

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

*Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj*

*Faculté des Sciences et de la technologie*

*Département d'Electronique*

# *Mémoire*

*Présenté pour obtenir*

LE DIPLOME DE MASTER

FILIERE : Télécommunications

Spécialité : Systèmes de Télécommunications

Par

**Beddiaf chahinaz.**

*Intitulé*

**Etude et conception d'une antenne patch tri-band (L1-L2-L5 du GPS) pour les récepteurs GNSS.**

*Evalué le : 16/06/2022*

*Par la commission d'évaluation composée de\* :*

<i>Nom &amp;Prénom</i>	<i>Grade</i>	<i>Qualité</i>	<i>Etablissement</i>
<i>M. MESSAOUDENE Idriss</i>	<i>MCA</i>	<i>Président</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>M.ATTIA Salim</i>	<i>MCA</i>	<i>Encadreur</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>M. BELAZZOUG Massinissa</i>	<i>MCB</i>	<i>Examineur</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>Mlle. FENENICHE Wafa</i>	<i>Docteur</i>	<i>Co-Encadreur</i>	<i>Univ-BBA</i>

*AnnéeUniversitaire 2021/2022*

***Remercîment***

En premier lieu, je remercie ALLAH le tout puissant pour la force, la santé et la sagesse qu'il m'a toujours donnée et que sans lui rien n'aurait été accompli.

Nous aimerions exprimer notre immense gratitude et notre plus profond respect à notre maitre et encadreur ***Dr. ATTIA Salim*** (MCA), membre du laboratoire **ETA**, Il a été pour nous un guide, un exemple et un mentor pendant notre cursus et durant l'accomplissement de ce mémoire. Les valeurs qu'il nous a inculquées et le savoir qu'il nous a transmis ont été inestimables.

Nous aimerions exprimer notre immense gratitude et notre plus profond respect à notre maitre et co-encadreur ***Dr. FENENICHE Wafa***, Docteur au niveau de l'université de Bordj Bou Arréridj pour la qualité de leur conseil, aides et soutiens. Je ne saurais trop vivement remercier pour le temps précieux qu'il a pu sacrifier au suivi de cette mémoire.

Nous aimerions exprimer notre immense gratitude et notre plus profond respect à notre maitre ***Dr. HAMMACHE Boualam*** (MCB). Un merci sincère pour ses conseils, le temps qu'il nous donne.

Nous adressons nos sincères remerciements aux membres du jury ***Dr. MESSAOUDENE Idriss*** et ***Dr. BELAZZOUG Massinissa*** pour avoir pris le temps d'examiner et juger ce travail.

## *Dédicace*

### *Dédicace*

Je dédie ce mémoire à :

A mon chère père

Tu étais toujours le pré de moi pour me soutenir, m'encourager et me guider avec tes précieux conseils que ce mémoire soit le témoignage de ma profonde reconnaissance

A mon chère mère

Je vous remercie pour tout le soutien et la l'amour que vous me portez depuis mon enfance et j'espère que votre bénédiction m'accompagne toujours

A mes sœurs : malika et nihad et ritaj

A ma chère frère : chrif

A mes oncles : samir et abd elkarim

Une dédicace spéciale à tous mes amis

**Chahinaz.**

## *Abstract*

### **Abstract**

The work presented in this thesis concerns the study and design of patch antennas, for GPS GNSS receivers with its three bands L1, L2 and L5. GNSS receiver antennas are increasingly designed for maximum incorporation requiring minimum size, weight and cost. After having introduced the patch antennas, and the characteristics of this type of antennas, a state of the art on some antennas. The third chapter, we will start with the study of patch antennas, we will do a simulation to find internal parameters (S... parameters, bandwidth) and external characteristics (gain, efficiency and radiation pattern) using the software HFSS and CST.

### **Résumé**

Le travail présenté dans ce mémoire concerne l'étude et la conception d'antennes patch, pour les récepteurs GNSS de GPS avec ses trois bandes L1, L2 et L5. Les antennes des récepteurs GNSS sont de plus en plus conçues selon une incorporation maximale exigeant une taille, un poids et un coût réduits au maximum. Après avoir introduit les antennes patch et les caractéristiques de ce type d'antennes, un état de l'art sur quelques antennes. Le troisième chapitre, nous commencerons par l'étude des antennes patch, nous allons faire une simulation pour trouver des paramètres internes (paramètres S..., bande passante) et des caractéristiques externes (gain, efficacité et diagramme de rayonnement) en utilisant le logiciel HFSS et CST.

### **ملخص**

يتعلق العمل المقدم في هذه الرسالة بدراسة وتصميم الهوائيات الترقية لمستقبلات GPS GNSS بنطاقاتها الثلاثة L1 و L2 و L5. تم تصميم هوائيات مستقبل GNSS بشكل متزايد لتحقيق الحد الأقصى من التضمين الذي يتطلب الحد الأدنى من الحجم والوزن والتكلفة. بعد إدخال هوائيات التصحيح وخصائص هذا النوع من الهوائيات، ظهرت حالة من الفن على بعض الهوائيات. الفصل الثالث، سنبدأ بدراسة هوائيات التصحيح، وسنقوم بمحاكاة للعثور على المعلمات الداخلية (S... المعلمات، عرض النطاق الترددي) والخصائص الخارجية (الكسب والكفاءة ونمط الإشعاع) باستخدام برنامج HFSS و CST.

# Table des matières

<i>Introduction Générale</i> .....	1
<b>CHAPITRE I</b> <i>Notion de base sur l'antenne patch</i>	
I. Introduction.....	3
I.1 Définition d'une antenne.....	3
I.2 Caractéristiques des antennes.....	3
I.2.1 Impédance d'entrée et coefficient de réflexion.....	4
I.2.2 Bande passante (BP).....	4
I.2.3 Gain.....	5
I.2.4 Directivité.....	5
I.2.5 Diagramme de rayonnement.....	5
I.2.6 Polarisation.....	6
I.3 Type des antennes.....	7
I.3.1 Les antennes classiques.....	7
I.3.2 Antenne micro ruban.....	9
I.3.2.1 Miniaturisation d'antenne.....	9
1- Miniaturisation par structuration.....	10
2- Miniaturisation par ondes lentes.....	13
I.3.2.2 Caractéristiques de l'antenne micro ruban.....	13
I.3.2.2.1 Définition d'une antenne patch.....	13
I-3.2.2.2 Eléments rayonnants de l'antenne.....	14
I-3.2.2.3 Principe de fonctionnement.....	15
I-3.2.2.4 Techniques d'alimentation de l'antenne patch.....	15
I-3.2.2.4.1 Alimentation directe (par contacte).....	16
I-3.2.2.4.2 Alimentation par proximité.....	16
I-3.2.2.5 Avantages et inconvénients d'une antenne patch.....	17

## *Table des matières*

I.4	Conclusion .....	18
<b>CHAPITRE II :Etude des antennes GNSS</b>		
II.1	Introduction.....	19
II.2	Système GNSS.....	19
II.2.1	Objectif.....	19
II.2.2	Technologie satellitaires existantes .....	20
II.2.3	Principesfondamentaux du GNSS.....	20
II.2.4	Bandes de fréquences GNSS.....	20
II.2.5	Réception GNSS .....	21
II.2.6	Antenne GNSS .....	22
II.3	Etat de l'art.....	22
II.9	Conclusion .....	33
<b>CHAPITRE III : Etude de performance d'une antenne GNSS par HFSS et CST .</b>		
III.1	Introduction .....	34
III.2	Outils de simulation.....	34
III.2.1	Logiciel HFSS.....	34
III.2.1.1	Etapas de simulation par HFSS.....	34
III.2.2	Logiciel CST .....	36
III.2.2.1	Description générale de l'interface CST .....	36
III.3	Résultats de simulation.....	37
III.3.1	Coefficient de réflexion ( $S_{11}$ ).....	38
III.3.2	Diagramme de rayonnement .....	39
III.3.3	Gain.....	41
III.3.4	Efficacité .....	41
III.3.5	Rapport axial.....	42
III.4	Validation avec CST.....	43
III.5	Conclusion .....	44
<i>Conclusion Générale.....</i>		

# Table des figures

## CHAPITRE I : Notion de base sur l'antenne patch

Figure.I. 1 illustration de la bande passante à -10dB d'une antenne [7].	5
Figure.I. 2 les différentes polarisations de l'onde électromagnétique [10].	7
Figure.I. 3 Antennes filaires: (-a-) Dipole, (-b-) Circulaire et (-c-)[10].	8
Figure.I. 4 Schéma illustrant l'antenne parabolique [11].	9
Figure.I. 5 Exemple des courants dans une antenne: (a) sans fentes et (b) avec fentes [4].	11
Figure.I. 6 Dipôle avec des meanders [4].	11
Figure.I. 7 Exemple de la corrugation [4].	12
Figure.I. 8 l'inter digitations [4].	12
Figure.I. 9 Un exemple de fractales avec 'N' iterations (N=3) [4].	13
Figure.I. 10 Antennes patch à élément rayonnant triangulaire et circulaire [12].	14
Figure.I. 11 structure d'une antenne imprimée [11].	14
Figure.I. 12 Les formes d'antenne patch [11].	15
Figure.I. 13 rayonnement d'une antenne patch [6].	15
Figure.I. 14 Alimentation par une ligne micro ruban [12].	16
Figure.I. 15 Alimentation par une sonde coaxial [2].	16
Figure.I. 16 couplage à ouverture(fente)dansleplandemasse [12].	17

## CHAPITRE II :Etude des antennes GNSS

Figure.II. 1 Bandes de fréquences et signaux GNSS [14].	21
Figure.II. 2 Schéma bloc des opérations réalisées par le récepteur [15].	22
Figure.II. 3 Configuration de l'antenne proposée avec le prototype fabriqué [16].	23
Figure.II. 4 (a) Vue tridimensionnelle de l'élément d'antenne unique. (b) Dimension détaillée du patch proposé déplié en une structure planaire. (c) Dimension détaillée du bras résonnant ajouter bras résonnant ajouté (unité : millimètres) [16].	24
Figure.II. 5 Effet de la fente sur le patch sur les -paramètres [16].	25
Figure.II. 6Distribution du courant distribution du courant de surface sur l'antenne à 5,25 GHz	25

### Liste des tableaux

Figure.II. 7 Diagrammes de rayonnement total en champ lointain 3D à (a) 1,575, (b) 2,62, (c) 3,35 et (d) 5,25 GHz [16].	26
Figure.II. 8 Géométrie de l'antenne [18].	27
Figure.II. 9 S11 simulé utilisant différents éléments rayonnants d'antenne [18].	29
Figure.II. 10 L'antenne multi mode multi constellation [19].	30
Figure.II. 11 Paramètres S de l'antenne dans les deux bandes et pour deux alimentations [19].	31
Figure.II. 12 Rapport axial de l'antenne dans les trois bandes à L1/E1/G1 [19].	32
Figure.II. 13 Gain réalisé de l'Antenne dans les deux bandes [19].	32
Figure.II. 14 Rapport axial de l'antenne dans les deux bandes à L5/E5a [19].	33

### *CHAPITRE III : Etude de performance d'une antenne GNSS par HFSS et CST.*

Figure.III. 1 Etapes principales d'une simulation complète sous HFSS [18].	35
Figure.III. 2 Interface du CST [18].	36
Figure.III. 3 forme géométrique et simulé de l'antenne propose [1].	37
Figure.III. 4 Variation de S11 en (dB) en fonction de la fréquence [1].	39
Figure.III. 5 Diagramme de rayonnement de l'antenne proposé dans les fréquences : (a) 1.13GHz, (b) 1.2 GHz et (c) 1.58GHz [1].	40
Figure.III. 6 Gain de l'antenne proposée.[1]	41
Figure.III. 7 Efficacité de rayonnement [1].	42
Figure.III. 8 rapport axial de l'antenne proposée [1].	43
Figure.III. 9 Comparaison de coefficient de réflexion de l'antenne par HFSS et CST.[1]	44



# *Liste des tableaux*

<b>Tableau 1</b> Comparaison des performances de l'antenne mimo quadri-bande [16].....	24
<b>Tableau 2</b> Dimensions de l'antenne proposé.[1].....	27
<b>Tableau 3</b> Dimension de l'antenne proposé dans la référence [1].....	37

## *Liste des abréviations*

<b>GNSS</b>	Global navigation satellite system
<b>MIMO</b>	Multiple-input–multiple-output
<b>GPS</b>	Global positioning system
<b>LHCP</b>	Left hand circular polarization.
<b>RHCP</b>	Right Hand Circular Polarization.
<b>PIFA</b>	The planar inverted-F antenna
<b>WiMAX</b>	Worldwide Interoperability formicrowave Access
<b>WLAN</b>	Wireless-area-network
<b>RF</b>	Convertisseurradiofréquence
<b>CAN</b>	Converteseuranlogiquenemreque
<b>FI</b>	Fréquenceintermédiaire
<b>HFSS</b>	High frequency structure simulator
<b>CST</b>	Computer simulation technology
<b>WiFi</b>	Wirless fidelity
<b>GLONASS</b>	Global Orbiting Navigation Satellite System
<b>GNSS</b>	Global navigation satellite system

## **Introduction Générale**

### **Introduction Générale**

Durant ces dernières années, la technologie de géolocalisation par satellites est devenue aisément accessible à tous avec un nombre d'applications qui ne cesse d'augmenter et des performances en termes de précision de plus en plus améliorées. Cette technologie de pointe, mis à part les applications grand public, offre des services qui s'étendent sur plusieurs secteurs stratégiques tels que militaires, maritime, aérienne, géologique, etc.... L'ensemble des systèmes de géolocalisation par satellites sont regroupés sous le sigle GNSS (Global Navigation Satellite System)[3]. L'utilité du GNSS est en effet aujourd'hui parfaitement reconnue et fondamentale, autant sur un plan stratégique que commercial ou encore pour la sûreté de la vie. Dans ce travail nous nous intéressons au récepteur GNSS et plus particulièrement à l'antenne incorporée dans ce récepteur.

De nos jours, grâce aux avancées en termes d'encombrement sur les semi-conducteurs, tous les appareils électroniques grand public ont tendance à devenir de plus en plus compacts, légers et transportables. Un exemple parmi les plus parlants est celui des téléphones portables qui hébergent systématiquement le système de géolocalisation. Afin de suivre cette tendance incontournable de miniaturisation, les parties radiofréquences ainsi que les antennes présentes dans les appareils grand public ont dû elles aussi réduire leur encombrement[4].

De ce fait, c'est l'antenne miniature qui est désormais utilisée actuellement dans le récepteur GNSS. L'enjeu de la miniaturisation est de réduire la taille de l'antenne tout en gardant ses caractéristiques électromagnétiques optimales (bande passante et gain). Afin de concevoir efficacement une antenne GNSS il est impératif de réaliser préalablement un cahier des charges qui répond aux caractéristiques spécifiques qui la distinguent des autres types d'antennes miniatures classiques utilisées en hyperfréquence. L'une de ces caractéristiques est directement liée aux bandes passantes des différents signaux utilisés par le GNSS.

Au début, lorsque le GPS était le seul système opérationnel avec ses trois bandes L1, L2 et L5, on exigeait une antenne bi-bande ou tri-bande avec une bande passante de l'ordre de 20Mhz. Aujourd'hui avec l'avènement des autres systèmes de navigation par satellites tels que GLONASS, Beidou et Glileo, le recours aux signaux multi-constellation est devenu une nécessité pour l'amélioration des performances. De ce fait, il fallait rechercher la possibilité d'élargir la bande passante de l'antenne pour prendre en charge au moins trois signaux au lieu

## *Introduction Générale*

d'un seul. Chose qui n'est pas évidente du moment que la dimension de l'antenne est directement liée à sa bande passante.

D'un autre coté l'antenne GNSS doit-être capable de résister au problème des multi trajets qui s'impose au niveau du récepteur à cause des signaux reçu par réflexion et des interférences. Ce problème est résolu en grande partie par la polarisation circulaire de l'antenne. A ces deux problèmes se rajoute le gain de l'antenne et l'ouverture du diagramme de rayonnement. Dans ce travail, nous contribuons à un travail de recherche qui vise à étudier les différentes techniques existantes qui permettent la conception d'antennes miniatures qui peuvent être adaptés efficacement au récepteur GNSS. Aussi, nous avons procédé à l'étude et la validation des travaux dans la référence [1] qui s'articule sur la conception d'une antenne miniature GNSS tri-bande.

Dans le premier chapitre nous avons présenté les différentes caractéristiques des antennes et plus particulièrement celles de l'antenne patch. Le deuxième chapitre a été consacré à l'étude générale des systèmes GNSS tout en se concentrant sur le récepteur et les caractéristiques des signaux interceptés par l'antenne GNSS. Le dernier chapitre rassemble les résultats de simulation qui sont commentés et comparés à ceux de la référence validée. Le manuscrit sera clôturé par une conclusion d'ordre général.

