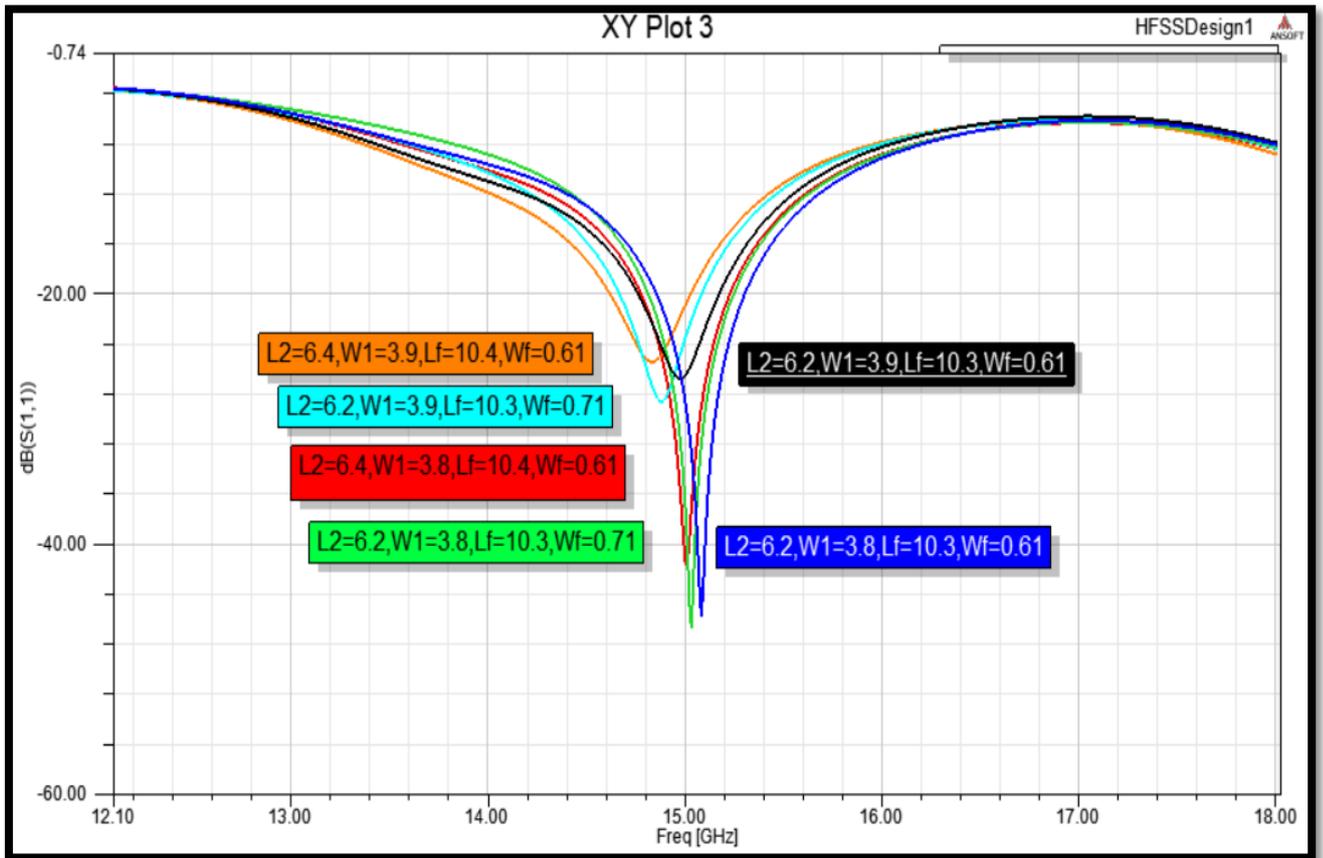
**Tableau 3.5** Différents paramètres du réseau d'antenne à optimiser

L'étude est faite toujours avec un pas de 0.1 mm.

**3.3.7.1 Résultats de l'étude paramétrique :**

L'étude paramétrique nous donne plusieurs résultats pour la suite de la conception nous avons pris quelques résultats qui nous permet de remarquer l'influence de variation des différents paramètres au même temps pour déterminer les meilleures valeurs désirés.

La (Figure 3.16) montre ces résultats dans les intervalles cités au (Tableau 3.5) :



**Figure 3.16** Résultat d'étude paramétrique

➤ **Interprétation :**

Une variation  $W1$  a entraîné une dégradation plus prononcée de l'amplitude du coefficient de réflexion, comme le montre la figure 3.16, tandis qu'une variation  $Lf$ ,  $Wf$  et  $L2$  a entraîné un décalage de pique vers la fréquence de résonance.

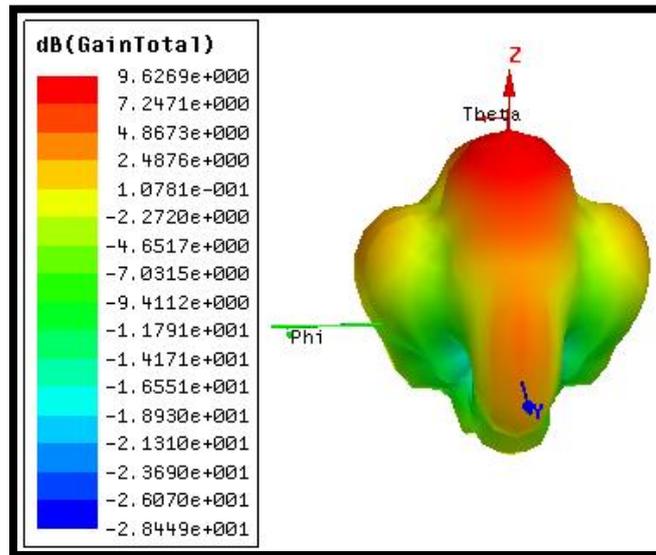
Enfin le meilleur  $S11$  est pour les valeurs suivantes :

paramètre	L2	W1	Wf	Lf
valeur	6.4	3.8	0.61	10.4

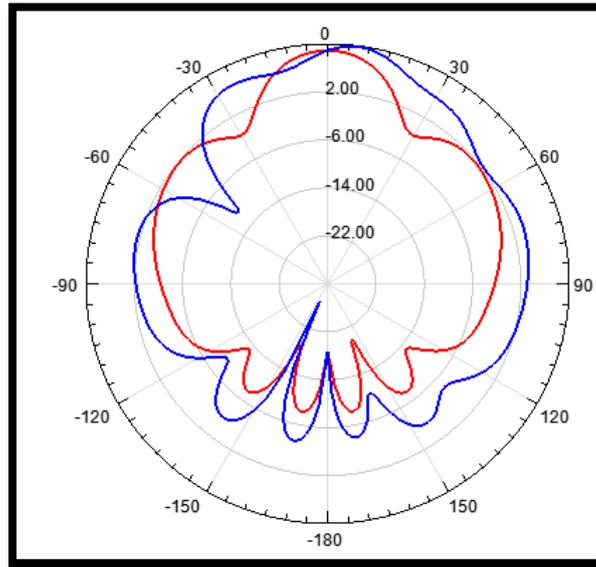
**Tableau 3.6** Valeurs pour meilleur  $S11$



