

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 Électronique

Mémoire

Présenté pour obtenir

LE DIPLOME DE MASTER

FILIERE : Télécommunication

Spécialité : Système Télécommunication

Par

- **SIDALI Ismail**
- **NEKHILI Hana**

Intitulé

*Etude de conception d'antennes combinées à polarisation circulaire adaptés
aux antennes GNSS multi- constellation*

Soutenu le : 04/07/2023

Devant le Jury composé de :

<i>Nom & Prénom</i>	<i>Grade</i>	<i>Qualité</i>	<i>Etablissement</i>
<i>M. MELIZI Nora</i>	<i>MCA</i>	<i>Président</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>M. ATIA Salim</i>	<i>MCA</i>	<i>Encadreur</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>M. ASBAI Nassim</i>	<i>MCA</i>	<i>Examineur</i>	<i>Univ-BBA</i>

Année Universitaire 2021/2022

Remerciement

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 souhaitons exprimer notre profonde gratitude et notre respect sincère à notre maître et superviseur, le **Dr. ATTIA Salim** (MCA), membre du laboratoire ETA. Il a été pour nous un guide, un modèle et un mentor tout au long de notre parcours et tout au long de l'accomplissement de ce mémoire.*

Les valeurs qu'il nous a inculquées et les connaissances qu'il nous a transmises sont inestimables.

*Nous souhaitons également exprimer notre immense reconnaissance et notre profond respect envers nos, le **Dr. FENENICHE Wafa** et le **Dr. BOUAZA Abdelmaoula**, pour la qualité de leurs conseils, de leur assistance et de leur soutien. Nous sommes extrêmement reconnaissants pour le précieux temps qu'ils ont consacré au suivi de ce mémoire.*

*Enfin, nous adressons nos sincères remerciements aux membres du jury, le **Dr. MELIZI Nora** et le **Dr. ASBAI Nassim** pour avoir pris le temps d'examiner et d'évaluer ce travail.*

Dédicace

Je dédie ce mémoire à :

A mes chers parents, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études,

*A mes chères sœurs **Hadjer** et **Meriem** pour leurs encouragements permanents, et leur soutien moral,*

*A mes chers frères, **Ibrahim**, **Abderrahmane**, et **Ahmed** pour leur appui et leur encouragement,*

A toute ma famille pour leur soutien tout au long de mon parcours universitaire,

Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux tant allégués, et le fruit de votre soutien infailible,

Merci d'être toujours à mes côtés.

Ismail

Dédicace

Dieu merci de ma voir donnée la capacité d'écrire et de réfléchir la Patience d'aller jusqu'à au bout du rêve et du bonheur. D'un cœur d'amour et de fierté, je dédie cet humble travail à mes deux bougies qui brûlent pour m'éclairer le chemin à mes chers et respectueux parents vraiment aucune dédicace ne saurait exprimer mon attachement. Mon cher père Nekhili noreddine qui était plus généreux avec moi, m'a aidé, m'encouragé, il était ma source de mon inspiration et de mon ambition, il est toujours consent d'énormes sacrifices pour mon bien être et mon éducation qui avait toujours confiance à ma volonté. À la personne qui m'est la plus chère au monde la femme qui n'a jamais dit non ma mère Soubkri salima qui était la confidente de mes secrets, la plus contente dans les moments de mes de mes réussites qui m'a élevé, sacrifiée toutes les belles années de sa vie pour moi, tu es une maman formidable et exceptionnelle que dieu les protèges pour nous. À mes chers et adorables sœurs Intissar et Maria à mon seul frère Adem qui n'ont pas cessé de me conseiller, encourager et soutenir tout au long de mes études, à mes beaux-frères Abdelatif et chamsedine que dieu les protège et leurs offres la chance et le bonheur. À mes petits anges Siradj Anaïs Taline et Larine. À mes oncles et mes tantes que dieu leur donne une longue vie un grand hommage pour mes grands-parents. À tous les cousins et les cousines merci pour leurs amours et leurs encouragements. Sans oublier toutes les professeurs que ce soit du primaire du moyen de secondaire ou de l'enseignement supérieur

Hana

Abstract

Abstract

This work concerns the design of a 4-element broadband patch antenna array providing high isolation for GNSS applications. The antennas of GNSS receivers are more and more designed by integrating constraints of reduced size, weight and cost as much as possible.

The third chapter of this dissertation focuses on the study of patch antennas, where we carry out simulations in order to obtain the internal parameters such as the S parameters (reflection coefficient), the bandwidth, as well as the external characteristics such as gain, mutual coupling and radiation pattern. We use the CST software for this.

Résumé

Ce travail concerne la conception d'un réseau d'antennes patch à large bande à 4 éléments offrant une isolation élevée pour les applications GNSS. Les antennes des récepteurs GNSS sont de plus en plus conçues en intégrant au maximum des contraintes d'encombrement, de poids et de coût réduits.

Le troisième chapitre de cette thèse porte sur l'étude des antennes patch, où nous effectuons des simulations afin d'obtenir les paramètres internes tels que les paramètres S_{11} (coefficient de réflexion), la bande passante, ainsi que les caractéristiques externes telles que le gain, le mutuel couplage et diagramme de rayonnement. Nous utilisons pour cela le logiciel CST.

ملخص

يتعلق هذا العمل بتصميم صفييف هوائي رقي عريض النطاق مكون من 4 عناصر يوفر عزلاً عاليًا لتطبيقات GNSS. تم تصميم هوائيات مستقبلات GNSS أكثر فأكثر من خلال دمج قيود الحجم والوزن والتكلفة المنخفضة قدر الإمكان. يتناول الفصل الثالث من هذه الرسالة دراسة هوائيات التصحيح، حيث نقوم بإجراء عمليات محاكاة للحصول على المعلمات الداخلية مثل معاملات S_{11} (معامل الانعكاس) وعرض النطاق الترددي وكذلك الخصائص الخارجية مثل الكسب، المتبادل. اقتتران ونمط الإشعاع. نحن نستخدم برنامج CST لهذا الغرض.

Table des matières

<i>Introduction générale</i>	9
<i>Chapitre I : Généralité sur les antennes et les antennes patch</i>	12
I.1. Introduction	13
I.2. Définition de l'antenne	13
I.3. Caractéristiques générales d'une antenne	14
I.3.1. Diagramme de rayonnement	14
I.3.2. Les paramètres S	16
I.3.3. Angle d'ouverture	17
I.3.4. Gain	18
I.3.5. Directivité	18
I.3.6. Rendement de l'antenne	19
I.3.7. Bande passante de l'antenne	19
I.4. Types d'antennes	20
I.4.1. Antennes réflectrices	21
I.4.2. Antennes filaires	21
I.5. Polarisation de l'antenne	22
I.5.1. Polarisation linéaire	22
I.5.2. Polarisation circulaire et elliptique	23
I.5.3. Polarisation elliptique	24
I.6. Les antennes imprimées ou patch	25
I.6.1. Introduction	25
I.6.2. Description des antennes imprimées ou patch	25
I.6.3. Caractéristiques d'une antenne imprimées ou patch	26
I.6.3.1. La bande passante	27
I.6.3.2. Diagramme de rayonnement	28
I.6.3.3. Directivité	28
I.6.3.4. Techniques d'alimentation des antennes patch	29
I.6.3.5. Alimentation par ligne micro-ruban	29
I.6.3.6. Alimentation par câble coaxial	30
I.6.3.7. Alimentation couplée par ouverture	30
I.6.3.8. Antennes patches à polarisation circulaire	31
I.6.3.9. Facteur de perte de polarisation et efficacité	32
I.7. L'antenne patch dans les systèmes de navigation par satellites	33

I.8.	Conclusion.....	34
<i>Chapitre II : Réseau d'antennes dans les récepteurs GNSS</i>		35
II.1.	Réseau d'antenne.....	36
II.1.1.	Définition.....	36
II.1.3.	Types de réseaux d'antennes	37
II.1.3.1.	Réseaux d'antennes linéaires.....	37
II.1.3.2.	Réseaux d'antennes circulaires.....	37
II.1.3.3.	Réseaux d'antennes à fente	38
II.1.3.4.	Réseaux d'antennes patches	38
II.1.3.5.	Autres types de réseau d'antennes	38
II.1.4.	Alimentation d'un réseau d'antennes.....	39
II.1.5.	Avantages et inconvénients des réseaux d'antennes.....	40
II.1.5.1.	Avantage.....	40
II.1.5.2.	Inconvénients	40
II.2.	Réseau d'antenne patch	40
II.2.1.	Définition.....	40
II.2.2.	Avantage des réseaux d'antennes patch	41
II.2.3.	Inconvénients des réseaux d'antennes patch	41
II.3.	Problématique et Etat de l'art.....	42
II.3.1.	Problématique.....	42
II.3.2.	Etat de l'art	43
II.4.	Conclusion.....	50
<i>Chapitre III : Conception d'un réseau d'antennes patch à large bande à 4 éléments compacts à haute isolation pour les applications GNSS</i>		51
III.1.	Introduction	52
III.2.	Outils de simulation	52
III.2.1.	Logiciel CST.....	52
III.2.2.	Description générale de l'interface CST	52
III.3.	Conception de l'antenne	53
III.3.1.	Élément d'antenne unique	53
III.3.2.	Résultats de simulation	54
III.3.3.	Conception du réseau d'antenne.....	55
III.4.	Résultats de l'analyse paramétrique.....	57
III.5.	Impacts du paramètre H.....	57

III.5.1.	Impacts sur l'adaptation d'impédance.....	57
III.5.2.	Impacts du paramètre H sur le gain et le couplage mutuel.....	57
III.5.3.	Effet du paramètre g sur le gain.	58
III.5.4.	Optimisation des paramètres	58
III.6.	Etude comparative et commentaires.	61
III.7.	Conclusion.....	61
	Conclusion générale	63

Liste des figures

Figure.I. 1 : Système général de communication sans fil.....	13
Figure.I. 2 : Exemple de diagramme de rayonnement 3D en valeurs logarithmiques	15
Figure.I. 3 : Diagramme de rayonnement normalisé dans le plan E, en dB.....	15
Figure.I. 4 : Diagramme de rayonnement normalisé dans le plan H, en dB.....	16
Figure.I. 5 : (a) Diagramme de rayonnement normalisé dans le plan E en coordonnées polaires, en fonction de u , en dB. (b) Diagramme de rayonnement normalisé dans le plan H en coordonnées Polaires, en fonction de u , en dB.....	16
Figure.I. 6 : Diagramme de rayonnement normalisé bidimensionnel.	17
Figure.I. 7 : Les différents types d'antennes [6].	21
Figure.I. 8 : Antennes réflectrices.	21
Figure.I. 9 : Antennes filaires.	22
Figure.I. 10 : Polarisation d'une onde [8].....	22
Figure.I. 11 : les paramètres pour obtenir Polarisation elliptique	24
Figure.I. 12 : Polarisation circulaire et elliptique [13].	24
Figure.I. 13 : Présentation d'une antenne patch.....	25
Figure.I. 14 : Les différentes formes du patch [14].	26
Figure.I. 15 : antenne imprimée rectangulaire.....	27
Figure.I. 16 : La Bande passante.	28
Figure.I. 17 : Antenne patch alimentée par une ligne micro-ruban.	30
Figure.I. 18 : Alimentation coaxiale.....	30
Figure.I. 19 : Alimentation couplée par fente.....	31
Figure.I. 20 : Antennes patch à polarisation circulaire simple excitation (a) Carré à coins coupés (b) Alimenté dans le coté, (c) Avec une fente, (d) Circulaire coupé.....	31
Figure.I. 21 : Antennes à polarisation circulaires à double excitations.....	32
Figure.I. 22 : Vecteurs unitaires de polarisation de l'onde incidente (u_w) et de l'antenne (u_a) et le PLF	33
Figure.I. 23 : différentes bandes de fréquences dispersées entre (1164 MHz et 1610 MHz)...	34
Figure.II. 1 : Exemple d'un réseau antennes. : (a) Antennes Ya-gi et (b) Antennes Téléphoniques.....	36
Figure.II. 2 : types de réseaux d'antennes.....	38
Figure.II. 3 : Alimentation d'un réseau d'antennes patch. (a)-série (b)-parallèle	39
Figure.II. 4 : Réseau d'antenne patch	41