## **CHAPITRE I**

### **Notion de base sur l'antenne patch**

# **CHAPITRE I : Notion de base sur l'antenne patch**

## **I. Introduction**

L'antenne joue un rôle primordial dans une communication sans fil, elle est indispensable pour établir n'importe quelle liaison entre deux points éloignés, que ce soit dans la téléphonie mobile, la radioastronomie, dans les systèmes de positionnements par satellites (GPS), la transmission des signaux TV et Radio, et dans les tours de contrôle des avions et les tours maritimes ...etc. L'antenne est vitale pour le bon fonctionnement de n'importe quel système de télécommunication [2]. De nos jours le volume et les dimensions des récepteurs GNSS sont appelés à être de plus en plus réduites ce qui a suscité l'utilisation d'antennes patches qui sont les plus adaptées aux procédés de miniaturisation d'antennes.

Dans ce chapitre, nous exposons dans un premier temps les caractéristiques générales d'une antenne pour se focaliser par la suite sur l'antenne patch avec plus de détails.

### **I.1 Définition d'une antenne**

Une antenne est un dispositif qui transmet ou reçoit des ondes électromagnétiques. En d'autres termes, une antenne est un transducteur qui convertit l'énergie électromagnétique dirigée en énergie électromagnétique rayonnée et vice versa. L'antenne a plusieurs rôles, principalement elle permet [2]:

- Une bonne adaptation entre équipement radio et support de propagation.
- D'assurer la transmission ou la réception de l'énergie dans la direction préférée.
- De transmettre les informations aussi fidèlement que possible.

Les antennes jouent un rôle important dans le fonctionnement de tous les équipements radio. Ils sont utilisés dans les réseaux locaux sans fil, la téléphonie mobile et les communications par satellite [6].

### **I.2 Caractéristiques des antennes**

Une antenne se caractérise par des attributs fondamentaux qui l'accompagnent et qui sont cités dans ce qui suit.

### I.2.1 Impédance d'entrée et coefficient de réflexion

L'impédance d'entrée est définie comme étant l'impédance présentée par une antenne à ses bornes [2], elle est égale au rapport de la tension  $v_e$  sur le courant  $I_e$ . Elle est donnée par l'équation suivante [5]:

$$Z = \frac{V_e}{I_e} = R + jX \quad (I.1)$$

Où :

$Z$  : impédance d'entrée.

$R$  : résistance de l'antenne.

$X$  : réactance de l'antenne.

De manière générale lorsqu'une onde incidente change de milieu de propagation, une partie de cette onde est réfléchie et l'autre partie est transmise dans l'autre milieu.

Le coefficient de réflexion  $\Gamma$  est lié à l'impédance d'entrée de l'antenne et l'impédance caractéristique de la ligne d'alimentation par la relation suivante [2]:

$$\Gamma = \frac{Z_{in} - Z_c}{Z_{in} + Z_c} \quad (I.2)$$

Où :

$z_c$ : Impédance caractéristique de la ligne d'alimentation, typiquement égale à  $50\Omega$ ,

$z_{in}$ : Impédance d'entrée de l'antenne.

On peut représenter  $\Gamma$  sous forme de paramètre S en dB comme suit:

$$S_{11} = 20 \log \Gamma \quad (I.3)$$

### I.2.2 Bandepassante (BP)

La bande passante de l'antenne définit la gamme de fréquences dans laquelle le coefficient de réflexion est inférieur à tout seuil fixe. C'est la bande de fréquence avec le plus grand transfert d'énergie de la source d'alimentation à l'antenne (ou de l'antenne au récepteur) et la bande passante est généralement dérivée de la courbe dont le coefficient de réflexion est inférieur à -10dB [2] [7].

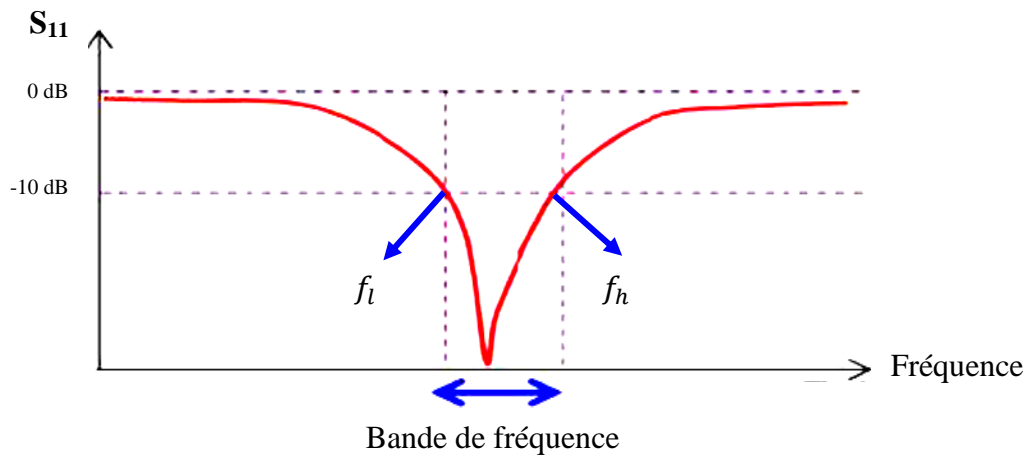
$$B_p(\text{GHz}) = f_h - f_l \quad (I.4)$$

Où :



$f_h$  est la fréquence la plus élevée de la bande.

$f_l$  est la fréquence la plus basse de la bande.



**Figure.I. 1 illustration de la bande passante à -10dB d'une antenne [7].**

### I.2.3 Gain

Le gain ( $G$ ) de l'antenne est égal à la puissance rayonnée  $p_r$  sur la source d'alimentation  $p_a$ . Elle dépend de sa directivité, qui est le rapport de la puissance rayonnée dans le lobe principal à la puissance rayonnée par l'antenne de référence [5][7].

### I.2.4 Directivité

La directivité d'une antenne ( $D$ ) dans la direction  $(\theta, \varphi)$  est le rapport entre la puissance rayonnée dans une direction donnée  $P(\theta, \varphi)$  et la puissance qui serait rayonnée par une antenne isotrope [2] [7]. Le rapport entre le gain et la directivité représente l'efficacité du rayonnement ( $\delta$ ) ce qui permet d'obtenir la relation entre le gain maximum  $G_{max}$  et la directivité de l'antenne comme suit [2]:

$$G_{max} = \delta \cdot D \quad (I.5)$$

### I.2.5 Diagramme de rayonnement

Un diagramme de rayonnement est une représentation graphique des caractéristiques de rayonnement d'une antenne à champ lointain et quantifie la capacité de l'antenne à transmettre/recevoir des signaux dans une direction particulière et la variation de la puissance rayonnée depuis l'espace par l'antenne dans différentes directions [7]. Il représente la direction dans l'espace où la puissance rayonnée est la plus grande [8].

## **I.2.6 Polarisation**

La polarisation d'une antenne correspond à celle du champ électrique  $E$  de l'onde électromagnétique qu'elle rayonne ou qu'elle reçoit au travers de son lobe principal. Il existe trois types de polarisations : rectiligne, circulaire et elliptique tels que montrées sur la figure (I.2) [8]:

### **1- Polarisation rectiligne**

Une onde est polarisée linéairement si son champ électrique reste dans la même direction dans le temps, relativement à un observateur fixe.

Il existe deux types de polarisation linéaire la polarisation horizontale et verticale par rapport à la surface de polarisation [9].

### **2- Polarisation circulaire**

Une onde est polarisée circulairement si son champ électrique décrit un cercle dans le temps relatif à un observateur fixe.

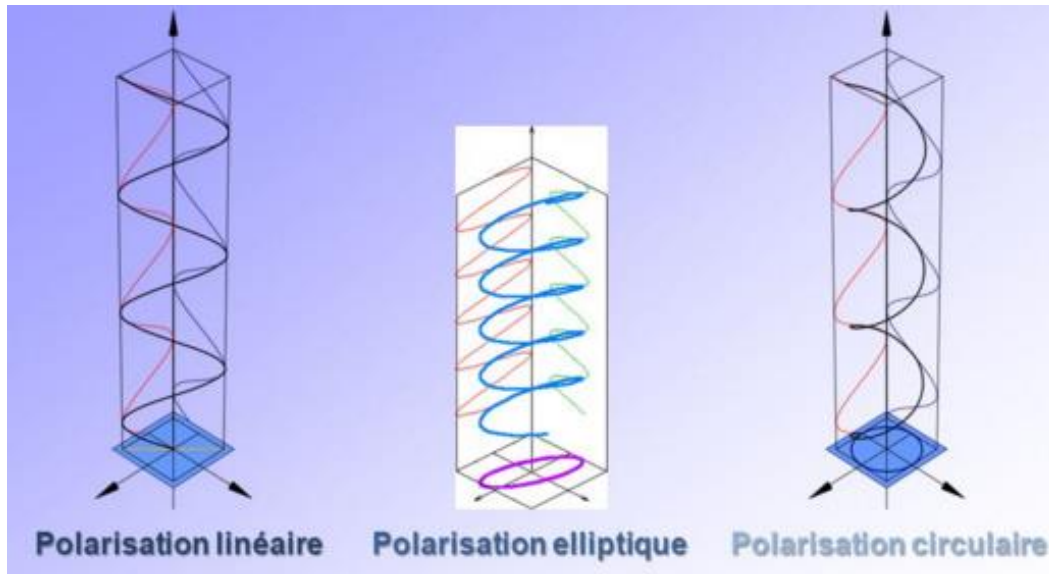
Par conséquent, il existe deux cas particuliers où les traits de soulignement sont requis: à gauche et à droite, le premier lorsque le champ électrique tourne dans le sens des aiguilles d'une montre lorsqu'un observateur fixe est placé sur l'antenne, le second sinon (convention IEEE).

La polarisation circulaire trouve son utilisation dans les communications avec des objets en mouvement (train, avion, ...ect). Elle est aussi sollicitée pour les antennes des récepteurs GNSS pour sa résistance aux multi-trajets (MTs) [9].

### **3- Polarisation elliptique**

Une onde est dite dans un état de polarisation elliptique si son champ électrique décrit une ellipse dans le temps par rapport à un observateur fixe.

C'est le cas général, lorsque la composition du champ électrique varie, il n'y a pas de relation spécifique entre eux. De même que pour la polarisation circulaire, deux types de polarisation sont déterminés : gauche et droite [9].



**Figure.I. 2 les différentes polarisations de l'onde électromagnétique [10].**

### **I.3 Type des antennes**

Il existe, au fait deux grand types d'antennes [10]:

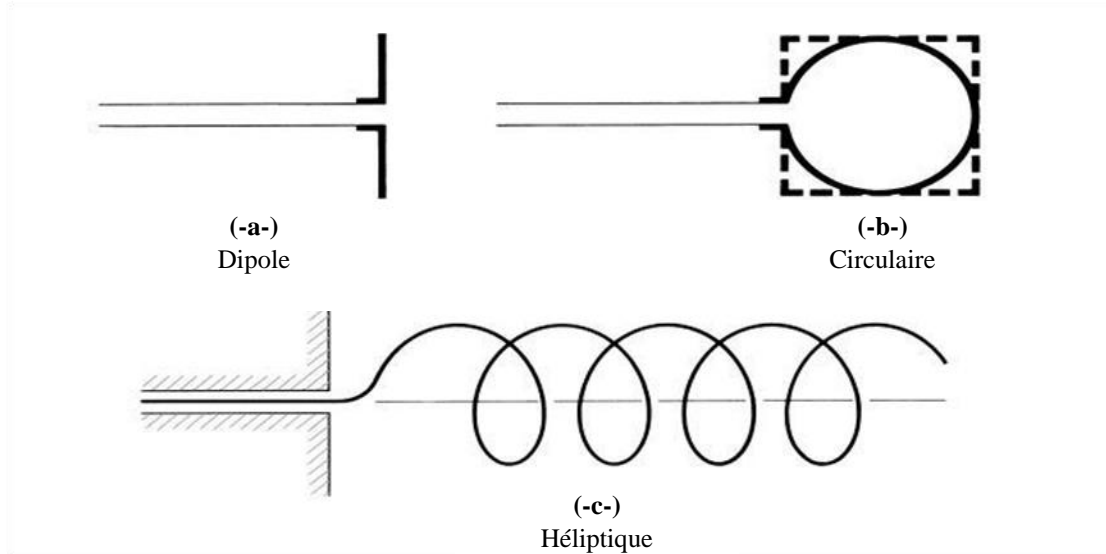
- Les antennes classiques qui sont caractérisées par leur grande dimension et leur volume global considérable.
- Les antennes miniaturisées classées sous le nom d'antennes patches.

#### **I.3.1 Les antennes classiques**

On citera dans ce qui suit deux exemples d'antennes classiques.

##### **a) Antennes filaires**

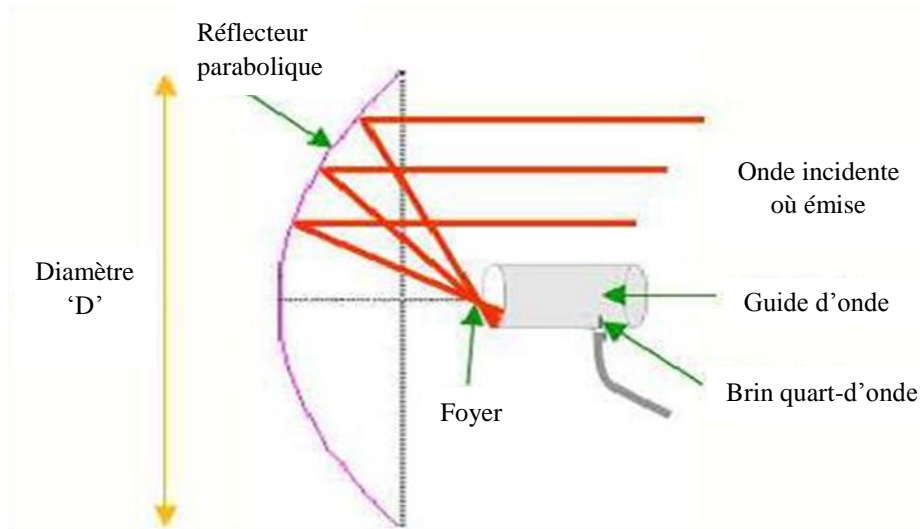
Ces antennes peuvent être trouvées presque partout dans les voitures, bâtiments, navires, avions, vaisseaux spatiaux, etc. Il existe différentes formes d'antennes filaires, telles que droites (dipôles), en boucle et hélicoïdales, comme le montre la figure (I.3). L'antenne cadre n'a pas seulement besoin d'être circulaire. Ils peuvent prendre la forme de rectangles, de carrés, d'ovales ou de toute autre configuration. Les antennes dipôles sont coupées et pliées pour un rayonnement efficace. La longueur totale du fil utilisé comme dipôle est la moitié de la longueur d'onde (c'est-à-dire  $L = \lambda/2$ ). Une telle antenne est appelée antenne dipôle demi-onde. C'est l'antenne la plus couramment utilisée en raison de ses avantages. Elle est également connue sous le nom d'antenne hertzienne [2][11].



**Figure.I. 3 Antennes filaires: (-a-) Dipole, (-b-) Circulaire et (-c-)[10].**

#### **a) Antenne réfléchissante**

Le besoin de communication longue distance a permis de développer des formes d'antennes capables d'émettre et de recevoir des signaux qui doivent parcourir des millions de kilomètres. Des antennes de ce type, appelées paraboliques, ont été construites jusqu'à 300 mètres de diamètre. De telles dimensions sont nécessaires pour obtenir le gain élevé requis pour transmettre ou recevoir des signaux après un voyage de millions de kilomètres, couramment utilisé en radioastronomie, en communications par micro-ondes et en poursuite de satellites [9]. Un exemple illustrant la structure générale d'une antenne parabolique est donné sur la figure (I.4).



**Figure.I. 4 Schéma illustrant l'antenne parabolique [11].**

### **I.3.2 Antenne micro ruban**

Les antennes citées plus haut, du fait de leur dimension, malgré leur efficacité incontestable ils restent inutilisables pour les systèmes qui requièrent des formes d'antennes miniaturisées. De ce fait, la miniaturisation d'antennes a suscité ces dernières décennies un grand intérêt par les chercheurs en hyperfréquence, ce qui a permis de développer plusieurs antennes de ce type appelés antennes micro ruban [11]. Le récepteur GNSS, auquel est lié notre axe de recherche, utilise ce type d'antennes avec des exigences qui lui sont spécifiques. Ces exigences seront présentées en détail dans le deuxième chapitre.