**Figure 3.17** Taux d'ondes stationnaires pour  $W1=3.8, L2=6.4, Wf=0.61, Lf=10.4, h3=9$



**Figure 3.18** Gain du réseau d'antennes de deux éléments



**Figure 3.19** Diagramme de rayonnement en 2D

**3.3.7.2 Le réseau d'antenne patch optimisée:**

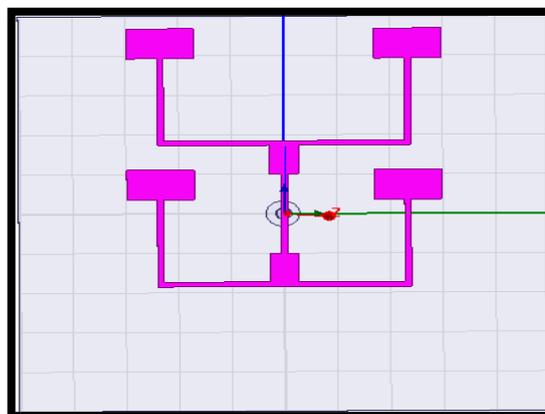
D'après la simulation et l'optimisation faites au paravent nous sommes arrivés au réseau d'antenne qui nous donne les bons résultats

Paramètre	L2	W1	Wf	Lf	h3
Réseau d'antenne de base	6.2	3.8	0.41	8.1	11.4
Réseau d'antenne optimisé	6.4	3.8	0.61	10.4	9

**Tableau 3.7** Dimensions du réseau d'antenne de base et du réseau d'antenne optimisé

**3.3.8 Simulation d'un réseau d'antenne de quatre éléments :**

De la même manière de la simulation précédente on prend les paramètres du réseau d'antenne de deux patchs optimisés pour simuler le réseau d'antennes de quatre éléments.



**Figure 3.20** Conception du réseau de quatre éléments du logiciel HFSS

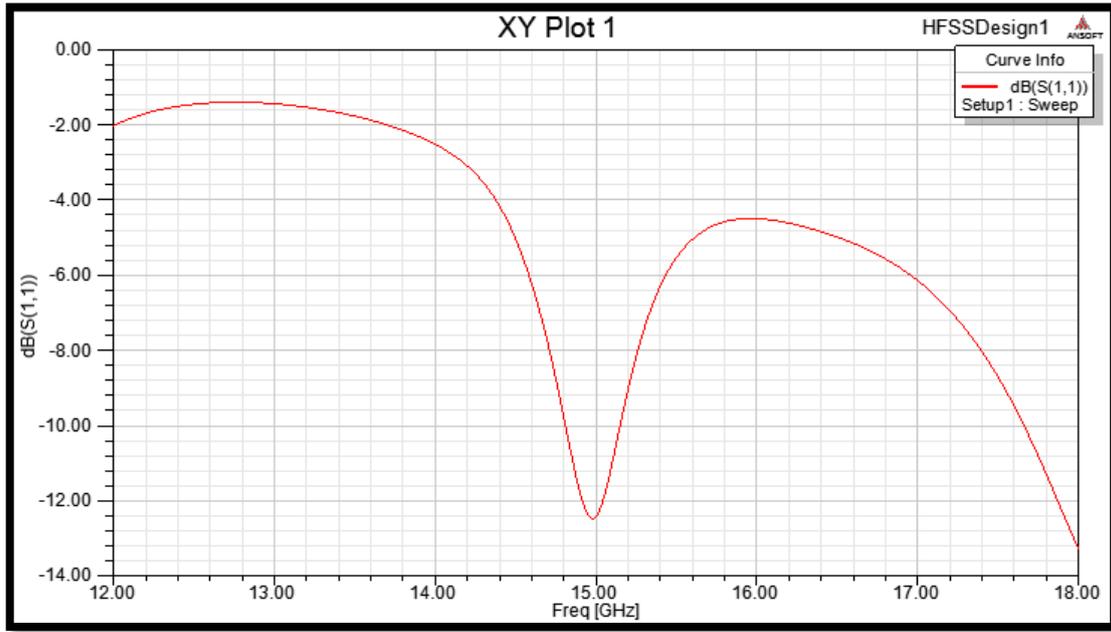
Paramètre	Symbole	Valeur
Longueur de substrat, plan de masse	Ls	50mm
Largeur de substrat, plan de masse	Ws	50mm
Longueur de patch	L2	6.4mm
Largeur de patch	W1	3.8mm
Longueur de ligne d'alimentation	Lf	10.4mm
Largeur de la ligne d'alimentation	Wf	0.61mm
Hauteur de substrat	hs	1.6mm
Hauteur de patch, plan de masse	h	0.035mm
Impédance d'entrée	Z0	50 ohm
Impédance caractéristique de la ligne d'alimentation	Zt	Zt=2Z0 100ohm
Impédance de la ligne d'adaptation	Z1	70.71
Distance de couplage	h3	9mm
Largeur de la ligne d'adaptation	Wf1	2.74mm
Longueur de la ligne d'adaptation	LM	3.67mm
Position de point d'alimentation	k	0

**Tableau 3.8** Paramètres du réseau d'antenne de quatre éléments

### 3.3.9 Résultat de la simulation :

#### 3.3.9.1 Le coefficient de réflexion :

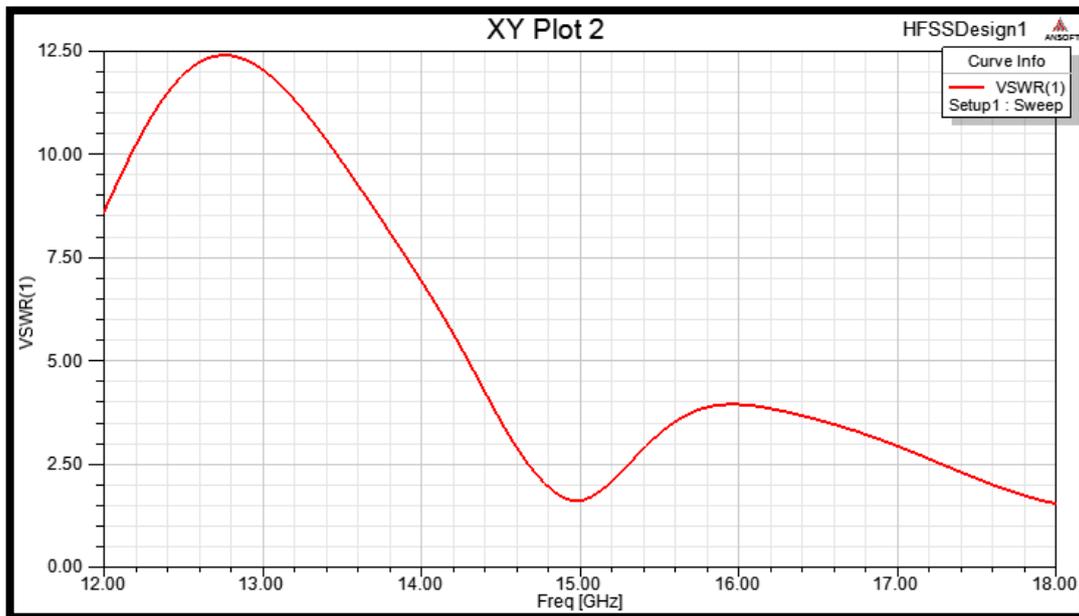
La (Figure 3.21) présente le coefficient de réflexion S11 (dB) du réseau d'antenne en fonction de la fréquence dans la bande [12-18] GHz.