Figure.II. 5 : Géométrie de l'antenne à 5 éléments	43
Figure.II. 6 : (a) Paramètre S simulé pour le réseau GPS proposé. (b) Rapport axial simulé du réseau d'antennes GPS à 5 éléments.	43
Figure.II. 7 : Diagramme de rayonnement simulé du réseau d'antennes GPS à 5 éléments. ...	44
Figure.II. 8 : Géométrie du réseau CPRA.	44
Figure.II. 9 : Coefficient de réflexion d'une antenne CRPA	45
Figure.II. 10 : Gain de visée de l'antenne CRPA.	45
Figure.II. 11 : Diagrammes de rayonnement d'une antenne CRPA. (a) plan zx. (b) plan zy. .	46
Figure.II. 12 : Géométrie de l'antenne proposée (a) antenne fabriquée. (b) model simulé.....	46
Figure.II. 13 : simulâtes and mesure S paramètres at. Room température (a) S11 paramètre. (b) The isolation paramètre.	47
Figure.II. 14 : Diagramme de rayonnement CP du plan E normalisé à température ambiante(a) Antenne centrale dans BDS_B1. (b) Antenne centrale dans GPS_L1.	48
Figure.II. 15 : Relation entre la fréquence de fonctionnement et la température (a) La fréquence centrale. (b) La bande passante.....	48
Figure.II. 16 : Relation entre le gain RHCP et la température	48
Figure.II. 17 : Image des matrices adaptatives à quatre éléments miniaturisées GPS utilisant un substrat 6010 LM (gauche) et un substrat TMM13i (à droite).....	49
Figure.III. 1 : Interface du CST.	53
Figure.III. 2 : Géométrie de conception d'un élément d'antenne à patch unique.....	54
Figure.III. 3 : Résultats de simulation de l'élément d'antenne patch. (a) Réponse d'impédance. (b)Rapport axial.....	55
Figure.III. 4 : La géométrie du réseau d'antennes patch à 4 éléments proposé pour les applications GNSS. (a) Vue de dessus. (b) Vue latérale.	56
Figure.III. 5 : Impact du paramètre H sur l'adaptation d'impédance.	57
Figure.III. 6 : Impact de H (a) Sur le Couplage mutuel et (b) Sur le gain de l'antenne	58
Figure.III. 7 : Impact de g (a) Sur le couplage mutuel (b) Sur le gain de l'antenne.....	58
Figure.III. 8 : Gain de l'antenne proposée en 3D.	59
Figure.III. 9 : Rapport axial de l'antenne proposée (a) En fonction de la fréquence (b) En fonction de Thêta	59
Figure.III. 10 : Réponse d'impédance S11	60
Figure.III. 11 : les performances d'adaptation d'impédance de l'antenne proposée	60
Figure.III. 12 : Diagramme de rayonnement (GPS L1). (a) Plan E. (b) Plan H.	60

Liste des équations

(I. 1).....	14
(I.2).....	14
(I.3).....	18
(I.4).....	19
(I.5).....	19
(I.6).....	19
(I.7).....	23
(I.8).....	23
(I.9).....	28
(I.10).....	32
(I.11).....	32
(I.11).....	32
(I.13).....	33
(II. 1).....	37
(II. 2).....	37
(II. 3).....	37

Liste des tableaux

Table 1 : présent les paramètres pour obtenir la polarisation circulaire.....	23
Table 2 : Les paramètres optimaux utilisés de la référence [37].....	47
Table 3 : Paramètres de la conception optimisée.	59

Liste des abréviations

GNSS	Global navigation satellite system
GPS	Global positioning system
CST	Computer simulation technology
GLONASS	Global Orbiting Navigation Satellite System
PC	polarisation circulaire
MCMF	Multi-Constellations Multi-Fréquences

Introduction générale

Introduction Générale

La technologie des systèmes de navigation par satellites mondiaux (GNSS pour Global Navigation Satellite System) a débuté dans les années 1970 avec la naissance du GPS (Global Navigation System) qui est resté le seul système de navigation par satellite opérationnel durant presque deux décennies. De nos jours, cette technologie est contrainte de s'adapter à la nouvelle structuration de constellations GNSS qui compte, en plus du GPS, le Bei Dou (Indien), le GLONASS (Russe) et le Galileo (Européen) qui fournissent tous des signaux de positionnement et de navigation utilisés dans divers domaines, notamment l'aviation, la marine, les applications terrestres et les systèmes de positionnement précis. Les travaux de recherche dans cet axe, ont prouvés que la combinaison de plusieurs constellations permet d'obtenir une meilleure couverture et une meilleure disponibilité des signaux GNSS, améliorant ainsi la précision et la robustesse du positionnement. Néanmoins, cette solution a suscité les chercheurs à adapter la conception des récepteurs GNSS la nouvelle structure des signaux GNSS, provenant désormais d'une multitude de constellation et avec une multitude de porteuses, connue sous le nom de Multi-Constellations Multi-Fréquences (MCMF). Dans ce travail on s'intéresse plus spécifiquement à l'antenne du récepteur GNSS.

L'étude de conception d'antennes adaptées aux GNSS MCMF est au cœur de ce mémoire. L'objectif est donc d'investiguer le développement de ce type d'antennes qui devrait être capables de profiter des GNSS MCMF et l'ensemble de leurs signaux existants pour améliorer d'avantage les performances de positionnement en termes précision tout en atténuant les effets des différents obstacles tels que les multi-trajets, le brouillage, les interférences, etc.

Dans le contexte de cette étude, l'accent est mis sur la conception d'un réseau d'antenne patch combinées à PC (polarisation circulaire). La polarisation circulaire présente plusieurs avantages par rapport à la polarisation linéaire traditionnelle, notamment une meilleure résistance aux effets des multi-trajets et des perturbations de polarisation causées par l'environnement. D'un autre côté, la conception d'un réseau d'antennes permet d'aboutir à une structure multi-bandes capable de couvrir la panoplie de fréquences de tels systèmes.

Cependant, il faut noter qu'une telle solution est controversée par un certain nombre de limitations notamment, le couplage mutuel entre les différents éléments du réseau d'antenne et la compacité de l'antenne.

Notre travail dans ce mémoire consiste à valider les travaux de recherche de la référence [39] qui visent à relever ces défis à travers la conception d'un réseau d'antennes multi-bandes à polarisation circulaire sur une surface compacte et qui réalise un meilleur niveau de couplage mutuel. Cette antenne, couvrant la bande (1559 MHz _ 1610 MHz), convient aux applications nécessitant le fonctionnement simultané dans les quatre bandes principales de la Bande GNSS L supérieure, c'est-à-dire GPS L1, BeiDou B1, Galileo E1 et GLONASS G1.

Dans le premier chapitre nous avons présenté les différentes caractéristiques et généralité sur les antennes et plus particulièrement celles de l'antenne patch. Le deuxième chapitre a été consacré à réseau d'antennes dans les récepteurs 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 :

Généralité sur les antennes et les antennes patch

I.1. Introduction

Dans ce chapitre on présentera, dans un premier temps une étude générale des notions théoriques des antennes. Ensuite, une attention particulière sera donnée aux antennes miniaturisées qui sont l'objectif même de notre travail dans ce mémoire. Cette étude va constituer une base théorique pour notre problématique qui vise l'étude et la conception d'un réseau d'antenne patch pour le récepteur GNSS multi-constellation et multifréquence.

I.2. Définition de l'antenne

Une antenne, comme montrée sur la figure (I.1), est un appareil qui peut transmettre ou recevoir des ondes électromagnétiques. En d'autres termes, une antenne est un transducteur qui convertit l'énergie électromagnétique directionnelle en énergie électrique. Par ailleurs, on définit l'antenne émettrice, comme un dispositif à l'extrémité de l'émetteur qui est utilisé pour disperser cette puissance dans l'espace environnant sous la forme d'ondes électromagnétiques. Réciproquement, une antenne à l'entrée du récepteur est utilisée pour capturer ces ondes électromagnétiques et fournir de l'énergie électrique à une charge dans la partie réceptrice [1].

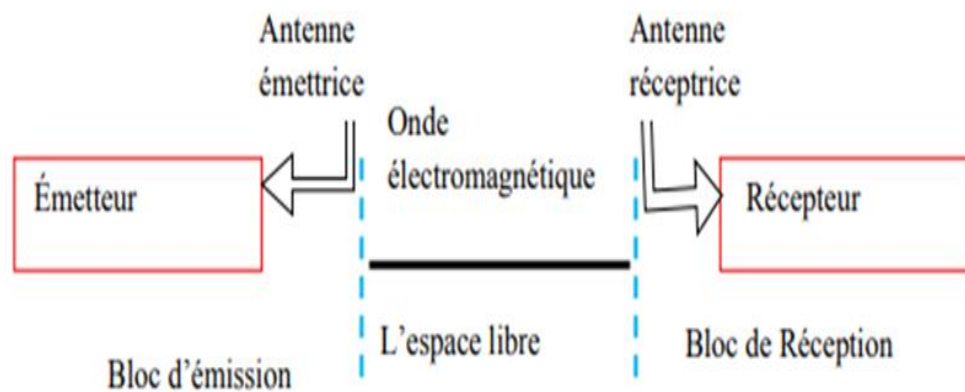


Figure.I. 1 : Système général de communication sans fil

I.3. Caractéristiques générales d'une antenne

Les caractéristiques d'une antenne sont déterminées par rapport à une source de référence, appelée antenne isotrope, une source ponctuelle qui rayonne sa puissance d'alimentation d'une façon identique dans toutes les directions constituant la source de référence idéale [2]. Dans ce cas, La puissance rayonnée par unité d'angle solide dans une direction définie par les deux angles (θ, ϕ) s'écrit :

$$P_0(\theta, \phi) = \frac{P_a}{4\pi} \quad (\text{I. 1})$$

Où, P_a est la puissance d'alimentation.

I.3.1. Diagramme de rayonnement

Le diagramme de rayonnement d'une antenne illustre les variations de la puissance rayonnée par unité d'angle solide dans différentes directions de l'espace. Sauf dans le cas des antennes omnidirectionnelles dans certains plans, les antennes ne diffusent pas leur puissance de manière uniforme dans toutes les directions de l'espace.

En général, il existe une direction de rayonnement maximale où une grande partie de la puissance rayonnée est concentrée, ainsi que des directions secondaires où la fraction restante de la puissance est répartie.