#### **I.3.2.1 Miniaturisation d'antenne**

Le formidable développement des téléphones portables et des applications sans fil embarquées a conduit à la miniaturisation et à l'intégration des appareils électroniques et des antennes. La miniaturisation de l'antenne consiste dans un premier temps à réduire sa taille, sa surface, son volume à une fréquence de résonance donnée et, dans un second temps, la miniaturisation et l'intégration de la structure d'adaptation et de polarisation au plus près de l'antenne. L'enjeu de cette miniaturisation est donc de réduire la taille de l'antenne tout en conservant ses propriétés électromagnétiques optimales (bande passante et gain). Le critère qui limite la portée effective d'une petite antenne est le facteur de mérite, et donc la bande passante (le facteur de mérite est

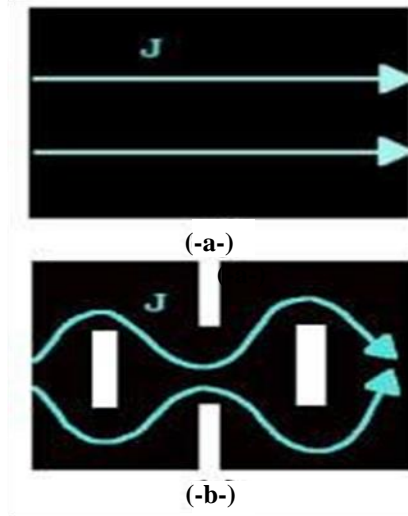
inversement proportionnel à la bande passante). Par conséquent, pour une taille d'antenne donnée, il existe un facteur de mérite limite [14][15]. Les techniques de miniaturisation peuvent être classées en deux grandes classes : la miniaturisation par structuration et la miniaturisation par modification du substrat [3].

### **1- Miniaturisation par structuration**

Cette technique de miniaturisation est de loin la plus utilisée, et il y a par conséquent une grande variété de structuration possible. La structuration d'antennes consiste à travailler un des paramètres physiques de l'antenne afin de réduire sa taille tout en conservant le mode propre et sans exciter de modes supérieurs. La forme de l'antenne est changée. Par conséquent les courants parcourant celle-ci subissent une modification [4]. On peut en citer dans ce qui suit quelques exemples.

#### **a. Ajout de fentes ou d'entailles**

Cette technique, utilisée pour la miniaturisation d'antennes planaires, est caractérisée par le placement de fentes dans les parties métalliques de ces antennes. Par conséquent, le courant circulant d'une extrémité à l'autre de ces pièces métalliques sera bloqué par les fentes, et pour les contourner, il faut emprunter un chemin plus long que celui sans les fentes, comme le montre la figure (I.5). Par conséquent, la longueur électrique ainsi que la capacité et l'inductance de l'antenne sont augmentées. Donc, nous pouvons dire que la fente est équivalente à la capacité et que le fil est équivalent à l'inductance. L'antenne est alors miniaturisée. Des études dans [4] montrent que plus la fente est grande, plus la fréquence de résonance est faible, et si la fente est bien adaptée à la forme de l'antenne planaire, sa taille peut être réduite d'environ 30 %. Il convient toutefois de noter que cette technique entraîne une augmentation du facteur de mérite, qui à son tour entraîne une réduction de la largeur de bande de l'antenne [3] [4].



**Figure.I. 5 Exemple des courants dans une antenne:(a) sans fentes et(b) avec fentes [4].**

### b. Méandres

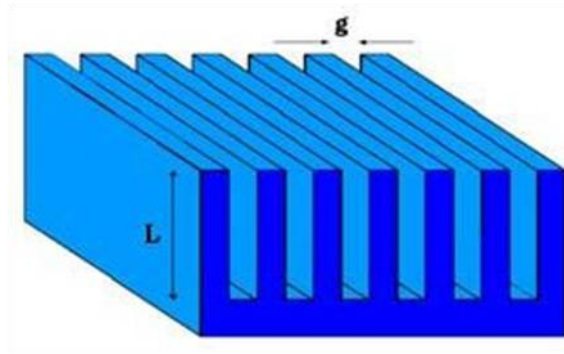
Les méandres sont une succession de courbures constituant l'équivalent d'inductances localisées. Elle permet de cette façon d'augmenter la longueur électrique d'une ligne, tout en gardant le même sens global des courants rayonnants. La figure (I.6) montre un dipôle avec des méandres qui possède désormais une fréquence de résonance plus basse que celle d'un dipôle sans méandre de même dimension. L'inconvénient majeur de cette technique est l'augmentation des pertes métalliques qui va causer la diminution de l'efficacité de l'antenne [4].



**Figure.I. 6 Dipôle avec des meanders [4].**

### c. Corrugation

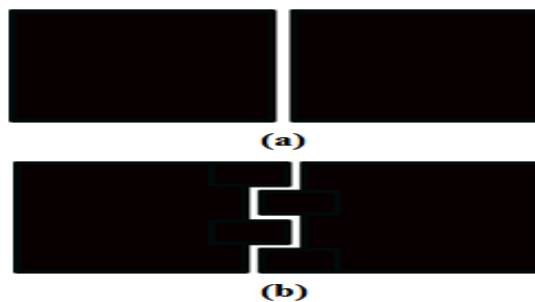
Cette technique, par l'utilisation d'une troisième dimension complique la réalisation de l'antenne et augmente la longueur électrique tout en présentant, comme les méandres, l'inconvénient de causer des pertes métalliques non négligeables qui vont diminuer l'efficacité de l'antenne. La corrugation est le plissement périodique de surfaces (i.e. méandres en 3D). La figure (I.7) montre un exemple de la corrugation [4].



**Figure.I. 7 Exemple de la corrugation [4].**

**d. Ajout de composants discrets**

La figure (I.8) est présentée l'inter digitation comme exemple de capacités localisées qui consiste à réaliser l'engrènement de replis. Comme pour les méandres, cette technique permet d'augmenter la capacité de vis à vis sans souder d'éléments. L'inconvénient de l'ajout de composants discrets est l'augmentation du facteur de qualité et par conséquent la diminution de la bande passante de telles antennes. L'idée ici consiste à réaliser des capacités et des inductances localisées sans avoir recours à la déformation de certaines parties de l'antenne mais plutôt à l'aide de l'ajout de composants localisés. Par exemple si on ajoute des inductances sur une ligne sa longueur électrique est augmentée tout en gardant sa longueur physique. Le même principe s'applique aux capacités dans les fentes [4] [3].



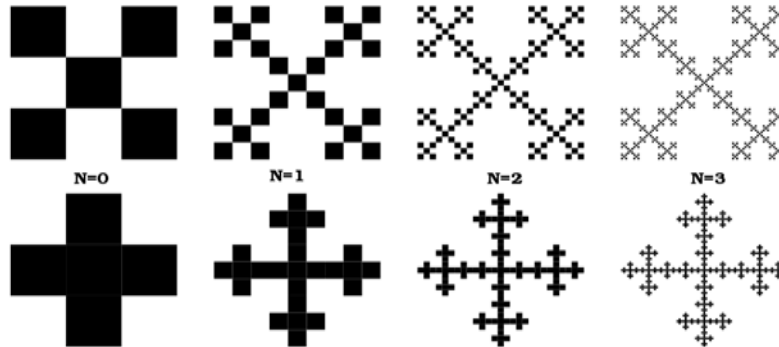
**Figure.I.8 l'inter digitations [4].**

**e. Les fractales**

Cette technique augmente la longueur électrique pour une dimension donnée et diminue ainsi la fréquence de résonance de l'antenne structurée. Ce sont des courbes de remplissage de formes mathématiques



fragmentées utilisées pour la conception d'antennes. Leur grand intérêt réside dans l'utilisation de leur facteur d'échelle pour augmenter la bande passante de l'antenne. La figure (I.9) montre un exemple de fractales avec 3 itérations [4] [3].



**Figure.I. 9** Un exemple de fractales avec ‘N’iterations (N=3) [4].

## 2- Miniaturisation par ondes lentes

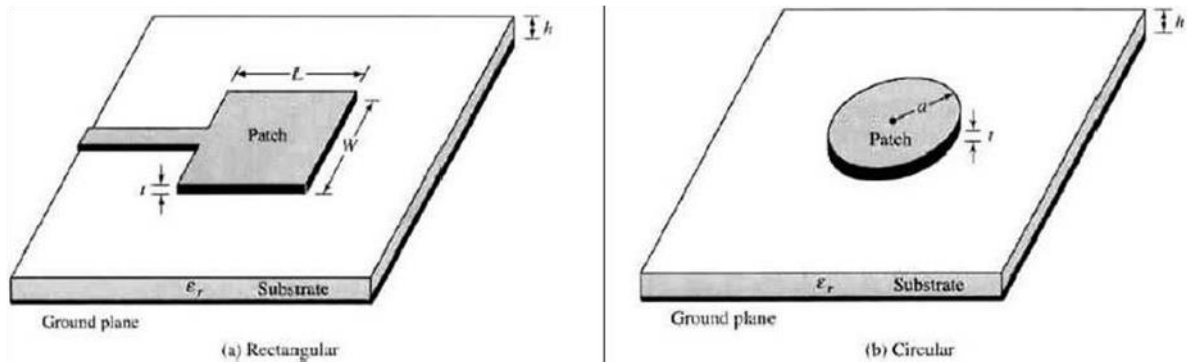
D'une manière générale, en diminuant la vitesse de phase, l'antenne est miniaturisée en créant une onde lente. Puisque les performances d'une antenne ainsi que sa fréquence de résonance sont dépendantes du substrat sur lequel elle est fabriquée, la réalisation d'ondes lente peut se faire en jouant sur la permittivité et la perméabilité du substrat. Une onde lente est une onde dont la vitesse de phase est inférieure à celle d'une onde monochromatique dans le vide (célérité). Une variation de cette vitesse de phase aura une incidence directe sur la fréquence de l'onde associée et donc sur la miniaturisation de l'antenne [4].

### I.3.2.2 Caractéristiques de l'antenne micro ruban

#### I.3.2.2.1 Définition d'une antenne patch

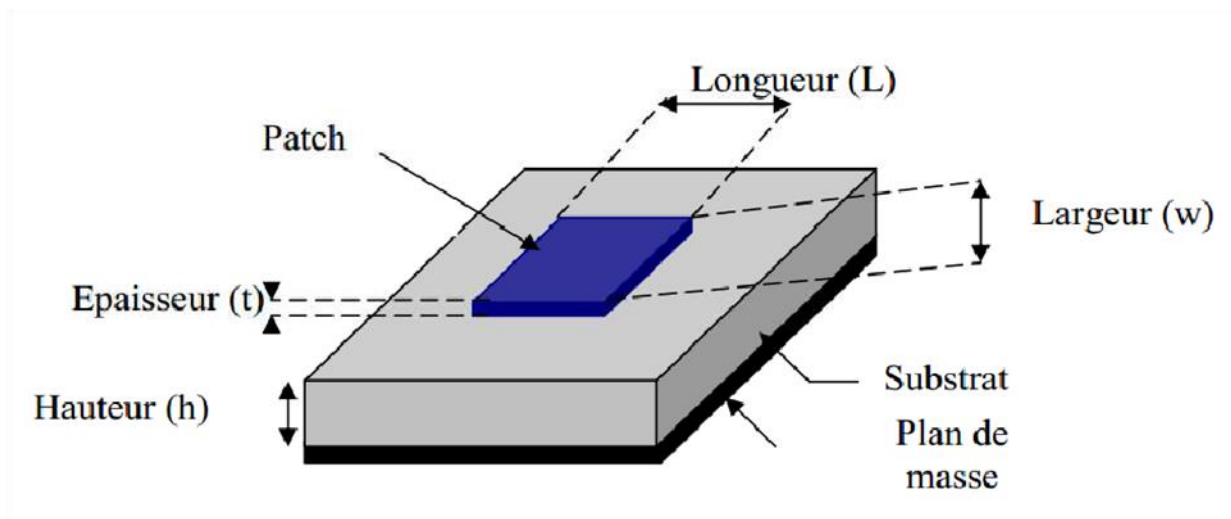
C'est dans les années 50 que le concept de l'antenne patch est apparu, mais il a fallu attendre les années 70 pour voir un développement conséquent, grâce à l'arrivée du diélectrique sur le marché. Ils ont été utilisés, dans un premier temps, pour des applications spatiales, puis pour des applications commerciales. Depuis, la recherche dans ce domaine n'a cessé de s'intensifier [6]. L'antenne micro ruban, dont la conception constitue la base de notre objectif, est constituée de patches métalliques montés sur un substrat avec un plan de masse tel que présenté sur la figure (I.10). Cet élément rayonnant est réalisé par un circuit imprimé qui sera intégré dans des circuits électroniques. Actuellement, les antennes imprimées deviennent de plus en plus importantes en raison des grandes variétés des formes géométriques (rectangulaire, circulaire, à

fente, ou formes plus élaborées) dont les plus populaires sont les rectangles et les cercles [3].



**Figure.I. 10**Antennes patch à élément rayonnant triangulaire et circulaire [12].

L'antenne patch rectangulaire est la plus courante, et sa structure est décrite dans la figure (I.11) suivante:



**Figure.I.11** structure d'une antenne imprimée [11].

Les paramètres physiques et géométriques liés à cette structure sont [6]:

- La permittivité relative du diélectrique ( $\epsilon_r$ ) et sa structure de perte  $\tan \alpha$  ;
- La hauteur du diélectrique  $h$  ;
- Les dimensions de l'élément rayonnant ( $L, W$ ).

#### I-3.2.2.2 Éléments rayonnants de l'antenne

L'élément rayonnant est un conducteur comme le cuivre, l'argent ou l'or. Généralement de

forme quelconque, mais les plus utilisés en pratique ont été montrés sur la figure (I.12) suivante [6]:

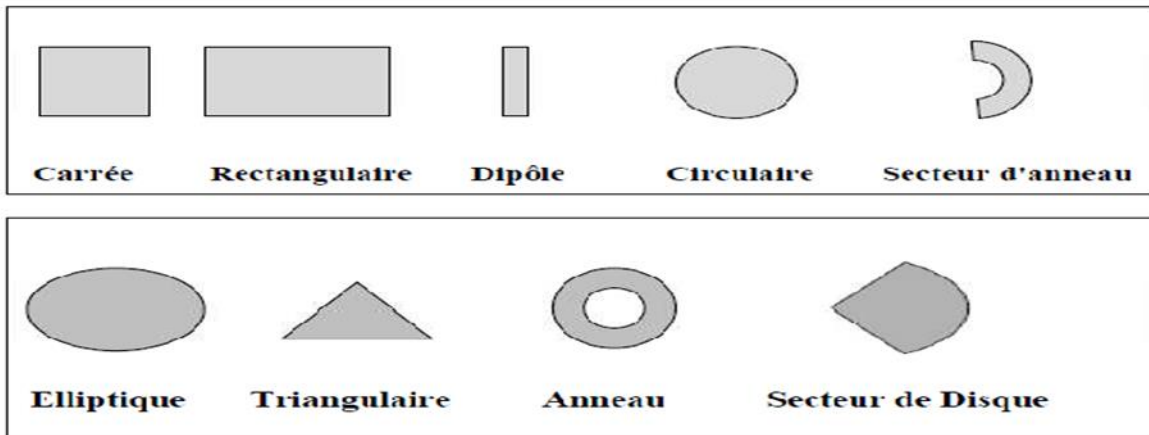


Figure.I. 12 Les formes d'antenne patch [11].

#### I-3.2.2.3 Principe de fonctionnement

Après l'excitation de la ligne d'alimentation, une onde électromagnétique se forme et se propage tout au long pour rencontrer l'élément rayonnant, ce qui provoque une distribution de charge qui s'établit au dessus et en dessous de l'élément entre le plan de masse et le substrat [6], tel que illustré sur la figure (I.13).

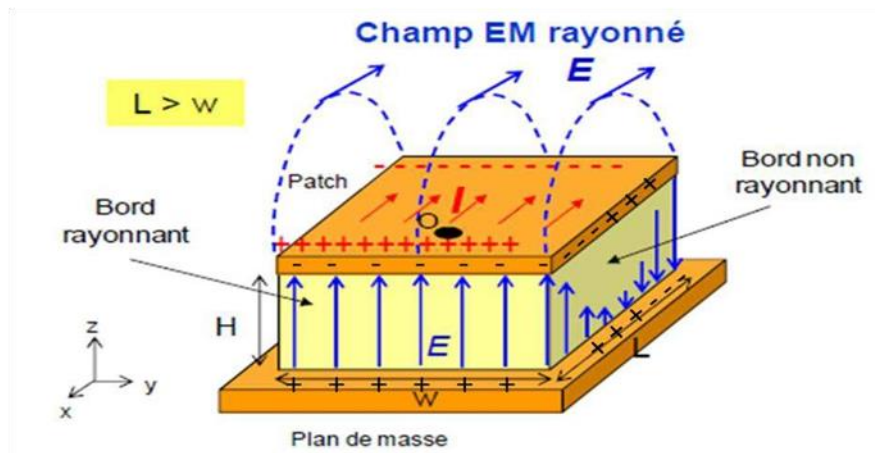


Figure.I. 13 rayonnement d'une antenne patch [6].

