

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE.

Université BELHDJ BOUCHAIB-AIN TEMOUCHENT

Institut de technologie



Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Télécommunication

Projet de fin d'études Pour l'obtention du diplôme de Master en : Réseau et
Télécommunications

Thème

Simulations d'un réseau d'antenne patch en bande "S" pour un nano satellite

Présenté Par :

Bouhmida hayat & Boulahia mimouna sihame

Devant le jury composé de :

<i>Dr. Bencherife Kadoure</i>	<i>C.U.B.B (Ain Temouchent)</i>	<i>Président</i>
<i>Dr. Ayachi Choukriya</i>	<i>C.U.B.B (Ain Temouchent)</i>	<i>Examineur</i>
<i>Dr. Slimani zouhra</i>	<i>C.U.B.B (Ain Temouchent)</i>	<i>Encadrant</i>
<i>Dr. RABAH Mohammed Amin</i>	<i>CDS (Oran)</i>	<i>Co-Encadran</i>

2019/2020

Remerciements

Tout d'abord, nous tenons à remercier Dieu Tout-Puissant de nous avoir donné le courage, la volonté, la force et la patience de faire ce travail. Nous tenons à exprimer, à travers ce modeste travail, notre gratitude, notre gratitude et nos grands remerciements à notre superviseur, Dr. "Slimani. Zahra "et Dr " Rabah.Mohammed Amin "pour ce sujet et pour nous faire bénéficier de ses compétences scientifiques afin de le rendre disponible. Nous remercions particulièrement les membres du jury qui ont accepté de lire et juger nos travaux, et nous tenons à remercier tous ceux qui nous ont aidés à distance ou même un petit conseil.

Dédicace

À ma chère maman, je vous dois qui je suis aujourd'hui grâce à votre amour, votre patience et vos sacrifices innombrables. J'espère que cet humble travail compense un peu et je vous suis reconnaissant pour tout ce que vous avez fait pour moi. Que Dieu Tout-Puissant vous protège et vous rassure sur la longévité et la santé.

À mes chères sœurs, "Houda.Ahlam", aucune dédicace n'exprimera profondément ce que je ressens pour vous deux. Je vais juste te dire merci, je t'aime.

Au mari de ma sœur « Maachou » et à leurs enfants « Youssef. Ramal », malgré la distance, vous êtes toujours dans mon cœur. Je vous dédie ce travail avec mes meilleurs vœux de bonheur, de santé et de réussite.

À mon partenaire « Sihame » et à mes amis « Fatiha.Majda.Imane », je vous souhaite un avenir plein de joie, de bonheur et de réussite. « Hayat »

Dédicace

A mon cher papa

Aucune dédicace ne serait exprimer l'amour, l'estime et le respect que j'ai toujours eu pour vous.

Rien au monde ne vaut les efforts fournis jour et nuit pour mon éducation et mon bien être.

Ce travail est le fruit de tes sacrifices que tu as consentis pour mon éducation et ma formation. « Merci papa »

A ma chère mère

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

Je te dédie ce travail en témoignage de mon profond amour. Puisse Dieu, le tout puissant, te préserver et t'accorder santé, longue vie et bonheur. A mon frère et sœur « yassine.imane »

Je vous souhaite un avenir plein de joie, de bonheur, de réussite et de sérénité. Je vous exprime à travers ce travail mes sentiments de fraternité et d'amour. Je dédie ce modeste travail aussi

A Ma tante et mes grands parents

A tout mes amis "fatiha.majeda.imane" sans exception.

A toute la promotion Master II télécommunication 2020.

A ma binôme "Hayat" et sa famille.

A tous ce qui m'ont aidée de près ou de loin dans la réalisation de ce travail. "sihame"

Sommaire

Remerciements	2
Liste des figures	Erreur ! Signet non défini.
Liste des tableaux	Erreur ! Signet non défini.
Liste des abréviations	13

« Généralités sur les antennes »

Introduction générale	15
I.1 Introduction :	17
I.2 Historique :	18
I.3 Ondes électromagnétique :	18
I.3.1 Définition de l'OEM :	18
I.3.2 Les sources des OEM :	20
I.3.3 Les paramètre d'OEM :	20
I.3.4 Le spectre électromagnétique :	21
I.4 Les Antennes :	22
I.4.1 L'antenne isotrope :	23
I.4.2 Densité de puissance d'une antenne :	24
I.5 Caractéristiques des antennes :	25
I.5.1 Directivité $D(\theta, \varphi)$	25
I.5.2 Rendement de l'antenne :	25
I.5.3 Gain :	26
I.5.4 Ouverture :	26
I.5.5 Impédance d'entrée :	27
I.5.6 Coefficient de réflexion S11 :	27
I.5.7 Diagramme de rayonnement :	28
I.5.8 Le VSWR (Voltage Standing Wave Ratio):	29
I.5.9 La bande passante (BP) :	29
I.6 Types d'antennes :	30
I.6.1 Antennes élémentaires :	30
I.6.2 Antennes à réflecteurs :	30
I.6.3 Antenne pour guide d'onde :	31
I.6.4 Antennes imprimées (micro-ruban) :	31
I.7 Description d'une antenne imprimée ou "patch" :	32

I.8 Les techniques d'alimentation :	33
I.8.1Alimentation par ligne micro-ruban :	34
I.8.2. Alimentation par sonde coaxiale :	34
I.8.3 Alimentation par couplage par fente :	35
I.8.4Alimentation par couplage de proximité :	36
I.9.Technique d'augmentation du Gain	38
I.9.1. Technique des réseaux d'antenne :	38
I.9.2. Technique de déformation du patch :	38
<i>Figure. I. 21 : Augmentation de la performance des antennes</i>	39
I.10Bilan de liaison :	39
I.11 Applications :	40
I.12 Conclusion :	41
II.1 Introduction :	43

Les satellites

II.2 Historique :	43
II.3 Définition du satellite :	44
II.4 Les orbites :	45
II.4.1 Définition d'orbites :	45
II.4.2 lois de « Kepler » appliquées aux satellites artificiels :	45
II.5 Les six paramètres orbitaux :	46
II.6 Les différents types d'orbites :	48
II.7 Les applications des satellites :	49
II.8 Architecture d'un système de télécommunications par satellite :	50
II.9 Description système d'un nano satellite :	51
II.10 Les nano satellites :	54
II.11 Dénomination des bandes de fréquences :	54
II.12 Avantages et inconvénients :	55
II.13 Conclusion :	56

Résultats de simulations

III.1 Introduction :	58
III.2 La bande S :	58
III.3 Conception d'une antenne patch :	58
III.3.1. Calcul de la permittivité effective de l'élément rayonnant :	59
III.3.2. Calcul de la longueur du patch L :	59
III.3.3. Calcul de la largeur du patch W:	59
III.4. Technique d'adaptation d'antenne:	60
III.4.1. Adaptation avec encoche :	60
III.4.2 Calcul de l'extension de longueur de patch :	60
III.5 Antenne patch carré alimenté par ligne micro ruban	62
III.5.1 Simulation de l'antenne patch carré à la fréquence 2.5GHz	62
III.5.2 Coefficient de réflexion S [1,1] de l'antenne carré avec une ligne micro ruban	63
III.5.3 VSWR de l'antenne carré adaptée à la fréquence 2.5GHz	64
III.5.4 le gain d'antenne :	64
III.5.5 Diagramme de rayonnement de l'antenne carré adaptée à la fréquence 2.5GHz :	65
III.6 Résultats de simulations de la nouvelle géométrie d'antenne patch :	66
III.6.1 Coefficient de réflexion S [1,1] de la nouvelle géométrie d'antenne avec une ligne micro ruban	67
III.6.2 VSWR de la nouvelle géométrie d'antenne adaptée à la fréquence 2.5GHz :	68
III.6.3 le gain d'antenne :	69
III.6.4 Diagramme de rayonnement de la nouvelle géométrie d'antenne adaptée à la fréquence 2.5GHz :	69
III.7 Résultats de simulation du réseau :	70
III.7.1 Coefficient de réflexion S [1,1] de réseau d'antenne 2*1 avec une ligne micro ruban :	71
III.7.2 VSWR de réseau l'antenne 2*1 :	71
III.7.3 le gain d'antenne :	72
III.7.4 Diagramme de rayonnement de réseau l'antenne 2*1 :	72
III.7.5 Coefficient de réflexion S [1,1] de réseau d'antenne 4*1 avec une ligne micro ruban	74
III.7.6 VSWR de réseau l'antenne 4*1 :	75
III.7.7 le gain d'antenne :	75

III.7.8 Diagramme de rayonnement de réseau l'antenne 4*1 :	76
III.9 Conclusion :	77
Présentation de l'outil de simulation CST	79
1. Description du logiciel de simulation CST Studio Suite :	80
2. Modules de CST L'outil CST :	81
3. Les modules d'exécution	82
4. Etapes à suivre pour une simulation réussie	83

Liste des figures :

Figure I.1 L'onde électromagnétique.....	1
Figure I.2 Types de polarisation.....	19
Figure I.3: Le spectre électromagnétique.....	20
Figure I.4:Rayonnement d'une antenne isotrope.....	21
Figure I.5 : Système de coordonnées de référence et notion d'angle solide.....	22
Figure I.6 : Diagramme de rayonnement et angle d'ouverture.....	24
Figure I.7 : Diagramme de rayonnement d'une antenne directive.....	26
Figure I.8 : Bande passante.....	27
Figure I.9 : Antenne YAGI (antennes dipolaires)	27
Figure I.10 : Réflecteur parabolique.....	28
Figure I.11 : Antenne cornet.....	28
Figure I.12:Antenne patch rectangulaire.....	29
Figure I.13 : Structure d'une antenne patch.....	30
Figure I.14 : Les différents types d'éléments rayonnant.....	30
Figure I.15: Alimentation par ligne micro-ruban.....	31
Figure I.16 : position par rapport à l'axe.....	31
Figure I.17 : Alimentation par sonde coaxiale.....	32
Figure I.18: Alimentation par couplage par fente.....	33
Figure I.19 : Alimentation par couplage de proximité.....	33
Figure I.20: Transfert de puissance entre une station de base et une station mobile.....	35
Figure I.21. différents types des réseaux d'antenne patch.....	36
Figure. I. 22 : Augmentation de la performance des antennes.....	37
Figure I.23 : Transfert de puissance entre une station de base et une station mobile.....	42
Figure II.1 : Satellite géostationnaire.....	42
Figure II.2: Satellites de communication	44
Figure II.3: Composantes d'un système de télécommunications par satellite.....	45
Figure II.4 : Paramètres orbitaux	48
Figure II.5: Les types des orbites	49
Figure II.6 : Vue globale du système englobant segment spatial et segment au sol.....	50
Figure II.7: Sous-systèmes du segment spatial.....	55
Figure III. 1. Les dimensions d'une antenne patch.....	58
Figure. III. 2 : un patch normal.....	58
Figure III.3 : Un patch avec encoche.....	59
Figure III.4 : Antenne patch carré avec encoche pour $F=2.5\text{GHz}$	61
Figure III.5 : Coefficient de réflexion S_{11}	61
Figure.III. 6 :VSWR simulé.....	62
La Figure III.7 : le gain d'antenne.....	63
Figure III.8 : Diagramme de rayonnement 3D et polaire.....	64
Figure III.9 : nouvelle géométrie d'antenne patch avec encoche.....	64
Figure III.10: nouvelle géométrie d'antenne patch avec encoche avec longueurs du triangle.....	64
	65

Figure III.11 : Coefficient de réflexion S_{11}	66
Figure III.12 : VSWR de la nouvelle géométrie.....	67
Figure III.13 : le gain d'antenne.....	67
Figure III.14 : Diagramme de rayonnement 3D et polaire.....	68
Figure III.15: réseau d'antennes alimentation parallèle 2*1.....	68
Figure III.16 : Coefficient de réflexion S_{11} de réseaud'antenne2*1.....	69
Figure III.17:VSWR de réseau l'antenne.....	70
Figure III. 18 : le gain d'antenne	71
Figure III.19 : Diagramme de rayonnement 3D et polaire de réseau d'antenne.....	71
Figure III.20: réseau d'antennes alimentation parallèle 4*1.....	72
Figure III.21 : Coefficient de réflexion S_{11} de réseau d'antenne.....	72
Figure III.22:VSWR de réseau l'antenne	72
Figure III. 23 : le gain d'antenne	73
Figure III.24 : Diagramme de rayonnement 3D et polaire de réseau d'antenne.....	73

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Les équations de Maxwell.....	18
Tableau I.2: Avantages et inconvénients de différentes techniques d'alimentation.....	34
Tableau II. 1 : premier satellite mis en orbite par un lanceur.....	41
Tableau II.2: Bandes de fréquences et services	52
Tableau III.1 Les valeurs de paramètre.....	60
Tableau III.2 : Gain et directivité d'antenne carré.....	63
Tableau.III. 3.des longueurs du triangle	64
Tableau III.4 : Gain et directivité de la nouvelle géométrie d'antenne avec	67
Tableau III.5 : Gain et directivité de réseau l'antenne.....	70
Tableau III.6 : Gain et directivité de réseau l'antenne.....	73

Liste des abréviations

2D et 3D deux dimensions et trois dimensions

CST *Computer Simulation Technologie*

DB *Décibel*

DCS *Direction cohésion sociale, Digital Cellular System*

OEM L'onde électromagnétique

VSWR Voltage Standing Wave Ratio.

Wi-Fi *Contraction de Wireless Fidelity.*

Wi Max *Worldwide Interoperability for Microwave Access désigne un standard de communication sans fil.*

RESUME

Les communications et en particulier les communications sans fil sont aujourd'hui dans la pleine croissance. Avec l'augmentation des besoins de débits élevés et de la raréfaction des bandes de fréquence disponibles, il est devenu essentiel de trouver les nouvelles solutions qui répondent à ces exigences.

Le domaine des télécommunications a connu un progrès technologique au cours des

Dernières années grâce à la forte demande de la population et de l'industrie. Parmi les préoccupations de ce domaine, on trouve les antennes. Ce sont des éléments indispensables pour assurer une opération d'émission ou de réception des ondes électromagnétiques dans l'atmosphère terrestre ou dans l'espace. Elles sont présentes dans tous les systèmes de communication sans fil.

Dans le cadre de notre travail nous avons donné en premier lieu une généralité sur les antennes, en deuxième lieu de notre travail nous avons présenté les définirons les plus importantes utilisées dans le domaine des satellites .et en dernier nous avons proposé une nouvelle géométrie d'antenne qui présente des caractéristique optimales et pourra éventuellement satisfaire les critères en terme de bande passante et de rayonnement

Le réseau conçu de cette antenne présente des performances compatibles avec l'application visée.

**Mots clés : les antennes, satellites, Le réseau, communications sans fil
Fréquence**

تشهد الاتصالات وخاصة الاتصالات اللاسلكية نموًا كبيرًا اليوم. مع تزايد الطلب على معدلات البيانات المرتفعة والندرة المتزايدة لنطاقات التردد المتاحة ، أصبح من الضروري إيجاد حلول جديدة تلبي هذه المتطلبات.

شهد مجال الاتصالات تقدمًا تقنيًا على مر السنين.

في السنوات الأخيرة بفضل الطلب القوي من السكان والصناعة. من بين الاهتمامات في هذا المجال الهوائيات. إنها عناصر أساسية لضمان تشغيل انبعاث أو استقبال الموجات الكهرومغناطيسية في الغلاف الجوي للأرض أو في الفضاء. هم موجودون في جميع أنظمة الاتصالات اللاسلكية.

في إطار عملنا، قمنا أولاً بإعطاء عمومية للهوائيات، وثانيًا في عملنا قدمنا أهم التعارف المستخدمة في مجال الأقمار الصناعية. وأخيرًا اقترحنا هندسة جديدة لـ الهوائي ذات الخصائص المثلى ويمكن أن تفي بالمعايير من حيث عرض النطاق والإشعاع تقدم الشبكات المصممة لهذا الهوائي أداءً متوافقًا مع التطبيق المقصود.

الكلمات مفتاحية: الهوائي, الاتصالات اللاسلكية, الأقمار الصناعية, التردد

Communications and in particular wireless communications are in full growth today. With the increasing demand for high data rates and the growing scarcity of available frequency bands, it has become essential to find new solutions that meet these requirements. The field of telecommunications has experienced technological advancement over the years. recent years thanks to strong demand from the

population and industry. Among the concerns in this area are antennas. They are essential elements to ensure an operation of emission or reception of electromagnetic waves in the Earth's atmosphere or in space. They are present in all wireless communication systems. Within the framework of our work we first gave a generality on antennas, secondly of our work we presented the most important definitions used in the field of satellites. And lastly we proposed a new geometry of antenna which has optimal characteristics and may possibly meet the criteria in terms of bandwidth and radiation. The networks designed for this antenna present performance compatible with the intended application.

Key words: antennas, satellite, Networks, communications are in full, Frequency

Introduction générale

La demande croissante de services de communications par satellite nécessite d'améliorer les performances du système à satellites, où les antennes constituent une partie très importante de la liaison par satellite, où des performances élevées sont nécessaires. Ces exigences sont suivies d'une créativité permettant d'adapter les technologies à ces besoins spécifiques.

L'antenne à micro-ruban peut être utilisée pour des applications sans fil car elle présente des caractéristiques particulières telles que la légèreté, la facilité de montage et la production en série; dans le cas où il est possible d'utiliser différentes applications, l'antenne micro-ruban, dans sa forme la plus simple, ne peut pas répondre aux exigences de bande passante et de gain pour la plupart des systèmes de communication sans fil. De ce fait, en surmontant ces limites, l'antenne micro-ruban peut être utilisée à son plein potentiel.

Pour répondre à ces exigences; Plusieurs techniques ont été développées qui ont prouvé leur efficacité pour les antennes planes. Parmi les différentes méthodes permettant d'augmenter le gain, nous pouvons placer un élément de patch dans une configuration en réseau qui peut être une technique utile pour améliorer les caractéristiques des antennes planaires.

Ce travail porte sur la conception de structures de réseaux d'antennes pour les applications satellitaire en bande S nous visons à réduire le poids et à assurer la rigidité de la structure.

Au premier chapitre nous présentons une démonstration détaillée sur les antennes avec la définition des termes et les termes les plus importants utilisés dans le domaine des satellites dans le deuxième chapitre.

Dans la deuxième partie, et pour atteindre notre objectif; un réseau d'antennes conçu composé de 4 éléments avec une alimentation en lignes à micro-ruban est conçu pour s'intégrer dans un petit satellite de communication

Chapitre I

« Généralités sur les antennes »

Chapitre I : Une vue générale sur les antennes sera consacrée à la description des antennes imprimées (patch), leurs propriétés et leurs caractéristiques, un rappel théorique sur l'antenne imprimée (patch), les différentes techniques.

I.1 Introduction :

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

Les antennes sont des dispositifs utilisés pour rayonner le champ électromagnétique dans l'espace ou pour le capter.

Le chapitre I de notre travail est destiné à présenter dans le cas général la description d'une antenne, ses caractéristiques ainsi que les principaux types d'antennes employées pour les radiocommunications.

I.2 Historique [4] :

Il serait inutile de chercher à attribuer l'invention de l'antenne à un savant en particulier, en revanche, on doit savoir que l'antenne est le résultat de l'accumulation de plusieurs recherches, auxquelles les scientifiques de plusieurs pays ont participé. Au début les chercheurs se sont beaucoup intéressés aux phénomènes électriques et magnétiques :

« Ampère » a remarqué qu'un courant électrique qui circule dans un fil dévie l'aiguille d'une boussole située à proximité.

De son côté « Faraday » a pu découvrir qu'un courant électrique circule dans un fil métallique refermé en boucle quand un aimant est approché ou éloigné de cette boucle.

Et c'est au physicien « James maxwell » et théoricien fondateur de l'électromagnétisme, d'unifier les divers observations et relations entre le champ magnétique et électrique pour formuler dans les années 1860/1865 les célèbres équations connues aujourd'hui sous le nom de « équations de maxwell » qui ont été publiées ensuite en 1873.

En 1888 le physicien allemand « Heinrich Rudolf Hertz » a démontré l'existence physique des ondes électromagnétiques en construisant un appareil produisant des ondes radio a une fréquence de 1GHz. En suite les expériences de « marconi » dans les années 1890 ont prouvées qu'il est possible d'établir une liaison entre deux points de la terre par propagation d'ondes radioélectriques en espace libre, « marconi » fut le premier à utiliser le terme* **Antenne***.

I.3 Ondes électromagnétique :

On commence par la définition d'une onde électromagnétique (OEM), les sources de ces ondes, le rayonnement de ces ondes et les paramètres qui les caractérisent.

I.3.1 Définition de l'OEM :

L'onde électromagnétique est la résultante de deux champs : Le champ électrique \vec{E} et le champ magnétique \vec{H} . Ces deux champs dont les variations temporelles sont sinusoïdaux, se déplacent dans le vide à la vitesse de la lumière soit 300 000 Km/s. Ce sont des vibrations définies par un mouvement ondulatoire sinusoïdal représentées dans « la figure I.1 ». [3]

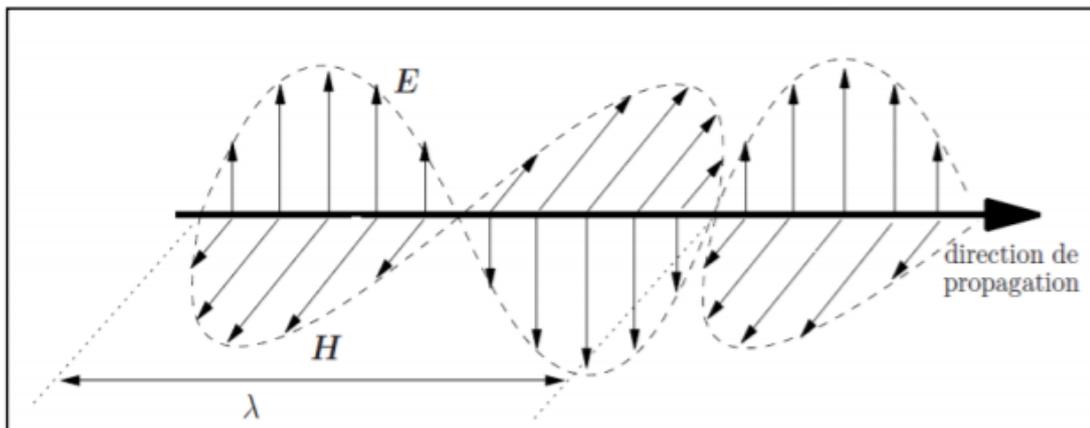


Figure I.1: l'onde électromagnétique

Toute charge et toute circulation de charge sont capables de créer des champs électriques et magnétiques autour d'eux et produire ainsi un rayonnement électromagnétique (création d'une onde électromagnétique qui se propage librement dans l'espace) [2]. Le physicien anglais « maxwell » a donné un cadre un peu plus mathématique à ses phénomènes en établissant ainsi les « équations de maxwell ».