**Figure 3.21** Coefficient de réflexion S11 pour le réseau d'antenne de quatre éléments

**3.3.9.2 Le taux d'ondes stationnaires :**

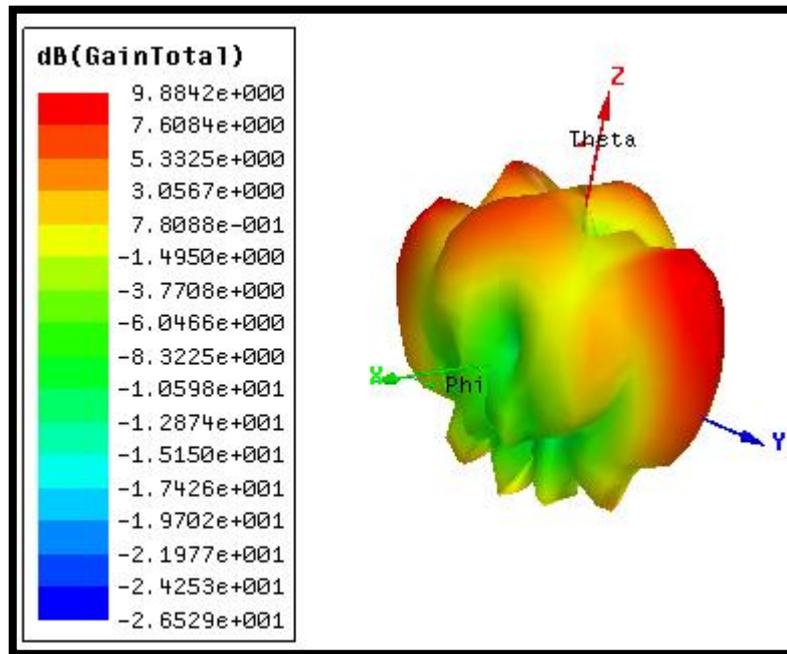
La (Figure 3.22) montre les valeurs du rapport d'ondes stationnaires calculées en fonction de la fréquence :



**Figure 3.22** Taux d'ondes stationnaires pour le réseau d'antenne de quatre éléments

**3.3.9.3 Le diagramme de rayonnement :**

La (Figure 3.23) présente le diagramme de rayonnement en 3D :



**Figure 3.23** Diagramme de rayonnement en 3D

Les (Figures 3.21, 3.22, 3.23) montrent que ce réseau d'antennes n'est pas adapté et a un faible gain.

Pour cela on a besoin de faire l'étude paramétrique afin d'obtenir des résultats satisfaisants

**3.3.10 Etude paramétrique :**

Le (Tableau 3.9) mentionne les paramètres à optimiser, toujours avec un pas de 0.1 mm :

Paramètre	L2	W1	Wf	Lf	h3	m	k
Intervalle	[6.4-6.8]	[3.8-4]	[0.31-0.81]	[3-11]	[8.5-12.5]	[9-15]	[-4-4]

**Tableau 3.9** Différents paramètres du réseau d'antenne à étudier

K : est la position du point d'alimentation selon l'axe (y)

**3.3.10.1 Résultats de l'étude paramétrique :**

Plusieurs résultats sont obtenus lors de cette études pour notre optimisation nous avons choisis les résultats qui sont proche à la fréquence de résonance.

Les résultats de l'étude paramétrique sont représentés par la (Figure 3.24).

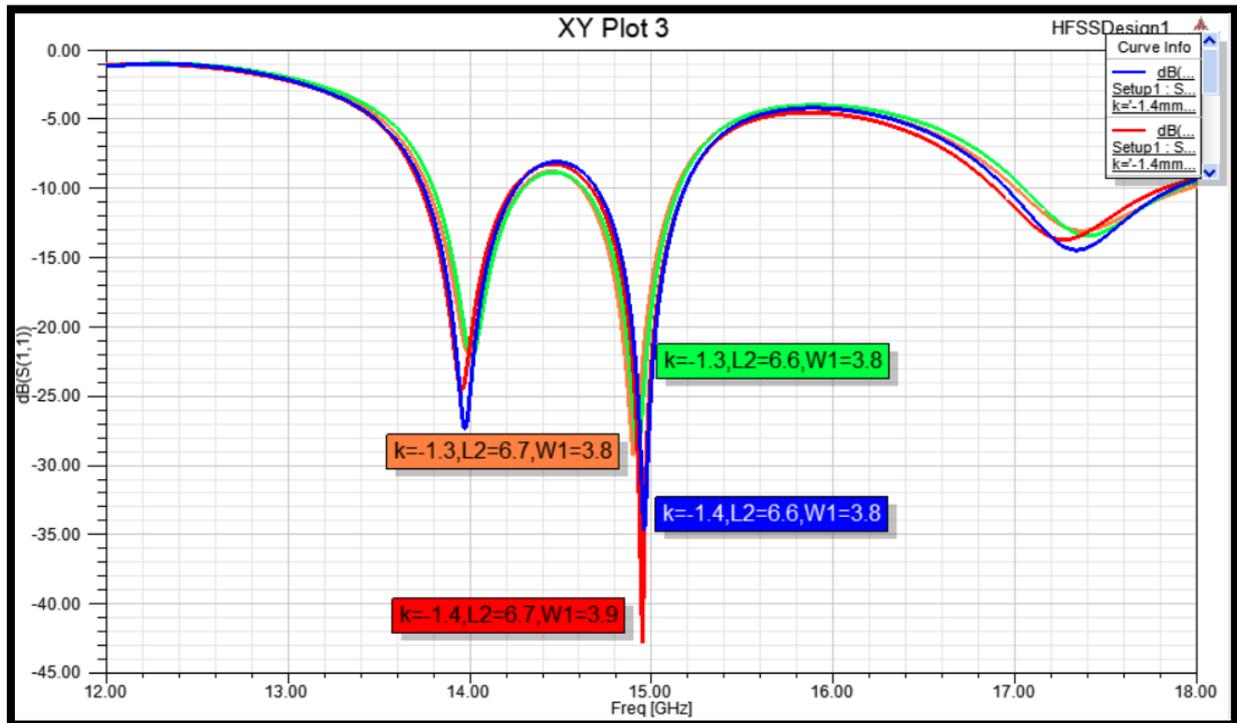


Figure 3.24 Résultats de l'étude paramétrique

➤ **Interprétation :**

Après avoir vérifié tous les résultats de l'études nous avons pu fixer les paramètres suivants  $h_3=12, m=12, L_f=4.5, W_f=0.31$ .