La fonction caractéristique de rayonnement, notée $r(\theta, \phi)$, permet d'obtenir une vue globale du rayonnement de l'antenne. Elle est définie comme le rapport de la puissance transmise dans une direction donnée $P(\theta, \phi)$ à la puissance maximale p_{\max} , qui correspond à la direction où le rayonnement est le plus intense. [2].

$$r(\theta, \phi) = \frac{P(\theta, \phi)}{P_0(\theta, \phi)} \quad (\text{I.2})$$

$P(\theta, \phi)$: Puissance rayonnée dans une direction quelconque

$P_0(\theta, \phi)$: Puissance rayonnée max

La figure (I-2) présente un exemple de représentation graphique de la fonction caractéristique de l'antenne, connue sous le nom de diagramme de rayonnement. L'axe de rayonnement de l'antenne est la direction où le rayonnement est maximal.

Ce diagramme fournit des informations sur les caractéristiques du rayonnement dans l'espace. Traditionnellement, il est courant de représenter le diagramme de rayonnement dans deux plans perpendiculaires : le plan E et le plan H. Le plan E est défini comme le plan contenant l'axe de l'antenne et le champ électrique, tandis que le plan H est défini comme le plan contenant l'axe de l'antenne et le champ magnétique.



Figure.I. 2 : Exemple de diagramme de rayonnement 3D en valeurs logarithmiques

Certaines représentations en trois dimensions ont l'avantage de montrer toutes les directions de rayonnement dans l'espace (figure I-2) mais permettent difficilement une appréciation quantitative.

Cependant, on peut utiliser la représentation logarithmique. Ceci permet de mieux voir les détails pour les faibles valeurs, dans les lobes latéraux [2].

Le diagramme de rayonnement normalisé, généralement à l'échelle logarithmique, est présenté soit en coordonnées rectangulaires soit en coordonnées polaires, dans les deux plans perpendiculaires E et H tels que présentés, respectivement sur les figures I-3, I-4 et I-5.

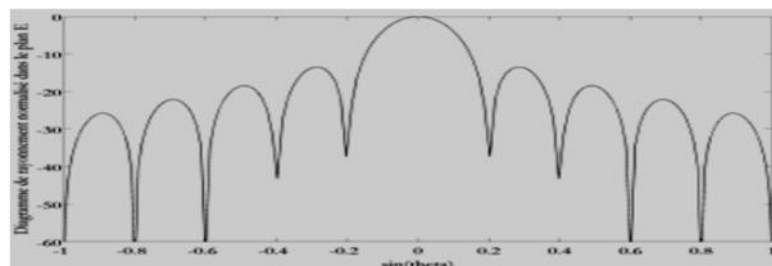


Figure.I. 3 : Diagramme de rayonnement normalisé dans le plan E, en dB.

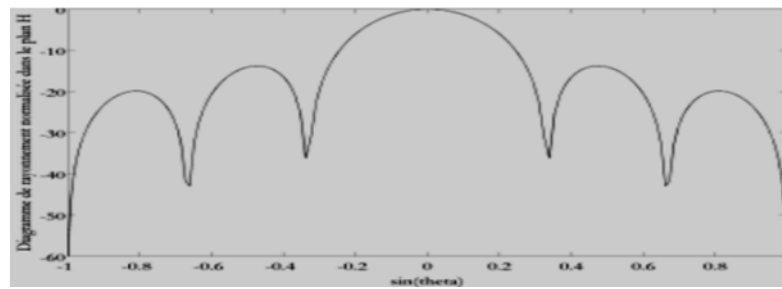


Figure.I. 4 : Diagramme de rayonnement normalisé dans le plan H, en dB.

La valeur du maximum ne peut pas excéder 0 dB. Elle est obtenue dans la direction du rayonnement maximum qui correspond à de l'axe de l'antenne [2].

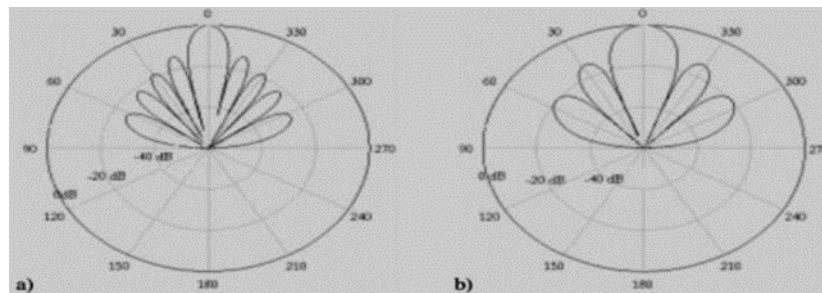


Figure.I. 5 : (a) Diagramme de rayonnement normalisé dans le plan E en coordonnées polaires, en fonction de u, en dB. (b) Diagramme de rayonnement normalisé dans le plan H en coordonnées Polaires, en fonction de u, en dB.

I.3.2. Les paramètres S

Généralement les paramètres S sont rassemblés dans la matrice S composée des coefficients de réflexion et des coefficients de transmission. Le coefficient de réflexion « S_{ii} » est défini par le rapport en amplitude entre la puissance réfléchie « P_r » et la puissance incidente « P_i » sur un élément rayonnant. D'une part, il reflète l'adaptation de l'élément, d'autre part, il est utilisé pour connaître le niveau de puissance réfléchie qui peut perturber le fonctionnement des instruments arrière.

Le coefficient de transmission « S_{ij} » ($i \neq j$) est le rapport en amplitude entre la puissance transmise « P_t » par le premier élément rayonnant vers le deuxième et la puissance incidente « P_i ». Il caractérise le couplage qu'on appelle aussi isolation inter-éléments.

Si on fait abstraction du caractère vectoriel ils sont donnés par :

$$|S_{ii}| = \sqrt{\frac{P_r}{P_i}}$$

$$|S_{ij}|(i \neq j) = \sqrt{\frac{P_r}{P_i}}$$

Généralement, une antenne est considérée comme étant adaptée et isolée lorsque les paramètres S sont inférieurs à -10 dB ce qui équivaut à au moins 10% de pertes. Cependant, en téléphonie mobile, on tolère des coefficients de réflexion allant jusqu'à -6 dB, soit 25% de pertes.

I.3.3. Angle d'ouverture

L'angle d'ouverture est l'angle que font entre elles les deux directions du lobe principal selon lesquelles la puissance rayonnée est égale à la moitié de celle rayonnée dans la direction de rayonnement maximale. La figure I.6 présente un exemple de diagramme de rayonnement en coordonnées cartésiennes avec illustration de l'angle d'ouverture $\Delta\theta$ à -3dB. Lorsque l'antenne présente un lobe principal assez fin, la plus grande partie de la puissance rayonnée est à l'intérieur des deux directions à (-3dB). Donc l'angle d'ouverture nous donne une idée assez précise sur la finesse du lobe et la qualité du rayonnement [3].

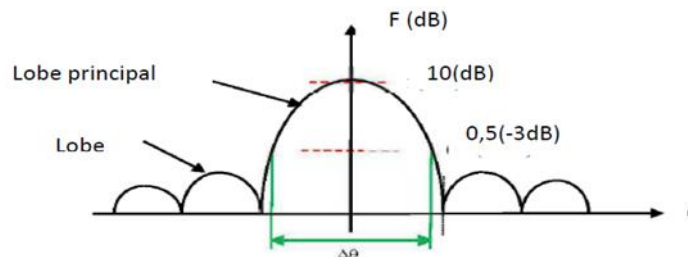


Figure.I. 6 : Diagramme de rayonnement normalisé bidimensionnel.

I.3.4. Gain

Le gain définit l'augmentation de puissance émise ou reçue dans le lobe principal. Il est dû au fait que l'énergie soit focalisée dans une direction comme l'énergie lumineuse peut être concentrée grâce à un miroir et/ou une lentille convergente. Le gain s'exprime en dBi (décibels par rapport à l'antenne isotrope). Pour une antenne, le miroir peut être constitué par un élément réflecteur (écran plan ou parabolique) tandis qu'un élément directeur (dans une antenne yagi, par exemple) jouera le rôle de la lentille.

La puissance rayonnée par une antenne varie généralement selon la direction considérée.

Le gain d'une antenne dans une direction (θ, ϕ) est le rapport de la puissance $P_0(\theta, \phi)$ rayonnée par l'antenne dans cette direction à la puissance $P(\theta, \phi)$ que rayonnerait la source isotrope de référence par unité d'angle solide avec la même puissance d'alimentation et il est exprimé par l'équation suivante [3] :

$$G(\theta, \phi) = \frac{P_0(\theta, \phi)}{P(\theta, \phi)} = 4\pi \frac{P_0(\theta, \phi)}{P_a} \quad (I.3)$$

I.3.5. Directivité

La directivité de l'antenne dans le plan horizontal est une caractéristique importante dans le choix d'une antenne. Une antenne qui directive ou omnidirectionnelle rayonne de la même façon dans toutes les directions du plan horizontal. Une antenne directive possède un ou deux lobes nettement plus importants que les autres qu'on nomme « lobes principaux ». Elle sera d'autant plus directive que le lobe le plus important sera étroit. La directivité correspond à la largeur du lobe principal, entre les angles d'atténuation à 3 dB. Pour toutes les antennes, la dimension constitue un paramètre fondamental pour déterminer la directivité. Les antennes à directivité et à gain élevés seront toujours grandes par rapport à la longueur d'onde. Il existe en effet des relations mathématiques (transformation de Fourier) entre les caractéristiques spatiales et le diagramme de rayonnement.

La directivité d'une antenne est le rapport de la puissance $P_0(\theta, \phi)$ rayonnée par unité d'angle solide dans la direction $((\theta, \phi))$ à la puissance que rayonnerait la source isotrope de référence par unité d'angle solide pour une même puissance totale rayonnée [3].

$$D(\theta, \phi) = 4\pi \frac{P_o(\theta, \phi)}{\eta P_a} \quad (\text{I.4})$$

Où, η représente l'efficacité de l'antenne.

La relation entre le gain et la directivité d'une antenne est donnée par l'équation suivante.

$$G(\theta, \phi) = \eta D(\theta, \phi) \quad (\text{I.5})$$

La directivité indique dans quelles directions la densité de puissance est meilleure ou moins bonne que celle de l'antenne isotrope.

I.3.6. Rendement de l'antenne

Le rendement R de l'antenne est le rapport entre la puissance rayonnée par l'antenne P_r et la puissance fournie à l'antenne P_f , soit :

$$R = \frac{P_r}{P_f} \quad (\text{I.6})$$

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

I.3.7. Bande passante de l'antenne

Une antenne s'utilise en général avec des signaux autour d'une fréquence donnée pour laquelle l'antenne possède des capacités optimales pour émettre ou recevoir l'énergie électromagnétique correspondante dans l'espace environnant. La fréquence de résonance d'une antenne dépend d'abord de ses dimensions propres, mais aussi des éléments qui lui sont ajoutés. Par rapport à la fréquence de résonance centrale de l'antenne, un affaiblissement de 3 dB détermine les fréquences minimum et maximum d'utilisation ; la différence entre ces deux fréquences correspond à la bande passante.