Dans le cas général ces équations sont données par tableau suivant [4] :

Equation de Maxwell Gauss	$div\vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon}$ Equation 1
Equation de Maxwell Thompson	$div\vec{B}=0$ Equation 2
Equation de Maxwell faraday	$\overrightarrow{rot}\vec{E}=-\mu\frac{d\vec{H}}{dt}$ Equation 3
Equation de Maxwell Ampère	

$$\text{rot } \vec{H} = -\mu \frac{d\vec{H}}{dt} \text{ Equation 4}$$

Tableau I.1 : Les équations de Maxwell

A noter que :

- + ρ : densité volumique de charge.
- + ε : permittivité électrique, $\varepsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$: permittivité électrique dans le vide
et ε_r permittivité relatif au milieu on a $\varepsilon = \varepsilon_0 \times \varepsilon_r$
- + μ : perméabilité magnétique, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$: perméabilité magnétique dans le vide
et μ_r perméabilité magnétique relatif et on a $\mu = \mu_0 \times \mu_r$
- + σ : la conductivité électrique.

I.3.2 Les sources des OEM :

- Les ondes électromagnétiques sont émises par deux types de source à savoir : les sources naturelles et les sources artificielles ;
- Les premières sont produites de façon naturelle dans l'environnement, par l'activité solaire (émission de la lumière) et atmosphérique (présence de charges électriques dans les nuages) mais également les cellules vivantes (cœur et le cerveau) ;
- Les secondes sont produites par l'ensemble des appareils électriques qui génèrent des ondes électromagnétiques, (antenne de téléphone mobile, radio, émission TV, les appareils électroménagers et les dispositifs médicaux comme la radiologie). Les ondes émises par ces sources sont classées selon leur gamme de fréquences.

I.3.3 Les paramètre d'OEM :

Les O.E.M sont caractérisés par certains paramètres liés entres eux, il s'agit de :

La longueur d'onde λ : c'est la distance parcourue par l'onde au cours d'une période mesurée en mètre (m) et si on appelle C la célérité de l'onde et T sa période, nous obtenons que : $\lambda = C.T = C/f$ équations(5)

- **La fréquence** : qui est le nombre de longueur d'onde compris dans une seconde, est mesurée en hertz (Hz).

La densité de puissance surfacique : qui est les flux énergétiques reçu par unité de surface s'exprime en watt /m² elle est donnée par la relation :

$$P = E^2/377. \text{ Equations(6)}$$

➤ **La polarisation de l'OEM** : c'est l'orientation du champ électrique \vec{E} par rapport à l'horizontal, si \vec{E} est parallèle à l'horizontale on dit que l'onde a une polarisation horizontale si le champ \vec{E} est perpendiculaire alors la polarisation est verticale. Si la direction de \vec{E} reste constante on dit que la polarisation est rectiligne (le cas le plus courant), si elle varie on aura deux mode circulaire ou elliptique [4]. « La figure I-2 » donne une représentation des différents types de polarisation.

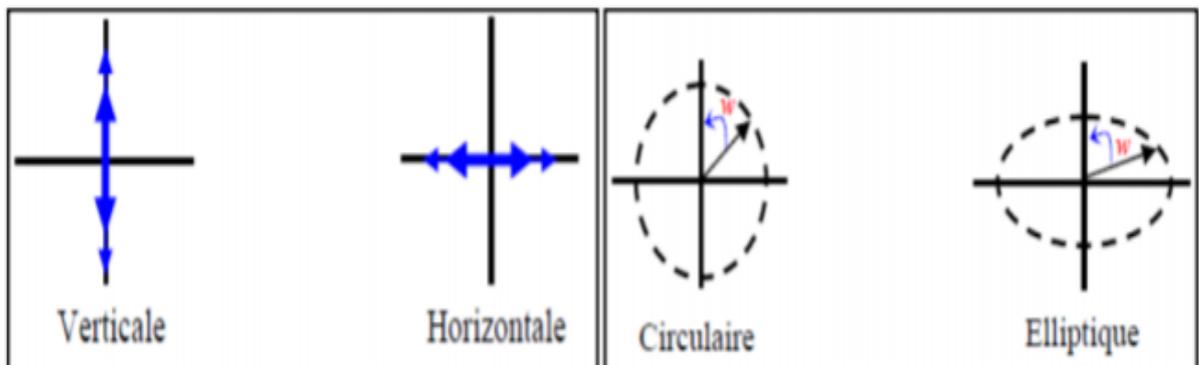


Figure I.2 : types de polarisation

I.3.4 Le spectre électromagnétique :

Le spectre électromagnétique « figure I-3 » est la répartition des ondes électromagnétiques en fonction de leur longueur d'onde, de leur fréquence, ou bien de leur énergie [5].

Les ondes radioélectriques ou ondes hertziennes sont des ondes électromagnétiques qui se propagent de deux façons :

1. Dans l'espace libre (propagation rayonnée, autour de la terre par exemple) ;

2. Dans des lignes (propagation guidée, dans un câble coaxial ou un guide d'onde), leur domaine de fréquences s'étend de 9 KHz à 300 GHz.

3. Ces ondes sont utilisées pour la transmission radio et télévision [8], ainsi la propagation s'effectue de diverses manières :

- Par onde directe c'est-à-dire sans rencontrer des obstacles naturels (montagne, couches atmosphérique) ou artificielles (les immeubles) ;
- Par réflexion, lorsque l'onde rencontre un obstacle elle subira des réflexions c'est-à-dire qu'elle est rayonnée dans une direction différente.

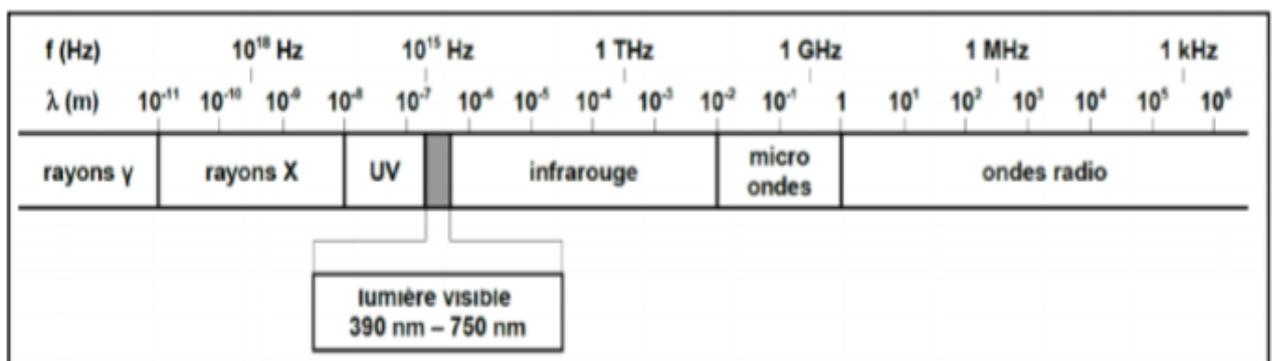


Figure 1.3: le spectre électromagnétique

I.4 Les Antennes :

Les antennes servent pour communiquer sur de grandes distances, car les communications sur petites distances sont moins coûteuses avec l'emploi de câbles ou de guides d'onde [6].

En radioélectricité, une antenne peut être définie comme un élément passif permettant le transfert de l'énergie électrique vers une énergie électromagnétique ou vice-versa.

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

L'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.

Les antennes présentent une propriété connue sous le nom de « réciprocité », cela signifie qu'une antenne peut être utilisée en réception ou en émission avec les mêmes propriétés rayonnantes, c'est en ce sens que son fonctionnement se dit réciproque, ainsi du fait de la réciprocité des antennes, il ne sera pratiquement jamais fait mention de la différence entre le rayonnement en émission et celui en réception, de ce fait les qualités qui seront annoncées pour une antenne le seront pour les deux modes de fonctionnement. [7].

I.4.1 L'antenne isotrope :

L'antenne isotrope est une référence théorique irréalisable, c'est une antenne fictive ponctuelle qui rayonne la même densité de puissance dans toutes les directions, elle ne sert que de référence à l'évaluation du gain [6]. Le rayonnement de cette antenne est donné dans « la figure I-4 ».

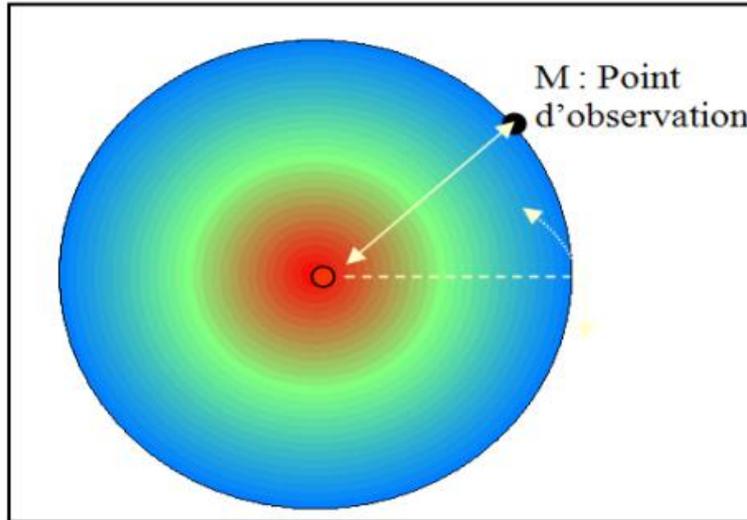


Figure I.4 : rayonnement d'une antenne isotrope

I.4.2 Densité de puissance d'une antenne :

Considérons une source de rayonnement électromagnétique, alimentée par une puissance P_a , rayonnant une onde électromagnétique traversant un élément de surface « DS ».

« Figure I-5 ».

Nous définissons la densité de puissance par unité de surface au point M, distant de r par rapport à la source, par la relation suivante [1] :

$$P(r, \theta, \varphi) = \frac{P_a}{4\pi r^2} (\text{Watt/m}^2) \text{ équations(7)}$$

La densité de puissance par unité d'angle solide ($d\Omega$), qui est parfois appelée intensité de rayonnement est donnée par [2]:

$$P(r, \theta, \varphi) = \frac{P_a}{4\pi} (\text{Watt/stéradian}) \text{ équations(8)}$$

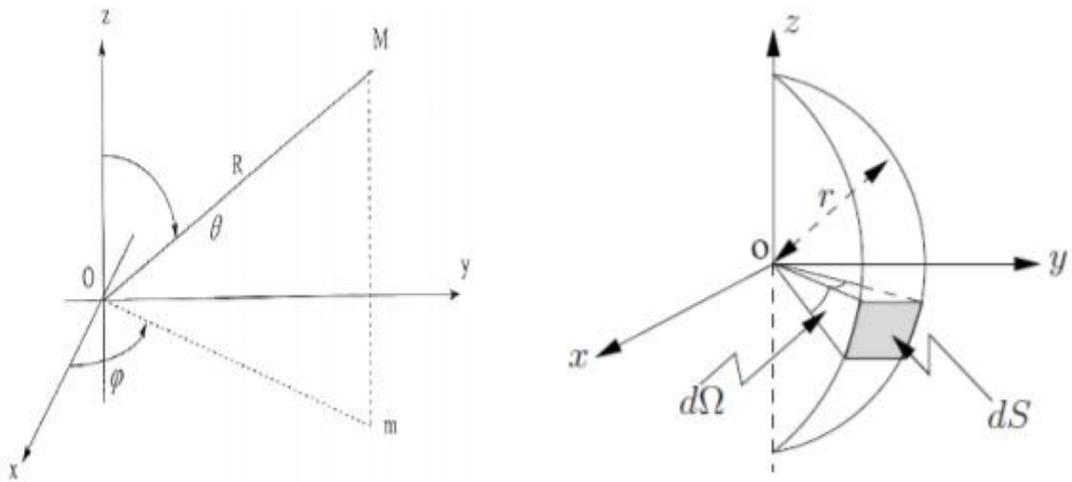


Figure 1.5 : système de coordonnées de référence et notion d'angle solide.

Avec ; θ : angle d'élévation par rapport à l'horizontale ($0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$).

Φ : azimut par rapport à l'axe des x ($0^\circ \leq \varphi \leq 360^\circ$).

r: distance entre l'origine et le point d'observation.

I.5 Caractéristiques des antennes :

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

Alors la performance d'une antenne peut être évaluée à partir de ses paramètres qui sont présentées ci-dessous [12]:

I.5.1 Directivité $D(\theta, \varphi)$

La directivité (θ, φ) d'une antenne dans une direction (θ, φ) est le rapport entre la puissance rayonnée dans une direction donnée (θ, φ) et la puissance que rayonnerait une antenne isotrope [13].

$$D(\theta, \varphi) = \frac{p(\theta, \varphi)}{p_r/4\pi} = 4\pi \frac{p(\theta, \varphi)}{p_r} \text{ équations (9)}$$

I.5.2 Rendement de l'antenne [13] :

Le rendement de l'antenne est le rapport entre la puissance rayonnée et la puissance

fournie à l'antenne, soit :

$$\eta = \frac{p_r}{p_f} \text{Équations(10)}$$

Ce rapport caractérise la perte à l'intérieur de l'antenne.

I.5.3 Gain [13] :

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

$$G(\theta, \varphi) = 4\pi \frac{P(\theta, \varphi)}{P_A} \text{Équations(11)}$$

En général, le gain G correspond au gain dans la direction de rayonnement maximal (θ_0, φ_0)

$$G(\theta, \varphi) = 4\pi \frac{P(\theta_0, \varphi_0)}{P_A} \text{Équations(12)}$$

Si l'antenne est omnidirectionnelle et sans pertes, son gain vaut 1 ou 0 « dB », le gain est généralement exprimé en « dB » (voir annexe A) ou en « dB », car une antenne isotrope est utilisée comme référence, parfois, on trouve également le gain exprimé en « dB », lorsqu'une antenne dipôle est utilisée comme référence.

I.5.4 Ouverture [13] :

Si G_m est le gain maximal d'une antenne donnée dans un plan bien déterminé, alors son ouverture dans ce plan est l'angle qui se trouve entre deux directions de ce plan ayant la moitié du gain maximal (gain à -3 dB)

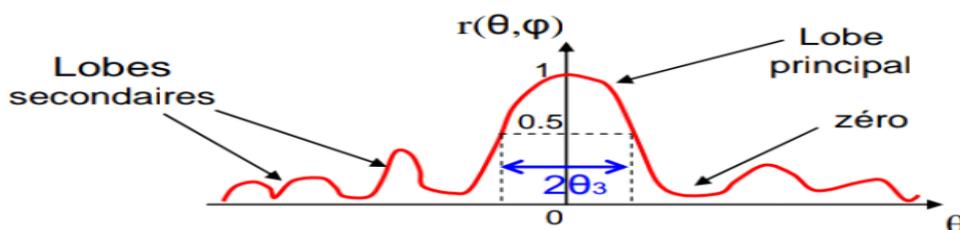


Figure I.6 : Diagramme de rayonnement et angle d'ouverture

I.5.5 Impédance d'entrée :

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

$$Z_{in} = \frac{V_{in}}{I_{in}} = R_{in} + jX_{in} \quad \text{Équations(13)}$$

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

R_{in} : La partie active est reliée aux champs (puissance) rayonnés et a puissance perdue par effet de joules [18].

I.5.6 Coefficient de réflexion S_{11} :

Le coefficient de réflexion S_{11} met en évidence l'absorption de l'énergie par l'antenne,

c'est sur ce paramètre que l'on se base lors de l'optimisation.

Le coefficient de réflexion peut être défini comme suit :

$$S_{11} = \frac{V_r}{V_i} = \frac{Z_{in} - Z_s}{Z_{in} + Z_s} \quad \text{Équations(14)}$$

Avec :

V_r : Amplitude de l'onde réfléchie.

V_i : Amplitude de l'onde incidente.

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

$$|S_{11}|_{dB} = 20 \log |S_{11}| \quad \text{Équations(15)}$$

I.5.7 Diagramme de rayonnement :

Le diagramme de rayonnement d'une antenne présente les variations de la puissance rayonnée par unité d'angle solide dans les différentes directions de l'espace.

En dehors du cas des antennes omnidirectionnelles dans certains plans, Les antennes rayonnent pas leurs puissances de façon uniforme dans toutes les directions de l'espace.

Il y a généralement une direction de rayonnement maximale autour de laquelle se trouve concentrée une grande partie de la puissance rayonnée et des directions secondaires autour desquelles se répartit la fraction de la puissance restante.

La fonction caractéristique de rayonnement (θ, ϕ) de l'antenne permet d'avoir une vision globale du rayonnement. Elle est définie comme étant le rapport de la puissance transmise dans une direction donnée (θ, ϕ) à la puissance P_{max} de la direction où le rayonnement est maximal [14].

$$P(\theta, \phi) = \frac{P_a}{4\pi} \text{Équations 16}$$

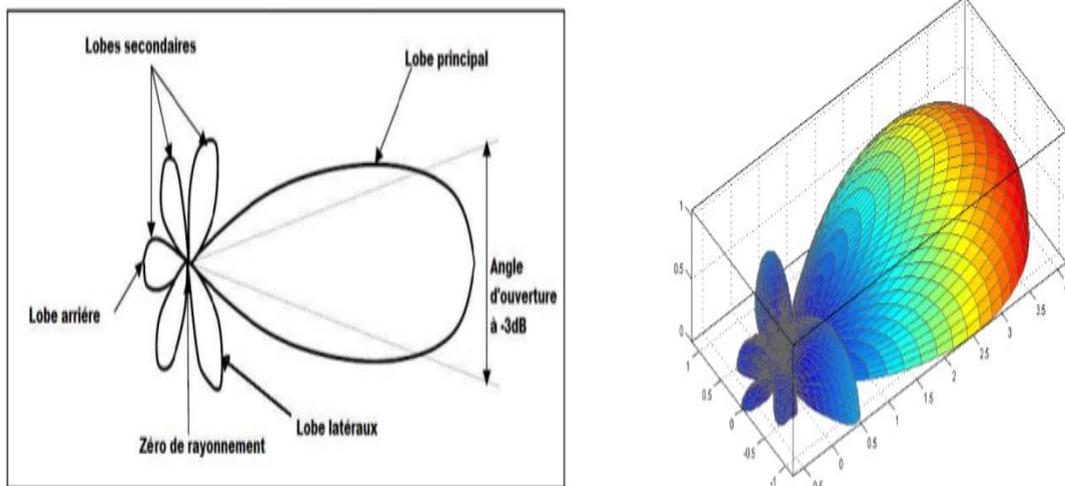


Figure I.7: diagramme de rayonnement d'une antenne directive

I.5.8 Le VSWR (Voltage Standing Wave Ratio) [18]:

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

Le VSWR est donné par Markov par :

$$VSWR = \frac{1+|S_{11}|}{1-|S_{11}|} \text{équations 17}$$

I.5.9 La bande passante (BP) :

La bande passante d'une antenne peut être définie comme étant la gamme des fréquences utiles, en laquelle l'antenne possède des capacités optimales pour émettre ou recevoir l'énergie électromagnétique correspondante dans l'espace environnement. La valeur des limites sur les critères de fonctionnement de l'antenne définit un domaine de fréquences situées entre une valeur minimale f_{min} et une valeur maximale f_{max} . La bande passante est donnée par :

$$BP(\%) = \left[\frac{f_{min}-f_{max}}{f_c} \right] \cdot 100 \text{ Équations 18}$$

Avec f_c est la fréquence centrale ou de résonance.

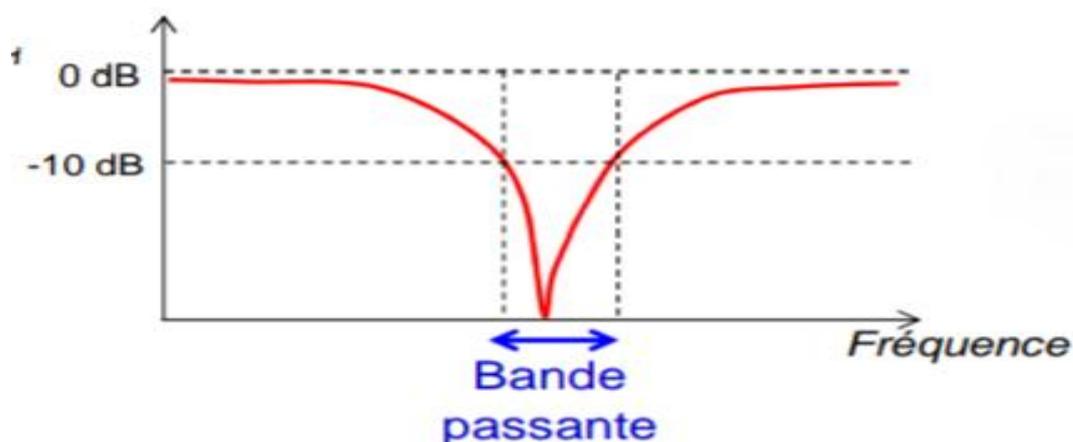


Figure I.8 : Bande passante

I.6 Types d'antennes :

Une antenne peut émettre dans toutes les directions (antenne omnidirectionnelle) ou dans une seule direction définie (antenne directionnelle), ainsi, dans ces deux catégories les types d'antennes sont multiples et diversifiés mais peuvent être regroupés en famille comme suit :

I.6.1 Antennes élémentaires :

Plus simple et moins chère ce genre d'antennes ne permettent qu'une polarisation linéaire dans cette catégorie, on peut citer : antennes isotrope, antennes dipolaires ou doublet demi-onde qui est constitué d'un élément conducteur de longueur égale à la demi-longueur d'onde et antennes monopoles constitués d'un élément conducteur de longueur égale au quart de la longueur d'onde.