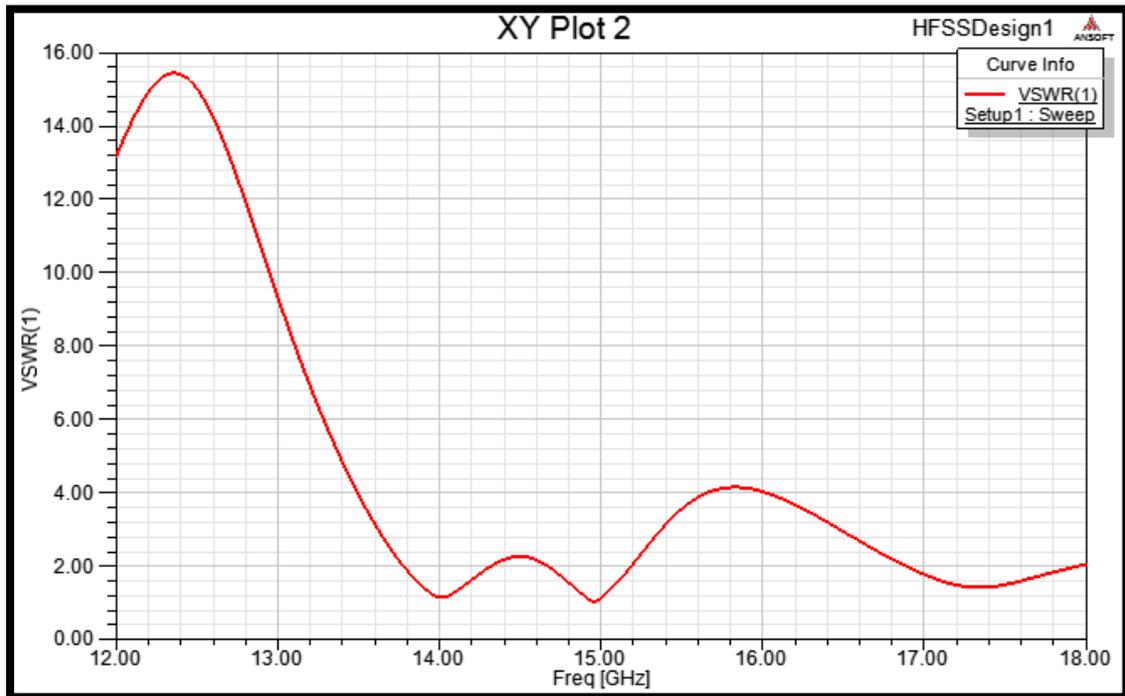
Les graphes mentionnés dans la (Figure 3.24) représentent le coefficient de réflexion, ces graphes contiennent deux pics :

- Le pique principal est celui qui est proche de la fréquence de résonance ;
- Le pique secondaire à la fréquence du 14GHz représente l'influence des lignes d'alimentation.

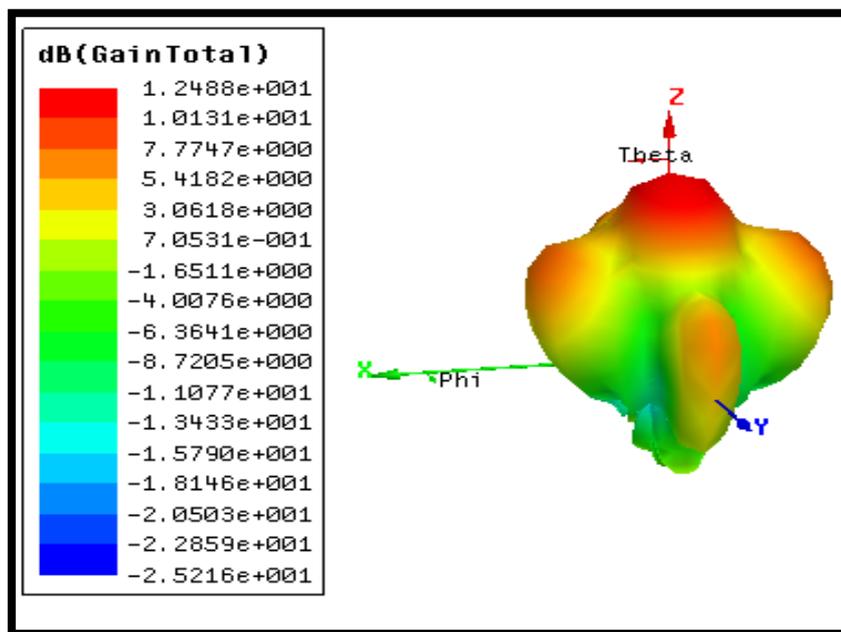
Nous nous intéressons beaucoup plus au pique principal.

Une variation de la position du point d'alimentation fait un décalage du pique principal vers la fréquence de résonance, nous constatons que la bonne position est pour  $k=-1.4$  suivant l'axe (y).

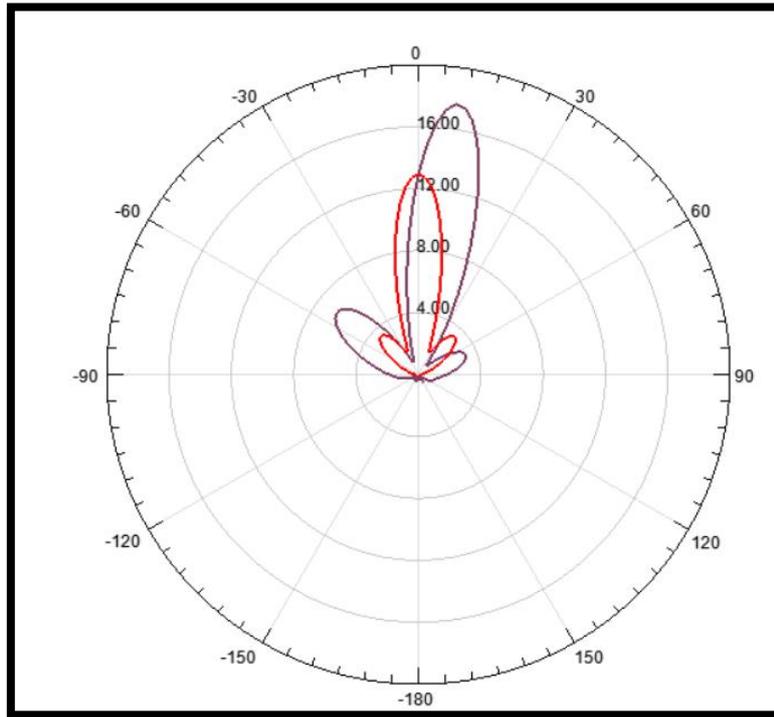
Un changement de  $L_2$  et  $W_1$  augmente l'amplitude du coefficient de réflexion, Par la suite on cite le taux d'onde stationnaire, le gain en 3D et le diagramme de rayonnement.