Par exemple, une antenne classique est l'antenne dipôle demi-onde, qui résonne à la fréquence pour laquelle sa longueur est d'une demi-longueur d'onde avec une largeur de bande d'environ 1 % si elle est très mince. En pratique, et pour les fréquences élevées, le diamètre du conducteur n'est plus négligeable par rapport à la longueur d'onde, ce qui augmente considérablement sa bande passante. En règle générale :

- La bande passante d'une antenne diminue si l'antenne devient petite par rapport à la demi-onde : il n'existe pas d'antennes large bande et compactes, du moins avec des pertes raisonnables.
- La bande passante d'une antenne filaire augmente si le diamètre du conducteur augmente.

Certaines antennes dites « multi-bandes » peuvent fonctionner correctement sur des segments discontinus de bande de fréquences sans dispositif particulier. D'autres nécessitent l'emploi d'un circuit adaptateur d'impédance pour fonctionner correctement [4].

I.4. Types d'antennes

Comme illustré sur la figure (I.7), il existe plusieurs types d'antennes qui peuvent être classés selon [5] :

- **leur forme géométries**
 - Antennes filaires : dipôle, boucle, spirale.
 - Antennes à ouverture : cornet, fente.
 - Antennes imprimées : patch, dipôle imprimé, spirale.
- **Le gain**
 - Antennes planaire : Gain élevé.
 - Antennes cornet. : Gain moyen
 - Antennes (dipôle, fente, patch) : Gain bas.
- **La forme de faisceau**
 - Antennes dipôle : Omnidirectionnelle
 - Antennes planaire : Faisceau étroit.
 - antenne réseau : Faisceau large :
- **La largeur de bande**
 - Bande large : spirale
 - Bande étroite : patch, fente

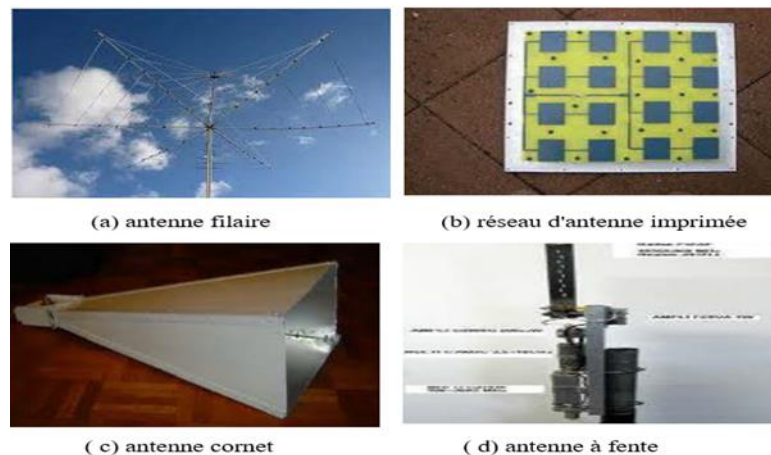


Figure.I. 7 : Les différents types d'antennes [6].

Dans ce qui suit on présentera quelques antennes parmi les plus connus.

I.4.1. Antennes réfléchrices

Une forme d'antenne très courante pour une telle application est un réflecteur parabolique représenté sur la figure I.8. Des antennes de ce type ont été construites avec des diamètres aussi grands que 300 Mètres. De telles dimensions sont nécessaires pour obtenir le gain élevé requis pour transmettre ou recevoir des signaux après des milliers de kilomètres de trajet, utilisé souvent dans la radioastronomie, la communication par micro-ondes ou par satellites [2].

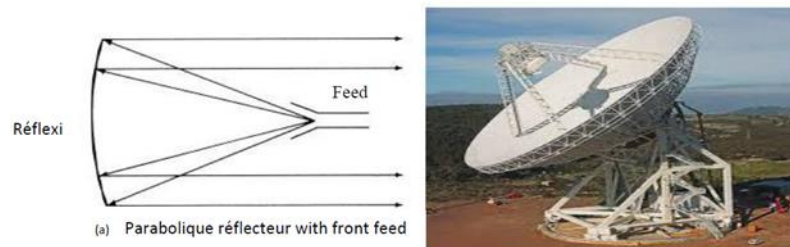


Figure.I. 8 : Antennes réfléchrices.

I.4.2. Antennes filaires

Les antennes filaires sont vues pratiquement partout – sur les automobiles, les bâtiments, les navires, les avions, les vaisseaux spatiaux, etc. d'antennes filaires telles qu'un fil droit (dipôle), une boucle et une hélice qui sont illustrées sur la figure I.9. Les antennes en boucle (Loop) ne doivent pas seulement être circulaires. Ils peuvent prendre la forme d'un rectangle, d'un carré, d'une ellipse ou de toute autre configuration. L'antenne dipôle est coupée et pliée pour un rayonnement efficace. La longueur du fil total, qui est utilisé comme dipôle, est égale

à 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 utilisée en raison de ses avantages. Elle est également connue sous le nom d'antenne Hertz [7].

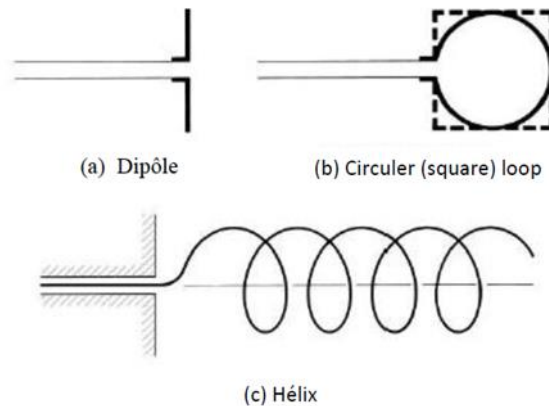


Figure.I. 9 : Antennes filaires.

I.5. Polarisation de l'antenne

La polarisation d'une antenne est déterminée par celle de l'onde radiée dans une direction donnée, elle est identifiée par la direction du champ électrique, c'est à dire à celle des brins rayonnants de l'antenne. Il y-a trois types de polarisation :

I.5.1. Polarisation linéaire

Dans ce cas la direction de l'électrique E reste inchangée E garde une direction constante, on dit que la polarisation est rectiligne ou linéaire. Un exemple d'une telle polarisation est illustré sur la figure (I-10).

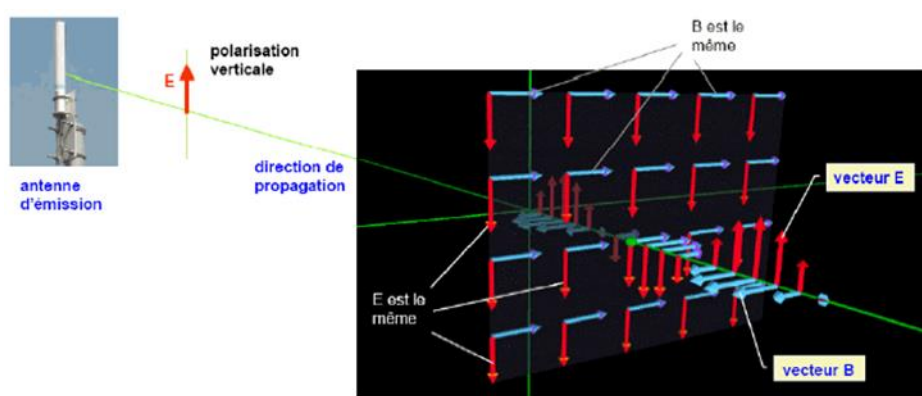


Figure.I. 10 : Polarisation d'une onde [8].

I.5.2. Polarisation circulaire et elliptique

Polarisation circulaire est une onde harmonique temporelle polarisée circulairement en un point donné de l'espace si le vecteur champ électrique (ou magnétique) en ce point trace un cercle en fonction du temps. Les conditions nécessaires et suffisantes pour y parvenir sont si le vecteur champ (Électrique ou magnétique) possède tous les éléments suivants :

- Le champ doit avoir deux composantes linéaires orthogonales,
- Les deux composantes doivent avoir la même grandeur
- Les deux composantes doivent avoir une différence de phase temporelle de multiples impairs de 90 °.

Le rayonnement d'une onde à polarisation circulaire est souvent intéressant afin de remédier aux phénomènes de dépolarisation qui peuvent apparaître lors de la propagation.

La polarisation circulaire représenté sur la figure (I.12) ne peut être obtenue que lorsque les grandeurs des deux composantes sont les mêmes et que la différence de phase temporelle entre elle est des multiples impairs de $\pi/2$. C'est-à-dire : [9].

$$|Ex| = |Ey| \Rightarrow Ex_0 = Ey_0 \tag{I.7}$$

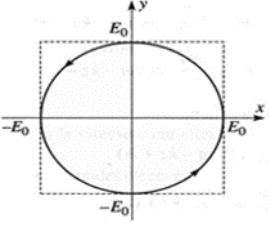
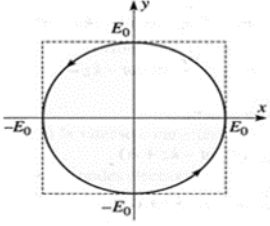
$$\Delta\phi = \phi_y - \phi_x = n\pi = \begin{cases} +\left(\frac{1}{2} + 2n\right)\pi, = 0, 1, 2 \text{ right hand circular polarization} \\ -\left(\frac{1}{2} + 2n\right)\pi, = 0, 1, 2 \text{ left hand circular polarization} \end{cases} \tag{I.8}$$

Avec : E_{x_0} est l'amplitude de composant E_x dans l'axe x.

: E_{y_0} est l'amplitude de composant E_y dans l'axe y.

Et le tableau1 suivant présent les paramètres pour obtenir la polarisation circulaire.

Table 1 : présent les paramètres pour obtenir la polarisation circulaire

Polarisation Circulaire			
Circulaire gauche $\varphi = \frac{\pi}{2}$		Circulaire droite $\varphi = \frac{\pi}{2}$	
			
Notation réelle	Notation complexe	Notation réelle	Notation complexe
$\begin{cases} E_x = E_0 \cos(\omega t) \\ E_y = E_0 \sin(\omega t) \end{cases}$	$\begin{cases} E_x = E_0 e^{j\omega t} \\ E_y = -jE_x = -jE_0 e^{j\omega t} \end{cases}$	$\begin{cases} E_x = E_0 \cos(\omega t) \\ E_y = -E_0 \sin(\omega t) \end{cases}$	$\begin{cases} E_x = E_0 e^{-j\omega t} \\ E_y = jE_x = jE_0 e^{j\omega t} \end{cases}$

I.5.3. Polarisation elliptique

Si φ_0 est quelconque, l'extrémité de E décrit une ellipse. On parle de polarisation elliptique droite si le champ électrique tourne dans le sens anti trigonométrique (ou horaire) pour un observateur qui reçoit l'onde. Dans le cas contraire, elle est elliptique gauche.