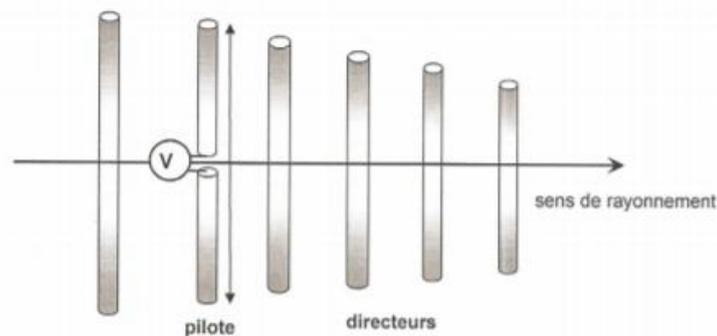


Figure I.9 : Antenne YAGI (antennes dipolaires)

I.6.2 Antennes à réflecteurs [18] :

En hyperfréquence, certaines antennes peuvent utiliser des montages similaires à l'optique avec des réflecteurs plans ou paraboliques. Il s'agit d'antennes à réflecteurs, on peut citer l'antenne parabolique qui est la plus connue pour son usage en télévision satellitaire, elle a un gain élevé lié au diamètre du réflecteur elle est également très directive.

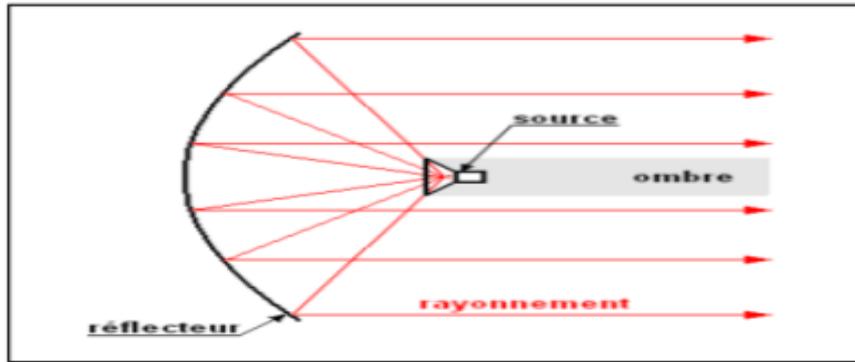


Figure I.10: réflecteur parabolique

I.6.3 Antenne pour guide d'onde :

L'antenne cornet utilisée en hyperfréquence est une ouverture rayonnante excitée par un guide ou un monopôle, elle est très directive et possède un gain élevé.

Nous trouvons également les antennes à fente constituées par les réseaux des fentes rayonnantes qui sont des réseaux de dipôles ouvert sur un guide elle est très facile à réaliser, elle devient de plus en plus utilisée surtout dans le domaine des radars utilisé pour la surveillance maritime

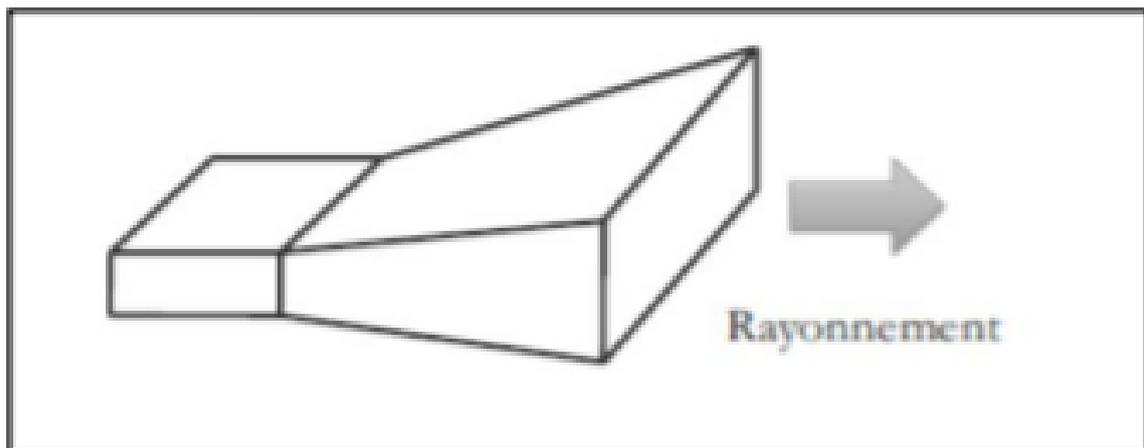


Figure I.11: antenne cornet.

I.6.4 Antennes imprimées (micro-ruban) :

Appelée également l'antenne patch, l'antenne imprimée est un type récent d'antenne dont le développement et l'utilisation sont de plus en plus fréquents, elle est constituée d'un diélectrique (substrat), possédant un plan de masse métallique sur une face, sur l'autre face une gravure métallique permet de supporter des courants

de surface (plaque) qui créent le rayonnement électromagnétique « Figure I.12», les courants sont ainsi amenés de générateur à l'entrée par une ligne micro-ruban.

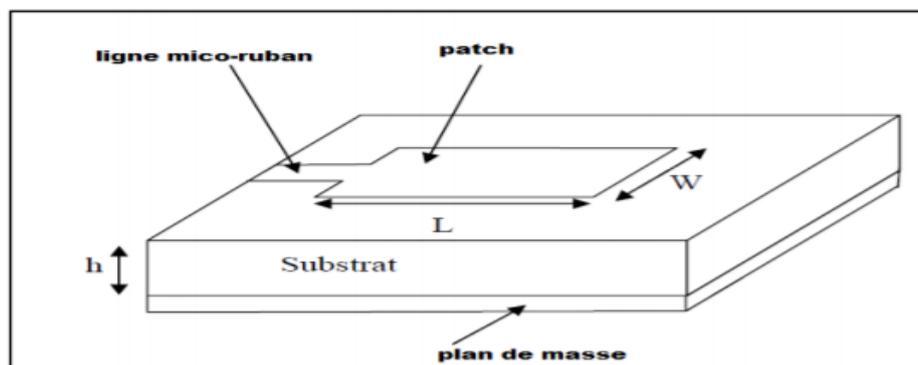


Figure I.12: antenne patch rectangulaire

I.7 Description d'une antenne imprimée ou "patch" :

Une antenne à éléments rayonnants imprimés « figure I.13», 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 et se compose de :

Le plan de masse (Grounds 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 ($2,2 < r < 12$), 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 (micro-ruban) 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 l'antenne [9].

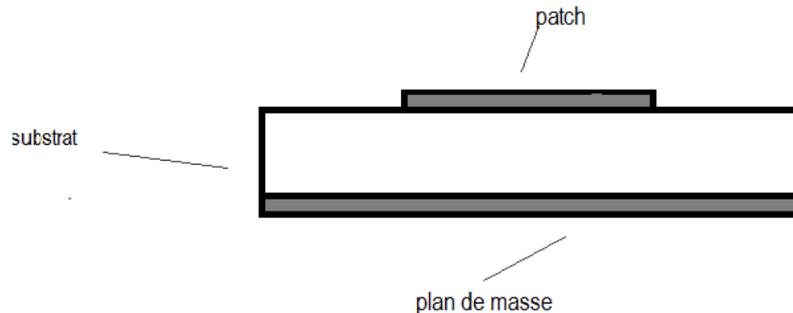


Figure I.13: structure d'une antenne patch

L'antenne patch peut prendre plusieurs formes, en effet, elles peuvent être rectangulaires, carrées, circulaires ou simplement dipôles, ces formes sont les plus courantes, en effet, outre le fait que le diagramme de rayonnement soit très intéressant, elles présentent également une grande facilité d'analyse et de fabrication, la figure suivante montre ces différentes formes [11]

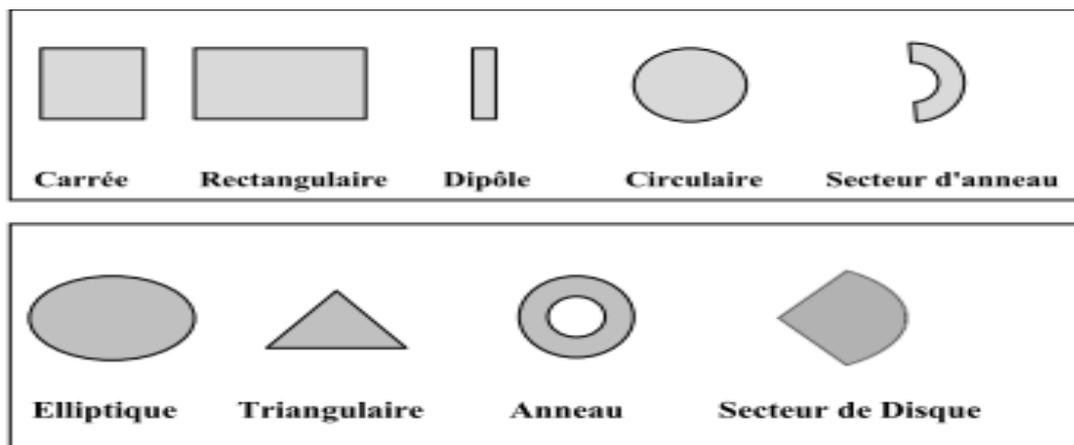


Figure I.14: les différents types d'éléments rayonnant

I.8 Les techniques d'alimentation :

Il existe plusieurs techniques pour l'alimentation des antennes micro-rubans, ces techniques peuvent être soit par contact direct soit par couplage, les plus communément utilisées sont l'alimentation par ligne micro-ruban, par sonde coaxiale, par couplage de proximité ou par ouverture.

I.8.1 Alimentation par ligne micro-ruban :

Dans le premier cas, une ligne micro-ruban est directement connectée à l'élément rayonnant comme le montre la figure I.15, le point de jonction peut être sur l'axe de symétrie du patch ou complètement décalé pour permettre une meilleure adaptation d'impédance.

Ce type d'alimentation est facile à mettre en œuvre et à modéliser, mais peut engendrer un rayonnement parasite qui peut devenir considérable et une bande passante typiquement entre 2 et 5%.

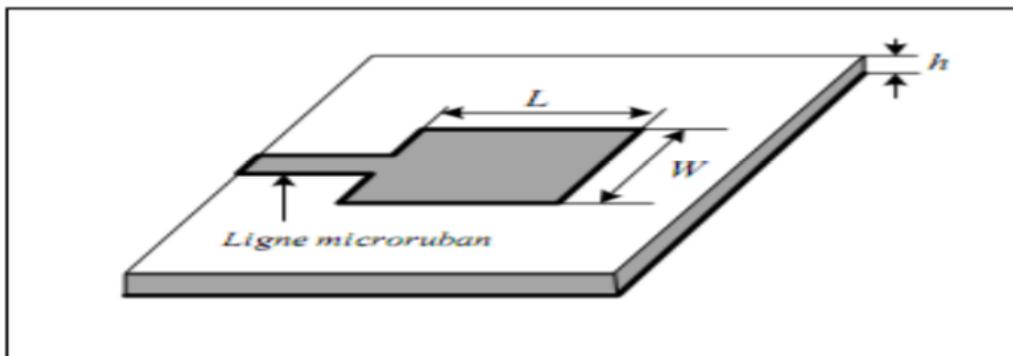


Figure I.15: Alimentation par ligne micro-ruban

Cette ligne peut prendre aussi d'autres positions soit qu'elle est décalée par rapport à l'axe de symétrie ou sur cet axe.

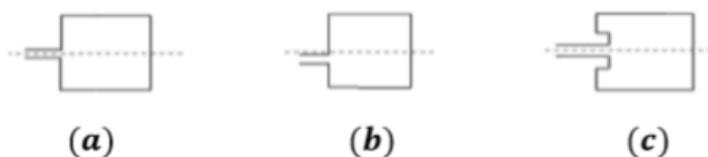


Figure I.16 : position par rapport à l'axe.

I.8.2. Alimentation par sonde coaxiale :

L'alimentation par sonde coaxiale est réalisée par un contact direct de l'élément rayonnant au conducteur central d'une ligne coaxiale, tandis que son conducteur externe est relié au plan de masse, comme le montre la figure I.17. L'adaptation d'impédance est réalisable en déplaçant le point d'alimentation sur le patch,

l'inconvénient de ce type d'alimentation réside dans la bande passante étroite et la difficulté de modélisation surtout pour des substrats électriquement épais.

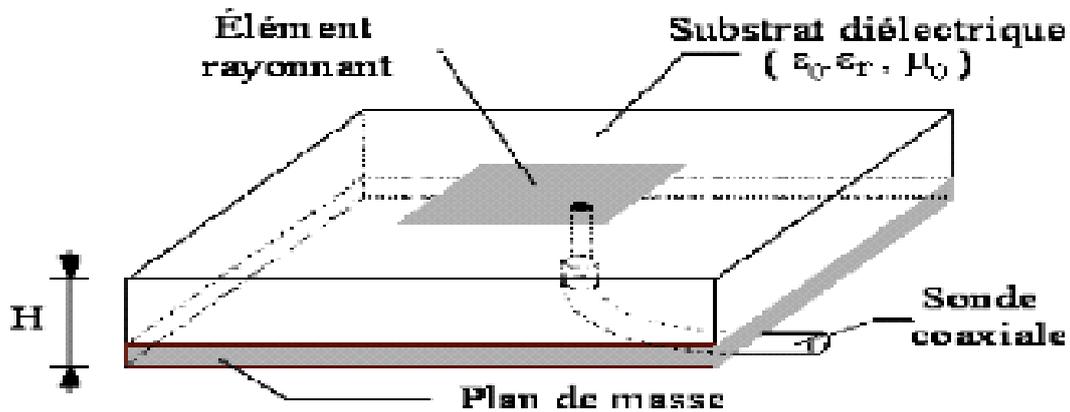


Figure I.17 : Alimentation par sonde coaxiale

I.8.3 Alimentation par couplage par fente :

L'alimentation par ligne micro-ruban ou par ligne coaxiale présentent une asymétrie qui génère des modes d'ordres supérieurs produisant un rayonnement de polarisation croisée, pour remédier à cet état de fait, l'alimentation par fente a été introduite.

Un couplage électromagnétique est introduit à travers une petite fente réalisée dans le plan de masse qui sépare deux substrats, l'un portant l'élément rayonnant et l'autre la ligne micro-ruban comme indiqué en Figure I.18, cette configuration permet une optimisation indépendante entre la ligne d'alimentation et le patch, facile à modéliser et présente un rayonnement parasite modéré, cependant, elle est la plus difficile à mettre en œuvre et présente une bande passante étroite.

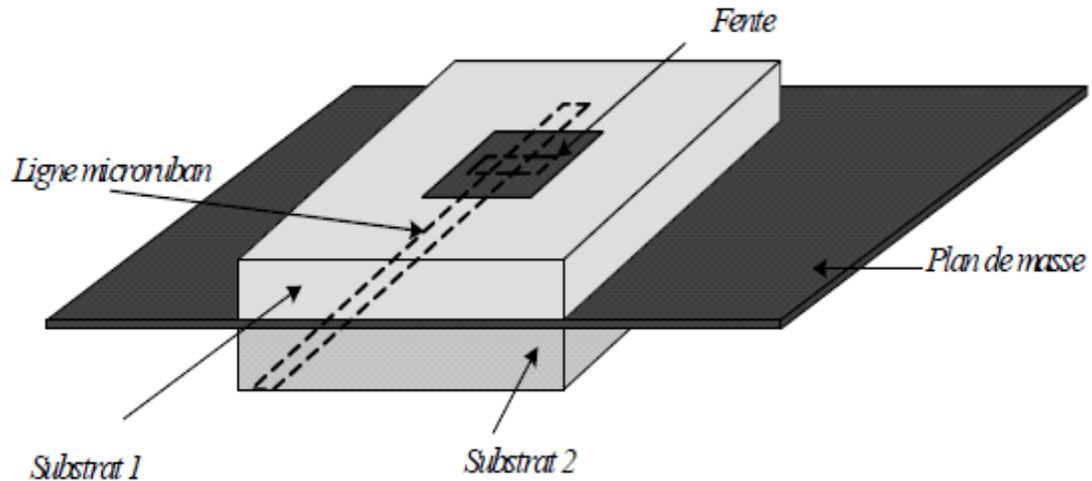


Figure I.18 : Alimentation par couplage par fente

I.8.4 Alimentation par couplage de proximité :

La meilleure bande passante pouvant atteindre 13% est réalisable en utilisant l'alimentation par couplage de proximité illustrée par la Figure I.19, l'avantage de cette technique d'alimentation réside dans l'affaiblissement du rayonnement parasite et la facilité du couplage, ce dernier peut être optimisé par l'ajustement des dimensions de la ligne, cependant elle est très difficile à mettre en œuvre.[15].

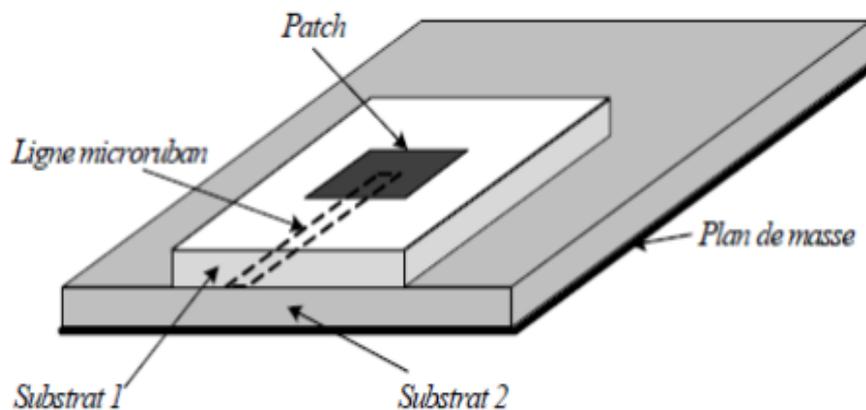


Figure I.19 : Alimentation par couplage de proximité

Une comparaison entre l'alimentation avec contacte (ligne micro-ruban et câble coaxial) et l'alimentation sans contacte (couplage par proximité ou par ouverture) se résume dans le tableau (I.2) suivant :

Méthode		Avantages	Inconvénients
Alimentation avec contact	Câble coaxial	<ul style="list-style-type: none"> - Pas de pertes de rayonnement de ligne. - Sélection possible d'un mode privilégié. - Obtention d'une impédance d'entrée adéquate par positionnement de la sonde. - Prédiction aisée de l'impédance d'entrée pour des substrats de faible hauteur. - Technique de perçage simple jusqu'à 10GHz. 	<ul style="list-style-type: none"> - Dans le cas de substrat épais, la réactance inductive supplémentaire apportée par la sonde affecte de la bande passante. - Technique de perçage et de soudure plus délicate en millimétrique. - La difficulté d'excitations de chaque élément d'un réseau seul.
	Ligne micro-ruban	<ul style="list-style-type: none"> - Procédé technologique le plus simple par gravure sur la même face de l'antenne et du circuit d'alimentation. - Adaptation de l'aérien possible par contact pénétrant. 	<ul style="list-style-type: none"> - Rayonnement parasite de la discontinuité ligne-aérienne. - Rayonnement parasite possible du circuit de distribution en millimétriques. - Structure figée après gravure.
Alimentation sans contact	Par couplage	<ul style="list-style-type: none"> - Bande passante plus large par augmentation de la hauteur. 	<ul style="list-style-type: none"> - Deux couches du substrat requises. - Difficulté pour l'intégration des dispositifs actifs et pour la dissipation de chaleur.

Tableau (I-2) : Avantages et inconvénients de différentes techniques d'alimentation. [10]

I.9. Technique d'augmentation du Gain

I.9.1. Technique des réseaux d'antenne [16] :

Un réseau d'antennes est une association des différents éléments rayonnants. Le but du réseau d'antennes est d'atteindre des caractéristiques spécifiques, un gain élevé et/ou un lobe principal conformé. Donc c'est une technique pour augmenter le gain.

Il existe deux types de réseau, linéaires et bidimensionnels à alimentation en série ou en parallèle ou la combinaison série parallèle

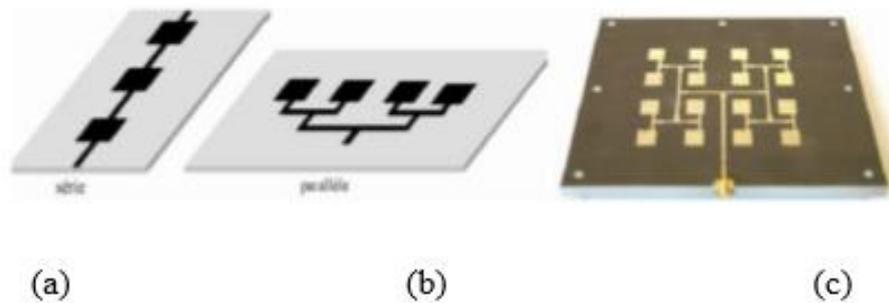


Figure 1.20. différents types des réseaux d'antenne patch

Les types des réseaux à alimentation :

- (a) Linéaire en série,
- (b) Linéaire en parallèle
- (c) Bidimensionnel en parallèle

I.9.2. Technique de déformation du patch :

Presque dans chaque création d'une antenne patch on tombe sur des difficultés pour obtenir des résultats donc sans trop compliqué les choses on essaye de modifier dans notre design surtout au niveau du patch par exemple on fait des creux ou des « silts ».