**Figure 3.25** Taux d'ondes stationnaires



**Figure 3.26** Gain en 3D



**Figure 3.27** Diagramme de rayonnement en 2D

Les (Figures 3.25, 3.26, 3.27) nous donne les résultats estimés

**3.3.10.2 Le réseau d'antenne patch optimisée:**

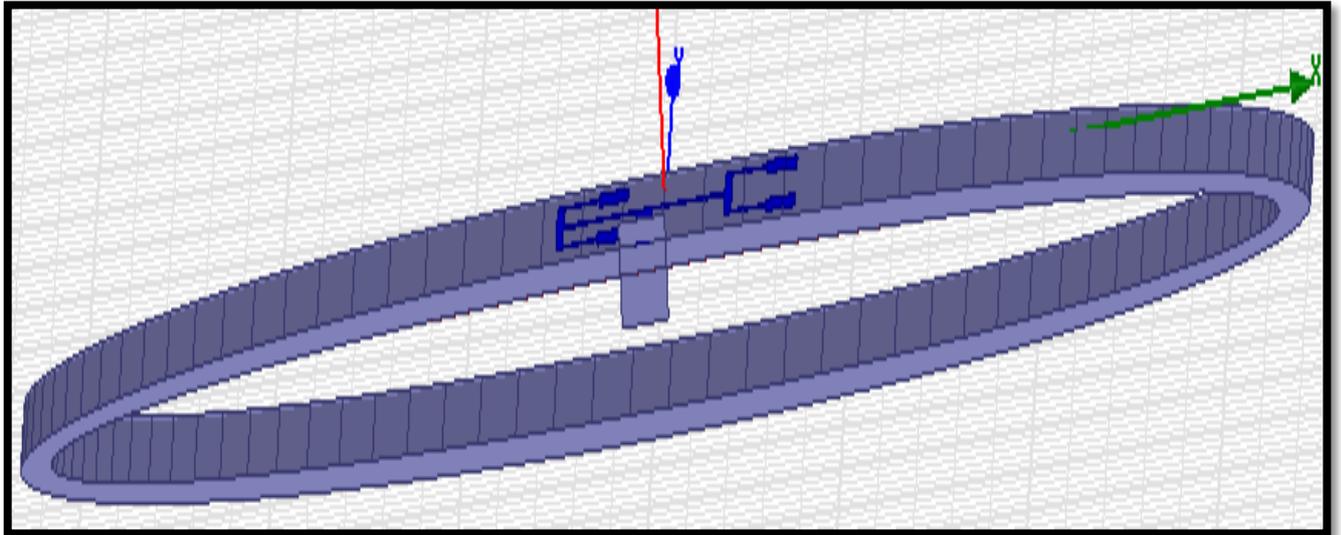
D'après la simulation et l'optimisation faite on a arrivé au réseau d'antenne qui nous donne les bons résultats :

Paramètre	L2	W1	Wf	Lf	h3	m	k
Réseau d'antenne de base	6.4	3.8	0.61	10.4	9	10	0
Réseau d'antenne optimisé	6.6	3.8	0.31	4.5	12	10	-1.4

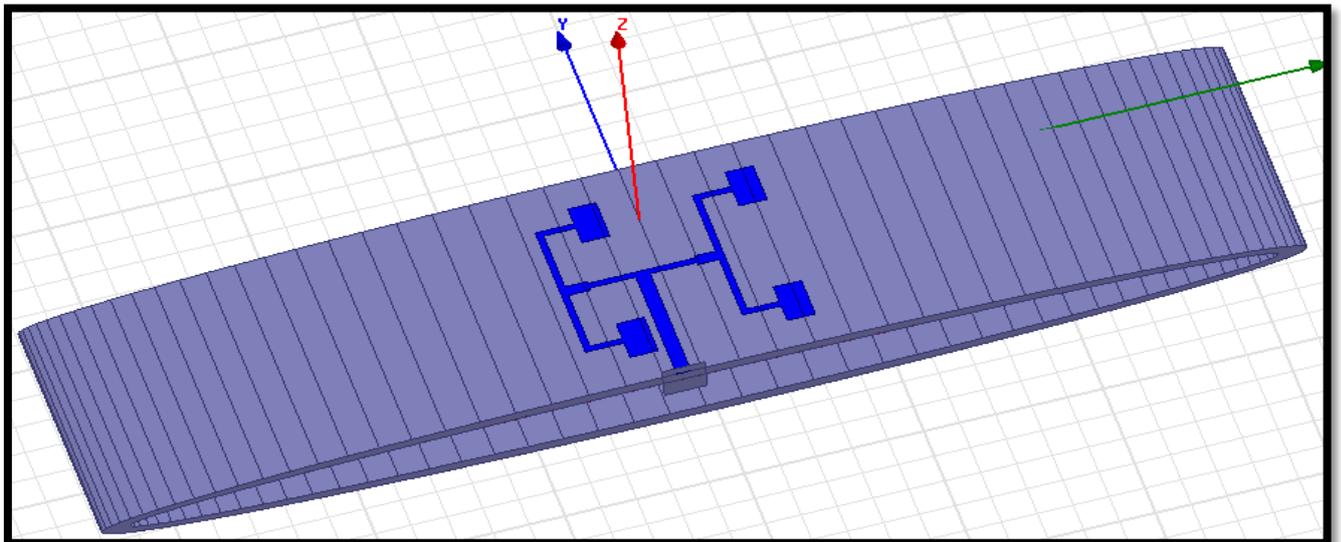
**Tableau 3.10** Dimensions du réseau d'antenne de base et du réseau d'antenne optimisé

**3.3.11 Simulation d'un réseau d'antenne conforme de quatre éléments :**

Vu à notre objectif du mémoire qui est l'étude et la conception d'un réseau d'antennes imprimées conformes pour la communication par satellite nous avons fait cette conception en utilisant les valeurs des paramètres obtenus à partir de l'étude paramétrique du réseau d'antennes de quatre patches. La (Figure 3.28) montre la structure du réseau installé sur l'ail du drone qui est pris comme substrat de forme elliptique.



**a)**



**b)**

**Figure 3.28** Conception d'un réseau d'antennes conforme de quatre éléments du logiciel

HFSS

Paramètre	Symbole	Valeur
Longueur de substrat	$L_s$	50mm
Premier axe	$a$	5.6mm
Deuxième axe	$b$	15mm
Largeur de substrat	$W_s$	40mm
Longueur de patch	$L_2$	6.7mm
Largeur de patch	$W_1$	3.9mm
Longueur de ligne d'alimentation	$L_f$	4.5mm

Largeur de la ligne d'alimentation	Wf	0.31mm
Hauteur de substrat	hs	1.6mm
Hauteur de patch, plan de masse	h	0.017mm
Impédance d'entrée	Z0	50 ohms
Impédance caractéristique de la ligne d'alimentation	Zt	Zt=2Z0 100ohm
Impédance de la ligne d'adaptation	Z1	70.71
Distance de couplage	m	10mm
Distance de couplage	h3	12mm
Largeur de la ligne d'adaptation	Wf1	2.74mm
Longueur de la ligne d'adaptation	LM	3.67mm
Position de point d'alimentation	k	-1.4