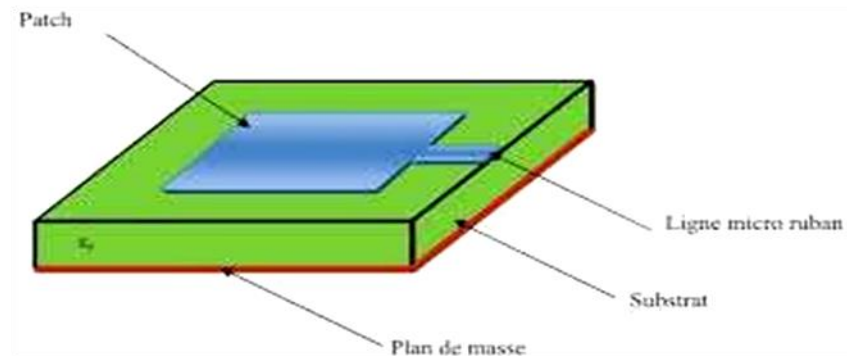
#### I-3.2.2.4 Techniques d'alimentation de l'antenne patch

Même si elle est susceptible de rayonner, une antenne patch n'est utilisable que s'il existe un circuit d'alimentation permettant un transfert acceptable de l'énergie guidée vers l'antenne. Le choix du type d'alimentation dépend de contraintes telles que : la simplicité du circuit

d'alimentation, l'isolation entre le circuit d'alimentation et l'antenne ou la mise en réseau éventuelle de l'élément rayonnant. On trouve essentiellement deux mécanismes d'alimentation pour les antennes imprimées [6][2], celui de l'alimentation directe et celui de l'alimentation par proximité.

#### I-3.2.2.4.1 Alimentation directe (par contacte)

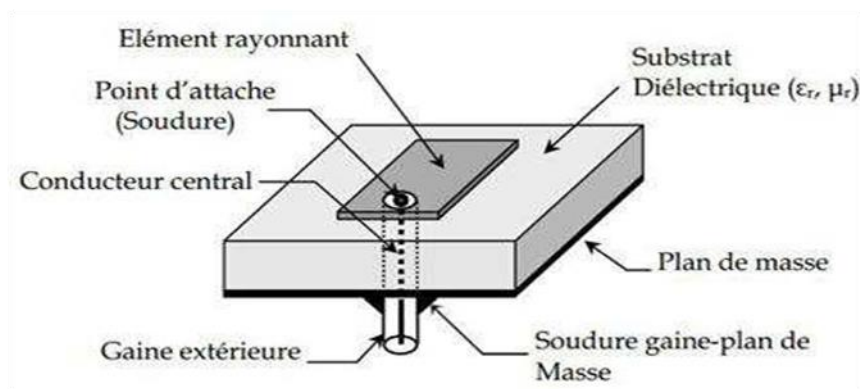
- ✓ Alimentation par ligne imprimée.



**Figure.I. 14 Alimentation par une ligne micro ruban [12].**

C'est l'alimentation la plus simple utilisant une ligne imprimée sur le même plan que le patch rayonnant.

- ✓ Alimentation par câble coaxial.



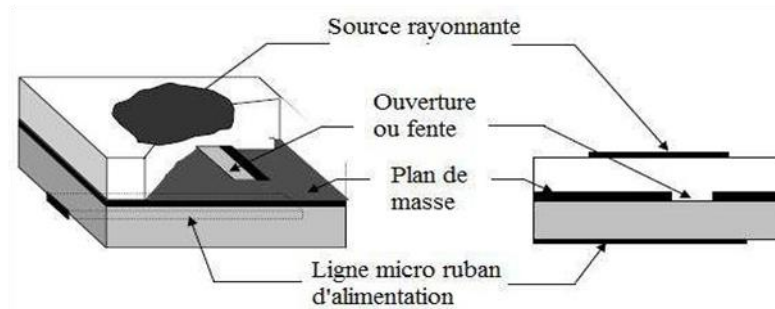
**Figure.I. 15 Alimentation par une sonde coaxial [2].**

La soudure de l'embase rend la structure mécaniquement robuste en cas de torsion du câble coaxial visé au connecteur.

#### I-3.2.2.4.2 Alimentation par proximité

Le couplage de proximité permet d'exciter l'antenne en évitant une connexion directe entre

l'alimentation et le patch tel que montré sur la figure (I.16).



**Figure.I. 16 Couplage à ouverture (fente) dans le plan de masse [12].**

Il est possible d'élargir la bande passante en associant la résonance de l'élément rayonnant à celle de la fente.

#### **I-3.2.2.5 Avantages et inconvénients d'une antenne patch**

Les antennes patches présentent de nombreux avantages dont on peut citer [11]:

- Un encombrement réduit.
- Un faible poids.
- Un faible coût de fabrication.
- Les réseaux d'alimentation et d'adaptations sont fabriqués simultanément avec l'antenne.
- La polarisation de l'onde électromagnétique linéaire ou circulaire est ajustable en ajustant la géométrie et l'excitation de l'élément rayonnant.

Ces antennes ont aussi des inconvénients qui peuvent être résumés comme suit [11]:

- Une bande passante étroite.
- Un faible gain (de l'ordre de 5dB).
- Supportent uniquement les faibles puissances.
- Une pureté de polarisation difficile à obtenir.
- Rayonnement limité à un demi-plan de l'espace.
- Pertes de rayonnement par des ondes de surface.

## **I.4 Conclusion**

Dans la première partie de ce chapitre nous avons présenté d'une manière générale, la définition et le rôle des antennes. La deuxième partie du chapitre est consacrée aux caractéristiques et types d'antenne et nous présentons les généralités sur les antennes imprimées, historique, structure, caractéristiques, les Avantages et inconvénients.

## **CHAPITRE II**

### **Etude des antennes GNSS**

## **Chapitre II: Etude des antennes GNSS**

### **II.1 Introduction**

Le système GNSS (global navigation satellite system) est le nom générique des systèmes de navigation satellitaires fournissant une couverture globale de géo localisation. L'objectif de ce système est de donner la position d'un mobile ainsi que sa vitesse en tout lieu du globe et dans un référentiel global. Les militaires américains sont les premiers créateurs du système GPS(Global Positioning System) suivis de très près par les russes GLONASS (Global NavigationSatellite System) et le système Galileo par les européens. Depuis 2000, le système GPS est devenu accessible aux populations civiles avec une précision métrique, ce qui a permis à la géo localisation GPS de se démocratiser. Chacun de ces systèmes GNSS est nominaleme nt constitué d'une constellation de plus d'une vingtaine de satellites dédiés qui émettent de façon continue des signaux radioélectriques dont la structure est parfaitement définie. Les utilisateurs équipés de récepteurs peuvent avec au moins quatre satellites en visibilité de déterminer l'heure et la position, en mesurant la distance qui les séparent de ces satellites dont les coordonnées sont connues [1].

Notre travail se focalise essentiellement sur l'antenne du récepteur GNSS. En effet, à cause des exigences spécifiques aux différentes applications de géolocalisation, plusieurs travaux de recherches se sont lancés sur la conception d'antennes GNSS. Dans ce chapitre, nous avons présenté, dans un premier temps les caractéristiques et les exigences les plus récentes requises par les antennes GNSS. Par la suite, nous avons établi un état de l'art permettant d'élucider quelques travaux de recherche novices qui serviront de repère pour notre travail dans ce mémoire.

### **II.2 Système GNSS**

Le système de positionnement est basé sur des signaux transmis par des satellites en orbite autour de la terre et offre une couverture mondiale.

#### **II.2.1 Objectif**

- Positionnement en temps réel, avec une précision allant jusqu'à quelques centimètres, à tout moment, n'importe où, quelle que soit la météo.
- Fournir au récepteur sa position, sa vitesse et son heure.



- Faible coût et minimum de complexité.

## **II.2.2 Technologie satellitaires existantes**

- GPS (États-Unis).
- GLONASS (Russie).
- Galileo (Union européenne).
- BeiDou (Chine).

Le GNSS se compose de trois composants principaux [14]:

- Segment spatial → constellation de satellites ;
- Segment terrestre → control et production de données ;
- Segment utilisateur → récepteur.

## **II.2.3 Principes fondamentaux du GNSS**

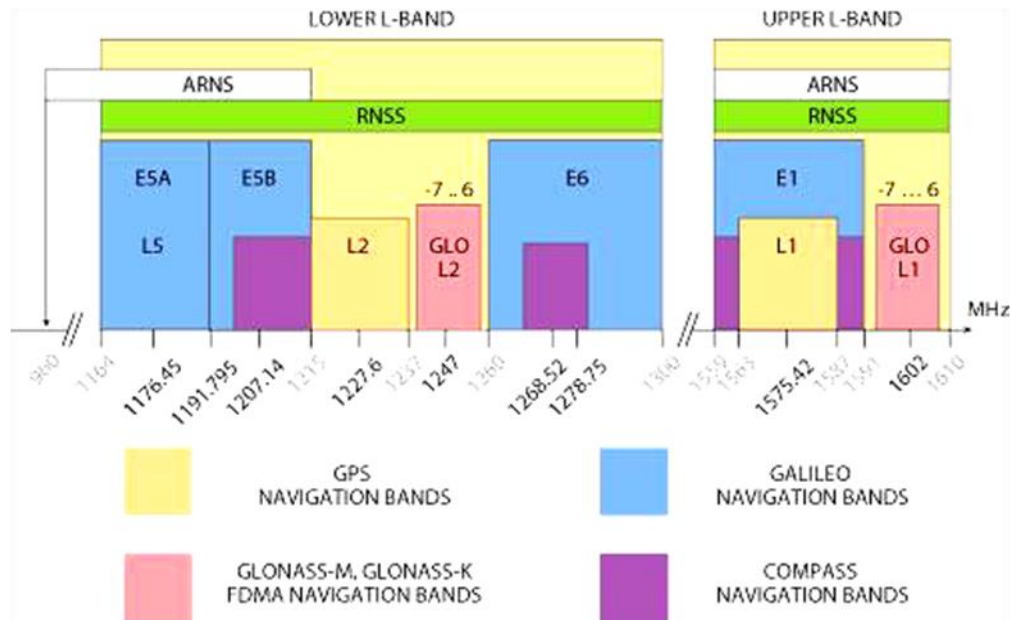
Depuis que l'humanité a commencé l'exploration du monde, les systèmes de navigation par satellites ont toujours joué un rôle essentiel dans les succès obtenus. Avec l'apparence de la science du chronométrage, le niveau de précision de la lecture céleste a augmenté et jusqu'à aujourd'hui, le chronométrage joue l'un des rôles les plus importants dans les systèmes de navigation.

Naviguer pourrait être défini comme une conduite en mode garanti et sécurisé d'un mobile de son point de départ à sa destination finale. Avec ce concept, nous pouvons comprendre que la navigation est un processus en temps réel et qu'il est important de récupérer la position du mobile déplacé et de garder des mesures cohérentes avec la vitesse du véhicule [2].

La navigation moderne se fait en collectant des signaux radio transmis par des satellites à des positions connues. La position est ensuite récupérée en faisant une trilatération des différentes distances obtenues, en traitant les signaux reçus.

## **II.2.4 Bandes de fréquences GNSS**

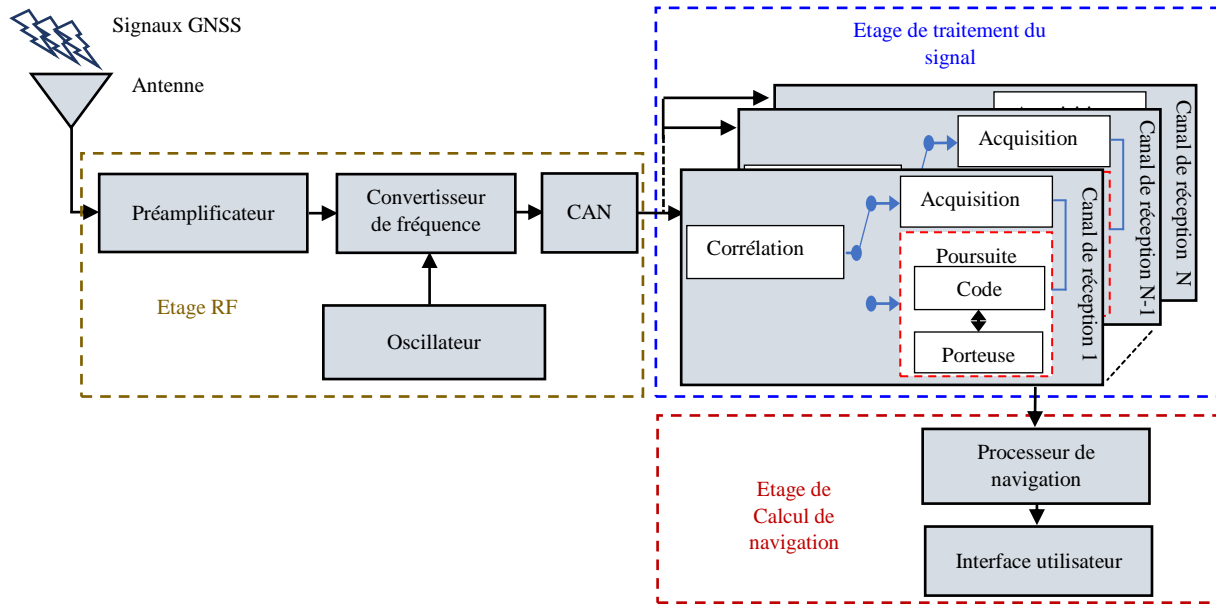
L'ensemble des systèmes GNSS en place utilisent la bande de fréquence L entre 1164 et 1610 MHz. La figure (II.1) montre les différentes bandes de fréquences caractérisant les différents signaux alloués aux différents signaux GNSS existants.



**Figure.II.1**Bandes de fréquences et signaux GNSS [15].

### II.2.5 Réception GNSS

Au niveau du récepteur, plusieurs signaux proviennent de différents satellites. Pour cela, un traitement du signal est nécessaire pour estimer la distance entre le récepteur et chaque satellite afin de calculer sa position. En général, un récepteur GNSS se compose d'une antenne, d'un préamplificateur, d'un convertisseur radiofréquence (RF) à fréquence intermédiaire (FI), d'un convertisseur analogique-numérique (CNA) et d'autres parties "matérielles" et logicielles. La figure (II.2) montre un schéma fonctionnel d'un récepteur GNSS. Ci-dessous, nous détaillerons les différents composants de ce schéma.



**Figure.II.2 Schéma bloc des opérations réalisées par le récepteur [16].**

## II.2.6 Antenne GNSS

Les antennes de réception GNSS ont été développées pour une intégration maximale. Par conséquent, leur taille, leur poids et leur coût sont réduits au minimum. Il est alors pertinent de choisir une antenne fine qui minimise ces paramètres. La miniaturisation des antennes sera traitée en détail dans le prochain chapitre. D'après ce qui a été présenté précédemment, plusieurs caractéristiques de l'antenne elle-même peuvent être identifiées [4]:

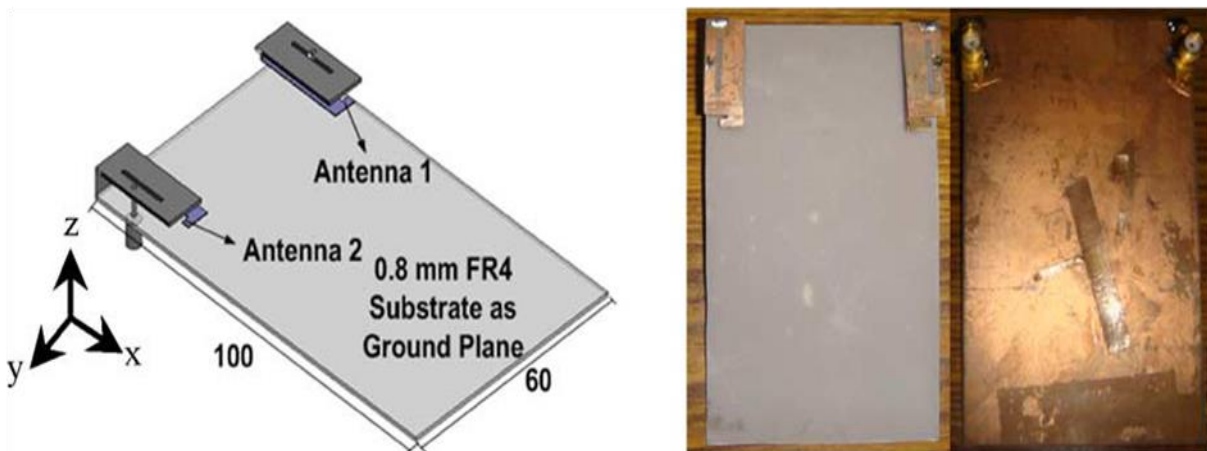
- Sélectivité : l'antenne doit limiter la puissance des interférences entrantes ;
- Le gain d'antenne est idéal si tous les satellites sont au-dessus d'un angle d'élévation donné (antenne omnidirectionnelle) ;
- Pour les angles d'élévation faibles ou négatifs, le gain doit être faible pour supprimer les trajets multiples et les interférences ;
- Pour les angles d'élévation faibles et le faible LHCP derrière l'antenne, la polarisation doit être RHCP.