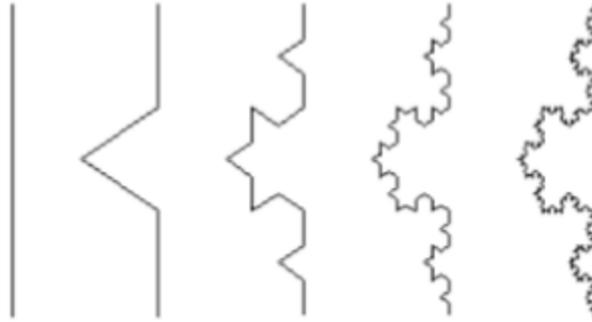


Figure. 1. 21 : Augmentation de la performance des antennes

I.10 Bilan de liaison [17] :

Le bilan de liaison est un outil courant en télécommunication permettant d'estimer les puissances reçues dans une liaison entre un émetteur et un récepteur et la qualité du signal.

Le bilan de liaison permet également de dimensionner l'émetteur, le récepteur et de déterminer les limites en termes de performance (couverture radio, puissance minimale, amplification nécessaire, etc.), un bilan entre 2 antennes permet notamment de :

1. Déterminer la puissance reçue connaissant la puissance émise, les caractéristiques des antennes, la perte liée à la propagation de l'onde électromagnétique et d'en déduire la qualité du signal reçu ;
2. Déterminer la perte de propagation maximale connaissant la puissance émise, les caractéristiques des antennes, le seuil de réception, le modèle de propagation et d'en déduire la couverture d'une antenne.

➤ **Atténuation en espace libre-Formule de Friis :**

En supposant qu'une antenne émettrice produise une onde sphérique et que celle-ci se propage en espace libre (milieu homogène, isotrope, libre de tout obstacle), la puissance rayonnée (P_{ray}) par une antenne de gain G_e et excitée par une puissance P_e à une distance d est donnée par :

$$P_{ray} = \frac{P_e G_e}{(4\pi d)^2} \text{Équation 19}$$

La puissance reçue diminue avec le carré de la distance. Il s'agit d'une perte de propagation aussi appelée PathLoss, cette perte de propagation en espace libre « L_p » peut s'écrire :

$$L_p = \frac{P_{\epsilon} G_{\epsilon}}{P_r G_r} = \frac{\lambda^2}{(4\pi d)^2} = \left(\frac{4\pi}{c} \times d \times f \right)^2 \text{Équation(20)}$$

$$L_p(\text{dB}) = 32.4 + 20\log(d \text{ (km)}) + 20\log(f(\text{MHZ})) \text{Équation (21)}$$

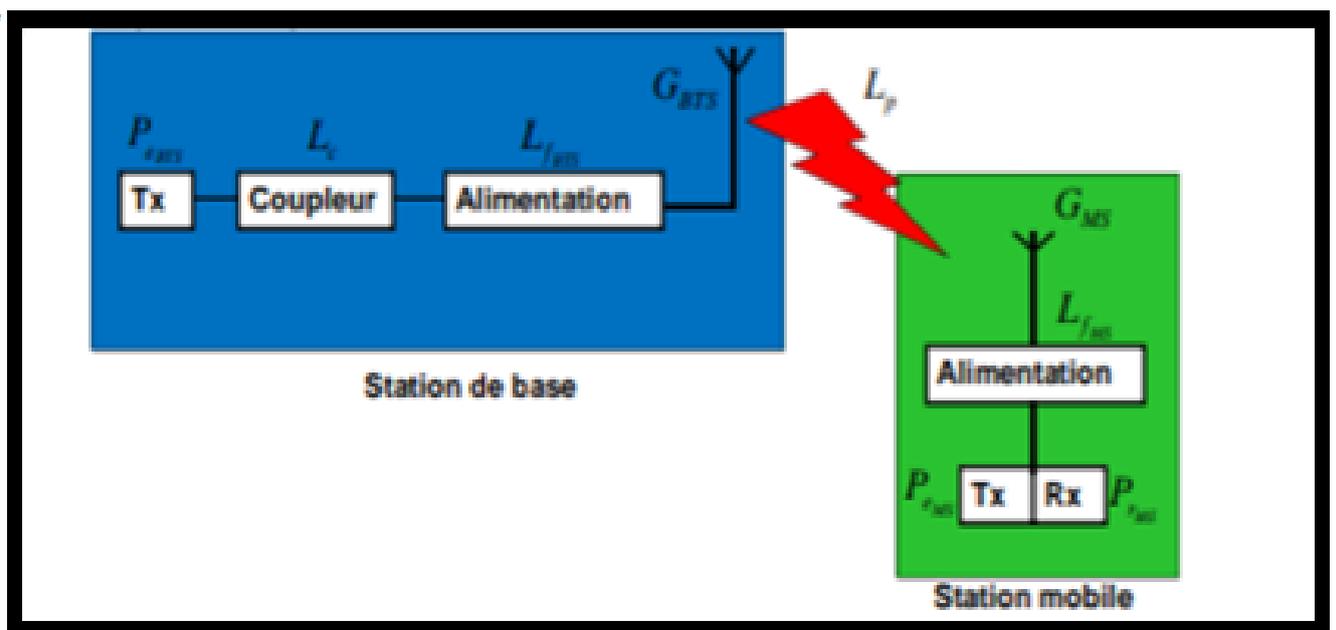


Figure I.22 : Transfert de puissance entre une station de base et une station mobile

L'équation constitutive du bilan de liaison est la suivante :

$$P_r = P_e - L_c - L_f + G_{BTS} - L_p + G_{MS} - L_{fms} \text{Équation (22)}$$

I.11 Applications :

Vu l'explosion technologique dans la télécommunication et les recherches scientifiques continues concernant les antennes imprimées, et au regard des 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 imprimées remplacent les antennes classiques dans la plupart des applications parmi ces application on peut citer :

- La commande et contrôle ;
- La télémétrie 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.

L'antenne patch est de plus en plus utilisée en télécommunication, tout particulièrement dans le secteur de la téléphonie mobile.

I.12 Conclusion :

En conclusion nous pouvons dire que les antennes ont des propriétés et des caractéristiques, qui sont valorisées, plusieurs techniques existent pour les réaliser et pour en assurer un bon fonctionnement, nous sommes tenus de choisir la technique la plus adaptée en fonction de l'application envisagée.

Dans notre travail, le choix s'est porté sur la technologie des antennes imprimées, leurs avantages nombreux, permettent de les utiliser dans divers secteurs notamment de celui des communications mobiles.

Dans l'élaboration de ce travail, nous avons présenté l'évolution technologique des antennes imprimées, nous en avons donné une petite description quelques techniques d'alimentations ainsi que leurs caractéristiques, nous avons également fait un rappel théorique sur l'antenne imprimée (patch).

Chapitre II

Les Satellites

Chapitre II: Une vue générale sur les satellites

II.1 Introduction :

Depuis maintenant plusieurs années, l'industrie du spatial s'est très largement développée et présente de très intéressantes perspectives avec plus de 1000 nouveaux satellites lancés d'ici 2023 [72] 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 télédiffusion, les fournisseurs d'accès à internet haut débit, la téléphonie, la météorologie et bien d'autres applications encore.

Ce chapitre est une introduction générale aux systèmes de télécommunications par satellite, l'objectif est de présenter les principales caractéristiques de ces systèmes.

II.2 Historique : [5*]

Le premier satellite artificiel « Spoutnik 1 » est lancé le 4 octobre 1957 par l'URSS, il constitue le point de départ de la course à l'espace que se font l'URSS et les États-Unis

puis le 3 novembre 1957, Spoutnik 2 est lancé, il a alors pour mission de placer en orbite et ce pour la première fois une créature vivante, une chienne répondant au doux nom de « Laïka ».

Le 31 janvier 1958, les États-Unis dont le programme spatial a pris du retard, placent en orbite le premier satellite appelé « Explorer 1 » puis, en juin 1961, soit 3 ans et demi après l'opération « Spoutnik1 », l'US Air Force détecte près de 115 satellites en orbite autour de la Terre, les premiers satellites sont utilisés pour mener des études scientifiques.

Les variations de l'orbite de « Spoutnik 1 » permettent de mieux connaître la densité des couches atmosphériques supérieures.

Premier satellite mis en orbite par un lanceur national

Pays	Année du lancement	Premier satellite (signification du nom)
 Union soviétique	1957	<i>Sputnik 1</i> (compagnon)
 États-Unis	1958	<i>Explorer 1</i> (explorateur)
 France	1965	<i>Astérix</i> (personnage de bande dessinée)
 Japon	1970	<i>Ōsumi</i> (nom d'une province japonaise)
 Chine	1970	<i>Dong Fang Hong I</i> (Orient rouge)
 Royaume-Uni	1971	<i>Prospero X-3</i> (personnage de Shakespeare)
 Inde	1980	<i>Rohini</i> (personnage de la mythologie hindoue)
 Israël	1988	<i>Ofeq 1</i> (horizon)
 Ukraine	1992	<i>Strela</i> (flèche)
 Iran	2009	<i>Omid 1</i> (espoir)
 Corée du Nord	2012	<i>Kwangmyŏngsŏng 3 numéro 2</i>
 Corée du Sud	2013	<i>STSAT-2C</i>

Tableau II. 1 : premier satellite mis en orbite par un lanceur

II.3 Définition du satellite [1*] :

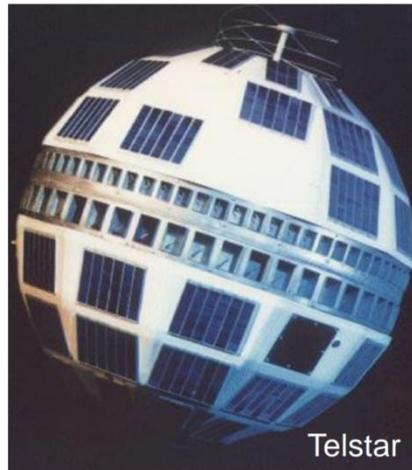
Étymologie du mot satellite : *Nom masculin du latin satelles,-itis, garde du corps, une autre définition trouve sa source dans le dictionnaire Larousse : « le satellite est un corps qui gravite autour d'un astre de masse prépondérante, en particulier autour d'une planète ».*

Un satellite artificiel est un engin construit par l'homme et qui grâce à une fusée ou un système de transport spatial est placé en orbite autour d'un astre, notamment la Terre. Apparus pour des motifs politiques, les satellites artificiels sont devenus des outils indispensables pour la science, on définit un satellite comme un objet gravitant autour de la terre, les satellites ne gravitent pas tous de la même façon, ainsi, différentes expressions définissent les types d'orbite.

Un satellite sur orbite géostationnaire est un satellite qui évolue autour de la terre juste au-dessus de l'équateur (inclinaison de 0 degré), à la même vitesse (période de 24 heures) et dans le même sens que la terre, ce qui fait qu'il semble fixe pour un observateur terrestre.



ETS VIII (Japon)



Telstar

Figure II.1 : Satellite géostationnaire Figure II.2: satellites de communication

II.4 Les orbites :

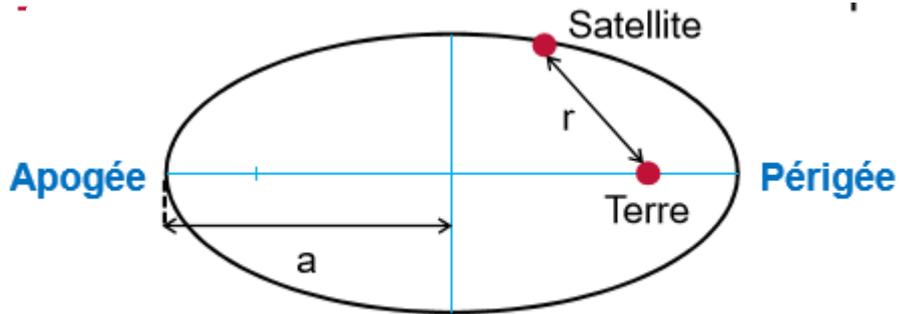
II.4.1 Définition d'orbites :

L'orbite est la trajectoire suivie par un engin autour d'un astre en passant toujours par son équateur, l'orbite d'un satellite est écrite de la manière suivante : périégée x apogée ; inclinaison (durée). **Le périégée** est le point le plus proche de l'astre survolé et **l'apogée** est le point le plus éloigné, **l'inclinaison** est l'angle décrit par l'orbite par rapport à l'équateur, sachant que la ligne équatoriale est à une inclinaison de 0° .

Un satellite peut conserver la même orbite pendant une période prolongée, dans la mesure où l'attraction gravitationnelle de la Terre vient équilibrer la force centrifuge, les satellites étant en orbite hors de l'atmosphère, ils ne rencontrent pas la résistance de l'air, par conséquent, du fait de la loi d'inertie, la vitesse du satellite reste constante, ce qui entraîne une orbite stable autour de la Terre pendant de nombreuses années.

II.4.2 lois de « Kepler » appliquées aux satellites artificiels : [2*]

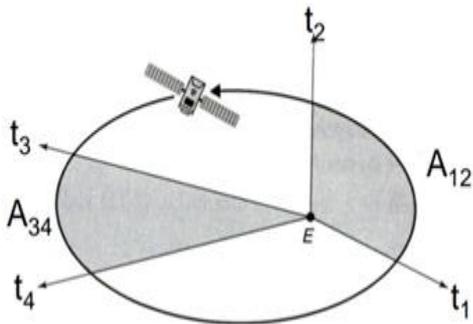
1^{ère} loi : l'orbite du satellite est une ellipse dont le centre de la terre est un des foyers.



Périgée : point de l'orbite le plus proche de la Terre

Apogée : point de l'orbite le plus éloigné de la Terre

✚ **2^{ème} loi**: le satellite se déplace d'autant plus vite qu'il est proche de la terre, le rayon **vecteur** du centre de la terre au satellite balaye des aires égales pendant des intervalles de temps égaux.



$$t_2 - t_1 = t_4 - t_3 \rightarrow A_{12} = A_{34} \text{ Équation (23)}$$

✚ **3^{ème} loi** : La période de révolution du satellite sur son orbite est :

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{a^3}{u}} \text{ Équation (24)}$$

✚ Où a : demi grand axe de l'ellipse et

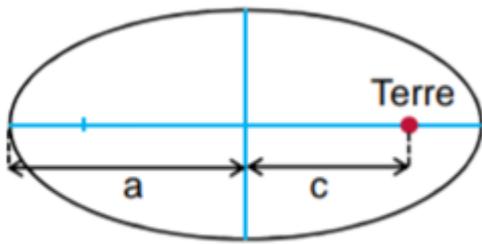
$$u = G \cdot M_{Terre} = 3.986 \cdot 10^{14} m^3 \cdot s^{-2} \text{ Équation (25)}$$

II.5 Les six paramètres orbitaux : [2*]

Il faut connaître la position et la trajectoire d'un satellite dans l'espace.

✚ Forme de l'orbite :

a : demi grand-axe
e : excentricité ($e = c/a$)



✚ Position du satellite sur l'orbite :

v : point vernal

✚ Position de l'orbite dans son plan

ω : argument du périégée

✚ Orientation du plan orbital :

i : inclinaison du plan orbital

Ω : longitude du nœud ascendant.

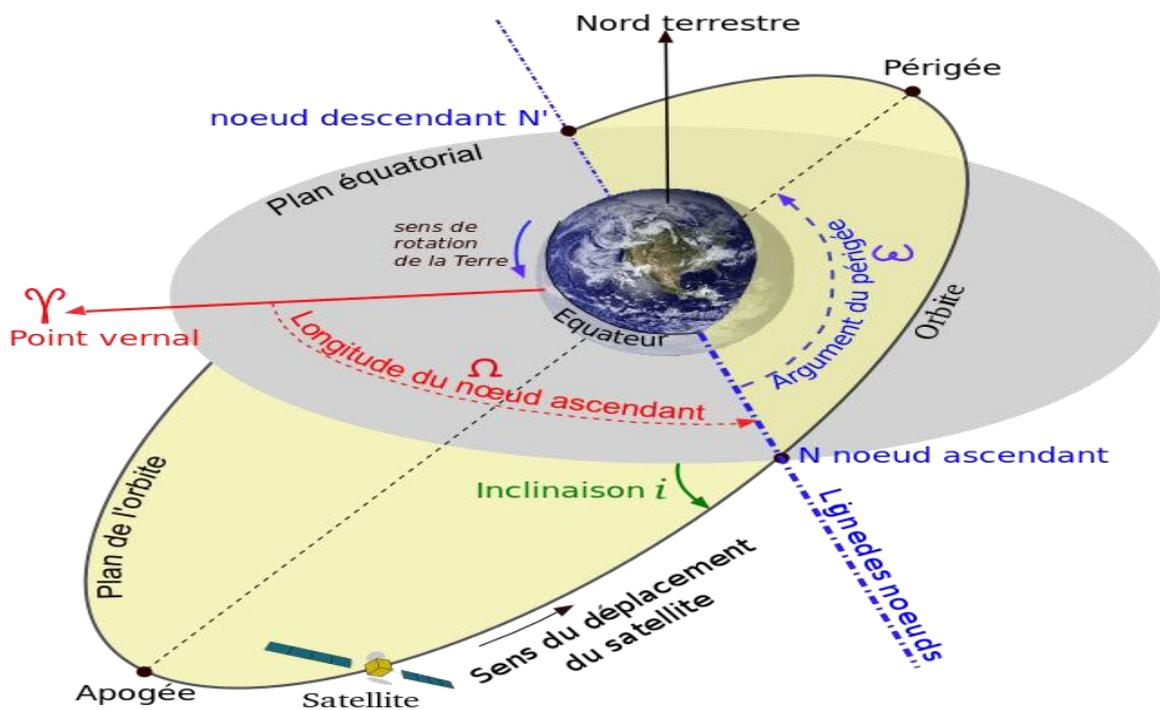


Figure II.3 : paramètres orbita

II.6 Les différents types d'orbites :

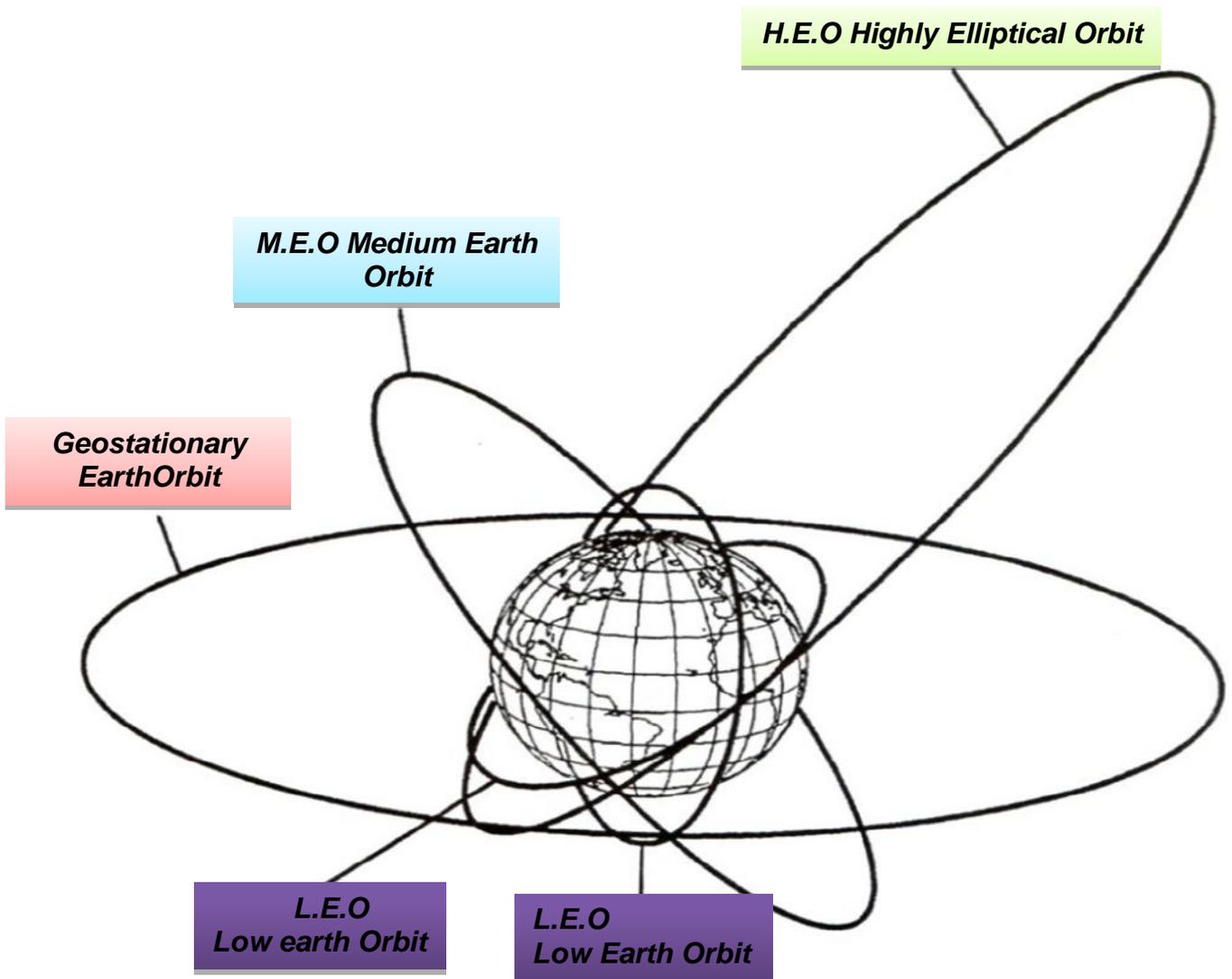


Figure II.4 : les types des orbites [2]*

II.7 Les applications des satellites :

➤ **Ils contribuent aux prévisions météorologiques :**

L'une des utilisations les plus courantes des satellites est l'application servant à faire des prévisions météorologiques, en effet, ces engins servent à collecter des informations et des images permettant aux météorologues d'élaborer et d'établir leurs prévisions.