Cette figure (I.11) représente les paramètres pour obtenir Polarisation elliptique [12]

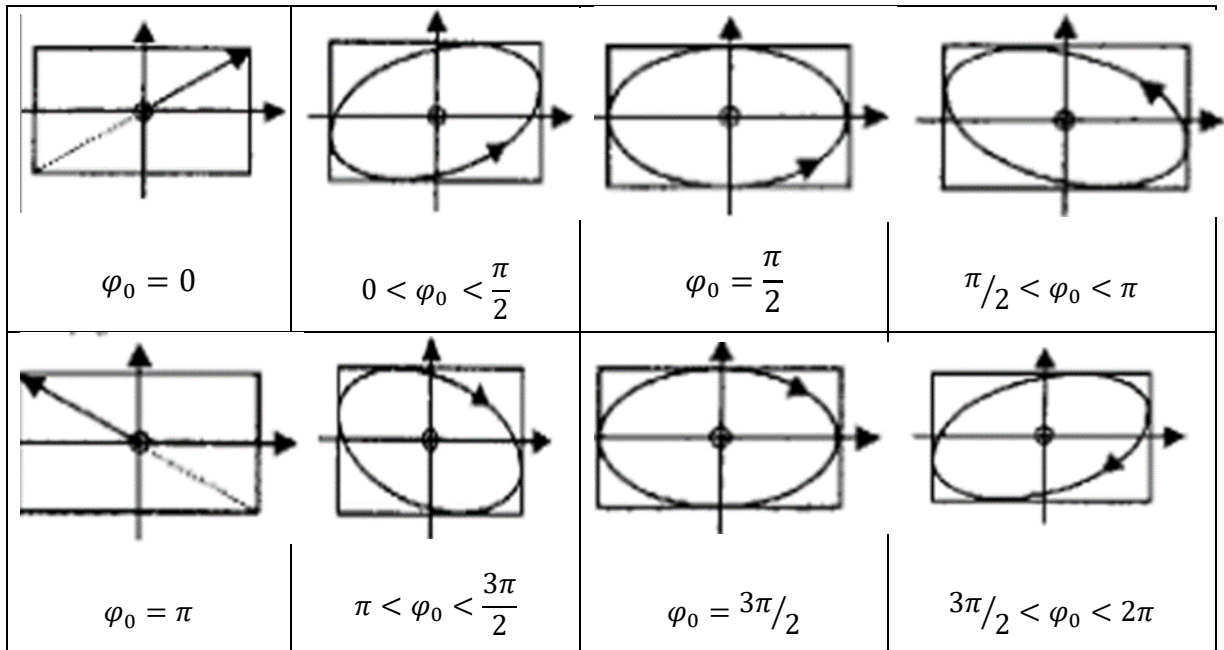


Figure.I. 11 : les paramètres pour obtenir Polarisation elliptique

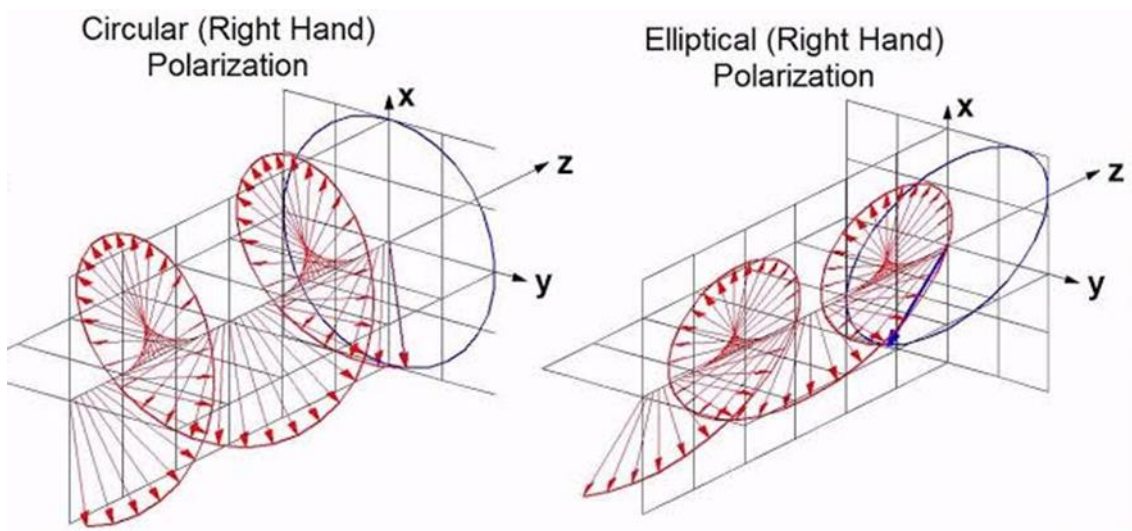


Figure.I. 12 : Polarisation circulaire et elliptique [13].

I.6. Les antennes imprimées ou patch

I.6.1. Introduction

Le développement des télécommunications spatiales, les contrôles et les commandes à distance, ont fait apparaître la nécessité croissante de réaliser des dispositifs micro-ondes peu coûteux et peu encombrants, faisant appel à une technologie simple et économique. Les systèmes micro-ondes à structure micro ruban ont été à l'origine du développement des antennes imprimées (antennes plaques ou antennes patch) qui sont le plus souvent utilisées en réseaux afin d'améliorer leurs performances et de permettre la réalisation de fonctions très particulières.

Dans ce chapitre nous présentons la description et le mécanisme de fonctionnement, les avantages, les inconvénients des antennes patches, ainsi que les différents types d'alimentation. En effet, nous détaillons le principe des méthodes usuelles les plus utilisées dans le domaine des antennes.

I.6.2. Description des antennes imprimées ou patch

Une antenne imprimée est constituée d'un plan de masse, d'une ou plusieurs couches de substrat de permittivités ϵ_r égales ou différentes (Fig. I.13). L'élément réfléchissant la géométrie de n'importe quelle forme (rectangulaire, circulaire, carré, etc.) est situé au-dessus de la surface. Il existe différents mécanismes d'alimentation pour activer l'antenne. [14].

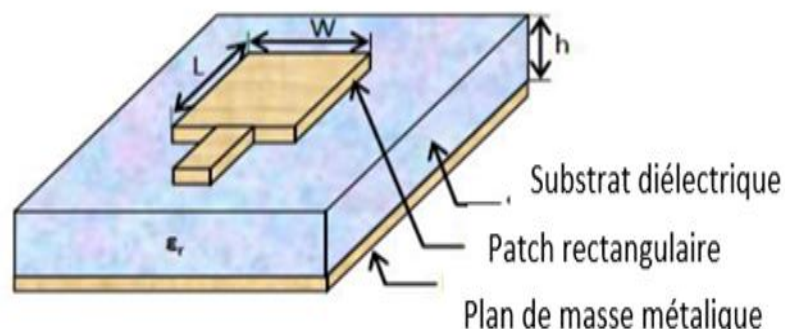


Figure.I. 13 : Présentation d'une antenne patch

L'antenne patch peut prendre plusieurs formes comme la montre sur la Figure I.14

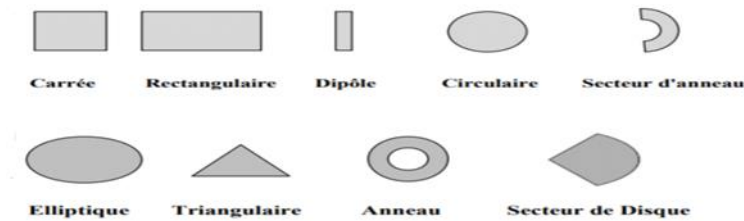


Figure.I. 14 : Les différentes formes du patch [14].

Remarque : Parmi toutes ces formes, l'élément rectangulaire est sans contexte le plus facile à appréhender pour la compréhension des mécanismes de rayonnements des Antennes planaires.

I.6.3. Caractéristiques d'une antenne imprimées ou patch

Le concept des antennes imprimées a été proposé dès 1953 par Deschamps mais il n'a été possible de les réaliser efficacement qu'à partir de 1970 (Howel et Muson) grâce à l'arrivée sur le marché de diélectrique à faibles pertes. Depuis, la recherche dans ce domaine n'a cessé de s'intensifier pour exploiter les nombreux avantages des antennes imprimées : [15]

- Faible poids,
- Faible volume et épaisseur réduite,
- Faible coût de fabrication,
- Compatibilité avec des circuits intégrés (antennes actives),
- Réseau d'antennes

Ces antennes présentent malheureusement, également des désavantages :

- Largeur de bande étroite,
- Faible gain.

Le calcul du rayonnement et des caractéristiques radioélectriques des antennes imprimées est assez complexe. Plusieurs approches ont été proposées : modèle de la ligne de transmission, modèle de la cavité, approche spectrale.

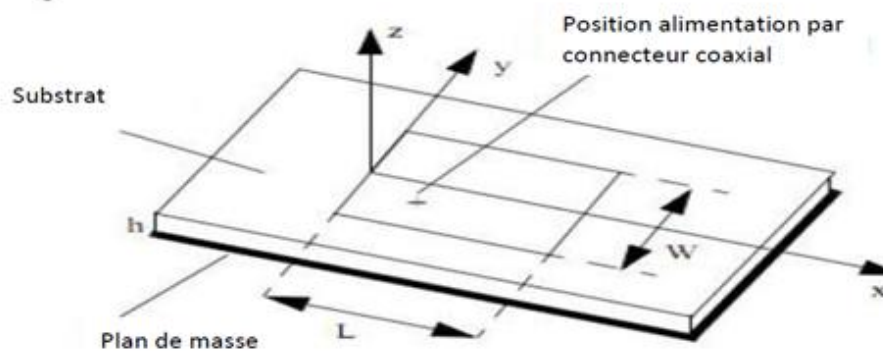


Figure.I. 15 : antenne imprimée rectangulaire

L'antenne la plus simple à étudier est sans doute le patch rectangulaire Figure I.15 qui est définie par :

1. La bande passante
2. Diagramme de rayonnement
3. La directivité :
4. Gain
5. Rendement de l'antenne
6. Ouverture
7. Polarisation Circulaire
8. Techniques d'alimentation

I.6.3.1. La bande passante

La bande passante est une bande où le transfert d'énergie de l'alimentation vers l'antenne (ou de l'antenne vers le récepteur). Dans la plupart des cas, la bande passante est définie en fonction du coefficient de réflexion. Il n'y a pas de critères précis pour la limite du coefficient de réflexion. Cependant, un critère typique est d'avoir un coefficient de réflexion inférieur à -10 dB sur toute la bande passante.

Certaines antennes sont très sélectives (bandes passantes très étroites), d'autres peuvent être utilisées sur une très large bande de fréquences [1]

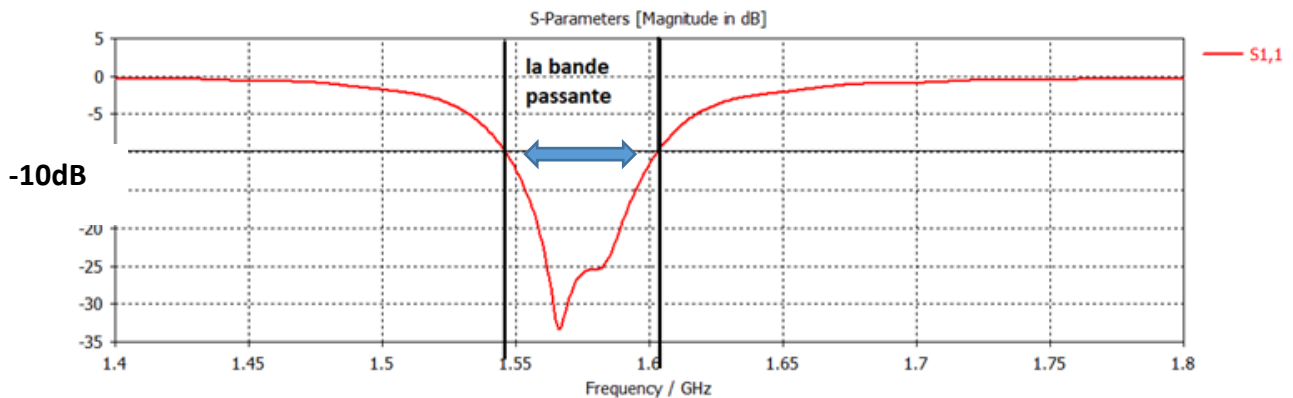


Figure.I. 16 : La Bande passante.