**Tableau 3.11** Dimension des différents paramètres du réseau d'antennes conforme

**3.3.12 Résultat de la simulation :**

**3.3.12.1 Le coefficient de réflexion :**

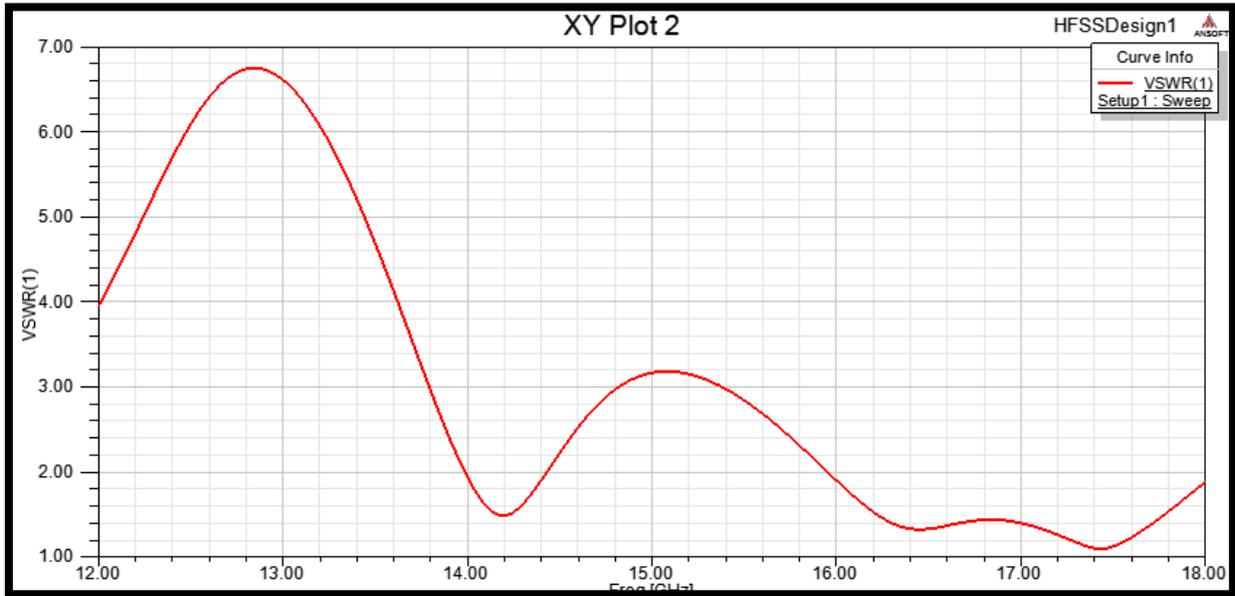
La (Figure 3.29) exprime le coefficient de réflexion S11 en fonction de la fréquence



**Figure 3.29** Coefficient de réflexion S11

**3.3.12.2 Le taux d'ondes stationnaires :**

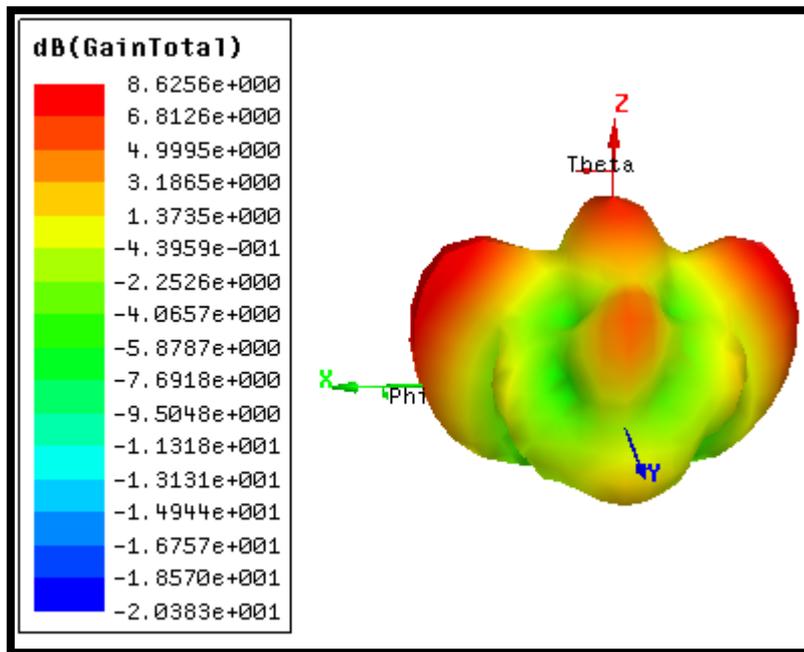
La (Figure 3.30) représente les valeurs du taux d'onde stationnaire :



**Figure 3.30** Taux d'ondes stationnaires TOS (VSWR)

**3.3.12.3 Le diagramme de rayonnement :**

La (Figure 3.31) exprime le gain en 3D :



**Figure 3.31** Diagrammes de rayonnement en 3D

Ces résultats ne sont pas désirés donc on est obligé de faire une étude paramétrique

**3.3.13 Etude paramétrique :**

Dans cette étude nous avons mis le point sur l'influence des différents paramètres du réseau d'antennes conforme pour obtenir les résultats désirés

Le (Tableau 3.12) présente les intervalles des différents paramètres à étudier :

Paramètre	L2	W1	Wf	Lf	h3	m
Intervalle	[6.7-9]	[3.9-7]	[0.31-0.81]	[3-11]	[8.5-12.5]	[9-15]

Tableau 3.12 Différents paramètres de l'antenne à optimiser

### 3.3.13.1 Résultat de l'étude paramétrique :

La (Figure 3.32) montre ces résultats dans les intervalles cités au (Tableau 3.12) :