## II.3 Etat de l'art

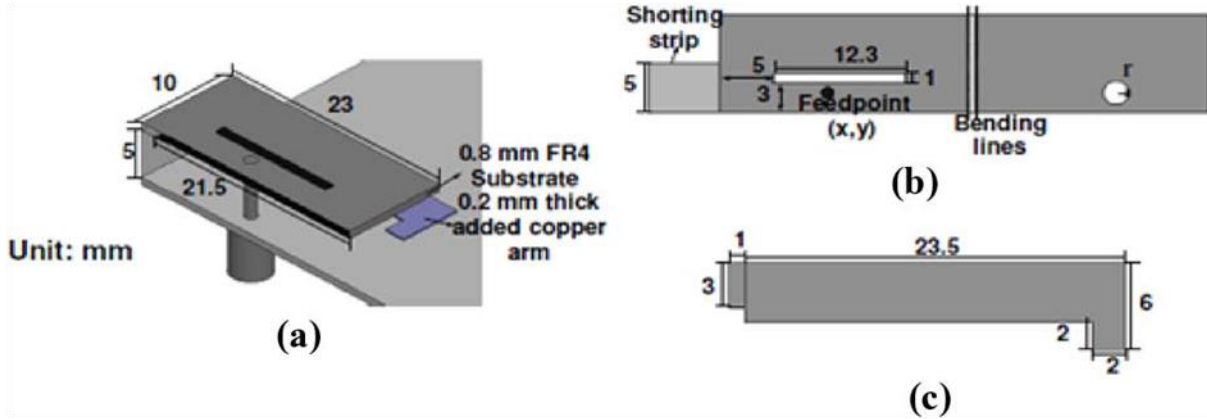
Dans la référence [17], un réseau d'antennes quadri-bande à profil bas pour les applications à entrées multiples et sorties multiples (MIMO) a été présenté. Le réseau à deux antennes

proposées est conçue pour couvrir le GPS L1 (1,565–1,585 GHz), Bluetooth/Wi-Fi (2,4–2,484 GHz), LTE2500 (2,5–2,57 GHz pour liaison montante, 2,62–2,69 GHz pour la liaison descendante), WiMAX (3,3–3,4 GHz), et les bandes HIPERLAN1 (5,15–5,35 GHz). Chaque élément d'antenne a une surface de  $25 \times 10 \text{ mm}^2$  qui se termine par un petit plan de masse de la taille  $100 \times 60 \text{ mm}^2$ . Afin de maintenir la petite taille de l'élément d'antenne, un patch plié est utilisé. La fente rectangulaire est gravée sur le radiateur principal pour utiliser le mode d'ordre supérieur. Un résonateur quart d'onde est intégré au bord du patch plié pour obtenir une résonance supplémentaire pour fonctionnement quadri bande. Un prototype d'antenne a été fabriqué, et les résultats mesurés sont en bon accord avec les résultats simulés. Caractéristiques de rayonnement et performances de diversité du système proposé structure sont présentés. Termes de l'index Diversité d'antenne, système de positionnement global (GPS), entrées multiples sorties multiples (MIMO), plan inversé- Antenne F (PIFA).

La configuration de l'antenne proposée (conception et réalisation) ainsi que ces différentes vues tridimensionnelles sont respectivement montrées sur la figure (II.3).



**Figure.II.3 Configuration de l'antenne proposée avec le prototype fabriqué [16].**



**Figure.II.4(a) Vue tridimensionnelle de l'élément d'antenne unique. (b) Dimension détaillée du patch proposé déplié en une structure planeaire. (c) Dimension détaillée du bras résonnant ajouter bras résonnant ajouté (unité : millimètres) [17].**

Les auteurs, dans le but de valoriser leurs résultats ont réalisés une étude comparative par rapport à d'autres prototypes existants dans la littérature. Les résultats de cette étude sont rassemblés dans le tableau (1)

**Tableau 1 Comparaison des performances de l'antenne mimo quadri-bande [17].**

Antenne MIMO	Dimension d'une seule antenna(mm)	Isulation		corrélacion	efficacité totale de l'antenne			
		GPS	Les outres		GPS	wiFi	WiMAX	HIPERANI
Ref[11]	20×16×5,8	-8	~6	0,425	-	-	-	-
Ref[12]	25×10×1,5	-10	~11	-	30	30	-	-
Ref[13]	20×15×8	-4	<-15	-	70	70	-	-
Proposed	25×10×5,8	-15	<-16	0,015	41	78	>90	>51

Les résultats trouvés par les auteurs sont résumés dans ce qui suit [16].

### 1) Effet de la fente sur les paramètres S.

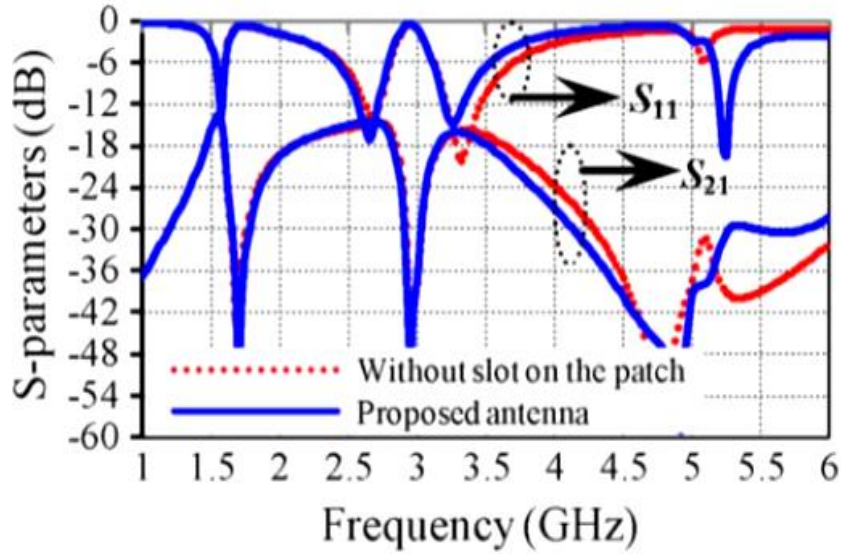


Figure.II.5 Effet de la fente sur le patch sur les  $S$ -paramètres [17].

2) Distribution du courant distribution du courant de surface sur l'antenne à 5,25 GHz.

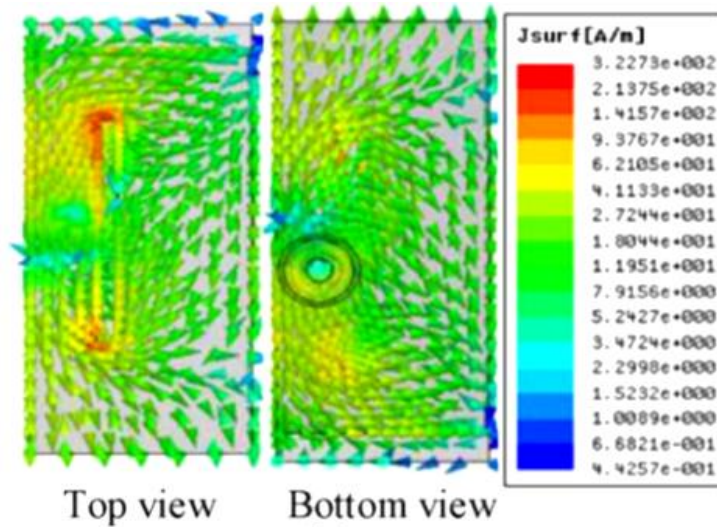
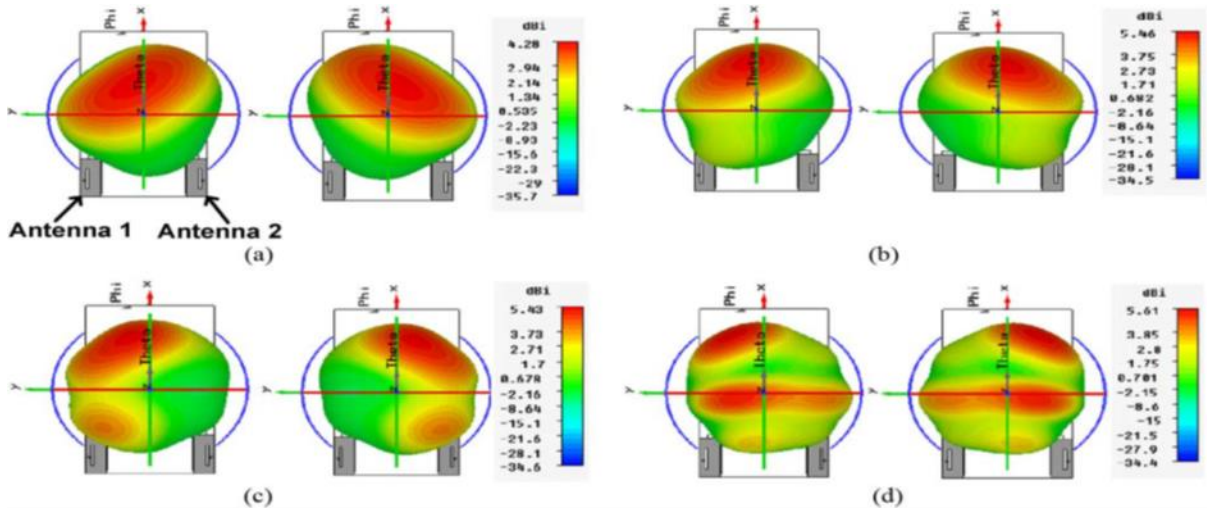


Figure.II.6 Distribution du courant distribution du courant de surface sur l'antenne à 5,25 GHz.

3) Diagrammes de rayonnement total en champ lointain 3D.



**Figure.II.7 Diagrammes de rayonnement total en champ lointain 3D à (a) 1,575, (b) 2,62, (c) 3,35 et (d) 5,25 GHz.**

Des investigations paramétriques de certains paramètres clés ont été effectuées pour analyser leurs effets sur la réflexion et le couplage des paramètres S de l'antenne à l'aide du logiciel HFSS d'Ansoft [17] pour optimiser tous les paramètres géométriques de l'antenne MIMO proposée.

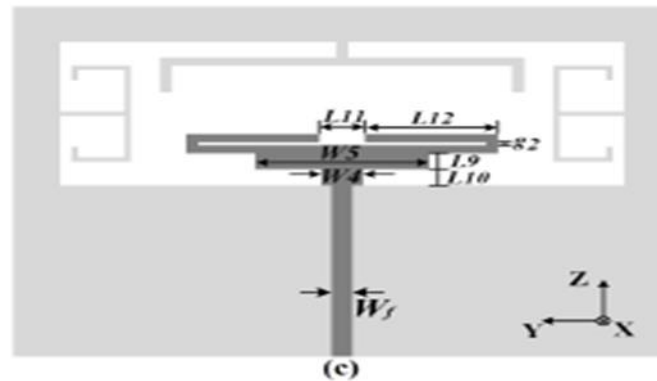
Pour conclure, on peut dire que l'antenne proposée dispose d'une structure petite et compacte qui s'insère facilement dans l'appareil mobile. Un bras résonnant supplémentaire est ajouté à la structure à un endroit approprié pour convertir la bande passante non désirée en bande passante désirée. L'antenne proposée présente de bonnes caractéristiques d'isolation même en l'absence de toute technique d'amélioration de l'isolation. Une bonne diversité de motifs est obtenue grâce à l'antenne proposée qui convient à la communication mobile en atténuant l'évanouissement par trajets multiples. La performance de diversité de l'antenne MIMO est bien dans les limites de la norme standard.

Les auteurs dans la référence [18] ont présentés la conception d'une antenne à fente à quatre bandes pour le GPS, le WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) et le WLAN (Wireless-Area-Network). L'antenne consiste en une fente rectangulaire d'une surface de  $0,37\lambda_g \times 0,14\lambda_g = 48 \times 18\text{mm}^2$  (où  $\lambda_g$  est la longueur d'onde du guide), un patch d'alimentation en forme de T, un stub en forme de T inversé et deux stubs en forme de E pour générer quatre bandes de fréquence.

La partie rayonnante et la taille totale de l'antenne sont inférieures à celles des antennes tri-bandes étudiées dans la littérature.



L'antenne à fente multi bande proposée est illustrée à la figure (II .8) qui consiste en une fente rectangulaire de taille  $L_1 \times w_1 = 48 \times 18mm^2$  sur une face du substrat. La fente rectangulaire est chargée d'un talon en forme de T inversé au bord supérieur de la fente rectangulaire et deux talons en forme de E sur la gauche (LH) et les côtés droit (RH) de la fente.



**Figure.II.8Géométrie de l'antenne.**

Un patch d'alimentation en forme de T avec micro ruban alimenté sur l'autre côté du substrat est utilisé pour alimenter la fente rectangulaire.

La ligne d'alimentation a une largeur de  $W_f=1,76$  mm pour obtenir une impédance de  $50 \Omega$ . La face supérieure du patch en forme de T est étendue des deux côtés puis pliée en deux pour obtenir un format compact.

L'antenne peut générer quatre bandes de fréquences : la fente rectangulaire et le talon en forme de T inversé, génèrent ensemble la bande 1 à environ 1,575 GHz pour le système GPS.

Les deux tronçons en forme de E fonctionnant comme des radiateurs monopôles génèrent la bande 2 à environ 2,45 GHz pour le WLAN IEEE. Le patch d'alimentation en forme de T et le talon en forme de T inversé génèrent la bande 3 à environ 3,5 GHz pour le système WiMAX. Le patch d'alimentation en forme de T dans le mode supérieur génère la bande 4 à environ 5,4 GHz pour le système WLAN.

L'antenne est étudiée et conçue sur un substrat avec un rapport permittivité de  $\epsilon_r=3,5$ , une épaisseur de 0,8 mm et une tangente de perte de 0,004. Les dimensions finales de l'antenne multi bande sont donné dans le tableau (2)

**Tableau 2Dimensions de l'antenne proposé.**



$L_1$	$L_2$	$L_3$	$L_4$	$L_5$	$L_6$	$L_7$	$L_8$	$L_9$
48	21,6	29	3,3	12	5,5	4	1,3	2
$L_{10}$	$L_{11}$	$L_{12}$	$g_1$	$g_1$	$w_1$	$w_2$	$w_3$	$w_4$
2	4	11,5	2	0,4	18	1	0,5	3,6
$w_5$	$W_f$	$w_s$	$h_s$	$L_s$	-	-	-	-
15	1,76	44	0,8	56	-	-	-	-

Dans la disposition de l'antenne illustrée sur la figure(II.8), la ligne d'alimentation est placée symétriquement sur le grand plan de masse, qui pourrait être bloquant la voie pour d'autres composants électroniques. Cependant, la ligne d'alimentation pourrait également être conçue pour avoir un plissement de  $90^\circ$  ou être placé asymétriquement sur le plan de masse pour donner plus d'espace pour d'autres composants. La ligne d'alimentation est placée symétriquement sur le plan de masse dans notre conception.

Les résultats mesurés montrent que l'antenne peut être conçue pour couvrir les bandes de fréquences de 1,575 à 1,665 GHz pour le système GPS, de 2,4 à 2,545 GHz pour les systèmes WLAN IEEE 802.11b&g, de 3,27 à 3,97 GHz pour le système WiMAX et de 5,17 à 5,93 GHz pour le système WLAN IEEE 802.11a.

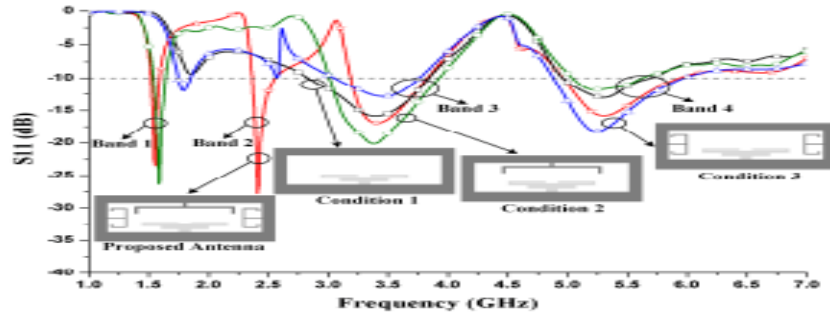
### ➤ Etudes d'antenne

Pour étudier les effets de différents éléments rayonnants sur les bandes de fréquences de l'antenne multi bande proposée, la simulation de  $S_{11}$  est réalisée selon quatre conditions différentes suivantes [17]:

1. Seule la Patch d'alimentation en forme de T ;
2. Uniquement le patch d'alimentation en forme de T et le stub en forme de T inversé ;
3. Seulement le patch d'alimentation en forme de T et les deux talons en forme de E ;
4. La conception achevée (proposée antenne).

Les résultats pour les ces quatre conditions sont présentés sur la figure(II.9).

- 1) Lorsque seule la forme en T le patch d'alimentation est utilisé dans la fente, l'antenne génère trois bandes de fréquences, bandes 1, 3 et 4, à environ 1,8, 3,5 et 5,2 GHz, respectivement.



**Figure.II.9 S11 simulé utilisant différents éléments rayonnants d'antenne.**

2) lorsque le talon en forme de T inversé est ajouté, la figure(II.9).montre que la bande 1 est légèrement déplacée vers le bas 1,8 à 1,575 GHz, mais les bandes 3 et 4 restent à peu près les mêmes.