I.6.3.2. Diagramme de rayonnement

Le mécanisme de rayonnement d'une antenne patch rectangulaire s'effectue à partir de sa forme géométrique. Une fois, la ligne d'alimentation excitée par une source RF, une onde électromagnétique se propage sur cette ligne, puis attaque l'élément rayonnant. Une distribution de charge va se mettre à l'interface substrat - plan de masse, sur et sous le composant rayonnant, ce qui va provoquer :

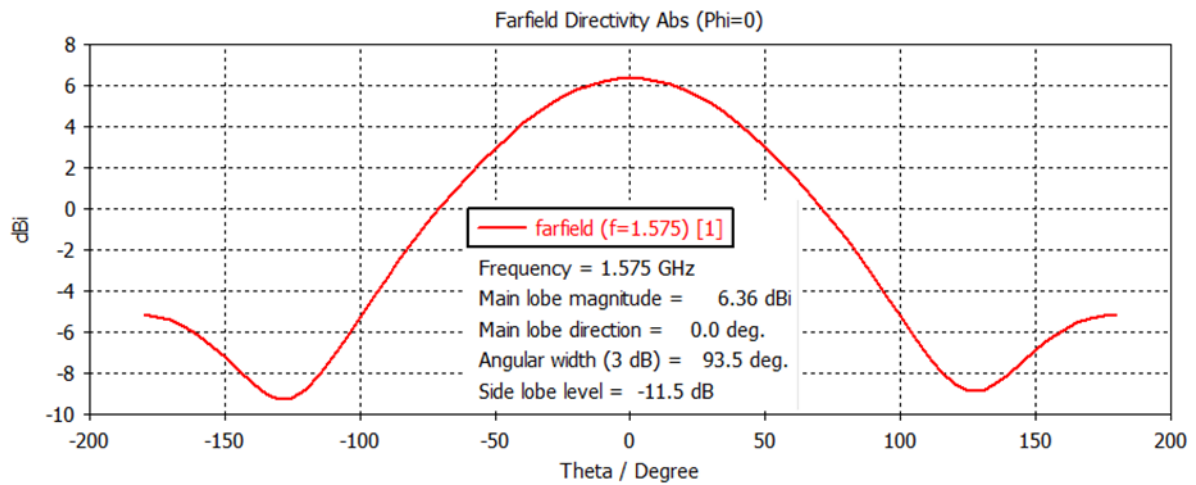
- Une inversion de phase des composantes verticales du champ électrique sur la longueur de l'antenne
- Contrairement à précédemment, des rayonnements qui sont en phase dans le plan de l'antenne et dus aux composantes horizontales des lignes de champ qui entourent l'élément imprimé.
- Une modélisation de l'antenne patch rectangulaire par une cavité à 4 murs magnétiques (bords de la cavité) et 2 murs électriques (formés par les métallisations).

I.6.3.3. Directivité

Comme pour toute autre antenne, la directivité est l'une des figures de mérite les plus importantes dont la définition est donnée par :

$$D_0 = \frac{U_{\max}}{U_0} = \frac{4\pi U_{\max}}{\text{Prad}} \quad (\text{I.9})$$

Une seule fente $K_0 h \ll 1$



Es ont quelques limites principales :

- Faible efficacité de rayonnement.
- Possibilité de fonctionnement en faible puissance.
- Effet de couplage du rayonnement de l'alimentation.
- Largeur de bande de fréquence très étroite (en général seulement une fraction d'un pour cent ou, dans la plupart des cas, quelques pour cent).
- Le gain légèrement inférieur comparé aux antennes conventionnelles à micro-ondes.

I.6.3.4. Techniques d'alimentation des antennes patch

Il existe plusieurs façons d'alimenter les antennes micro-ruban, qui peuvent être réalisées soit par connexion directe, soit par appairage. Les techniques d'alimentation les plus courantes sont l'alimentation par ligne de micro-ruban, l'alimentation par sonde coaxiale, l'alimentation par couplage étroit ou l'alimentation par fente. Quelques exemples sont donnés ci-dessous [19].

I.6.3.5. Alimentation par ligne micro-ruban

Dans le cas de l'alimentation par ligne micro-ruban, la ligne est directement connectée à l'élément rayonnant, comme illustré dans la figure (I.17). Le point de jonction peut être sur l'axe de symétrie du patch ou décalé pour améliorer l'adaptation d'impédance. Cette méthode d'alimentation est facile à réaliser et à modéliser, mais peut causer un rayonnement parasite important et une bande passante typiquement limitée à 2-5%.

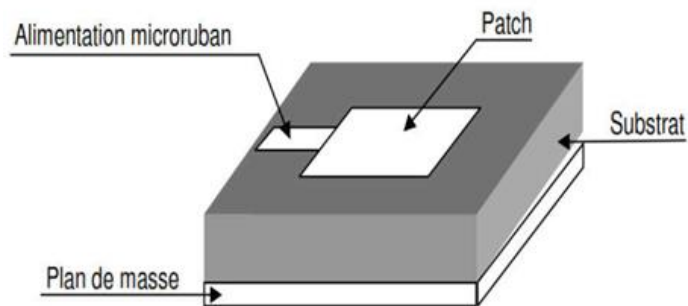


Figure.I. 17 : Antenne patch alimentée par une ligne micro-ruban.

I.6.3.6. Alimentation par câble coaxial

L'alimentation coaxiale ou par sonde est une technique couramment utilisée pour alimenter les antennes plaques. Dans cette technique, le conducteur interne du connecteur coaxial traverse le diélectrique et est soudé au patch, tandis que le conducteur externe est relié au plan de masse, comme illustré dans la Figure (I.18).

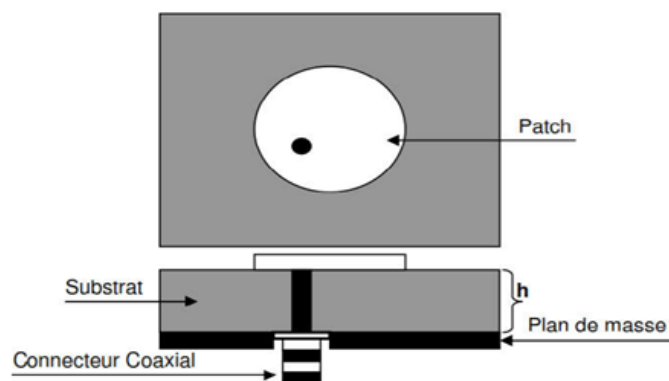


Figure.I. 18 : Alimentation coaxiale

I.6.3.7. Alimentation couplée par ouverture

Dans ce genre de configuration d'alimentation, la ligne micro-ruban et l'élément rayonnant sont disposés de part et d'autre du plan de masse, tel qu'illustré dans la figure I.19. Pour créer une liaison entre le patch et la ligne d'alimentation, une fente ou une ouverture est pratiquée dans le plan de masse.

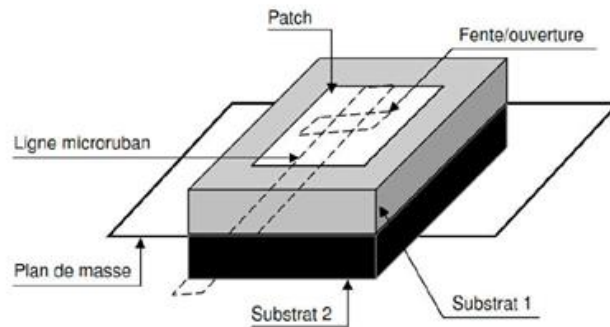


Figure.I. 19 : Alimentation couplée par fente.

I.6.3.8. Antennes patchs à polarisation circulaire

La polarisation circulaire des antennes micro-rubans peut être obtenue de plusieurs manières, selon la forme géométrique (carré, cercle,...etc.), la création d'une ou plusieurs fentes sur la surface du patch, la forme de la ligne d'alimentation, et avec un ou deux points d'excitation pour avoir un déphasage de 90° .

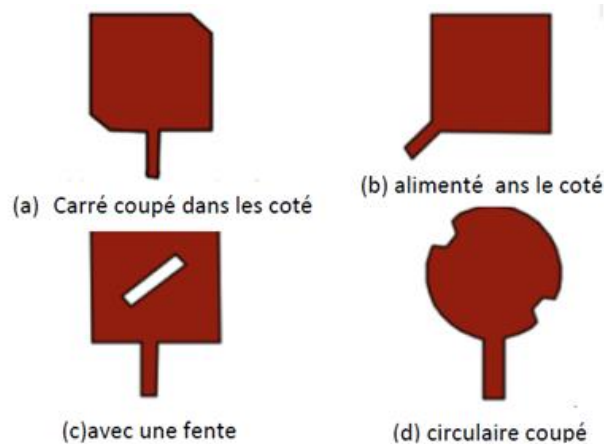


Figure.I. 20 : Antennes patch à polarisation circulaire simple excitation (a) Carré à coins coupés (b) Alimenté dans le coté, (c) Avec une fente, (d) Circulaire coupé.

On peut aussi obtenir la polarisation circulaire dans les antennes patch avec le déphasage de 90° au niveau du circuit d'alimentation au moyen de deux méthodes [2] :

- Ajout d'un tronçon de ligne de longueur $\lambda/4$, tel qu'illustré sur la figure I.21 (a), la bande passante sera dans ce cas limitée en fréquence.
- Avec l'utilisation d'un coupleur hybride 3 dB, tel qu'illustré sur la figure I.21 (b), ce qui permet la séparation de la puissance en deux ondes ayant des énergies égales.

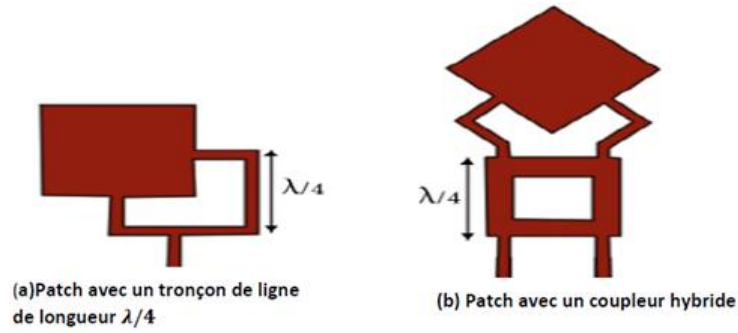


Figure.I. 21 : Antennes à polarisation circulaires à double excitations

I.6.3.9. Facteur de perte de polarisation et efficacité

En général, la polarisation de l'onde au niveau du récepteur ne sera pas la même au niveau de l'antenne de réception. La quantité de puissance extraite par l'antenne à partir du signal entrant ne sera pas maximale en raison de la perte de polarisation [18].