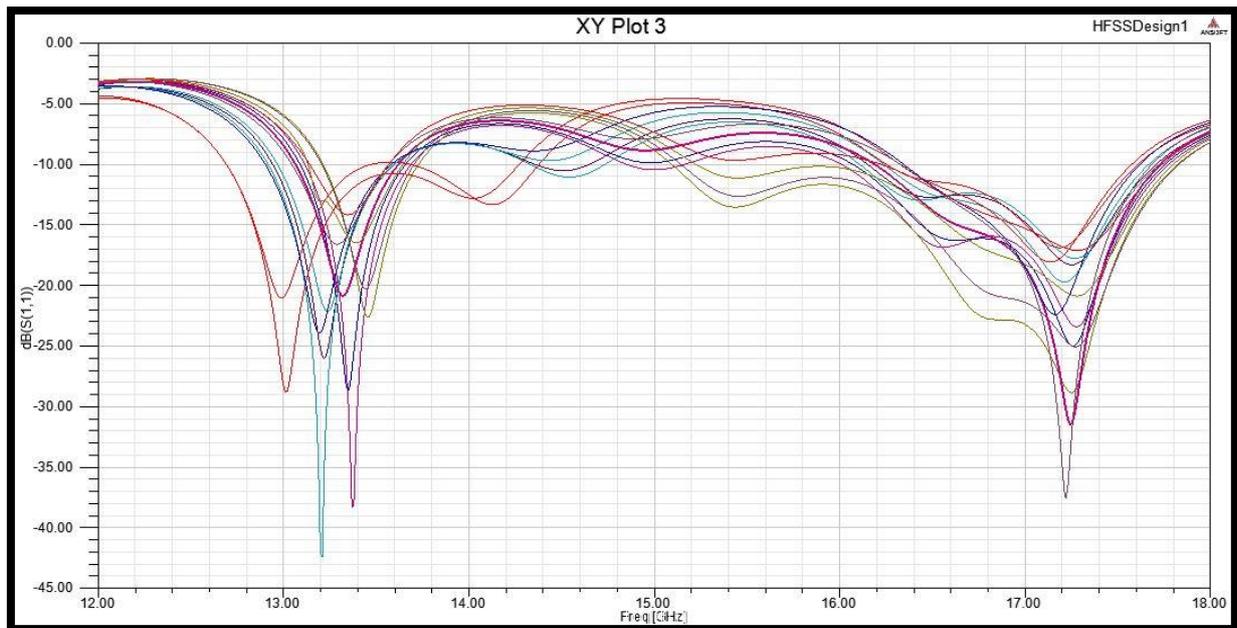


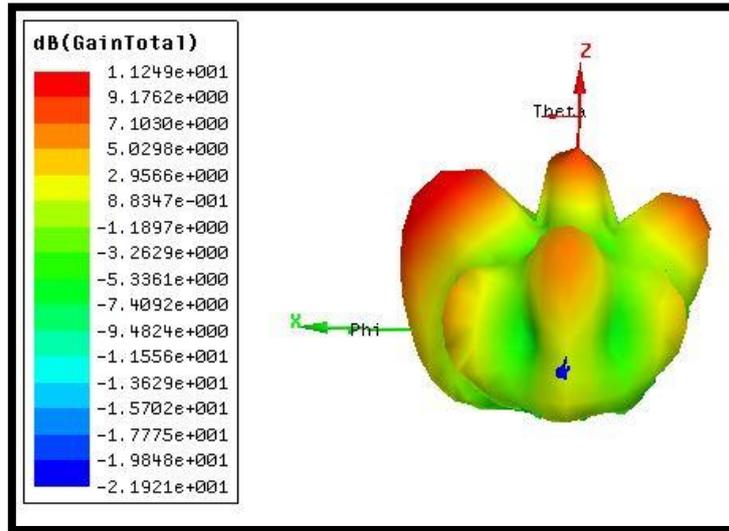
Figure 3.32 Résultat d'étude paramétrique

#### ➤ Interprétation :

La (Figure 3.32) nous permet d'observer l'influence des différents paramètres du réseau d'antennes.

Tous les paramètres influent sur l'amplitude du coefficient de réflexions et non sur le décalage du pique vers la fréquence de résonance.

Pour cette raison on n'a pas pu arriver à décaler le pique vers la fréquence de résonance



**Figure 3.33** Gain en 3D

Le gain du réseau d'antennes est amélioré après cette étude portant qu'il n'est pas bien adapté.

### 3.4 Conclusion :

Pour la réalisation d'un réseau d'antennes conforme, nous étions obligés de passer par plusieurs étapes, nous avons commencé par la conception d'une seule antenne non optimisée puis nous avons l'optimisé.

Nous avons utilisé les résultats obtenus pour la conception du réseau de deux éléments, nos résultats n'étaient pas satisfaisants, donc nous étions aussi obligé d'optimiser cette conception, par la suite nous avons pris ces résultats pour concevoir un réseau d'antennes de quatre éléments.

En faisant la simulation nous avons constaté que les résultats obtenus ne sont pas désirés donc on a optimisé ce réseau de quatre éléments : et on a obtenus des résultats estimés.

En fin on a utilisé les résultats obtenus dans l'optimisation du réseau de quatre éléments pour faire concevoir le réseau d'antenne conforme.

Les résultats de la conception ne sont pas satisfaisants donc on était obligé de faire une étude paramétrique, cette étude nous permet d'améliorer le gain de la valeur  $G=8.6256\text{db}$  à  $G=11.249\text{db}$  avec une désadaptation remarquable à cause de notre ordinateur non puissant que nous n'avons pas pu arriver à une adaptation de ce réseau.

---

CONCLUSION  
GENERALE

---

### **Conclusion générale :**

L'organisation de notre travail nous a permis de bien assimiler l'ensemble des connaissances collectées dans le domaine des antennes et de communication par satellite. Nous avons dans un premier temps présenté la communication par satellite en mettant le point sur le bilan de liaison satellite terre et les différentes antennes existantes pour assurer cette liaison.

L'objectif principal de ce travail était la simulation et l'optimisation d'un réseau d'antennes conforme imprimée sous forme rectangulaire adapté sur les bandes de fréquences [12GHz-18GHz].

Nous avons apporté quelques modifications sur cette structure pour élargir sa bande passante à l'aide du logiciel de simulation hyperfréquence HFSS.

L'étude s'est portée sur une variation des dimensions du substrat, de la largeur du plan de masse, de la ligne d'alimentation et des dimensions de l'antenne. Pour ce faire, on a utilisé une étude paramétrique qui consiste à faire varier tous les paramètres pour étudier leurs influences sur la performance de l'antenne. Cette étude nous a permis d'atteindre notre objectif. On a réussi à améliorer le gain mais avec une désadaptation remarquable à cause de notre ordinateur non puissant.

Ce réseau est réalisable vu aux résultats satisfaisants obtenus si on les exécute avec un ordinateur puissant.

---

# Références

---

---

## Webographie

- [1] Futura Sciences . <http://www.futura-sciences.com/magazines/espace/infos/actu/d/utilisation-espace-plus-1000-nouveaux-satellites-seront-lances-ici-2023-54916>, Aout2014.
- [2] EUTELSAT . <http://www.eutelsat.com/en/services/broadcast-media.html>, Avril2015.
- [3] EUTELSAT. <http://www.eutelsat.com/fr/satellites/trouvez-un-satellite.html>, Avril2015.
- [4] Intelsat.Services <http://www.intelsat.com/services/>.
- [5] INTELSAT. <http://www.intelsat.com/news/intelsat-and-phasor-partner-on-new-antenna-technology-to-enable-ku-band-broadband-connectivity-to-civil-and-government-small-jet-aviation-marketplace/>, March2015.