3) Si les deux talons en forme de E sont utilisés, au lieu du Stub en forme de T, la figure(II.9).montre que l'antenne a quatre bandes de fréquences, les bandes 1, 2, 3 et 4, à environ 1,8, 3,5, 2,5 et 5,2 GHz, respectivement, donc une bande de fréquence de plus (avec une résonance assez faible) est généré à environ 2,5 GHz.

De plus, la bande passante de la bande 4 à environ 5,2 GHz est élargi.

4) Cependant, dans la condition lorsque tous les éléments sont utilisés, la figure(II.9).montre que l'antenne multi bande proposée a quatre bandes de fréquences (avec  $S_{11} < -10$  dB), soit 1,522-1,588 GHz pour le système GPS, 2,368-2,56 GHz pour l'IEEE 802.11b & g Systèmes WLAN, 3,19-3,832 GHz pour le système WiMAX, et 4,96-5,94 GHz pour le système WLAN IEEE 802.11a.

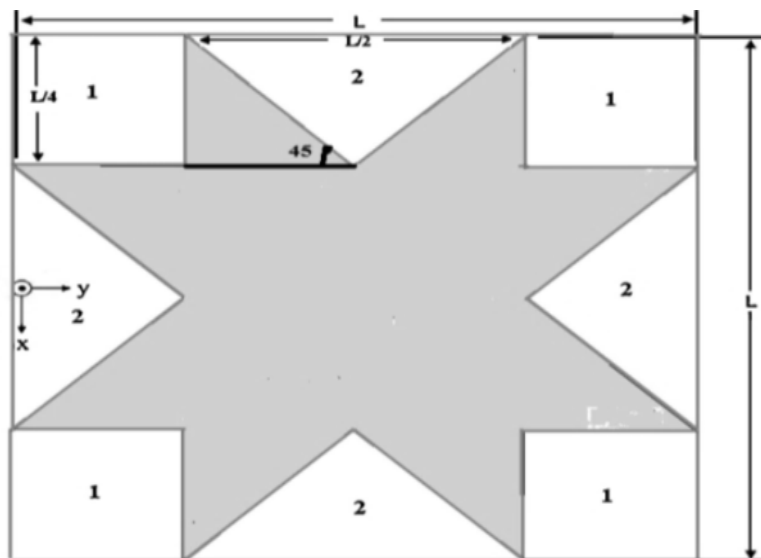
Dans cette référence les auteurs ont fait une étude sur les différents paramètres intervenant dans la géométrie de l'antenne, notamment L1, L3-L10, W1, W5 et g1 ainsi que leur effet sur les quatre bandes de fréquences tout en gardant la taille de l'antenne (c'est-à-dire  $W1 \times L1$ ) inchangée. Les résultats ont montré que

- La bande 3 varie en utilisant L3 et W5 ;
- La bande 4 en utilisant L12 ;
- La bande 1 en utilisant g1 ;
- La bande 2 en utilisant L6 (la hauteur du talon en forme de E).

Cette antenne dispose de performances appréciables en termes de perte de retour, de diagramme de rayonnement, de gain de crête réalisé et efficacité, de l'antenne. Cependant, elle ne dispose pas d'une polarisation circulaire, ce qui la rend moins résistante aux phénomènes de multi-trajets. D'un autre côté, les bandes de fréquences de l'antenne nécessitent un élargissement pour s'adapter aux récepteurs multi-constellation.

Dans la référence [19], est proposée une antenne patch GNSS (Global Navigation Satellite System) tri-bande multi-constellations dont le schéma de conception est montré sur la figure (II.10). Cette antenne est donc conçue pour être utilisée sur tous les marchés mondiaux et prendre en charge par sa structure tri bande les signaux des différentes constellations des différents systèmes GNSS existants. Au fait, le GNSS comprend les constellations du GPS, GLONASS, Galileo et Beidou. Chacune de ces constellations utilise des bandes passantes et des fréquences porteuses différentes. Il s'agit donc de concevoir une solution à antenne unique pour supporter une application globale.

Les résultats de la simulation sont utilisés pour montrer les capacités de l'antenne.



**Figure.II.10 L'antenne multi mode multi constellation [19].**

**a) Conception d'antenne.**

L'antenne est conçue en forme d'étoile avec une longueur de résonance, (L) de 49,2 mm, et un substrat avec une permittivité relative de 42,87, une hauteur  $h = 5,41$  mm et une tangente de

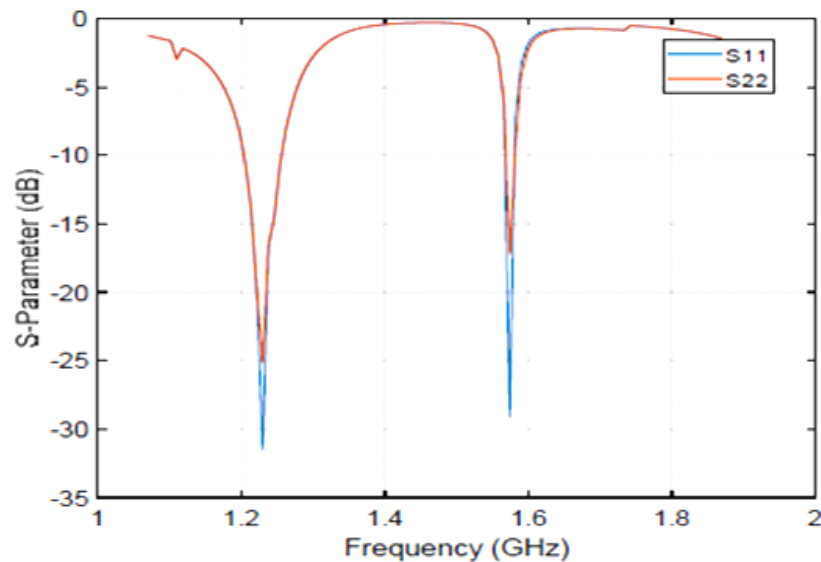
perte de 0,00072. Le patch est placé sur un substrat de 60 mm par 60 mm, qui est centré sur un plan de masse de 70 mm x 70 mm.

L'antenne est alimentée par deux sondes coaxiales à travers le plan de masse qui sont décalés du centre du patch de  $x_1 = 6$  mm et  $y_1 = 4,8$  mm, et  $x_2 = 2,4$  mm et  $y_2 = -3,4$  mm. La forme en étoile de l'élément patch est réalisée en trois étapes. Dans la première étape, un patch carré dont les cotés sont de dimension  $L \times L$ .

Dans la deuxième étape, un carré de côté  $L/4$  est retiré de chacun des quatre coins. Enfin, un triangle équilatéral de côté  $L/2$  est découpé de chaque côté.

### b) Résultat

Les résultats de la simulation FEKO présenté pour la perte de retour, le gain réalisé et le rapport axial sont illustrés sur les figures(II.11)et(II.12) et ci-dessous, respectivement.



**Figure.II.11 Paramètres S de l'antenne dans les deux bandes et pour deux alimentations.**

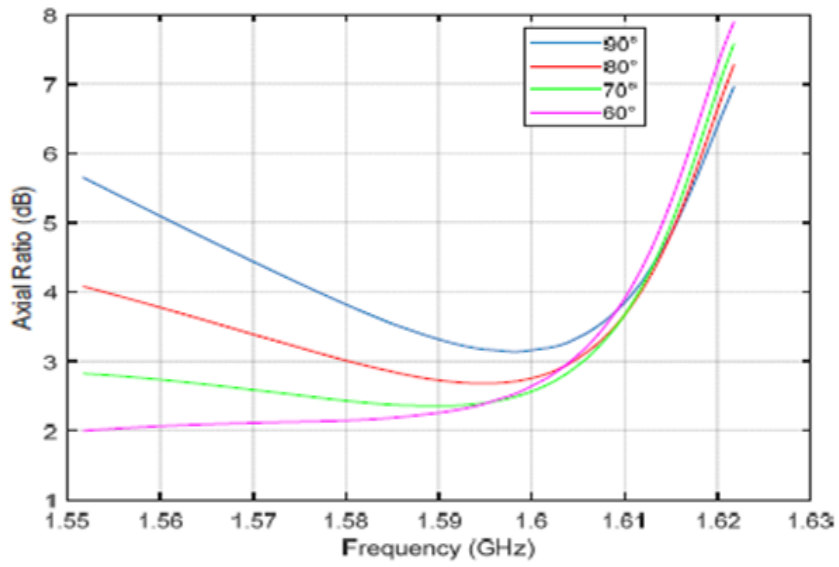


Figure.II.12 Rapport axial de l'antenne dans les trois bandes à L1/E1/G1 [19].

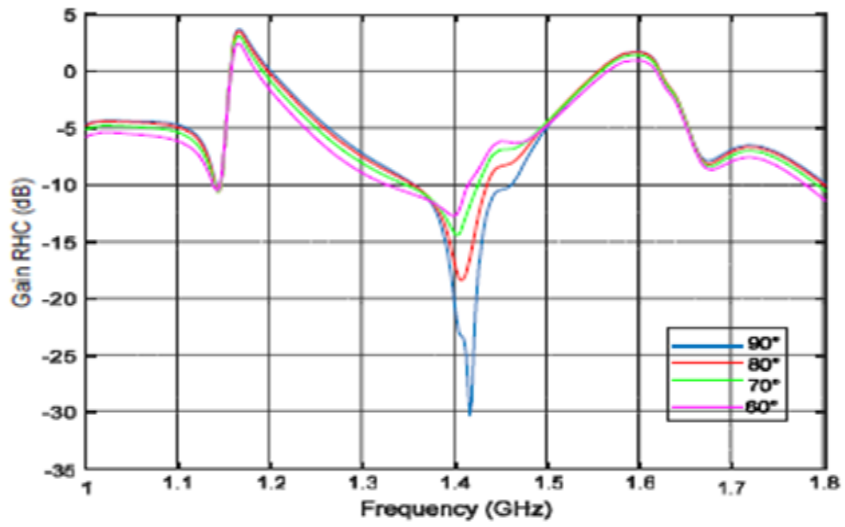
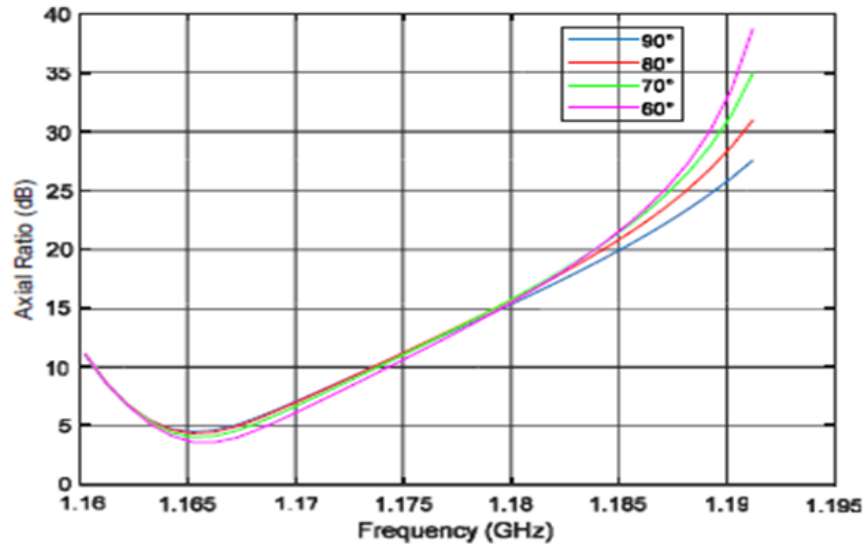


Figure.II.13 Gain réalisé de l'Antenne dans les deux bandes [19].



**Figure.II.14**Rapport axial de l'antenne dans les deux bandes à L5/E5a [19].

D'après les résultats de figure (II.11) à figure(II.12) , l'antenne patch GNSS tri-bande proposée présente une perte de retour acceptable dans le spectre de fréquences désiré, le gain réalisé est élevé allant de 0,5dB à 3,5dB aux fréquences souhaitées, et le rapport axial est faible dans les deux bandes de fréquences.

Dans cette référence, un mode d'ordre supérieur est excité pour atteindre des performances tri-bande à partir d'une seule antenne patch à profil bas ; cette antenne tri-bande présente des performances d'antenne GNSS qui prennent en charge les exigences de navigation mondiales pour plusieurs constellations GNSS, y compris GPS, GLONASS, Galileo et BeiDou. Cependant, pour la bande passante de L2 et L5, il est nécessaire de faire une optimisation supplémentaire.

## II.9 Conclusion

L'antenne du récepteur GNSS, comme tous les systèmes électroniques de télécommunication modernes, est très concerné par la miniaturisation. Cette miniaturisation est, d'un côté, étroitement liée à un certain nombre de paramètres qui définissent l'objectif et le fonctionnement de l'antenne ; d'un autre côté, les performances de l'antenne miniaturisée sont hypothéquées par la technique de miniaturisation utilisée. Ces paramètres d'antennes et certaines techniques de miniaturisation ont été soigneusement présentés dans ce chapitre [3]. De plus, afin d'investiguer les efforts des chercheurs sur cette problématique, un état de l'art sur certaines antennes GNSS proposées dans la littérature récente a été effectué.

## **CHAPITRE III**

### **Etude de performance d'une antenne GNSS par HFSS et CST.**

## **Chapitre III: Etude de performance d'une antenne GNSS par HFSS et CST.**

### **III.1 Introduction**

Ce chapitre présente notre contribution qui consiste, dans un premier temps, la validation des travaux de la référence [1]. Notamment la détermination des paramètres internes (paramètres S..., bande passante) et des caractéristiques externes (gain, efficacité et diagramme de rayonnement) de l'antenne GNSS proposée. Par la suite, les résultats obtenus ont été commenté.

### **III.2 Outils de simulation**

#### **III.2.1 Logiciel HFSS**

Pour prédire les performances électromagnétiques de la structure avec précision, le recours à la simulation électromagnétique est indispensable. Ainsi, il s'avère incontournable de bien choisir un logiciel adéquat, permettant la prise en compte de tous les phénomènes physiques importants, dans le but de réduire les erreurs de modélisation.

Actuellement avec l'évolution rapide des moyens informatiques, on peut trouver sur le marché plusieurs logiciels de calcul scientifique :(ANSYS, KeySight, HFSS, AWR, CST, EMworks, etc...)

L'Ansoft HFSS est un logiciel commercial, tridimensionnel et d'éléments finis. Il bénéficie d'interface graphique conviviale et puissante, qui calcule le comportement électromagnétique d'une structure tout en permettant une simulation 2D et 3D. Il permet d'obtenir [21]:

- Les paramètres de réflexion / transmission (paramètres S),
- Le champ proche, et le diagramme de rayonnement,
- L'impédance et les constantes de propagation des différents modes.

##### **III.2.1.1 Etapes de simulation par HFSS**

Son fonctionnement peut se résumer en [21] :

La sélection de l'environnement dans lequel la structure sera créée. il s'agit de sélectionner les unités, le type de solution .....

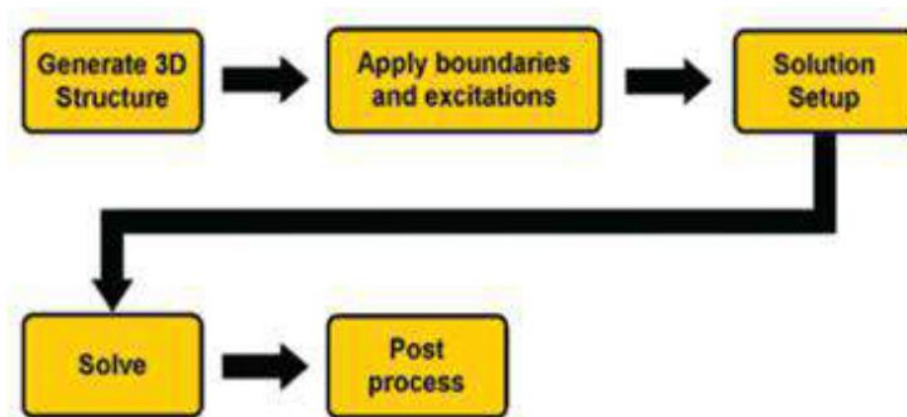
- 1- La Schématisation de la structure en représentant les géométries des différents objets, à partir de formes de bases (cubes, sphères, cônes, etc.), de quelques outils de



transformations géométriques (translation, rotation, duplication, intersection, etc.) et avec les dimensions appropriées.

- 2- Spécification des propriétés physiques pour chaque objet
- 3- Spécification des conditions aux limites :
- 4- Manière d'exciter la structure, consiste à injecter la puissance sous forme d'onde électromagnétique à travers la porte d'alimentation déjà définie.
- 5- Configuration des paramètres de simulation : Fréquence(s) de maillage, paramètres de convergence.
- 6- Analyse des solutions à 1 ou plusieurs fréquences : Après avoir vérifié la conformité de la structure aux exigences du HFSS, les conditions aux frontières et l'excitation, la simulation sera prête à être lancée. La durée de cette simulation dépend essentiellement de [21]:
  - La vitesse du calculateur (ordinateur) utilisé.
  - La complexité de la structure (volume, dimensions etc).
  - La bande de fréquence de l'analyse.
- 7- Visualisation des résultats.
- 8- Discussion et exploitation des résultats par l'utilisateur.