Les images de l'atmosphère terrestre que l'on peut voir à la télévision dans le bulletin météo sont prises par des satellites spécialisés appelés "satellites météorologiques", ces derniers permettent aussi de suivre la formation et les déplacements de certains phénomènes météorologiques comme des tempêtes, les ouragans ou encore les typhons.

➤ **Ils permettent l'échange d'informations :**

Les télécommunications sont une autre application majeure des satellites, ils sont des centaines aujourd'hui à être placés sur l'orbite géostationnaire (dans le plan de l'équateur à 36.000 km d'altitude) et ce pour servir de relais de transmission pour les télécommunications, ainsi, ils permettent :

- ❖ La téléphonie et l'Internet par satellite dans des régions reculées du globe ;
- ❖ La réception directe de chaînes de télévision ;
- ❖ La transmission de données en temps réel entre les places boursières, les réseaux bancaires et les grandes entreprises ;
- ❖ La localisation de nos véhicules et l'utilisation des GPS.

➤ **Ils servent à observer la Terre :**

Tout le monde peut s'en rendre compte en cliquant sur « Google Earth » : notre planète est aujourd'hui observée sous tous les angles par de très nombreux satellites dits "imageurs ». Nos observations de la surface terrestre sont devenues de plus en plus précises puisque, en quarante ans, la résolution des images est passée de 80 mètres à 50 centimètres, les applications de ces images satellites sont multiples :

- ✚ Pour la défense du territoire et le renseignement ;
- ✚ Pour la cartographie ;
- ✚ Pour le suivi de l'environnement (progression de la déforestation et changements d'occupation des sols) ;

✚ Pour le suivi et la gestion en temps réel des catastrophes naturelles (incendies, séismes, cyclones, inondations ou encore les déversements accidentels d'hydrocarbures).

➤ **Ils surveillent les océans et les ressources en eau :**

Outre l'observation des différents continents, les satellites artificiels qui gravitent autour de la terre surveillent également les océans et fournissent de nombreuses mesures telles que :

- ✚ La température et la salinité de surface de la mer
- ✚ Les courants ;
- ✚ Les vagues ;
- ✚ L'élévation du niveau de la mer et même ;
- ✚ L'activité biologique des eaux superficielles.

Ces observations permettent ainsi d'établir des bulletins océaniques en temps réel et des prévisions sur l'état de l'océan qui sont bien sûr très utiles pour la Marine nationale, les navigateurs, les pêcheurs ou encore les plaisanciers.

Une autre application récente de l'observation spatiale consiste en la gestion des ressources en eau à l'échelle planétaire, les satellites nous aident en effet à estimer les précipitations, les variations des volumes d'eau des réservoirs de surface (lacs, fleuves, réservoirs artificiels), de mesurer l'humidité superficielle des sols et de visualiser le pompage de l'eau dans les nappes phréatiques.

II.8 Architecture d'un système de télécommunications par satellite :

[1*]

Un système de télécommunications par satellite comprend les satellites (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.

➤ **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, celles-ci 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.

➤ **Le secteur spatial :**

Celui-ci est constitué principalement du satellite et de l'ensemble des stations de poursuite, de télémesure 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.

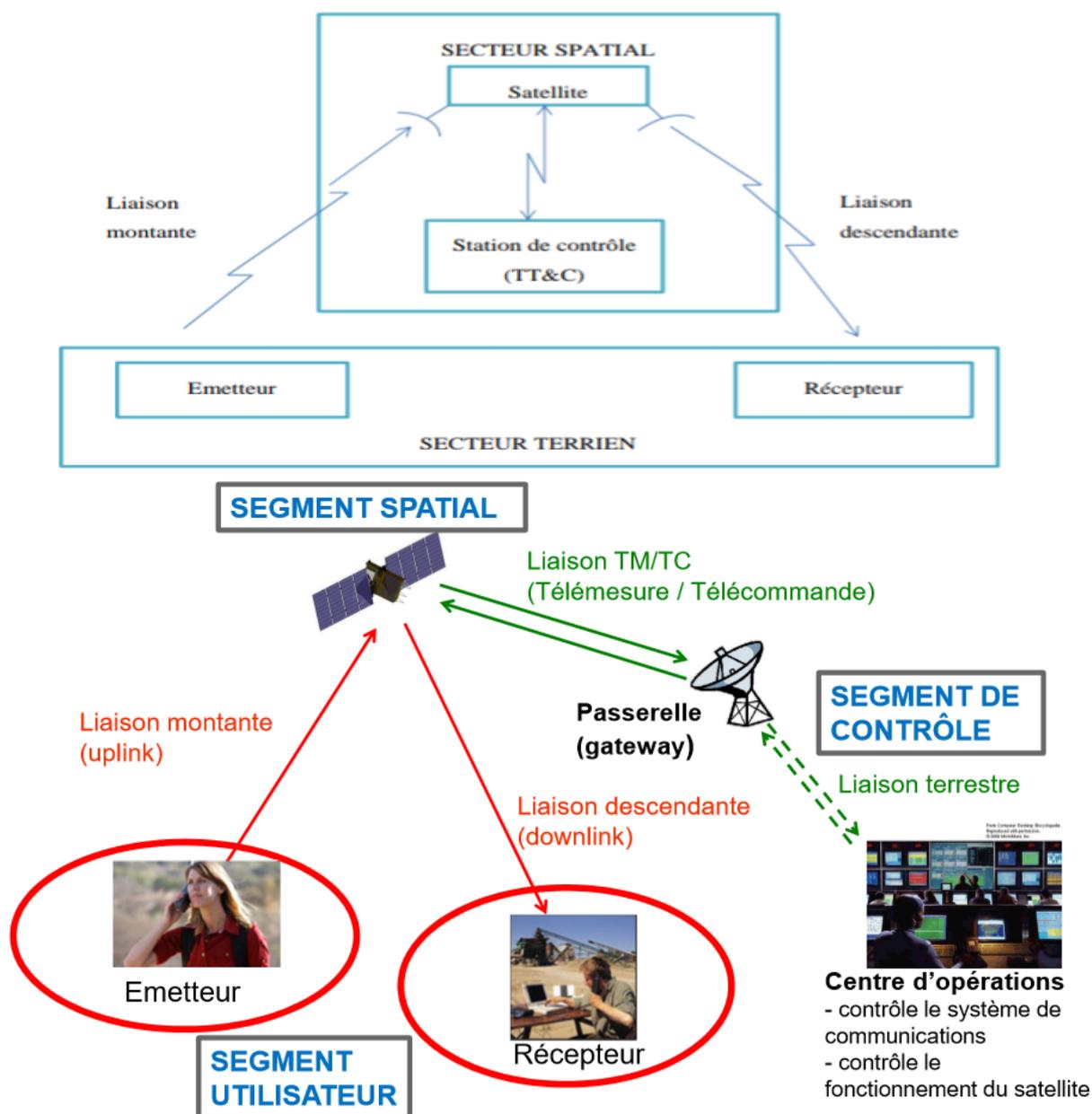


Figure II.5 : Composantes d'un système de télécommunications par satellite

II.9 Description système d'un nano satellite : [5*]

Du point de vue système, il est pratique de subdiviser un engin spatial ou satellite en plusieurs éléments fonctionnels, ainsi, on en distingue :

- ✚ Un segment spatial communément appelé satellite ;

✚ Un segment au sol constitué d'une ou plusieurs stations au sol dont le rôle est d'envoyer les commandes au segment spatial et de recevoir les données de télémétrie et celles de la charge utile embarquée.

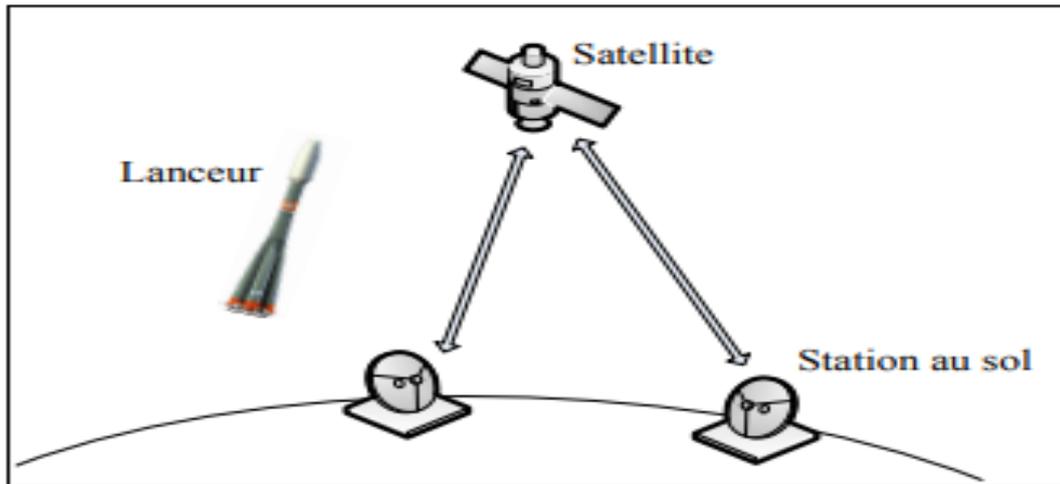


Figure II.6: Vue globale du système englobant segment spatial et segment au sol

Chacun des éléments du système spatial peut être considéré, comme un sous-système exécutant des fonctions qui lui seront associées et interagissant avec les autres en fonction des objectifs et exigences fonctionnelles de la mission, dans le cas d'un nano satellite, le segment spatial est généralement constitué de deux parties (Figure II.6) :

✚ La charge utile qui dépend de la mission. Vu la contrainte de masse des nano satellites, cette charge utile consiste généralement à faire de l'expérimentation scientifique dans l'espace (évaluer, vérifier et valider certaines technologies et protocoles de communication).

✚ La plateforme du segment spatial est constituée de plusieurs sous-systèmes qui assurent le bon déroulement de la mission, pour les nano satellites, il s'agit généralement des sous-systèmes.

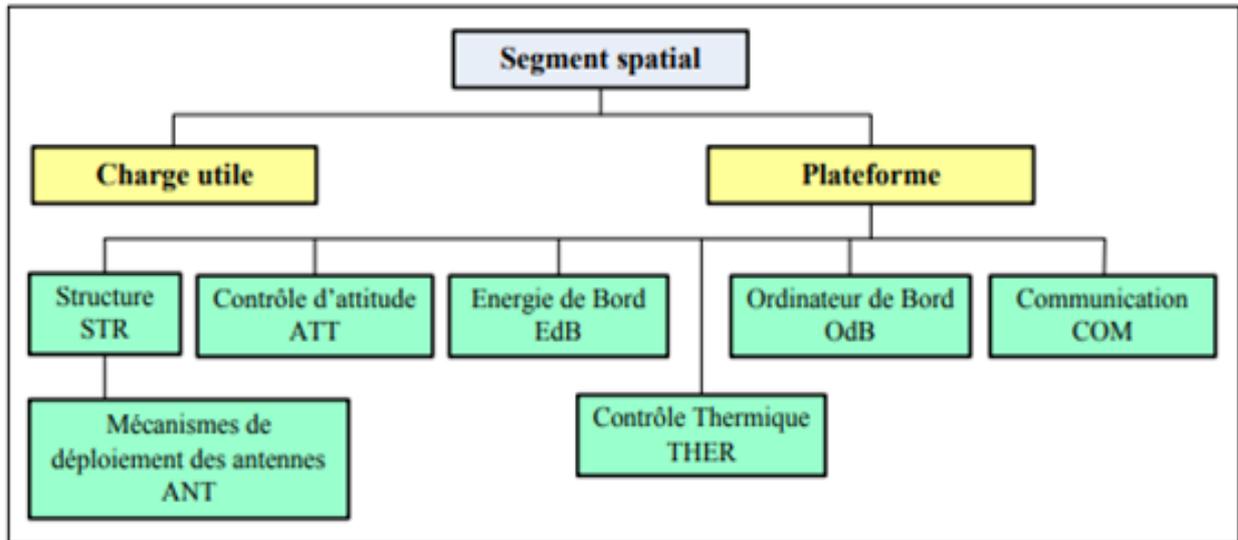


Figure II.7 :Sous-systèmes du segment spatial

- ✚ **Structure (STR)** qui assure, d'une part un interfaçage mécanique entre le segment spatial et le lanceur, et d'autre part un environnement de fonctionnement sécurisé contre les effets des radiations spatiales.
- ✚ **Contrôle d'attitude (ATT)** permet d'assurer une orientation optimale du segment spatial dans l'espace en fonction des objectifs de la mission.
- ✚ **Energie de Bord (EdB)** qui a pour tâches principales la production de l'énergie électrique provenant des cellules solaires, son stockage dans des batteries, et sa régulation/distribution sécurisée aux différents sous-systèmes embarqués dans le segment spatial en fonction de leurs besoins en termes de consommation.
- ✚ **Contrôle Thermique (THER)** qui doit garantir au segment spatial un environnement thermique permettant son fonctionnement nominal, sachant que la température dans l'environnement spatiale peut varier de -130°C à $+100^{\circ}\text{C}$ en quelque dizaines de secondes ou minutes
- ✚ **Communication (COM)** qui est composé d'un émetteur/récepteur radio permettant d'assurer un lien fiable entre le segment spatial et celui au sol.
- ✚ **Ordinateur de Bord (OdB)** qui est le système principal de traitement des données et des télécommandes. Il doit ainsi garantir un état opérationnel stable du segment spatial en assurant toute les tâches de supervision et de contrôle.
- ✚ **Mécanisme de déploiement des Antennes (ANT)** qui est un système spécifique pour les nano satellites, son rôle principal c'est la maintenance des antennes en place lors du lancement, et leur déploiement une fois le segment spatial en orbite.

II.10 Les nanosatellites : [3*]

Les nanosatellites sont des très petites plateformes dont la masse ne dépasse pas 10 Kg. Ils sont destinés à embarquer des missions élémentaires ciblées, pour lesquelles il n'est pas souhaitable d'engager une grosse charge utile. Ils peuvent aussi être utilisés pour réaliser des missions préparatoires à d'autres missions plus ambitieuses.

Le but est par exemple de valider des technologies en réduisant la prise de risque, cependant il paraîtrait que l'avenir réside probablement dans le déploiement des constellations de 20 à 50 nano satellite pour des mesures distribuées.

Du nano satellite au « Cubesat » : [4*]

Les nano satellite se sont popularisés dans les années 1990 grâce à la création d'un nouveau nano satellite, le « Cubesat », issu de la recherche d'un laboratoire de l'université de Stanford (San Francisco, Californie, Etats Unis), ce satellite a la forme d'un cube, avec une arête de 10cm et pèse au maximum 1,33kg, il consomme très peu d'énergie.

Ces satellites rendent de nombreux services, ils font entre autres office de détecteurs de particules, de relais de communication, etc. et ce même si la batterie embarquée ne leur fournit que peu de puissance.

Souvent envoyés en grappe, les nano satellites partagent leur lanceur avec de gros satellites commerciaux, la charge financière du lancement est alors fortement réduite, le coût de fabrication et de lancement d'un nano satellite se situe entre 50 000€ et 100 000€.

En comparaison avec le satellite européen GAIA dont le coût total était estimé à 740 millions d'euros, le coût d'un nano satellite est ainsi très, très réduit, de ce fait les économies d'échelle générées par la miniaturisation, démocratisent et vulgarisent l'accès à l'espace, c'est ainsi que le nombre d'utilisateurs de l'espace s'est élargi considérablement, le Pakistan a par exemple envoyé un « Cubesat » dans l'espace en 2013.

II.11 Dénomination des bandes de fréquences : [1*]

Les télécommunications par satellite, en tant que communications radio ou sans fil, utilisent le spectre radio, l'évolution croissante des systèmes satellitaires en orbite et des systèmes de télécommunications en général, crée un intérêt sans cesse grandissant pour l'attribution des bandes de fréquences aux différents opérateurs satellitaires, la partie la plus utilisée par ces derniers et donc la plus attractive et

sujette à de nombreuses sollicitations est celle s'étalant entre 1 GHz et 30 GHz, les fréquences y sont distinguées et réparties comme suit :

Bande	Lien montant	Lien descendant	Services
L	2 GHz	1 GHz	Service de positionnement mobile par satellite.
S	4 GHz	2 GHz	Service audio radio numérique, recherche spatiale.
C	8 GHz	4 GHz	Service fixes par satellite.
X	12.5 GHz	8 GHz	Service fixes par satellite communications militaires satellites d'observations de la Terre.
Ku	18 GHz	12.5 GHz	Service de diffusion par satellite, service fixe par satellite.
K	26.5 GHz	18 GHz	Service de diffusion par satellite, service fixe par satellite
Ka	40 GHz	26.5 GHz	Service de diffusion par satellite, liaisons inter satellitaires, Imagerie par satellite

Tableau II.2: Bandes de fréquences et services [1]*

II.12 Avantages et inconvénients :

Avantage :

- + Relais hertzien élevé ;
- + Installation rapide des stations sol ;
- + Installation indépendante des infrastructures terrestres ;
- + Flexibilité ;
- + Permet la surveillance de tous les points du globe.

Inconvénients :

- + Trajectoire prédictible/changement d'orbite possible mais couteux ;
- + Temps de propagation élevé ;

✚ Forte atténuation du signal.

II.13 Conclusion :

En conclusion, nous pouvons affirmer que depuis la mise en orbite du premier satellite en 1957, la vie quotidienne de l'homme s'est grandement améliorée, nous avons les avons rarement à l'esprit et pourtant les satellites jouent un rôle essentiel dans notre quotidien, ils influent sur notre bien-être et nous permettent de réaliser nos objectifs de façon innovante.

Depuis l'espace, les satellites fournissent des renseignements et des services servant à promouvoir les télécommunications, l'économie, la sécurité, la défense, la gestion des situations d'urgence, l'environnement et la santé.

L'évolution technologique permettra l'accroissement du potentiel des satellites, de nouveaux marchés émergeront et les occasions prometteuses se multiplieront, repoussant ainsi les limites des technologies spatiales.

De plus, il est reconnu que les technologies de communication par satellite ont réalisé des gains d'efficacité remarquables et augmenté leurs performances en près d'un demi-siècle.

Chapitre III

Résultats de simulations

Chapitre III : ce chapitre présente la démarche de conception logicielle et les résultats de simulation d'une antenne imprimée

III.1 Introduction :

L'objectif principal de notre travail de mémoire porte sur la conception de structures de réseaux d'antennes pour les applications nano satellitaires en bande S.

Bien que la largeur de l'antenne patch dans sa forme la plus simple soit l'un des facteurs qui affectent la largeur de la bande passante, mais il n'est pas pratique de l'augmenter pour obtenir des résultats satisfaisants.

Les antennes patch sont actuellement considérées comme très prometteuses, notamment pour la conception d'antennes compactes. Il est conçu par déformation de patch pour améliorer les performances de ces types d'antennes telles que la largeur de bande, la résonance multifréquence et le gain.

III.2 La bande S :

La bande S est une bande de fréquence définie sur la partie du spectre électromagnétique allant de 2 à 4 GHz. Cette bande est surtout utilisée par les radars météorologiques et quelques satellites de communication, spécialement ceux que la NASA emploie pour communiquer avec leurs navettes spatiales et la Station spatiale internationale (ISS). Utilisée aussi pour certains transmetteurs audio/vidéo de puissance maximale 20 mW et aussi pour le Wifi (2400 à 2460 MHz). La bande S a des utilisations différentes par pays ce qui l'a rapidement rendu ingérable dans le cadre d'une maîtrise globale des communications terrestres et par satellite. Cette bande sert sur terre aux réseaux Wifi et Wi Max, mais aussi aux fours à micro-ondes qui opèrent aux alentours de 2,45 GHz [2].

III.3 Conception d'une antenne patch :

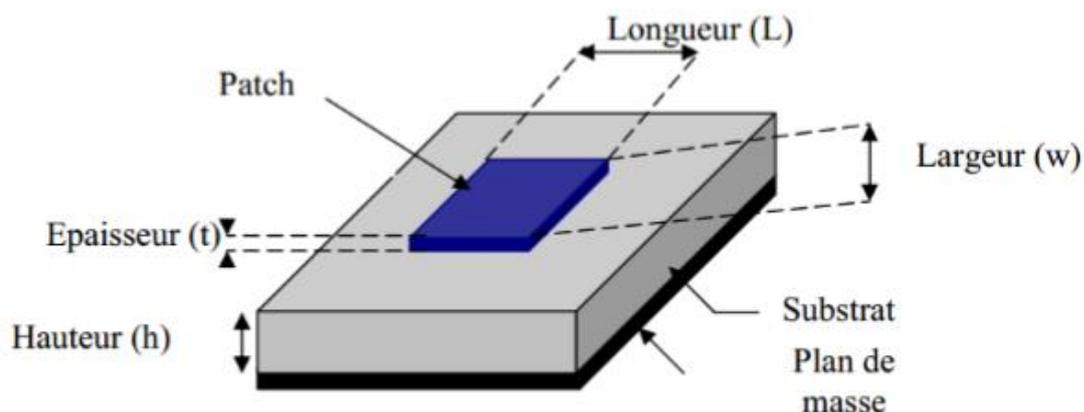


Figure III.1 : Les dimensions d'une antenne patch.

III.3.1. Calcul de la permittivité effective de l'élément rayonnant :

D'après les formules d'AMMERSTAD, la permittivité effective est :

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} * \left(1 + 12 * \frac{h}{w}\right)^{-\frac{1}{2}} \text{ Pour } \frac{h}{w} \geq 1 \quad \text{Équation (26)}$$

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} * \left[\left(1 + 12 \frac{h}{w}\right)^{-\frac{1}{2}} + 0.04 \left(1 - \frac{w}{h}\right)^2 \right] \text{ Pour } \frac{h}{w} < 1 \quad \text{Équation (27)}$$

III.3.2. Calcul de la longueur du patch L :

Pour un patch rectangulaire, sa longueur L est généralement $0.3333\lambda_0 < L < 0.5 \lambda_0$, où λ_0 est la longueur d'onde dans l'espace libre. Le patch est conçu de façon qu'il soit très mince ($t \ll \lambda_0$, ou t est l'épaisseur du patch) La taille h du substrat diélectrique est habituellement $0.003 \lambda_0 < h < 0.05 \lambda_0$.