C'est ce qu'on appelle désadaptation de polarisation. Le champ électrique de l'onde entrante est comme suit :

$$\vec{E}_i = \vec{u}_w E_i \quad (\text{I.10})$$

Avec : \vec{u}_w le vecteur unitaire de l'onde et E_i le champ électrique d'onde entrante. La polarisation du champ électrique de l'antenne de réception peut être exprimée comme suit:

$$\vec{E}_a = \vec{u}_a E_a \quad (\text{I.11})$$

Avec : \vec{u}_a son vecteur unitaire (vecteur de polarisation).

La perte de polarisation est donnée comme un facteur de perte de polarisation (PLF pour Polarization Loss Factor en anglais). Ce facteur peut être défini en fonction de la polarisation d'antenne dans son mode de transmission.

$$\text{PLF} = |\vec{u}_w \cdot \vec{u}_a|^2 = |\cos \Psi_p|^2 \quad (\text{I.12})$$

Avec : Ψ_p l'angle entre les deux vecteurs unitaires.

L'alignement relatif de la polarisation de l'onde entrante et de l'antenne est illustré à la figure I.22 Si l'antenne est adaptée à la polarisation, son PLF sera égal à 1 et l'antenne extraira la puissance maximale de l'onde entrante.

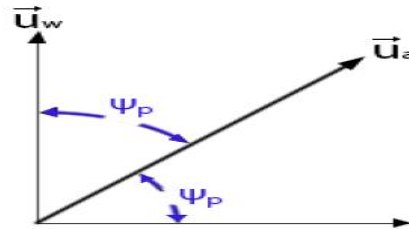


Figure.I. 22 : Vecteurs unitaires de polarisation de l'onde incidente (\vec{u}_w) et de l'antenne (\vec{u}_a) et le PLF

L'efficacité de la polarisation P_e est un autre facteur utilisé pour présenter les caractéristiques de polarisation d'une onde et d'une antenne. Ce dernier est défini comme le rapport entre la puissance reçue par une antenne à partir d'une onde plane de polarisation arbitraire donnée et la puissance reçue par la même antenne d'une onde plane de la même densité de flux de puissance et de même direction de propagation.

$$P_e = \frac{|\vec{L}_e \cdot \vec{E}_1|^2}{|\vec{L}_e|^2 |\vec{E}_1|^2} \quad (\text{I.13})$$

Avec :

- \vec{L}_e : Vecteur de la longueur effective de l'antenne.
- \vec{E}_1 : Champ électrique de l'onde donnée.

I.7. L'antenne patch dans les systèmes de navigation par satellites

L'évolution exponentielle du besoin en dispositifs hyperfréquences dans les systèmes de communication moderne a incité les industriels à investir de plus en plus dans ce domaine. Dans ce travail on s'intéresse aux récepteurs des systèmes de positionnement par satellites qui, de nos jours, en plus de l'ancien système GPS (pour Global Positionning System en anglais) sont contraint de prendre en charge d'autres systèmes tels que le Compass (Chinois) le Glonass (Russe) et le Beidou (Indou). Chacun de ces systèmes dispose de sa propre constellation de satellites et de ses propres signaux sur différentes bandes de fréquences dispersées entre 1164 MHz et 1610 MHz, tels qu'illustré sur la figure (I.23). Cette nouvelle situation de Multi-fréquence Multi-

constellation a imposé la recherche de nouvelles conceptions d'antennes miniatures. Pour faire face aux différents enjeux, une multitude de voies ont été explorées afin de s'adapter aux exigences des applications en termes de performances. En effet, diverses topologies et techniques ont été investiguées dans le but de répondre aux spécifications requises, à savoir : la miniaturisation, le fonctionnement multi-bandes et le rayonnement à polarisation circulaire tout en maintenant des performances radioélectriques (gain, efficacité de rayonnement, coefficient de réflexion...) optimales.

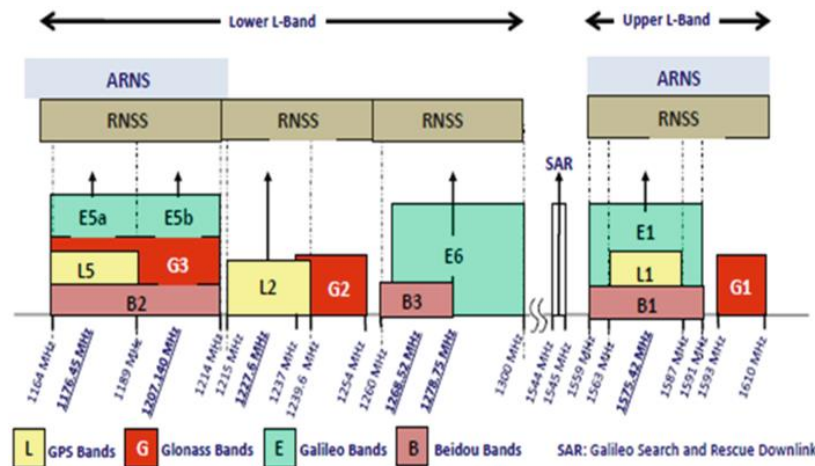


Figure.I. 23 : différentes bandes de fréquences dispersées entre (1164 MHz et 1610 MHz)

Dans ce projet, nous avons investigué l'utilisation de réseaux d'antennes patch dans la conception d'antenne d'un récepteur GNSS qui paraît être prometteuse d'après les recherches les plus récentes. La théorie de cette nouvelle approche sera exposée au chapitre deux et les résultats s'y afférant seront donnés et commentés au chapitre trois.

I.8. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la propagation des ondes électromagnétiques dans le cas général, puis la polarisation de ces ondes (linéaire, circulaire, *elliptique*) après les avoir étendues au détriment. Dans ce chapitre, nous avons présenté la propagation des ondes électromagnétiques dans le cas général, puis la polarisation de ces ondes (linéaire, circulaire) après les avoir étendues au détriment du rapport axial qui détermine le type de polarisation. En continuant, nous avons donné des exemples de patches d'antennes à polarisation circulaire, et enfin, les facteurs de perte de polarisation sont bien représentés. En continuant, nous avons donné des exemples de patches d'antennes à polarisation circulaire, et enfin, les facteurs de perte de polarisation sont bien représentés. Bien qu'il existe trois types de polarisation en théorie.

Chapitre II :

Réseau d'antennes dans les récepteurs GNSS

II.1. Réseau d'antenne

Ce chapitre sera consacré dans un premier temps à l'étude des réseaux d'antennes et de leurs caractéristiques générales. Par la suite, on se focalisera sur le réseau d'antennes patch et les avantages qu'il peut offrir dans les différentes applications de communication sans fil. Finalement, on exposera l'objectif et la problématique visés par notre projet ainsi que l'état de l'art s'y afférant.

II.1.1. Définition

Un réseau d'antennes est constitué de plusieurs antennes identiques arrangées de manière régulière pour produire un rayonnement de forme spécifique. En multipliant le nombre d'éléments rayonnants, la puissance rayonnée est augmentée. Le rayonnement est généré en combinant en phase les champs produits par chaque élément, offrant ainsi de multiples options pour concevoir des réseaux d'antennes. Ces réseaux peuvent utiliser différents types d'éléments tels que les cornets, les antennes filaires, les antennes plaquées et les antennes patch, et leur but est de générer un champ électromagnétique global qui résulte de la somme vectorielle des champs individuels de chaque antenne. Ce champ électromagnétique peut être utilisé pour différentes applications, notamment la communication sans fil, la radiodiffusion, la télédétection, la surveillance et la navigation [41].

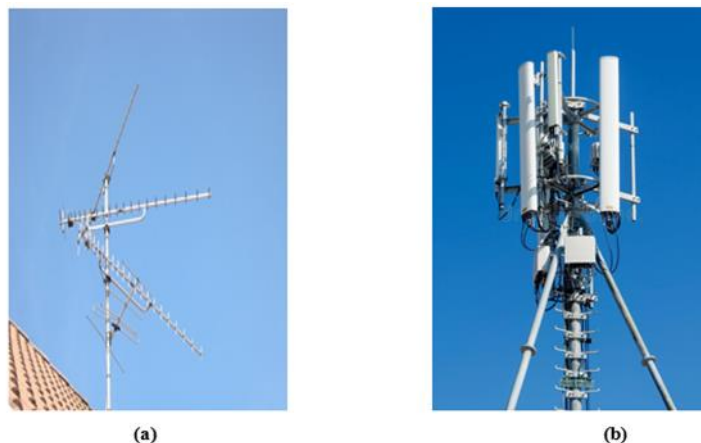


Figure.II. 1 : Exemple d'un réseau d'antennes. : (a) Antennes Ya-gi et (b) Antennes Téléphoniques.

II.1.2. Caractéristiques fondamentales

Il y'a deux caractéristiques qui sont essentielle lors du choix du type de réseau d'antenne à utiliser qui sont :

- **Le gain** : Le gain de réseau est l'un des critères les plus sensibles dans le choix de la loi d'alimentation. Plus généralement le gain de réseau peut s'écrire [21]

$$G_{r,dB} = 10 \log 10 \left[\frac{(\sum_{i=1}^N C_i)^2}{\sum_{i=1}^N C_i^2} \right] \quad (II. 1)$$

- **Le facteur de réseau** : L'expression générale du facteur de réseau est donnée par [23]

$$AF(\theta, \varphi) = \sum_{i=1}^N C_i e^{j(\psi_i + K_a \sin \theta \cos(\varphi - \varphi_i))} \quad (II. 2)$$

$$\psi_i = -K_a \sin \theta_0 \cos(\varphi - \varphi_i) \quad (II. 3)$$

II.1.3. Types de réseaux d'antennes

Il existe différents types de réseaux d'antennes, chacun ayant ses propres caractéristiques et applications spécifiques. Voici quelques-uns des types de réseaux d'antennes les plus courants :

II.1.3.1. Réseaux d'antennes linéaires

Ce type de réseau d'antennes est constitué de plusieurs antennes alignées dans une direction linéaire tel que montré sur la figure (II.2.a). Les réseaux d'antennes linéaires sont souvent utilisés pour la communication de données à haute vitesse, tels que les réseaux sans fil [20].

II.1.3.2. Réseaux d'antennes circulaires

Les réseaux d'antennes circulaires sont similaires aux réseaux d'antennes linéaires, mais les antennes sont disposées en cercle plutôt que dans une ligne droite. Où les éléments rayonnants sont répartis sur le périmètre d'un cercle et d'espacements égaux Figure (II.2.b). Ils sont souvent utilisés pour les applications radar, les communications par satellite et les stations de radio [22].

II.1.3.3. Réseaux d'antennes à fente

Les réseaux d'antennes à fente sont constitués de plusieurs fentes dans un matériau conducteur. Ils sont souvent utilisés dans les applications de radiofréquence et de communication sans fil.

II.1.3.4. Réseaux d'antennes patchs

Les réseaux d'antennes à patch sont constitués de plusieurs antennes à patch (une forme de circuit imprimé). Est un arrangement des antennes dans un plan tel qu'illustré sur la figure (II.2.c). Il y a deux formes de réseaux planaires [24]. Le réseau planaire à forme rectangulaire qui est une généralisation du plan du réseau linéaire disposées sur une surface plane. Ils sont souvent utilisés pour les applications de communication sans fil à courte portée, tels que le Wi-Fi et le Bluetooth.