Finalement, les étapes principales d'une simulation complète sous HFSS peuvent être schématisées par le digramme présenté sur la figure1.



**Figure.III. 1** Etapes principales d'une simulation complète sous HFSS.

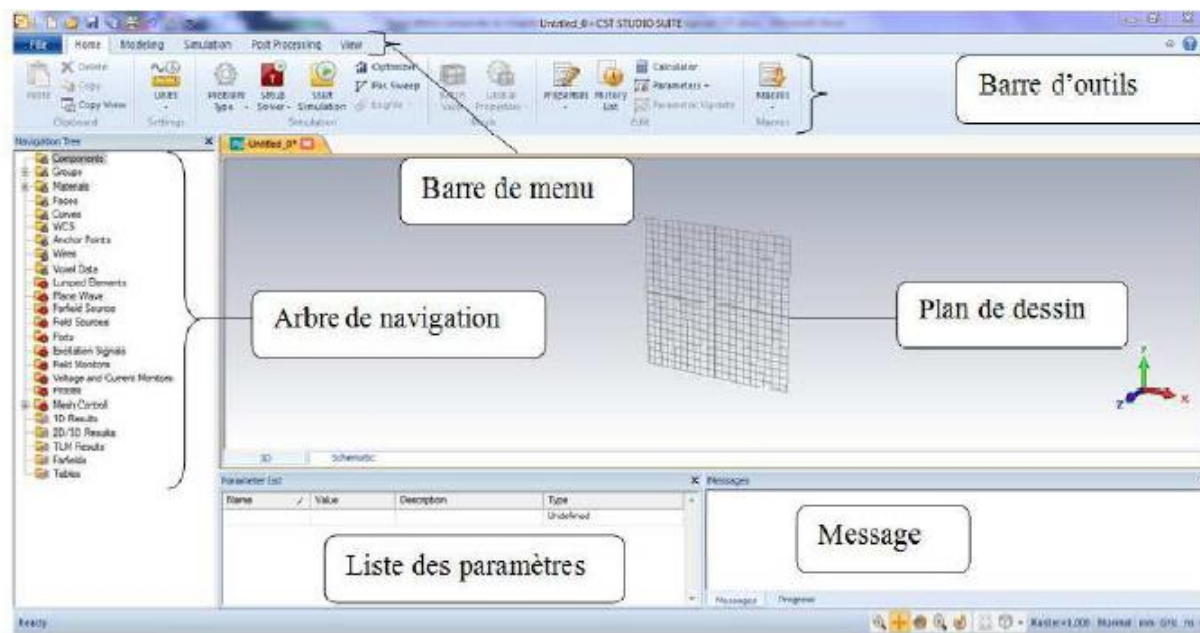
## II.2.2 Logiciel CST

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

Comme tous les simulateurs 3D, l'avantage de cet outil est la possibilité de traiter toutes sortes de structures homogènes quelle que soit la technologie utilisée[21].

### II.2.2.1 Description générale de l'interface CST

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



**Figure.III. 2 Interface du CST.**

- A l'entête de l'interface, on trouve la barre d'outils qui est un ensemble de raccourcis de la barre de menu.
- A gauche de l'interface, nous avons l'arbre de navigation d'où on peut accéder aux éléments structuraux et aux résultats de simulation.
- Au corps de l'interface se trouve le plan de travail sur lequel la structure est en 3D.
- Au pied de l'interface, nous avons :
  - ✓ La liste des paramètres d'où on trouve les variables utilisées pendant la simulation

- ✓ Le message qui informe si chaque étape est simulée avec succès. Dans le cas contraire, un message d'erreur apparaît.

### III.3 Résultats de simulation

Les auteurs dans [1], présentent une nouvelle conception d'antenne patch micro ruban tri-bande pour le récepteur du GPS. L'antenne utilise un substrat FR-4 à faible coût. Il emploie un résonateur en boucle ouverte (OLR), une fente rectangulaire divisée (SRS) et un stub au bord non rayonnant pour obtenir une réponse multi bande. La conception est simple et n'implique pas l'empilement de substrats.

Des simulations sont effectuées dans Ansys HFSS pour étudier la perte de retour, le diagramme de rayonnement et le gain de l'antenne. L'antenne tri-bande proposée dans [1] résonne aux fréquences GPS, à savoir. 1,58 GHz (bande L1), 1,208 GHz (bande L2) et 1,129 GHz (bande L5). Sa forme géométrique ainsi que la forme simulée sont, respectivement montrées sur les figures 3-a et 3-b.

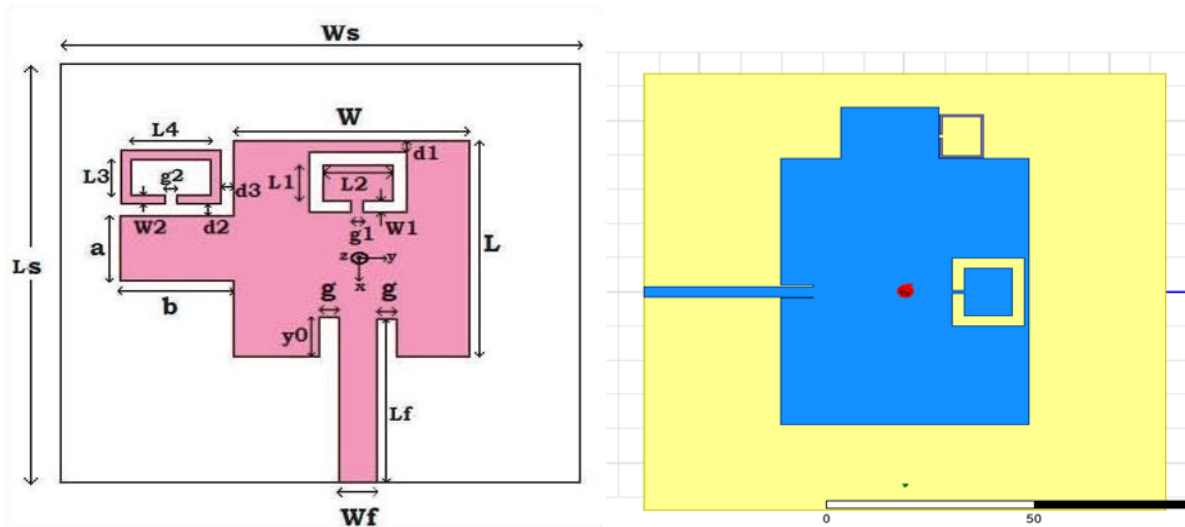


Figure3-a : forme géométrique

Figure3-b : forme simulé

**Figure.III. 3 forme géométrique et simulé de l'antenne proposé.**

Les dimensions de l'antenne patch sont illustrées dans le tableau suivant.

**Tableau 3 Dimension de l'antenne proposé dans la référence [1]**

Paramètre	Valeur (mm)	paramètre	Valeur (mm)	Paramètre	Valeur (mm)
$L_S$	127.5	$g$	0.4	$d_1$	1
$W_S$	127.5	$a$	24	$L_3$	9.6
$L$	60.6	$b$	15	$L_4$	11.4
$W$	77.6	$L_1$	11.7	$d_2$	0.3
$W_f$	3	$L_2$	13.7	$g_2$	1
$L_f$	41.3	$g_1$	1	$W_2$	0.5
$Y_0$	7.8	$W_1$	3	$d_3$	0.3

### III.4 Résultats et discussions

En utilisant les paramètres sus-mentionnés, les valeurs de  $S_{11}$ , le diagramme de rayonnement, le rapport axial, le gain et l'efficacité de l'antenne proposée sont déterminés par simulation sous HFSS et CST.

#### III.4.1 Coefficient de réflexion ( $S_{11}$ )

Figure (III.4), montre le coefficient de réflexion  $S_{11}$  d'antenne proposée en fonction de la fréquence et met en évidence la bande passante à -10 dB. On remarque que l'antenne proposée résonne aux fréquences GPS, à savoir. 1,58 GHz (bande L1) avec une largeur de bande passante à -10dB de 33MHz dans l'intervalle (1,1150 – 1,1470) GHz, 1,208 GHz (bande L2) avec une largeur de bande passante à -10dB de 23 MHz dans l'intervalle (1,1900 – 1,2130) GHz, et 1,129 GHz (bande L5) avec une largeur de bande passante à -10dB de 21 MHz dans l'intervalle (1,5750 – 1,5960) GHz.

Ce résultat, comparé à celui de la référence [1], représenté sur la figure(III.4), est montre une bande passante assez large. En effet, la largeur de bande pour L1 et L5 a été croissante de 20,5 MHz et 14,8 MHz.

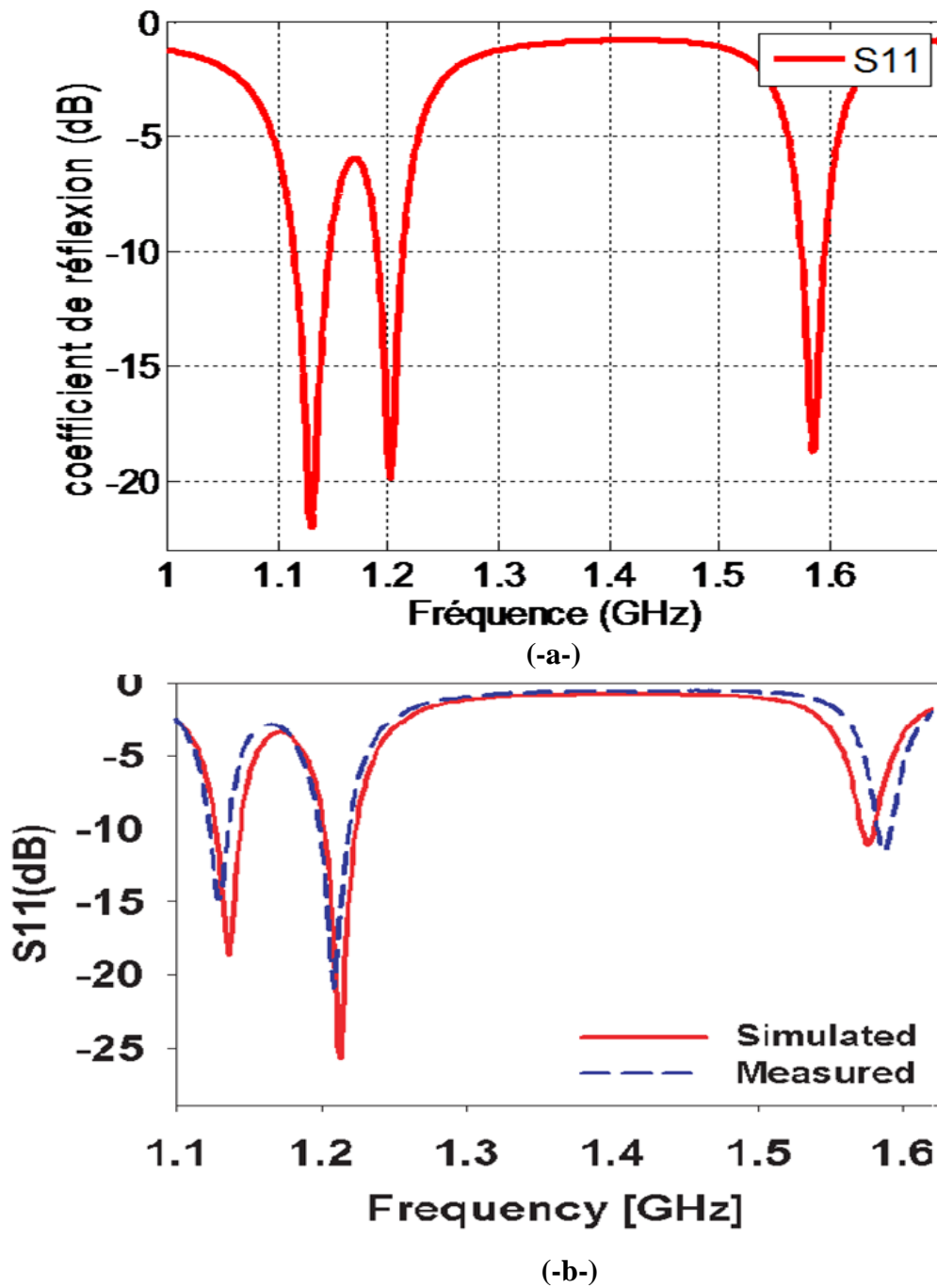
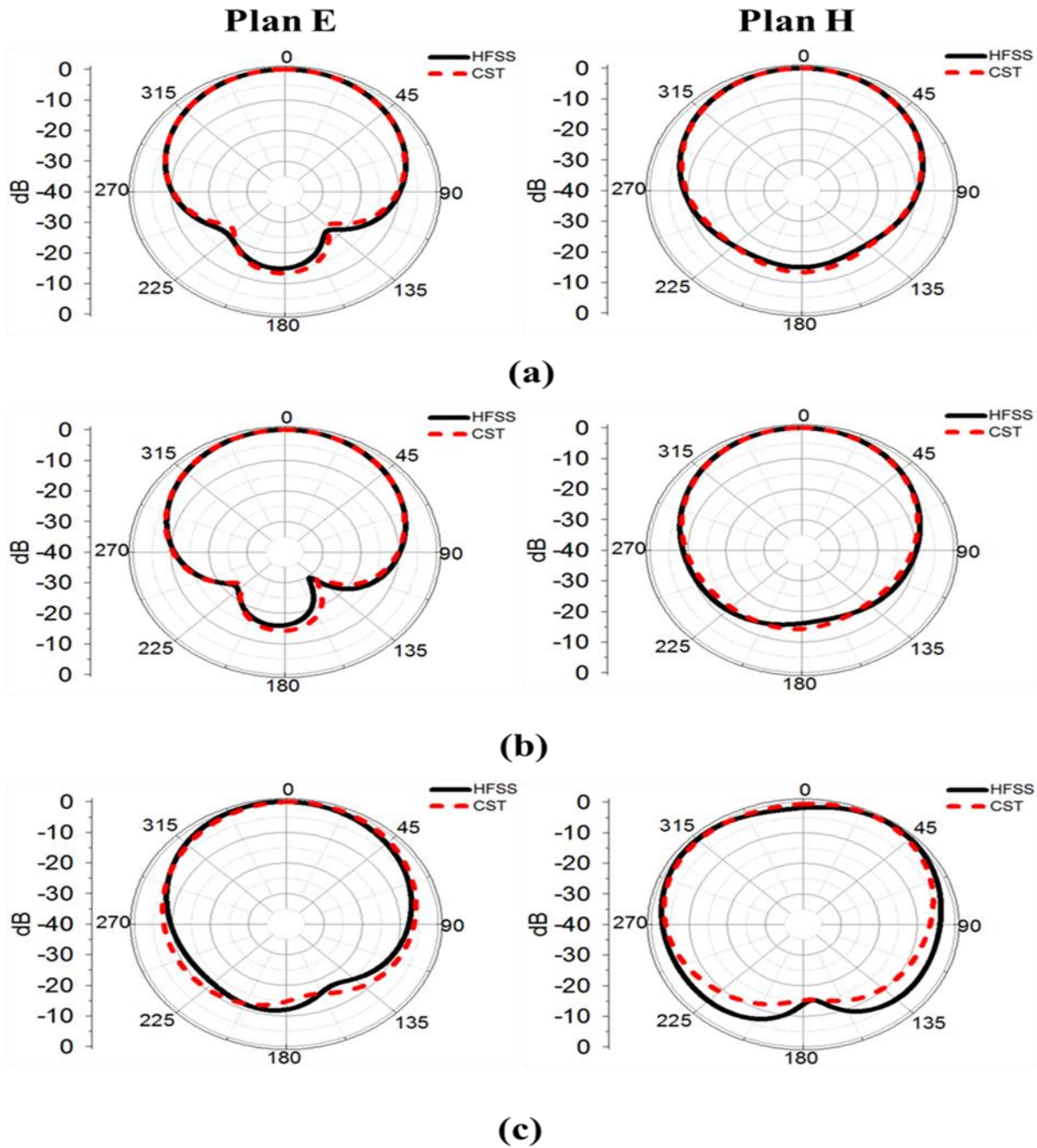


Figure.III. 4 Variation de S11 en (dB) en fonction de la fréquence.

### III.4.2 Diagramme de rayonnement

Le diagramme de rayonnement représente les variations de la puissance rayonnée par l'antenne dans les différentes directions de l'espace. Les diagrammes de rayonnement du champ lointain

de la structure finale dans les plans  $\phi = 0^\circ$  et  $\phi = 90^\circ$  et  $\theta = 0^\circ$  et  $\theta = 90^\circ$  ont été déterminés pour les trois fréquences porteuses  $f_1 = 1.130 \text{ GHz}$  et  $f_2 = 1.202 \text{ GHz}$  et  $f_3 = 1.58 \text{ GHz}$ . Les résultats de simulation correspondant, respectivement, à ces trois fréquences sont illustrés sur les figures (III.5-a), (III.5-b) et (III.5-c), et ce, pour les deux outils HFSS et CST.