III.3.3. Calcul de la largeur du patch W:

Dans une antenne patch rectangulaire, pour qu'une antenne rayonne le plus efficacement possible, W doit être égale à $\lambda/2$ et on la calcule par la relation :

La largeur du patch est donnée par la relation :

$$w = \frac{c}{2 * f_0} * \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad \text{Équation 28}$$

- C : vitesse de la lumière dans le vide
- f_0 : La fréquence de résonance

Remarque : la longueur de résonance est d'environ de $\lambda/2$

Meilleure approximation est :

$$l = 0.49 \times \lambda_d \quad \text{Équation 29}$$

Ou :

$$L = L_{eff} - 2\Delta L \quad \text{Équation 30}$$

- + L : longueur de résonateur
- + λ_0 : longueur d'onde dans l'espace libre
- + λ_d : longueur d'onde dans l'espace diélectrique
- + ϵ_r : constant diélectrique des matériaux utilisés

III.4. Technique d'adaptation d'antenne:

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

III.4.1. Adaptation avec encoche :

Pour adapter l'antenne, une alimentation axiale avec encoche qui est la meilleure méthode par rapport aux résultats obtenus, il suffit de modifier la géométrie du patch. Les dimensions des encoches sont données par la relation :

- La longueur et la largeur effective du patch s'écrivent :

$$l_{eff} = l + \Delta l \quad \text{Équation 31}$$

$$w_{eff} = w + 2\Delta w \quad \text{Équation 32}$$

- + ΔL et ΔW Sont les extensions le long de L et de W.

III.4.2 Calcul de l'extension de longueur de patch :

- L'extension de la longueur du patch donnée par la relation suivante :

$$\Delta l = \frac{h}{\sqrt{\epsilon_0}} \quad \text{Équation 33}$$

- La longueur effective est donnée par la relation :

$$l_{eff} = \frac{c}{2f \sqrt{\epsilon_{reff}}} \quad \text{Équation 34}$$

- Ou f_0 est la fréquence de résonance calculée par la relation :

$$f_0 = \frac{c}{2l_0 \sqrt{\epsilon_0}} \text{ Équation 35}$$

- Et L'impédance du patch est donnée par la relation :

$$Z_{in} = 90 \frac{\epsilon_r - 2}{\epsilon_r - 1} \left(\frac{l}{w}\right)^2 \text{ Équation 36}$$



Figure. III. 2 : un patch normal

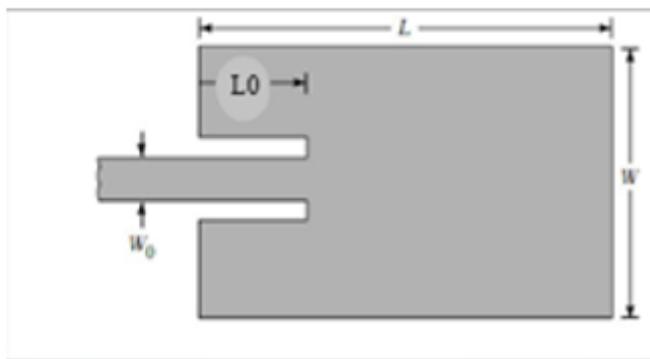


Figure III.3 : un patch avec encoche.

Ou :

L : la longueur de l'élément rayonnant.

W : la largeur de l'élément rayonnant.

$W_0 = \Delta W$: la largeur de la ligne.

$L_0 = \Delta L$: l'épaisseur de la ligne dans l'élément rayonnant.

III.5 Antenne patch carré alimenté par ligne micro ruban

L'antenne étudiée est une antenne patch carré alimentée et adaptée par une ligne micro-ruban, Nous allons simuler cette antenne dans la fréquence 2.5 GHz pour des applications nano satellitaire

✚ Le substrat utilisé est de type FR4 (lossy) avec une permittivité de 4.7 et une épaisseur $h=1.6\text{mm}$.

✚ Les dimensions de notre antenne sont calculées à partir des équations [26 ,28,30,31,33, 34]

Avec : $F_{i=\frac{6H}{2}}$ Équation 37

III.5.1 Simulation de l'antenne patch carré à la fréquence 2.5GHz

L'antenne proposée est une antenne patch carré, alimentée et adaptée pour une ligne micro rubane, elle fonctionne à la fréquence 2.5 GHz. Les paramètres géométriques de cette antenne sont représentés dans la figure III.5.

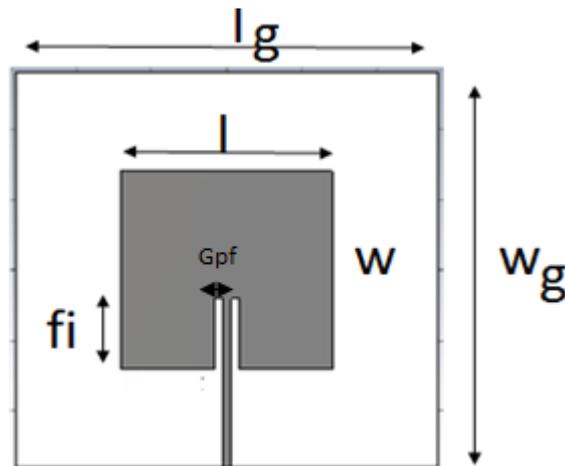


Figure III.4 : Antenne patch carré avec encoche pour $F=2.5\text{GHz}$

Les valeurs des paramètres de l'antenne sont mentionnées dans le tableau III.1

paramètre	Valeur
W	35.54
L	35.54
Fi	4.8
Wf	2.93
Gpf	1
Lg	2*L
Wg	2*W
Hs	1.6
H	0.035

Tableau III.1 Les valeurs de paramètre

III.5.2 Coefficient de réflexion S [1,1] de l'antenne carré avec une ligne micro ruban

La figure III.5 obtenu une fréquence de 2.5GHz avec un paramètre S11 de -28.669 dB, nous allons donc effectuer une étude paramétrique sous CST sur la ligne d'alimentation pour améliorer l'adaptation de notre antenne,

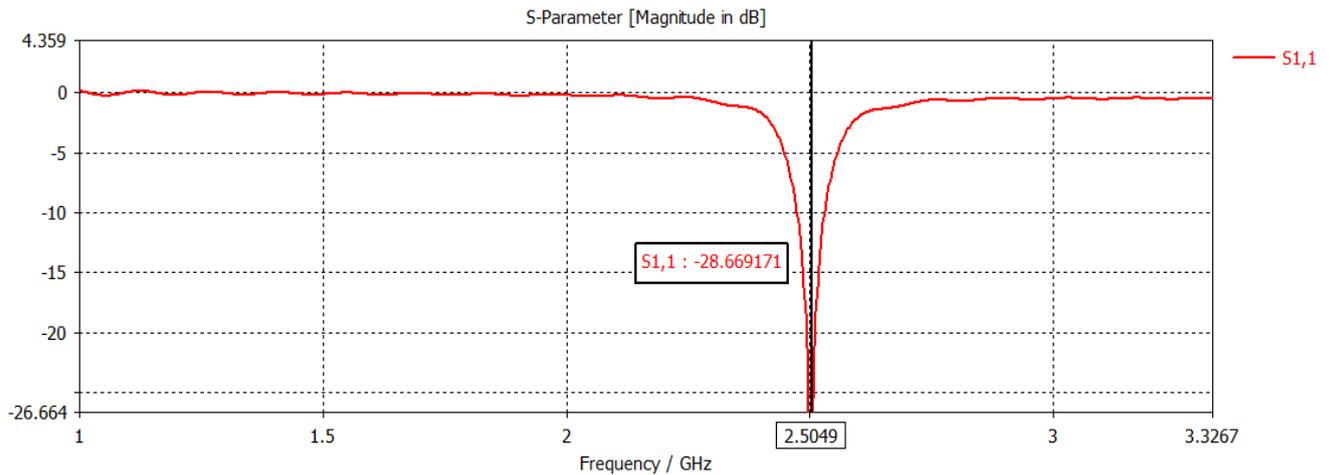


Figure III.5 : Coefficient de réflexion S_{11}

III.5.3 VSWR de l'antenne carré adaptée à la fréquence 2.5GHz

La Figure III.6 montre clairement que, dans la fréquence de résonance exploitée pour cette antenne, la valeur VSWR est nettement inférieure à 1,03 à la fréquence 2.5 GHz,

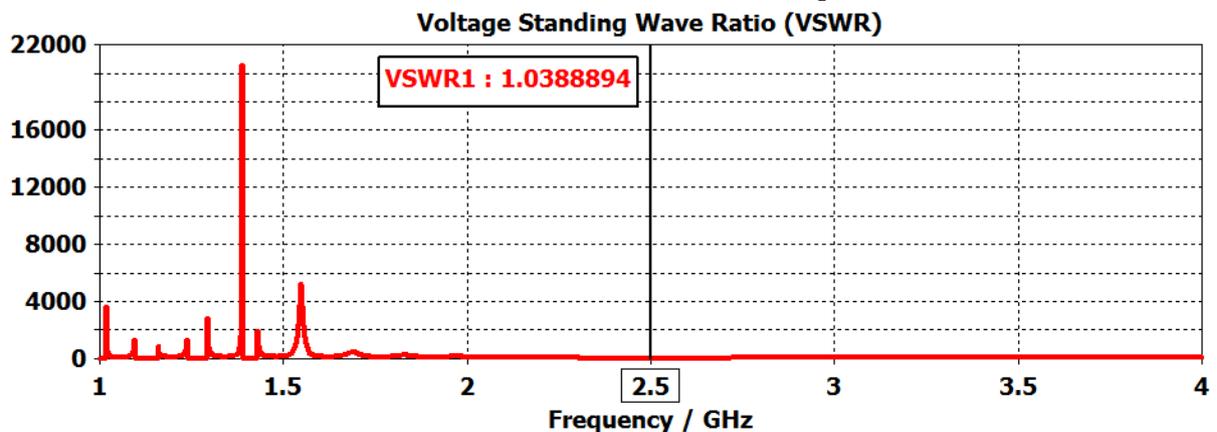
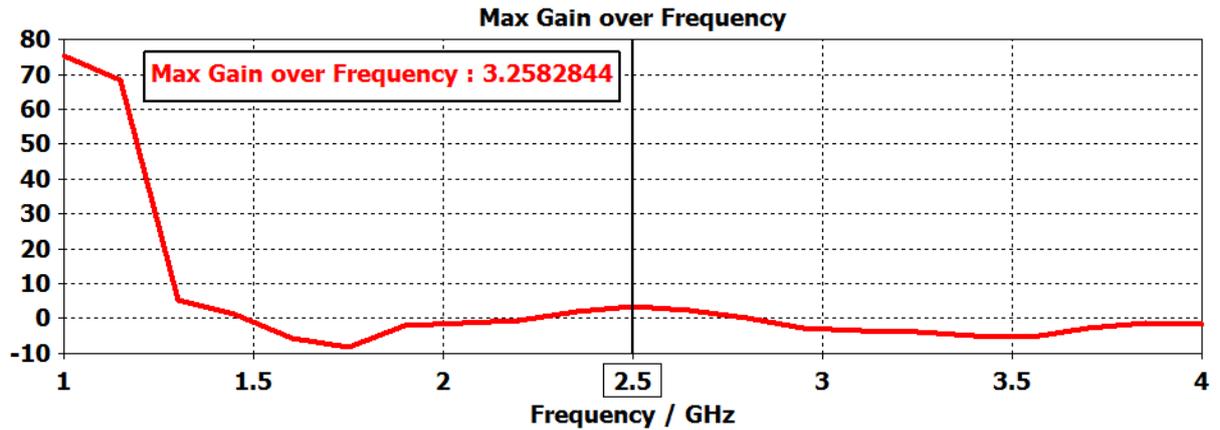


Figure.III. 6 : VSWR simulé

III.5.4 le gain d'antenne :

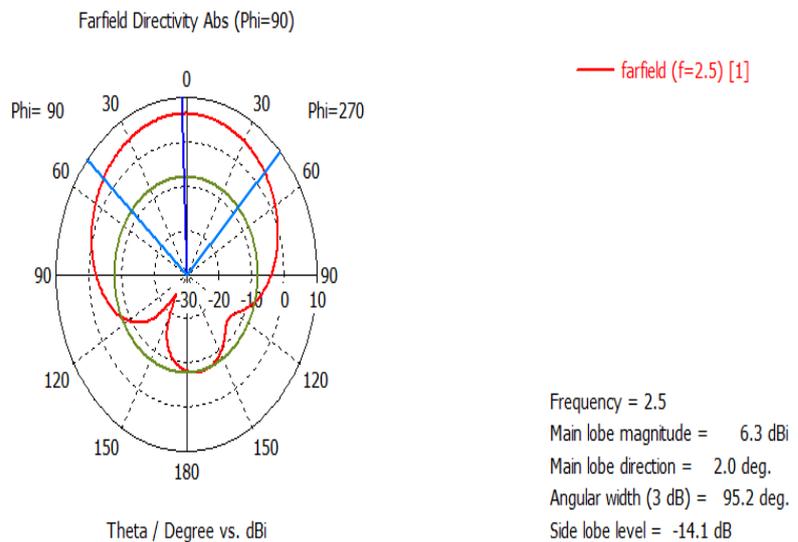
La Figure III.7 montre le gain de l'antenne patch carré autour de 2.5 GHz nous adonné un gain maximal de 3.25 (dBi)



La Figure III.7 : le gain d'antenne.

III.5.5 Diagramme de rayonnement de l'antenne carré adaptée à la fréquence 2.5GHz :

La Figure III.8 montre le diagramme de rayonnement simulé de l'antenne patch carré autour de 2.5 GHz pour une variation de l'angle Thêta avec Phi = 90. Il est clair que l'énergie est concentrée dans la direction d'une ouverture de 95.2° a -3 dB.



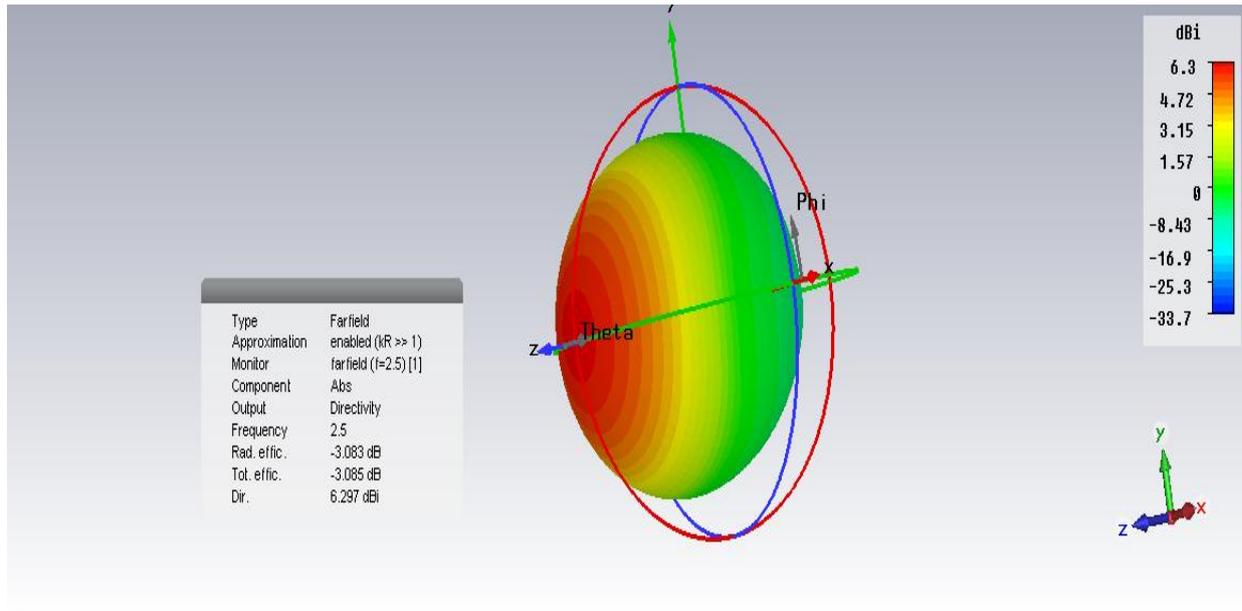


Figure III.8 :Diagramme de rayonnement 3D et polaire

Le tableau III.2 présente les résultats du gain et directivité à la fréquence 2.5GHZ

Fréquence	Gain (dB)	Directivité (dB)
2.5GHz	3.25	6.3

Tableau III.2 : Gain et directivité d'antenne carré

III.6 Résultats de simulations de la nouvelle géométrie d'antenne patch :

Les résultats obtenus à partir de la simulation par un logiciel commercial seront discutés dans cette section.

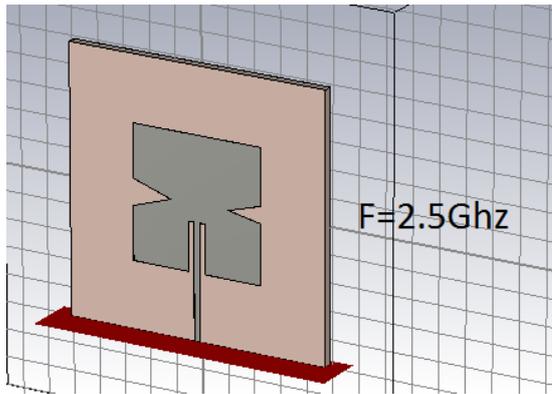


Figure III.9 : nouvelle géométrie d'antenne patch avec encoche

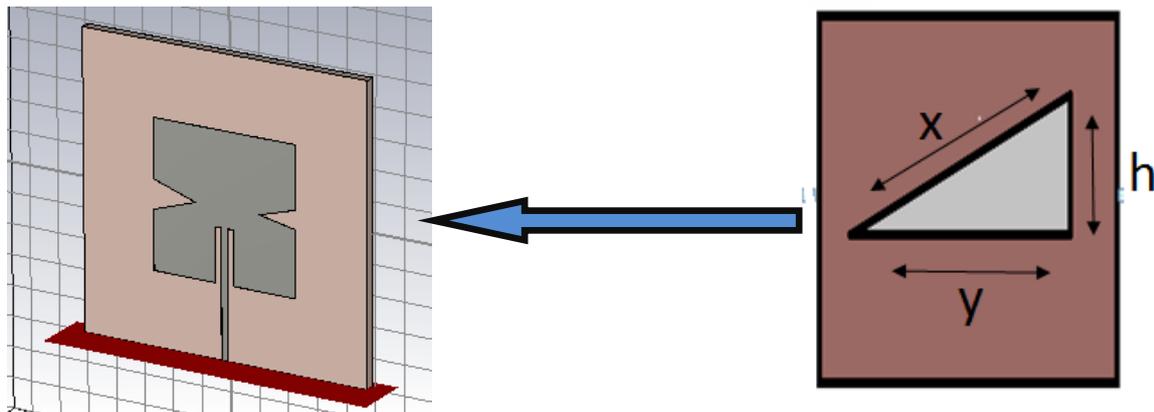


Figure III.10: nouvelle géométrie d'antenne patch avec encoche avec longueurs du triangle

Le tableau suivant présente quelque longueur intéressante de triangle pour obtenir un bon résultat:

X	Y	H	S11 (dB)	Vswr	Gain(dB)
4.65	3.25	1.8	-9.5	2.05	1.95
3.5	2.98	1.6	-8.88	2.33	2.5
3.1	2.5	1.5	-17.57	1.30	4

Tableau.III. 3.des longueurs du triangle

III.6.1 Coefficient de réflexion S [1,1] de la nouvelle géométrie d'antenne avec uneligne micro ruban

Nous allons représenter le coefficient de réflexion S11, qui va nous permettre de visualiser le niveau d'adaptation et la bande passante à la fréquence de résonance désirée pour cette antenne.

Bon résultat donne pour c'est valeur $x=3.1$, $y=2.5$, $h=1.5$.