## Bibliographie

- [6] Roger-Charles Houzée. *Les antennes. Tome 2, L'électronique de l'antenne, les paraboles*, volume 1 vol of 9782100041206. DUNOD, 2<sup>e</sup> édition edition, 1998.
- [7] E. Rammos. A new wide band, high gain suspended substrate line planar array for 12 ghz satellite t.v. In *Micro wave Conference, 1983. 13th European*, pages 227–231, Sept 1983.
- [8] E. Rammos. A low tolerance dual slot radiator for space and ground applications. In *Antennas and Propagation Society International Symposium, 1991. AP-S.Digest*, pages 1599–1602 vol.3, June 1991.
- [9] S. Kitao, E.T. Rahardjo, A. Matsui, and M. Haneishi. Ku-band planar array using ring shaped patch antenna. In *Antennas and Propagation Society International Symposium, 1993. AP-S.Digest*, pages 972–975 vol.2, June 1993.
- [10] Takao Murata and Masaru Fujita. A self-steering planar array antenna for satellite broad cast reception. *Broadcasting, IEEE Transactionson*, 40(1):1– 6, Mar 1994.
- [11] S. Tanaka, Masaru Fujita, H. Mitsumoto, Takao Murata, K. Takano, K. Imai, K. Shogen, and N. Toyama. Hardware performance and experimental results of portable digital sng equipment using a flat antenna. In *Global Telecommunications Conference, 1996. GLOBECOM'96. 'Communications: The Key to Global Prosperity*, volume 2, pages 813–818 vol.2, Nov 1996.
- [12] V. Peshlov, R. Traykov, G. Bozmarova, M. Popova, D. Vasilev, Z. Ivanov, and S. Alexandrov. Low-cost scanning antenna for satellite reception. In *Phased Array Systems and Technology, 2003. IEEE International Symposium on*, pages 441–445, Oct 2003.
- [13] Ung Hee Park, Haeng Sook Noh, Seong Ho Son, Kyong Hee Lee, and Soon Ik Jeon. A novel mobile antenna for ku-band satellite communications. *ETRI Journal*, vol.27(no.3):pp.243–249, June 2005.

- [14] F. Tiezzi and S. Vaccaro. Hybrid phased array antenna for mobile ku-band dvb-s services. In *Antennas and Propagation, 2006. EuCAP2006. First European Conference on*, pages 1–4, Nov 2006.
- [15] R. Wansch, H. Adel, and H. Humpfer. Miniterminal—a small antenna for satellite reception. In *Antennas, 2007. INICA '07. 2<sup>nd</sup> International ITG Conference on*, pages 153–157, March 2007.
- [16] Renxin Che, Baoyu Dong, and Chong Yu. Study and design of ku band direct broadcast satellite microstrip antenna array. In *Communications Technology and Applications, 2009. ICCTA '09. IEEE International Conference on*, pages 952–957, Oct 2009.
- [17] P. Mousavi, M. Fakharzadeh, and S. Safavi-Naeini. 1k element antenna system for mobile direct broadcasting satellite reception. *Broadcasting, IEEE Transactions on*, 56(3) :340–349, Sept 2010.
- [18] J.A. Encinar, M. Arrebola, L. F. de la Fuente, and G. Toso. A transmit-receive reflect array antenna for direct broadcast satellite applications. *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, 59(9) :3255–3264, Sept 2011.
- [19] M.A. Motin, M. I. Hasan, and M. Asaduz-Zaman. Design and optimization of a low cost multi band microstrip patch antenna for k-band, ku-band and x-band applications. In *Computer and Information Technology (ICCIT), 2012 15th International Conference on*, pages 615–620, Dec 2012.
- [20] Odile Picon et coll, “*Les antennes Théorie, conception et application*“, Dunod, Paris, 2009, ISBN 978-2-10-054245-1.
- [21] GROSSE, C. ; TIRADO, M. : “*Animating field lines*“. *Education, IEEE Transactions on*. Vol. 39, Issue 1, Feb. 1996. pp. 69-76.
- [22] DARKO, K., J.; GERALD J., A.: “*Plotting Vector Fields with a Personal Computer*“. *IEEE transactions on microwave theory and techniques*, Vol. MTT-35, N. 11, November 1987. Pp.1069-1072.
- [23] STALLING, D.; ZOCKLER, M.; HEGE, H.-C: “*Fast display of illuminated field lines*“. *Visualization and Computer Graphics, IEEE Transactions on*. Vol. 3, Issue 2, June 1997. pp. 118–128.

- [24] Balanis, C.A., "*Antenna Theory: Analysis and Design*", John Wiley & Sons, Inc, 1997.
- [25] Makarov, S.N., "*Antenna and EM Modeling with MATLAB*", John Wiley & Sons, Inc, 2002.
- [26] Ulaby, F.T., "*Fundamentals of Applied Electromagnetics*", Prentice Hall, 1999.
- [27] Leila Chouitti, "contribution à l'étude d'antenne imprimées rectangulaires doubles bandes et multi-bandes tenant compte de l'effet de couplage", Thèse magistère, Institut d'électronique, Université de Constantine, 2009.
- [28] Ali CHAMI, "Miniaturisation et intégration d'antennes imprimées pour systèmes Communicants ULB pulsés", thèse doctorat, Université de Nice-Sophia Antipoli, novembre 2011.
- [29] Ahmed BENOMAR, " Etude des Antennes à Résonateurs Diélectriques. Application aux Réseaux de Télécommunications ", thèse doctorat, Université Abou Bekr Belkaid, Tlemcen, juin 2015.
- [30] REFICE Mohamed Lamine, "Modélisation et simulation des antennes en onde Millimétrique à base de méta-matériaux.", mémoire de Magister, Université Ziane Achour de Djelfa, 2014.
- [31] D. Khedrouche, "Modélisation des antennes microbandes par une analyse tridimensionnelle rigoureuse en utilisant une méthode intégrale," Thèse de Doctorat, Université de Constantine, Juin 2009.
- [32] AZZAZ RAHMANI Salima, " ANALYSE ET CONCEPTION DES ANTENNES IMPRIMEES MULTIBANDES EN ANNEAUX CONCENTRIQUES POUR LES RESEAUX DE TELECOMMUNICATIONS ", Thèse De Doctorat, Université Abou Bakr Belkaid–Tlemcen, Juillet 2013.
- [33] ABLA BEHLOUL, " Contribution à l'étude des antennes microstrip Supraconducteur deforme triangulaire", Mémoire de Magister, Université Mentouri Constantine, Avril 2010.
- [34] Rabia Yahya, " Etude et la réalisation des antennes ultra LARGE BANDE À DOUBLE POLARISATION". Mémoire pour l'obtention grade Maître ès sciences, Université du Québec INRS- ÉMT, 2011.
- [35] KAID OMAR Omar, " Conception et modélisation d'une antenne pour les

- communications pour -Ultra Large Bande-" thèse doctorat, Université Des Sciences Et DeTechnologie D'Oran, avril 2013.
- [36] A. Boufrioua, "Contribution à l'étude des antennes a patch résistifs et parfaitement conducteur tenant compte d'une source d'excitation et des nouvelles formes asymptotiques de courant " , thèse de Doctorat, Institut d'électronique, Université de Constantine, 11 /2006.
- [37] Electronic Radio and Engineering. F.R. Terman. MacGraw-Hill.
- [38] H. J. Visser, "Array and phased array antenna basics " John Wiley & Sons Ltd, The
- [39] K.R. Carver, W.H. James Microstrip antennas technology. IEEE Trans. on Antennas and Propagation, Vol. AP-32, No. 8, 1984, pp. 884-887.
- [40] Radio Research Laboratory (U.S.), "Very High-frequency Techniques," McGraw Hill, New York, 1947, pp.1-25, Chap 1.
- [41] F.T. Bendimerad Synthèse de réseaux non périodiques d'antennes micro rubans à loi d'alimentation uniforme ou prédéterminée. Thèse de Docteur de l'Université, Université deNice Sophia Antipolis, France, Juin1989.