**Figure.III. 5** Diagramme de rayonnement de l'antenne proposé dans les fréquences : (a) 1.13GHz, (b) 1.2 GHz et (c) 1.58GHz.

On remarque que le diagramme de rayonnement de l'antenne dans les trois bande L1 et L2 et L5 est stable .

### III.4.3 Gain

La figure (III.6) présente la variation du gain en fonction de la fréquence. On remarque que le gain est inférieur à 0. En effet, dans les trois bande L1(1.130 GHz) et L2(1.202 GHz) et L5(1.58 GHz), le gain obtenu est respectivement de -1 dB, -4 dB et -16 dB.

Ce résultat, comparé à celui de la référence [1], représenté sur la figure b, est inacceptable et nécessite une amélioration considérable.

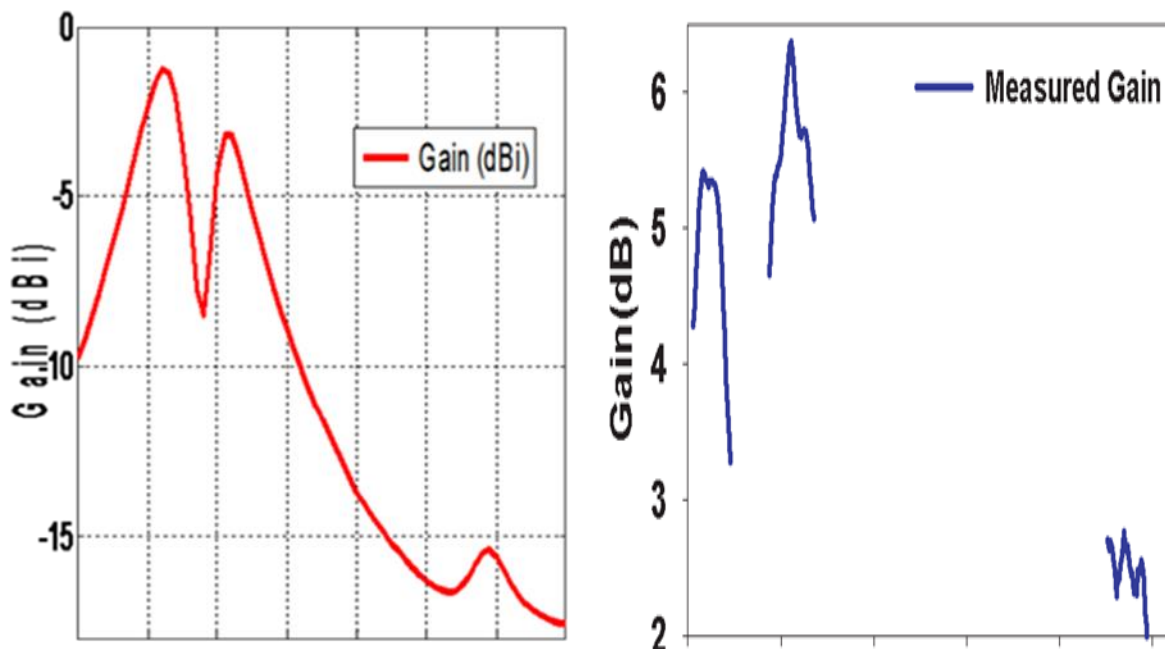


Figure.III. 6 Gain de l'antenne proposée.

### III.4.4 Efficacité

La figure (III.7) présente la variation de l'efficacité en fonction de la fréquence. On remarque que l'efficacité est inférieure à 0. En effet, dans les trois bande L1(1.130 GHz) et L2(1.202 GHz) et L5(1.58 GHz), efficacité obtenue est respectivement de 0,15%, 0,06% et 0,12%.

Ce résultat, comparé à celui de la référence [1], est inacceptable et nécessite une amélioration considérable.

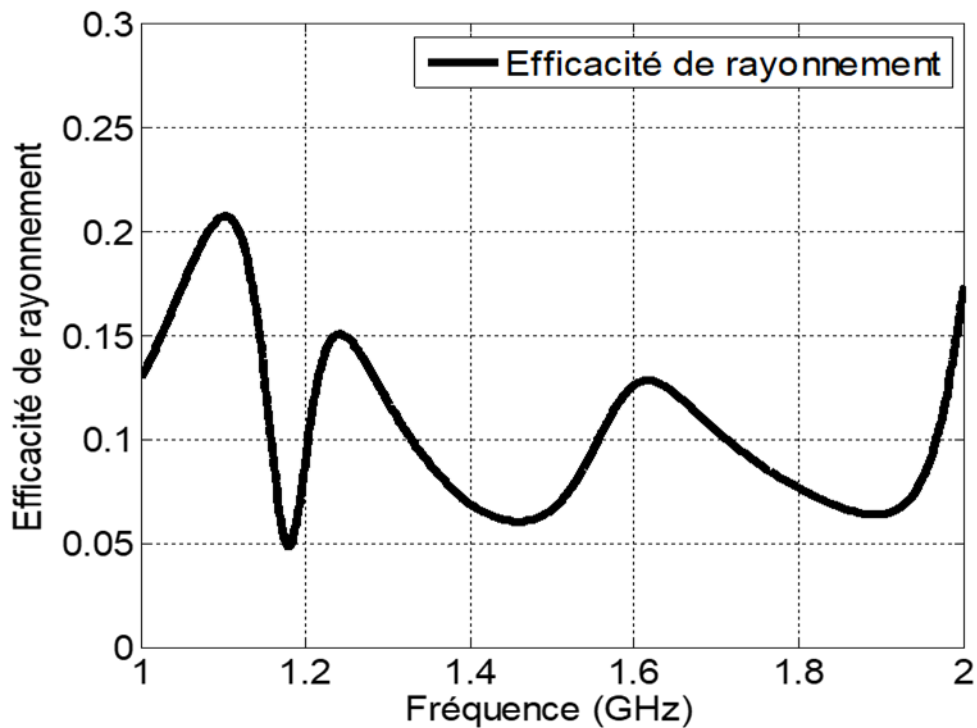


Figure.III. 7 Efficacité de rayonnement.

### III.4.5 Rapport axial

Le résultat de simulation du rapport axial de l'antenne proposée pour  $\phi = 180^\circ$  et  $\theta = 10^\circ$  est montré sur la figure (III.8). On remarque que la bande L1 à la fréquence porteuse 1,58 GHz est la seule à jouir d'une polarisation circulaire. Il reste donc à doter les deux autres bandes d'une polarisation circulaire.



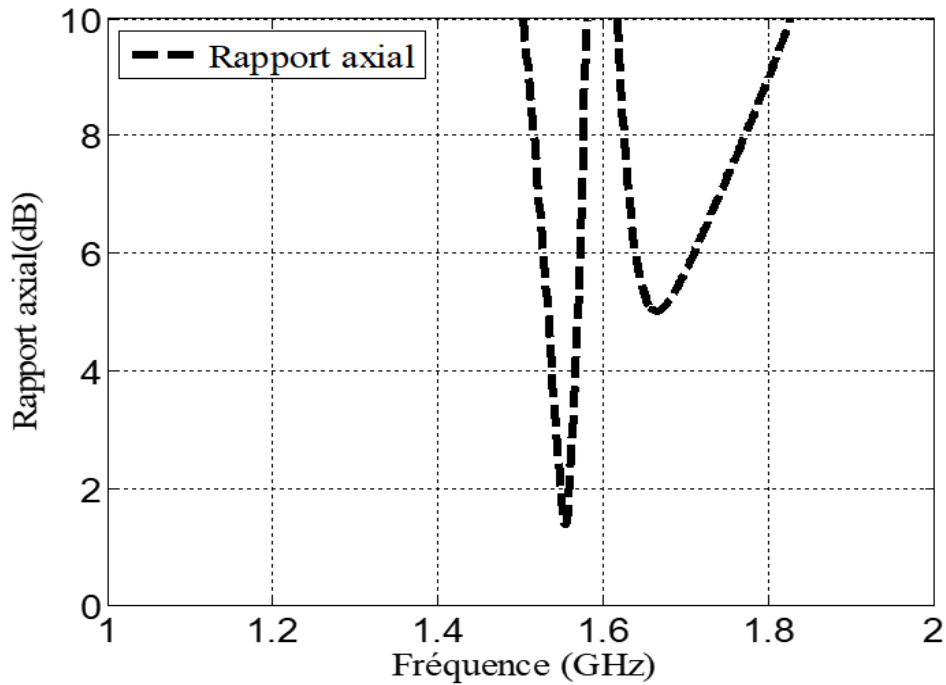
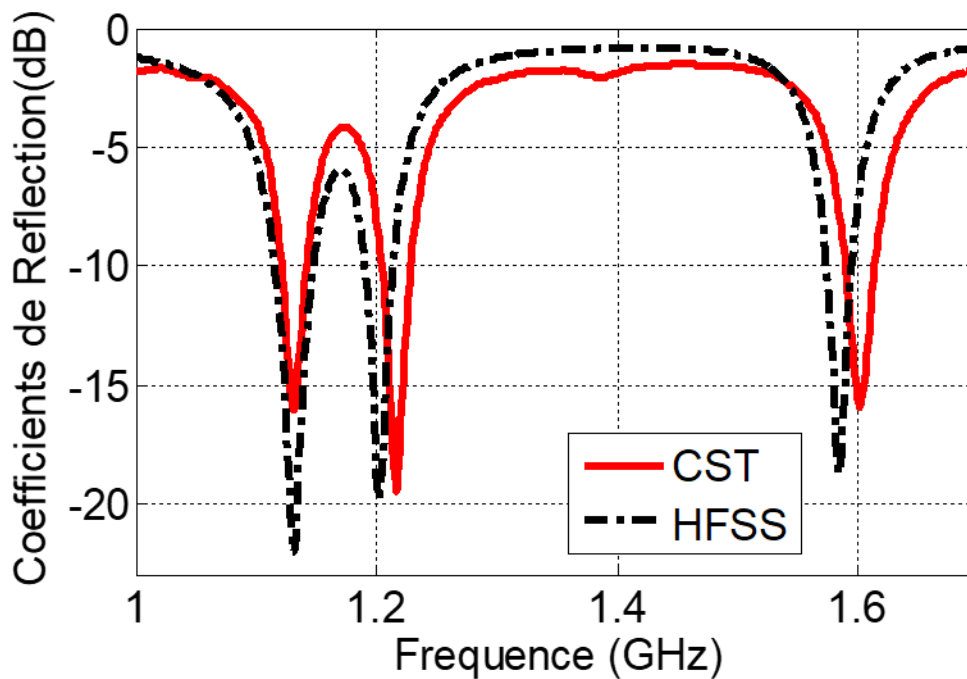


Figure.III. 8 rapport axial de l'antenne proposée [1].

### III.5 Validation avec CST

Dans cette deuxième étape, les memes paramètres de l'antenne proposée déjà trouvés ci-haut, ont été déterminé utilisant, cette fois-ci, le CST.

Les résultats via CST du digramme de rayonnement sont donnés conjointement avec ceux utilisant HFSS, sur la figure (III.5). Alors que les résultats des cefficients de réonnement sont donnés sur la figure (III.9).



**Figure.III. 9 Comparaison de coefficient de réflexion de l'antenne par HFSS et CST.**

Une étude comparative entre les résultats des deux simulateurs HFSS et CST présentés sur Figure (III .9), permet de constater qu'il y-a un bon accord entre les deux simulateurs.

### III.6 Conclusion

Dans ce chapitre, les travaux de la référence [1] ont été validés. Dans cette dernière, une antenne patch micro ruban tri-bande pour la réception simultanée des trois signaux GPS, L1, L2 et L5 a été conçu et testée. Après validation nous avons pu aboutir pratiquement aux mêmes résultats concernant les coefficients de réflexion et le diagramme de rayonnement. Cependant, les autres paramètres ont besoin d'être améliorés.

Il faut noter, cependant que les trois bandes passantes telles que obtenues par les auteurs dans [1], (de l'ordre de 20MHz), restent insuffisantes pour les applications multi-constellations.

Aussi, nous proposons, comme perspectives, d'améliorer dans un premier temps les paramètres dont les performances sont dégradées et d'adapter par la suite l'antenne proposée aux multi-constellations.

## **Conclusion Générale**

### **Conclusion Générale**

Le travail présenté dans ce mémoire a porté sur l'étude et la conception d'antennes patch tri-bande (L1-L2-L5 du GPS) pour les récepteurs GNSS.

Nous avons présenté, dans ce travail, nous contribuons à un travail de recherche qui vise à étudier les différentes techniques existantes qui permettent la conception d'antennes miniatures qui peuvent être adaptés efficacement au récepteur GNSS. Aussi, nous avons procédé à l'étude et la validation des travaux dans la référence [1] qui s'articule sur la conception d'une antenne miniature GNSS tri-bande.

Dans le premier chapitre nous avons présenté les différentes caractéristiques des antennes et plus particulièrement celles de l'antenne patch. Le deuxième chapitre a été consacré à l'étude générale des systèmes GNSS tout en se concentrant sur le récepteur et les caractéristiques des signaux interceptés par l'antenne GNSS.

Le dernier chapitre rassemble les résultats de simulation à l'aide du logiciel CST et HFSS qui sont commentés et comparés à ceux de la référence validée. Les résultats de simulation des caractéristiques en utilisant les paramètres les valeurs de  $S_{11}$ , le diagramme de rayonnement, le rapport axial, le gain et l'efficacité de l'antenne

## **BIBLIOGRAPHIE**

*Références Bibliographiques*

- [1] A. S. Supriya ,<<A Low Cost Tri-band Microstrip Patch Antenna for GPS Application>> ,article ,Department of Electronics & Communication Engineering, Amrita School of Engineering Coimbatore, Amrita Vishwa Vidyapeetham, Amrita University, 641112, India
- [2] BELMESSAOUD Djaouida,<<Etude de nouvelles antennes planaires en tenant compte des surfaces sélectives en fréquence>> ,Thèse doctorat, Université Mohamed Boudiaf - M'sila
- [3] OUMY Diop, << Etude de miniaturisation du facteur de qualité d'antenne miniature conçue pour des petits objets communiquant >>, thèse de doctorat, de l'Université de Nice.2013
- [4] HERVE Aubert, LAAS-CNRS, « Etude et réalisation d'antennes ultra-compactes à basede métamatériaux: Application à la réalisation d'une antenne GNSS miniature. », Toulouse, Génie Elecricque, Electronique et Télécommunications (GEET)
- [5] CHORFI Hamid, << conception d'un nouveau système d'antenne réseau en onde millimétrique >>, thèse de doctorat, Université du Québec ,2012
- [6] BRUNO Delorme : << les antennes dans les réseaux de téléphonie mobile>>, Paris, 2010
- [7] A.Boyer, ANTENNES -SUPPORT DE COURS, in, 2011. Juiellet 2014.
- [8] O. Picon et coll. << Les antennes. Théorie, conception et applications>>.
- [9] BALANIS, << Antenna Theory: Analysis and Design>>, Constantine A, April 1982
- [10] Théorie des antennes [https://www.tutorialspoint.com/antenna\\_theory](https://www.tutorialspoint.com/antenna_theory)
- [11] GUENACH Mohamed, << Conception d'une antenne PIFA Multibandes pour applications sans fils>> , Université du Maroc ,2016
- [12] JEAN Marc:<< Petite antenne >>, Paris, 2011
- [13] SAHBI Baccar, << developpement d'une architecture d'un recepteurgpsrfs subsampling >>, thèse d'ingénieur, Ecole Supérieur Des Communications De Tunis, 2005
- [14] ATIA.Salim, <<Global Navigation Satellite Systems « GNSS » Signals&Problematics>>, novembre 2018.

## *Bibliographie*

[15] FENENICHE .wafa, <<Amélioration des Performances de Positionnement GNSS par Exploitation de la Sous porteuse des Signaux modulés en BOC>>thèse de doctorat, Université Mohamed El-Bachir EL-Ibrahimi de Bordj Bou Arréridj

[16] Hari Shankar Singh, <<A Quad-Band Compact Diversity Antenna for GPS L1 /WIFI /LTE2500/WiMaX/HIPERLAN1 Applications>> VOL. 13, 2014

[17] Y. F. Cao, S. W. Cheung, <<A Multi-band Slot Antenna for GPS/WiMAX/WLAN Systems>> DOI 10.1109/TAP.2015.2389219, IEEE Transactions on Antennas and Propagation

[18] Olutola Jonah and Leo Lanctot Ford Motor Company, Dearborn, <<Tri-band Multi-Constellation GNSS Antenna >>, MI, USA DOI: 10.1109/IEEECONF35879.2020.9329680

[19] Ansoft, <<Introduction to HFSS: An Introduction to HFSS: Fundamental Principles>>, Concepts, and Use, 2009, LLC, 225 West Station Square Drive, Suite 200, Pittsburgh, PA 15219.

[20] BELGACEM Nassima, Mémoire de fin d'étude de master académique:<< Conception des antennes PIFA mono-bande et multi-bande GSM, DCS, PCS, UMTS et WIFI>> Université de Tlemcen, 2013