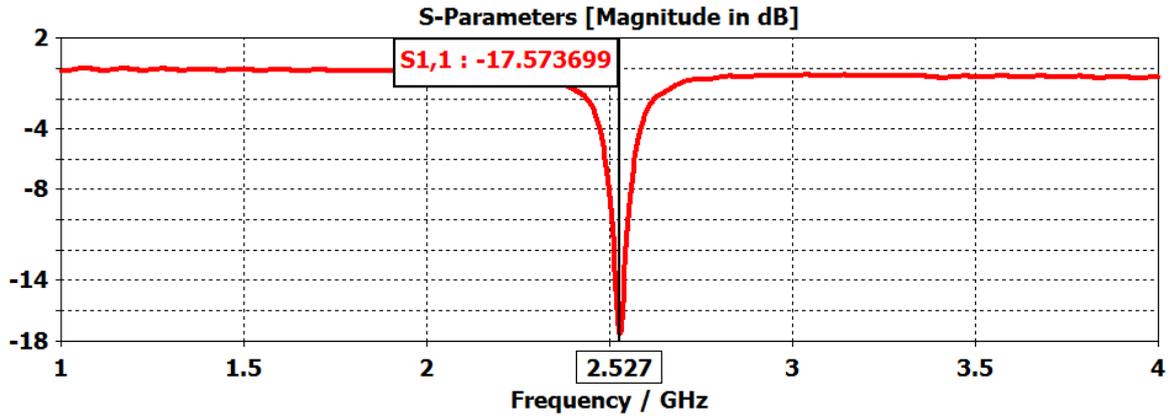


Figure III.11 : Coefficient de réflexion S_{11}

La figure III.11 obtenu une fréquence de 2.5 GHz avec un paramètre S11 de -17.573 dB, nous allons donc effectuer une étude paramétrique sous CST sur la ligne d'alimentation pour améliorer l'adaptation de notre antenne,

III.6.2 VSWR de la nouvelle géométrie d'antenne adaptée à la fréquence 2.5GHz :

La Figure III.12 montre clairement que, dans la fréquence de résonance exploitée pour cette antenne, la valeur VSWR est nettement inférieure à 1,30, non seulement autour de 2.5 GHz,

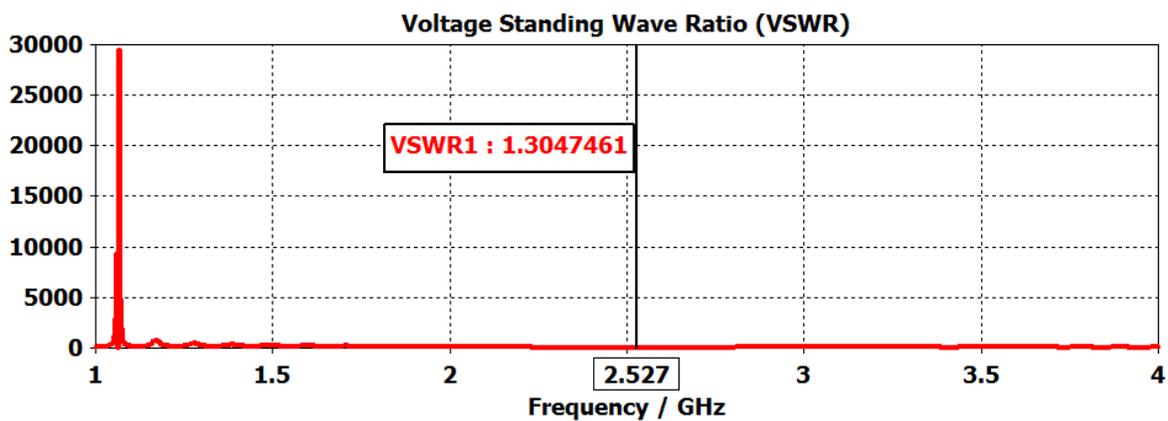
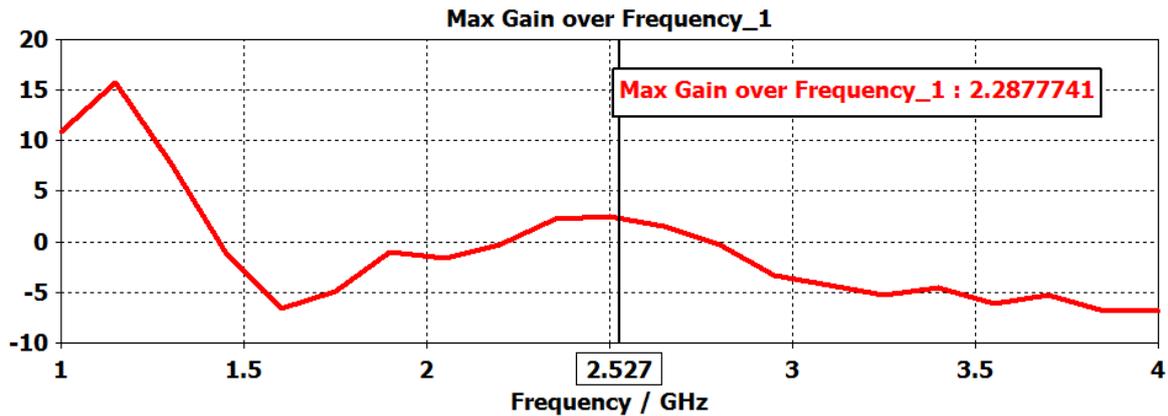


Figure III.12 : VSWR de la nouvelle géométrie

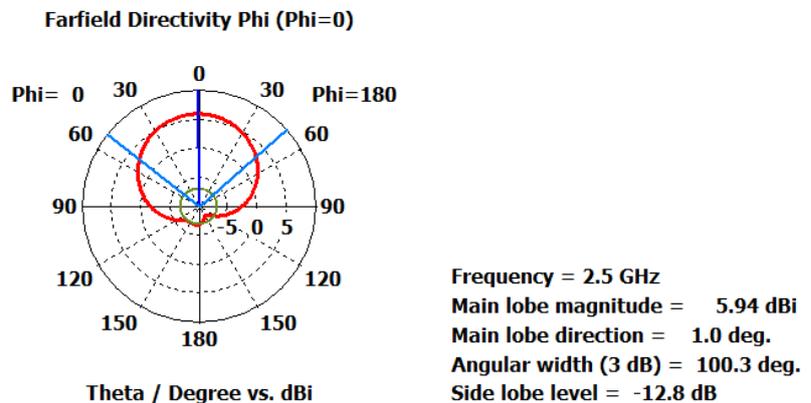
III.6.3 le gain d'antenne :



La Figure III.13 : le gain d'antenne.

III.6.4 Diagramme de rayonnement de la nouvelle géométrie d'antenne adaptée à la fréquence 2.5GHz :

CST permet de visualiser les diagrammes de rayonnement 3D de l'antenne. C'est une représentation qui nous informe sur le gain et la directivité de l'antenne. Il nous donne la possibilité de visualiser le rayonnement sur un plan polaire; ceci nous donne une idée sur l'angle d'ouverture.



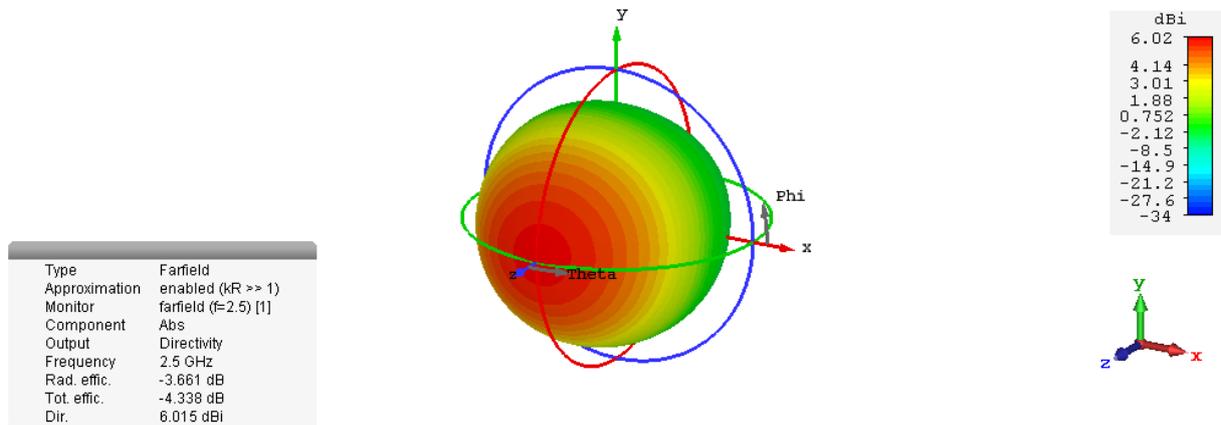


Figure III.14 : Diagramme de rayonnement 3D et polaire

L'antenne simulée avec CST nous a donné un gain maximal de 3 (dB) alors, le Diagramme simulé avec CST donne un angle d'ouverture à (3dB) de 100.3°, c'est une bonne ouverture pour une antenne patch pour laquelle l'angle d'ouverture à (3dB) appartient à l'intervalle [0°, 180°].

Le tableau III.4 présente les résultats du gain et directivité à la fréquence 2.5GHZ :

Fréquence	Gain (dB)	Directivité (dB)
2.5GHz	4	6.02

Tableau III.4 : Gain et directivité de la nouvelle géométrie d'antenne avec encoche

III.7 Résultats de simulation du réseau :

➤ réseau d'antennes2*1 :

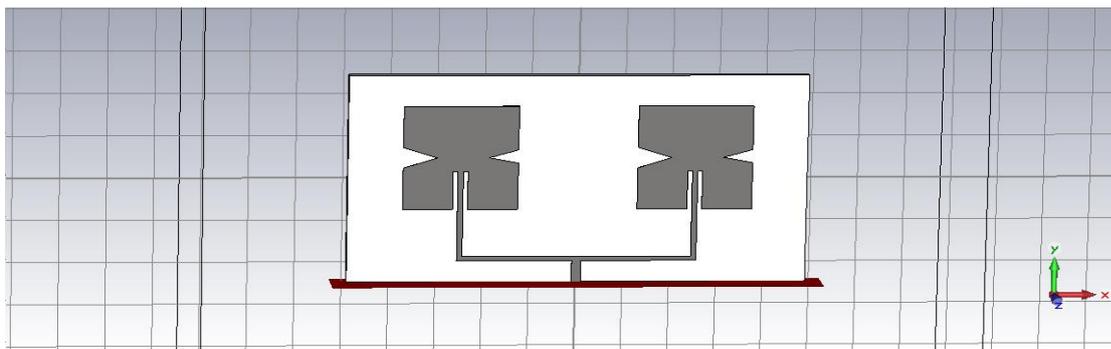


Figure III.15: réseau d'antennes alimentation parallèle 2*1

III.7.1 Coefficient de réflexion S [1,1] de réseau d'antenne 2*1 avec une ligne micro ruban :

La figure III.16 montre la comparaison des pertes de retours donné par CST Microwave Studio nous remarquons que les résultats sont entre de 2.6 GHz avec un S11 de -12.23dB et 3.4 GHz avec un S11 de -14.9 dB

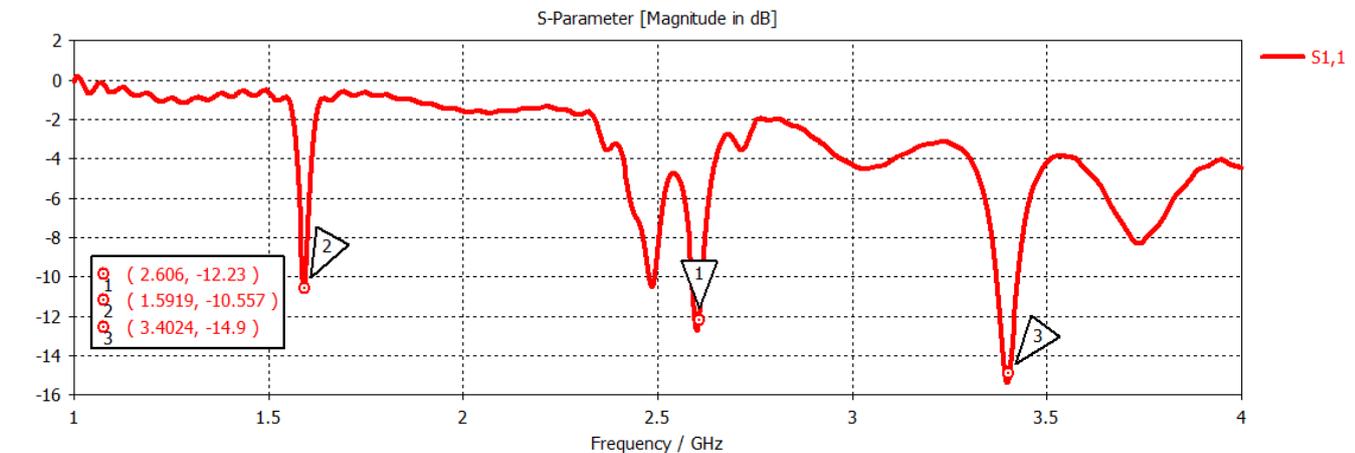


Figure III.16 : Coefficient de réflexion S_{11} de réseau d'antenne 2*1

III.7.2 VSWR de réseau l'antenne 2*1 :

La Figure III. 17 montre clairement que, dans la fréquence de résonance exploitée pour cette réseau d'antenne, la valeur VSWR est nettement inférieure à 1.521 non seulement autour de 2.5 GHz,

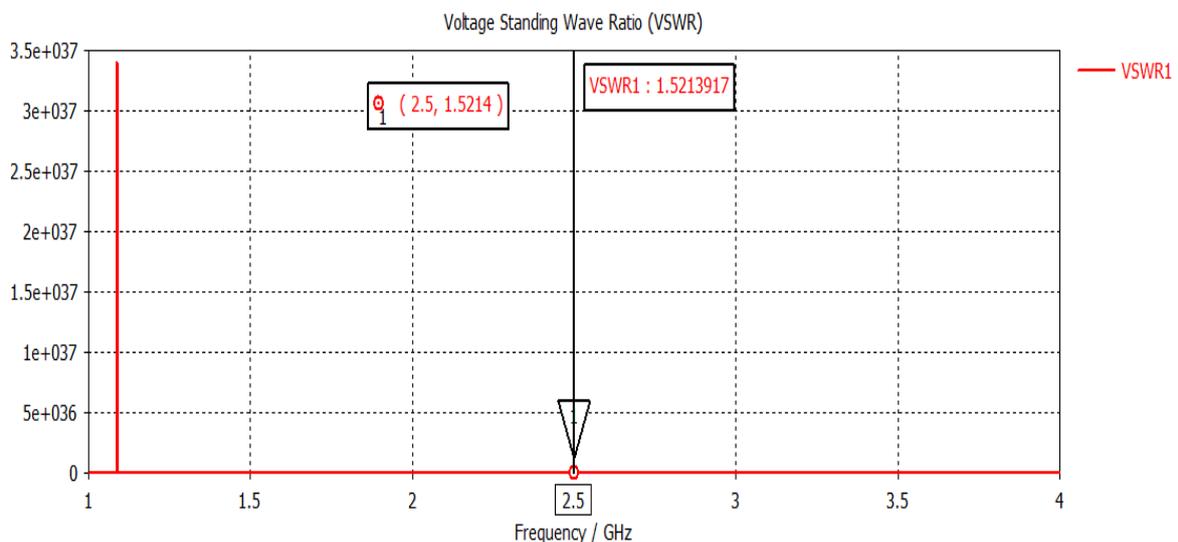


Figure III.17: VSWR de réseau l'antenne

III.7.3 le gain d'antenne :

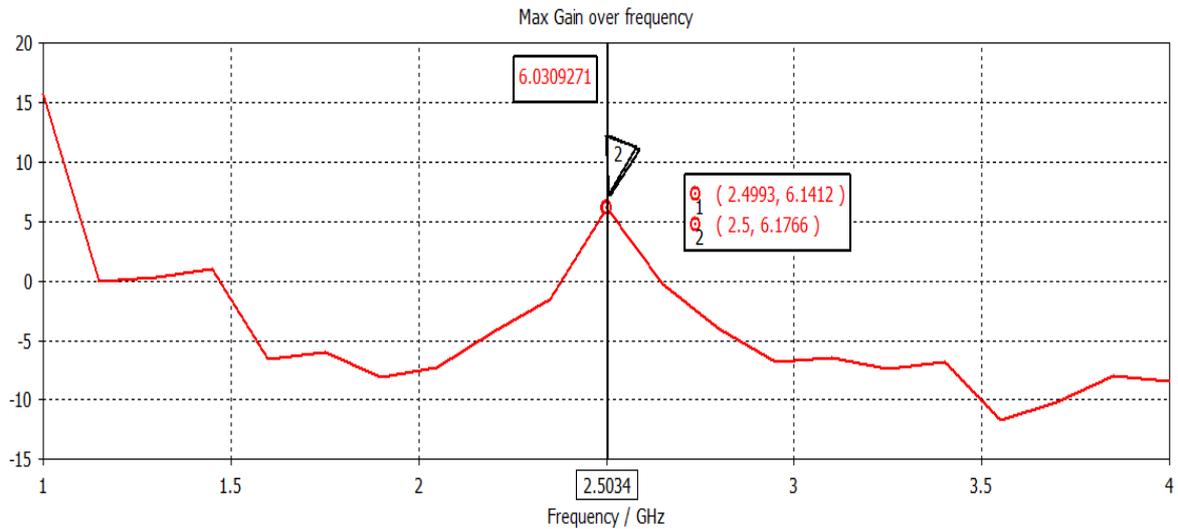


Figure III. 18 : le gain d'antenne

III.7.4 Diagramme de rayonnement de réseau l'antenne

2*1 :

Réseau d'antenne simulée avec CST nous a donné un gain maximal de 6.03 (dB) alors,

le Diagramme simulé avec CST donne un angle d'ouverture à (3dB) de 90°, c'est une bonne ouverture pour un réseau d'antenne pour laquelle l'angle d'ouverture à (3dB) appartient à l'intervalle [90°,270°].

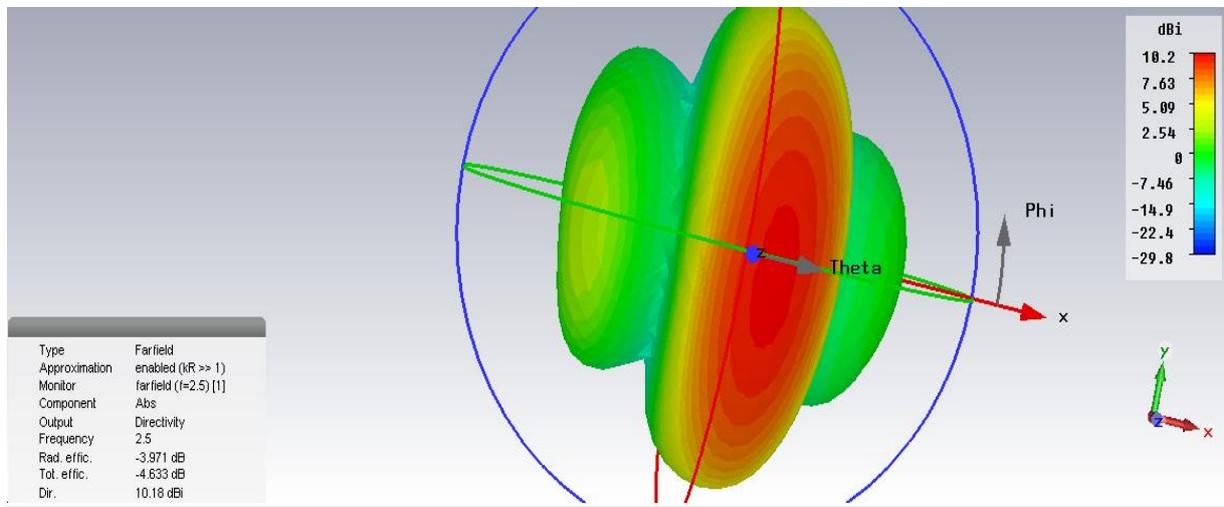
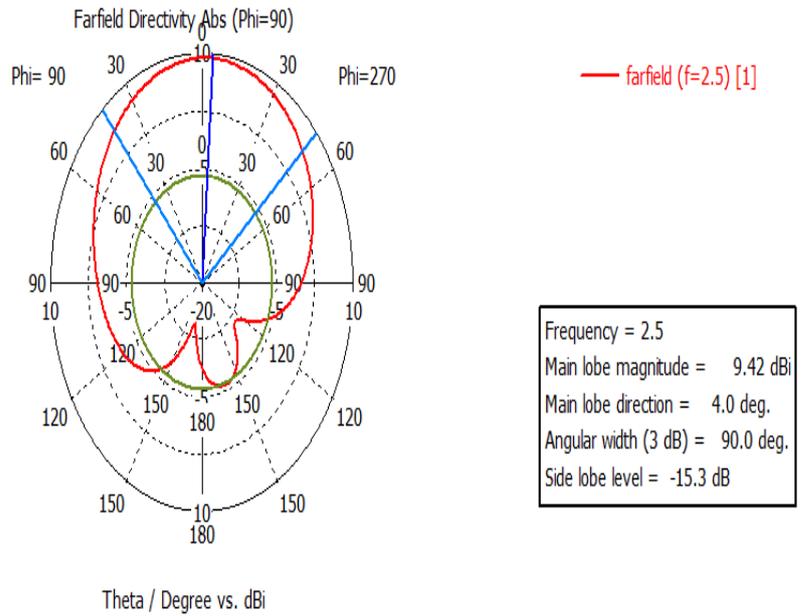


Figure III.19 : Diagramme de rayonnement 3D et polaire de réseau d'antenne

Le tableau III.5 présente les résultats du gain et directivité à la fréquence 2.5GHz

Fréquence	Gain (dB)	Directivité (dB)
2.5GHz	6.03	10.2

Tableau III.5 : Gain et directivité de réseau l'antenne

➤ Réseau d'antennes 4*1 :

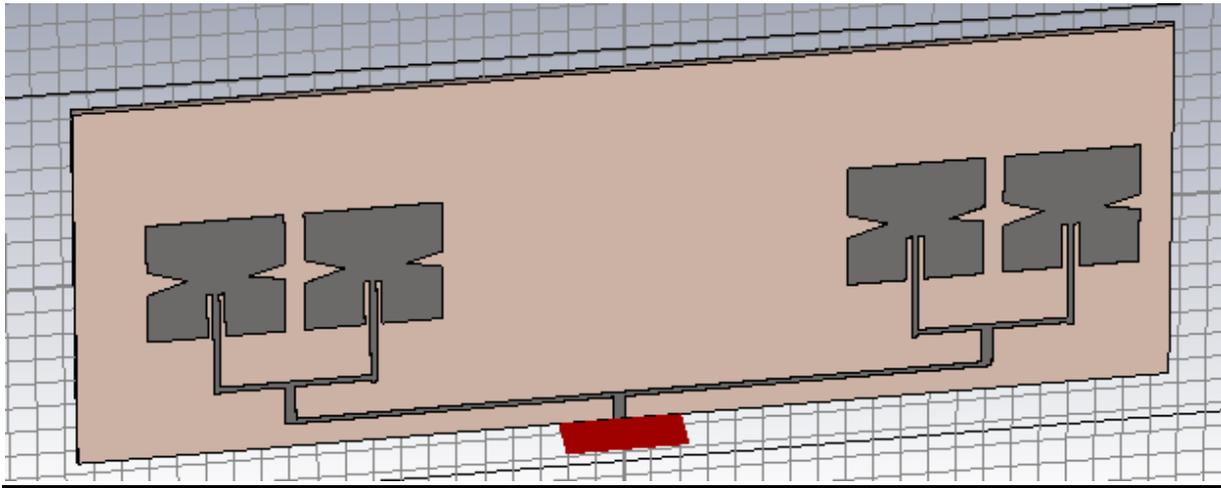


Figure III.20: réseau d'antennes alimentation parallèle 4*1

III.7.5 Coefficient de réflexion S [1,1] de réseau d'antenne 4*1 avec une ligne micro ruban

La figure III.21 montre la comparaison des pertes de retours donné par CST Microwave Studio nous remarquons que les résultats sont entre de 2.6 GHz avec un S11 de -19.147 dB et 3.39 GHz avec un S11 de -39.292 dB

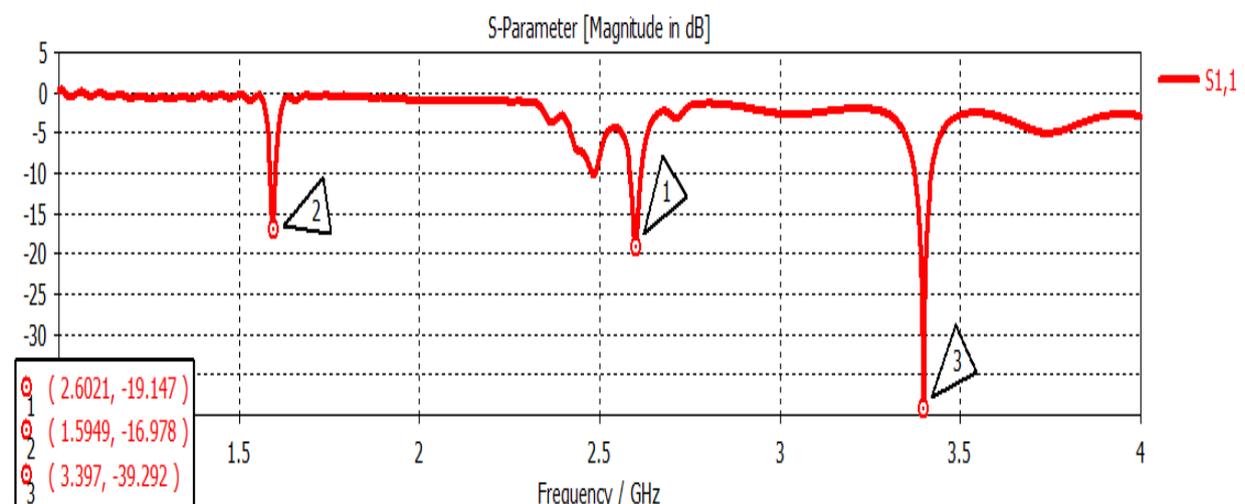


Figure III.21 : Coefficient de réflexion S_{11} de réseau d'antenne

III.7.6 VSWR de réseau l'antenne 4*1 :

La Figure III. 22 montre clairement que, dans la fréquence de résonance exploitée pour cette réseau d'antenne, la valeur VSWR est nettement inférieure à 1,982, non seulement autour de 2.5 GHz,

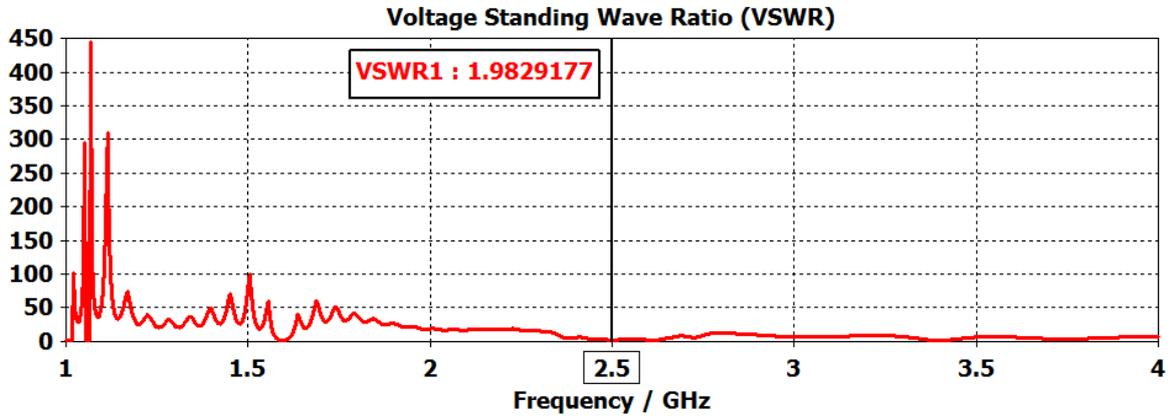


Figure III.22: VSWR de réseau l'antenne

III.7.7 le gain d'antenne :

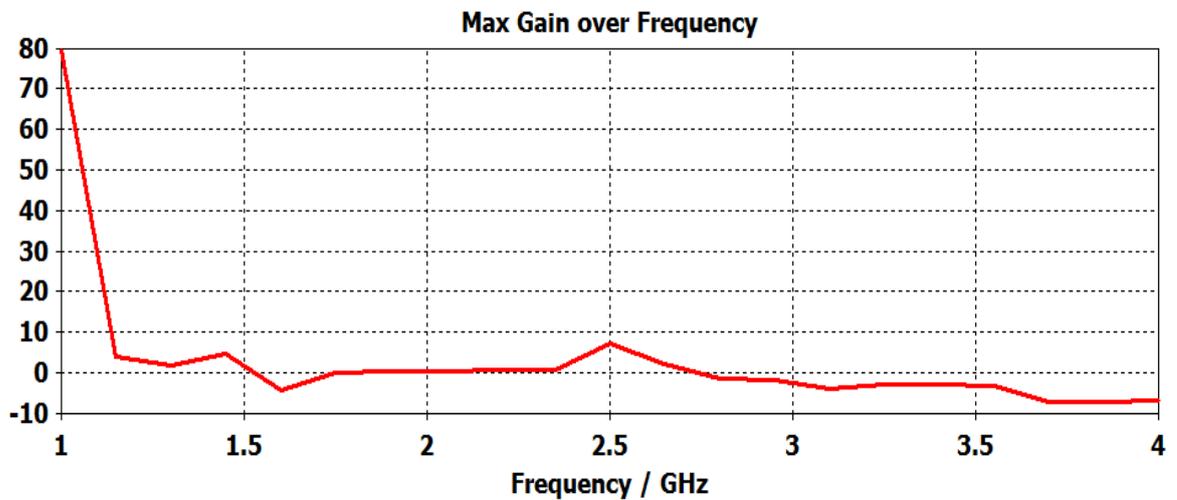
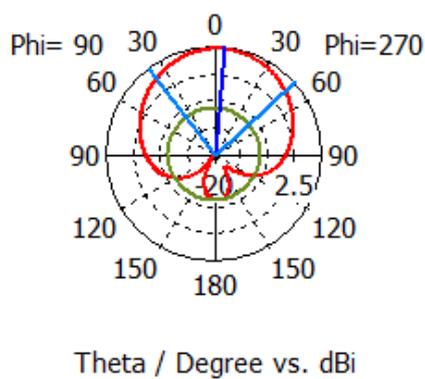


Figure III. 23 : le gain d'antenne

III.7.8 Diagramme de rayonnement de réseau l'antenne 4*1 :

Réseau d'antenne simulée avec CST nous a donné un gain maximal de 9 (dB) alors, le Diagramme simulé avec CST donne un angle d'ouverture à (3dB) de 85.6°, c'est une bonne ouverture pour un réseau d'antenne patch pour laquelle l'angle d'ouverture à (3dB) appartient à l'intervalle [90°,270°].

Farfield (Array) Directivity Abs (Phi=90)



Frequency = 2.5
 Main lobe magnitude = 9.39 dBi
 Main lobe direction = 5.0 deg.
 Angular width (3 dB) = 85.6 deg.
 Side lobe level = -16.5 dB

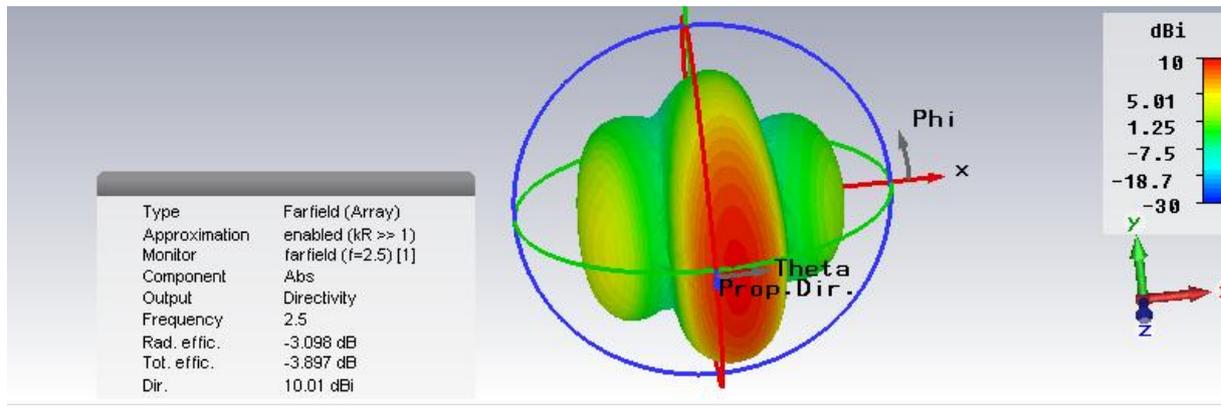


Figure III.24 : Diagramme de rayonnement 3D et polaire de réseau d'antenne

Le tableau III.6 présente les résultats du gain et directivité à la fréquence 2.5GHZ

Fréquence	Gain (dB)	Directivité (dB)
2.5GHz	9	10

Tableau III.6 : Gain et directivité de réseau l'antenne

III.9 Conclusion :

À l'issue de cette étude nous pouvons constater que la structure qui présente des caractéristiques optimales pourra éventuellement satisfaire les critères imposés par le cahier des charges en termes de bande passante et de rayonnement, est celle de l'antenne patches. L'antenne réalisée fonctionne dans une bande de fréquence 2.5 GHz avec un gain de 3 (dB)

Le réseau conçu de cette antenne présente des performances d'un point de vue circuit tout à fait compatible avec l'application visée

Conclusion générale

Les télécommunications par satellite devront encore relever de nombreux défis : l'un d'entre eux consistera à maintenir l'intérêt d'allocation de spectre pour les nouveaux systèmes et l'abandon des fréquences plus élevées. La liste des développements technologiques nécessaires est longue, mais des progrès sur tous les fronts sont nécessaires pour assurer l'avenir à long terme des communications par satellites.

Les tendances futures des antennes de satellite (concernant la conception et la complexité) seront probablement dictées par l'état de la technologie du satellite, la croissance du trafic, les technologies émergentes et les activités commerciales.

La modification considérable de la forme d'antenne patch carré donne une amélioration des caractéristiques de ce type d'antennes. L'antenne réseau avec la nouvelle géométrie présente un comportement multifréquence en bande S à gain élevé (gain moyen de plus de 9 dB) et une large bande passante.

Les résultats obtenus montrent bien que l'antenne proposée est bien adaptée dans la bande de fréquence 2.5GHz. tous les paramètres de l'antenne tel que le coefficient de réflexion, le diagramme de rayonnement ont été présentés et commentés.

Le réseau d'antennes que nous avons conçu peut recevoir les émissions en bande S des satellites.

Annexe I

Présentation de l'outil de simulation CST

1. Description du logiciel de simulation CST Studio Suite :

Une des priorités de ce mémoire est de simuler un réseau d'antenne patch en bande s, tout en gardant les meilleures caractéristiques de l'antenne d'un point de vue bande passante et adaptation.

Pour cela nous avons choisis l'outil CST Micro-wave Studio.

La solution logicielle offerte par CST Micro-ave Studio, est une option très intéressante pour la conception d'antenne. Des fonctions comme l'optimisation, l'édition en 3D, la modélisation par variable, la mise à la terre finie et la possibilité de définir les conditions aux bornes, en font un logiciel très intéressant pour la tâche à effectuer dans le cadre de ce travail.

Le CST Micro wave Studio utilise deux techniques de discrétisation une discrétisation surfacique (cellules en 2D) et une discrétisation volumique (cellule en 3D).

L'objectif du maillage en cellule, consiste à calculer les densités de courants surfaciques électriques ou magnétiques de chaque cellule, afin de calculer le champ total de toute la structure.

Une fois ces courants déterminés, les caractéristiques de la structure étudiée peuvent être visualisées sous différentes formes : paramètres[S], lieu d'impédance, diagramme de rayonnement à deux ou trois dimensions, représentation des densités de courants.

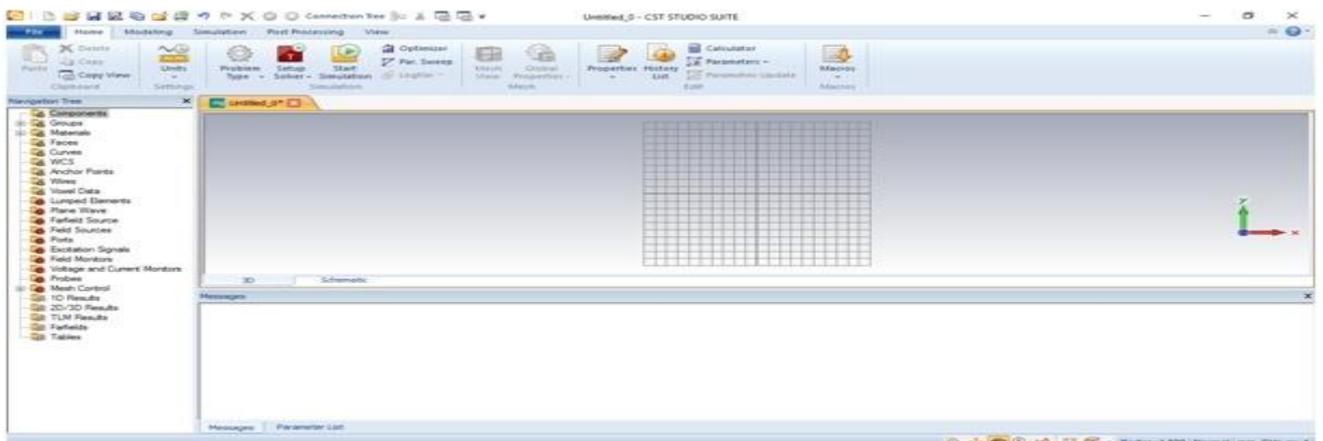


Figure1: FenêtreCST (Computer Simulation Technologie)

2. Modules de CST L'outil CST :

Est constitué d'un certain nombre de modules appelés « solveurs ».

a) Un solveur transitoire

Il s'agit d'un module 3D général qui permet d'obtenir des simulations en temps réel, ce qui peut être intéressant pour étudier la propagation du champ dans un composant électronique en fonction du temps.

b) Un solveur fréquentiel

Comme le solveur transitoire, il est constitué d'un solveur général basé sur une méthode fréquentielle. Le type de maillage change selon la structure étudiée.

c) Un solveur intégral

Ce solveur est dédié aux plus grandes structures électriques. Il se fonde sur la méthode des moments avec une formulation intégrale des champs électriques et magnétiques. Afin de réduire la complexité numérique l'approche MLFMM (Multi Level Fast Multipole Method) est utilisée.

d) Un solveur modal

Ce solveur est dédié à la simulation des structures fermées résonantes. Les résultats qui peuvent être obtenus sont par exemple la distribution des modes ainsi que les fréquences de résonance de la structure. CST nous permettent donc de décrire nos dispositifs hyperfréquences tel qu'ils sont réalisés en pratique. Dans Micro wave Studio, chaque cellule du maillage est cubique. L'outil de résolution temporelle remplace les dérivées partielles par des différentielles Δt . Nous avons choisis ce logiciel car son utilisation est très avantageuse en termes de temps de calcul pour notre simulation.

3. Les modules d'exécution

Le logiciel CST possède plusieurs modules d'exécution, qu'on va survoler brièvement.



➤ **CST EM Studio :**

C'est un outil facile à utiliser pour l'analyse et la conception des structures statiques et basses fréquences. Les applications incluent : les actionneurs, les freins EMS, EMC, générateurs, de mesure, moteurs, capteurs et le blindage.



➤ **CST Particule Studio :**

Particule CST Studio est un outil spécialisé pour la conception rapide et précise. Il inclut l'analyse des canons à électrons 3D et les tubes cathodiques.



➤ **CST Mphysics Studio :**

Cet outil permet d'analyser les contraintes thermiques et structurales, et des problèmes de mécanique.



➤ **CST Design Studio :**

C'est une plate-forme universelle pour gérer les processus de conception d'un système complexe. En construisant des sous-systèmes élémentaires, l'utilisateur peut analyser le comportement du système complet en petits segments.



➤ **CST PCB Studio :**

Cet outil permet l'étude des signaux et la simulation des effets EMC et EMI (électromagnétique Compatibility/ électromagnétique Interférence) sur cartes de circuits imprimés.



➤ **CST câble Studio :**

CST CABLE STUDIO est un outil pour l'analyse des effets dans les systèmes de câble, y compris les fils uniques, paires torsadées ainsi que des faisceaux de câbles complexes.



➤ **CST Micro Stripes :**

Il analyse les structures de rayonnement d'antennes complexes, et résout les problèmes EMC/EMI.



➤ **CST Microwave Studio :**

Ce dernier est un outil de simulation 3D spécialisé pour le traitement rapide et précis des problèmes en haute fréquence avec un large champ d'application

4. Etapes à suivre pour une simulation réussie

Voici les étapes nécessaires pour la réussite d'une simulation :

- ✓ Définition des unités.
- ✓ Définition des matériaux de base.
- ✓ Modélisation de la structure.
- ✓ Définition de la gamme de fréquence.
- ✓ Définition des ports et des conditions aux limites.
- ✓ Début de la simulation.

Après avoir défini ces paramètres, la simulation est apte à débiter.

Bibliographie

- [1] P.F.Combes " Micro-ondes ",Dunod, 1997.
- [2] Thomas.A. Milligan "Modern Antenne design", Wiley, IEEE, July 2005.
- [3] **P. Ciaïis**. Antennes multistandards pour communications mobiles. PhD thèses, LEAT - Université de Nice Sophia Antipolis, Décembre 2004.
- [4] Cours antenne, Alexander Bayer : institut national des sciences appliquées de Toulouse ,4ème année informatique et réseau, Octobre2011.
- [5] Cours antennes dispensés au département génie électrique à l'INSA de Renne.
- [6] Dominique Garnier, "Antenne et propagation radio" (GEL 202/ GEL7019), hiver 2016.
- [7] Odile Picon et Colle, "antennes théorie conception et application «, Dunod, paris 2009
- [8] Tahar Neffati, " L'électronique de A à Z", Duodi, 2006
- [9] Leila Chouitti, "contribution à l'étude d'antenne imprimées rectangulaires doublebandes et multi-bandes tenant compte de l'effet de couplage", Thèse magistère, Institut d'électronique, Université de Constantine, 2009.
- [10] M. Diblng "Développement du concept de l'antenne à résonateur pour la génération dela polarisation circulaire", Université de Limoges, thèse de Doctorat, 20 mars 2006.
- [11] **BalanisC.A.** «Analysis Design, Third Edition» Copyright John Wiley & Sons, 2005.

[12] **Youssef DAHER** Cours Universitaire Université Libanaise –Faculté de Génie I –
Branche 1.9 juillet 2001.

[13] **Rabih A Slim** Conception Antenne WIFI, Micro-ruban, HFSS
Méthodologie Université Antonine Faculté des Ingénieurs en
Télécommunications, Informatique

[14] **Touati Mohamed Housseem Eddine** Conception et Simulation d'une antenne
micro-ruban circulaire Université Mohamed Khider Biskra Faculté des Sciences et de
la Technologie 05 Juin 2014.

[15] Mme. **Yamina Tighil**, doctorat en science -identification des antennes micro-
rubans multicouches par la méthode spectrale et les réseaux de neurones-
université FERHAT Abbas -Sétif UFAS (ALGERIE) . 23 juin 2011

[16] **Guy Pujolle**, 'Les réseaux', 5^{ème} édition

[17] Cours antenne, Alexander Bayer : institut national des sciences appliquées de
Toulouse, 5^{ème} année Réseau et Télécom cours Enonce travaux dirigés, Alexander
bayer, octobre 2011 répétition de la même référence du Alexander

[18] Airza Karemipour "Contribution à l'étude du couplage entre l'antenne, application
à la compatibilité électromagnétique et à la conception d'antenne et de réseaux
d'antennes", de doctorat de l'école nationale supérieure des télécommunications,
spécialité communication et électronique, juin 2002.

[1*] Mémoire Ingénieur_Ntsama 2016 « Liaisons satellitaires : Calculateur de bilan de
liaison et performances de la bande Ka » Word

[2*] Télécommunication Lepage 28 juin, Département Communications et Electronique
« télécommunications par satellites » ppt

[3*] **DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE LIMOGES** « Discipline / Spécialité :

"Electronique des Hautes Fréquences, Photonique et Systèmes" « 10 décembre

2015 par ,**Jamil FOUANY**,(Nouvelles architectures d'antennes à éléments parasites pour la polarisation circulaire. Application à la conception d'une antenne en bande X pour nano satellite)

[4*] Jamie Chin Basic Concepts and Processes for First-Time CubeSat Developers , NASA CubeSat Launch Initiative For Public Release – Revision Dated October 2017

[5*] Université Sidi Mohamed Ben Abdellah faculté des sciences Dhar El mahraze "Sciences et Technologies" DOCTORAT : **HANAFI Ahmed**, (ETUDE ET CONCEPTION DU SEGMENT SPATIAL DU NANOSATELLITE UNIVERSITAIRE MASAT1 AVEC ORDINATEUR DE BORD SECONDAIRE RECONFIGURABLE A BASE DE FPGA).