La figure suivante représente : réseaux d'antennes linéaires (a), réseaux d'antennes circulaires (b), réseaux d'antennes patch (c) et réseaux d'antennes à réflecteur parabolique(d).

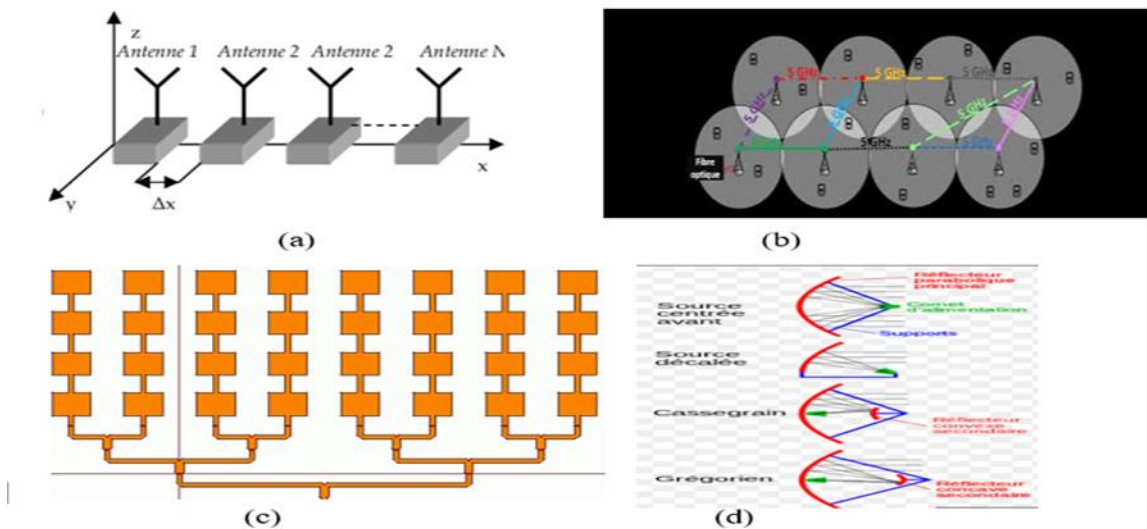


Figure.II. 2 : types de réseaux d'antennes.

II.1.3.5. Autres types de réseau d'antennes

En plus des réseaux d'antennes présentés précédemment, il existe d'autres configurations de réseaux d'antennes qui sont souvent développées à partir de la structure planaire. Le but de ces configurations est généralement de réduire les niveaux des lobes secondaires et/ou d'améliorer le lobe principal (une meilleure focalisation), ainsi que d'améliorer la couverture spatiale environnante. Parmi ces configurations, on trouve les réseaux multi-surfaces où un polyèdre est couvert par des réseaux d'antennes planaires. Le polyèdre peut être un

parallélépipède, un cylindre, un hémisphère ou une pyramide. Les dimensions des réseaux planaires multi-surfaces sont généralement grandes et les lois d'alimentation nécessitent parfois des processus d'optimisation pour réduire les interférences entre les lobes, ce qui limite l'utilisation de ces réseaux principalement aux domaines spatial et militaire [25.26].

II.1.4. Alimentation d'un réseau d'antennes

Il faut, avant tout, noter que lorsque les réseaux contiennent un grand nombre d'éléments, les éléments sont regroupés par sous-réseaux. Cela permet d'optimiser le nombre de composants et de simplifier les fonctions de Commande [27].

Les types d'alimentation de réseaux d'antennes sont nombreux et variés. On se contentera de présenter les technologies les plus importantes et les plus utilisées tout en se limitant aux concepts les plus simples.

- **Alimentation série** : les éléments rayonnants sont excités en série par une ligne de transmission. Un déphaseur entre deux éléments rayonnants consécutifs impose la loi de phase appropriée (Fig. II.3 (a))
- **Alimentation parallèle** : le circuit d'alimentation a une entrée et plusieurs sorties, égales au nombre d'éléments rayonnants. La synthèse de réseau détermine les coefficients de pondération et les déphasages des signaux à affecter à chaque élément

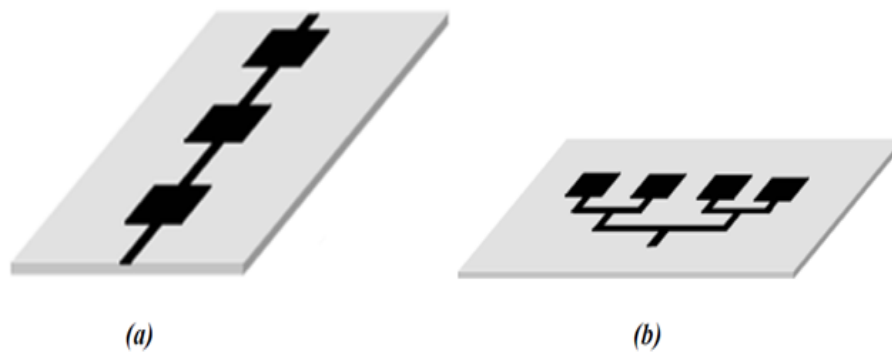


Figure.II. 3 : Alimentation d'un réseau d'antennes patch. (a)-série (b)-parallèle

II.1.5. Avantages et inconvénients des réseaux d'antennes

Les réseaux d'antennes présentent plusieurs avantages et inconvénients, tels que décrits ci-dessous [28] :

II.1.5.1. Avantage

- Les réseaux d'antennes peuvent offrir une meilleure couverture et une plus grande portée du signal que les antennes individuelles.
- Ils peuvent également offrir une plus grande capacité de traitement de signaux, ce qui peut être bénéfique dans les applications qui nécessitent une transmission de données rapide et fiable.
- Les réseaux d'antennes peuvent être configurés pour fonctionner à différentes fréquences, ce qui permet une plus grande flexibilité dans leur utilisation. On notera que cette propriété est basique pour la justification de leurs choix pour les récepteurs GNSS MFMC (multi fréquences multi constellations).

II.1.5.2. Inconvénients

- Les réseaux d'antennes peuvent être plus coûteux à installer et à entretenir en raison de la complexité de leur conception et de leur mise en place.
- Ils peuvent également être plus difficiles à intégrer dans des infrastructures existantes, ce qui peut nécessiter des modifications importantes pour les adapter.
- Les interférences entre les antennes peuvent également être un problème, surtout si elles sont trop proches les unes des autres.

II.2. Réseau d'antenne patch

II.2.1. Définition

Un réseau d'antennes patch est un ensemble d'antennes patch interconnectées, disposées selon un motif régulier pour former une matrice d'antennes. Les antennes patch sont des antennes directionnelles de type planer, composées d'une plaque métallique plane, généralement carrée ou rectangulaire, qui rayonne ou reçoit des ondes électromagnétiques. Les réseaux d'antennes patch peuvent être utilisés dans de nombreuses applications, telles que les systèmes de communication sans fil, les radars, les satellites, et d'autres applications qui nécessitent une transmission ou une réception de signaux dans différentes directions [1].

Le Figure (II .4) suivante montre le réseau d'antenne patch.

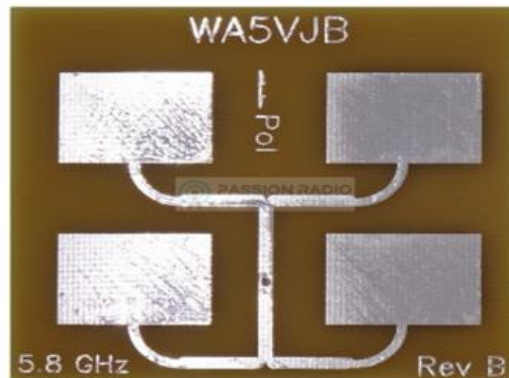


Figure.II. 4 : Réseau d'antenne patch

Les réseaux d'antennes patch, également appelés (patch arrays en anglais), sont des systèmes d'antennes utilisés pour la communication sans fil, la télédétection et d'autres applications similaires. Voici quelques avantages et inconvénients associés à l'utilisation de ces réseaux [33] :

II.2.2. Avantage des réseaux d'antennes patch

- Les réseaux d'antennes patch offrent une grande directivité, ce qui signifie qu'ils peuvent concentrer la puissance de l'antenne dans une direction particulière pour maximiser la portée et la qualité de la communication.
- Ils sont également assez faciles à fabriquer, ce qui les rend rentables et faciles à intégrer dans des systèmes plus grands.
- Les réseaux d'antennes patch sont souvent compacts et légers, ce qui les rend pratiques pour les applications portables.

II.2.3. Inconvénients des réseaux d'antennes patch

- L'un des principaux inconvénients des réseaux d'antennes patch est qu'ils ont une bande passante limitée, ce qui signifie qu'ils peuvent être moins efficaces dans les environnements de communication où la largeur de bande est importante.
- Ils sont également assez sensibles à la polarisation, ce qui signifie qu'ils peuvent perdre de la puissance de signal si l'orientation de l'antenne n'est pas correcte.

- Enfin, les réseaux d'antennes patch peuvent être plus sensibles, que d'autres types d'antennes, au couplage mutuel entre les différents éléments du réseau d'antennes et aux interférences électromagnétiques.

II.3. Problématique et Etat de l'art

II.3.1. Problématique

Les récepteurs GNSS, compte tenu de leur taille réduite, utilise à l'entrée des antennes patches. La compacité du réseau d'antennes GNSS est très critique pour les plates-formes portables et les terminaux mobiles.

Au début, comme il n'y avait que le GPS qui était opérationnel, les exigences en termes de performance étaient réduites. De nos jours, il existe plusieurs systèmes GNSS qui sont utilisés simultanément avec chacun sa propre constellation et ses propres signaux.

En effet, il existe deux bandes principales du service de radio navigation aéronautique (ARNS pour Aeronautical Radio Navigation Service en anglais), qui sont la bande L inférieure contenant GPS L5, Galileo E5 et GLONASS G3, et la bande L supérieure contenant GPS L1, BeiDou B1, Galileo E1 et GLONASS G1 [39]. Dans ce travail on s'intéressera exclusivement à la bande L supérieure qui couvre une large gamme fréquence de 1559 MHz à 1610 MHz.

Cette nouvelle situation a incité les chercheurs à concevoir, d'un côté, des antennes large bande, multi fréquences et multi constellations et qui présentent, d'un autre côté, une bonne performance en terme de résistance au brouillage potentiel, à l'interférence électromagnétique intentionnel ou non intentionnelle et à l'espionnage [31,32]. Parmi les travaux qui ont abordé cette problématique et auxquels on s'intéresse dans notre travail, il y'a ceux qui utilisent les réseaux d'antennes patch comme solution.

Un certain nombre de techniques existent dans la littérature, qui traite la question du couplage mutuel dans les réseaux étroitement couplés [33] [34].

Dans ce qui suit, on présentera un certain nombre de travaux qui exhibent des conceptions de réseaux d'antennes patch destinés aux systèmes de navigation par satellites.

II.3.2. Etat de l'art

Le réseau d'antennes GPS présenté dans la référence [35] a été conçu dans le but rejeter les signaux de brouillage provenant de deux directions différentes. Comme montré sur la figure (II.5), il se compose de cinq éléments d'antennes à patch micros-trip, placés uniformément le long d'un cercle de rayon $R_2= 90\text{mm}$. Les quatre antennes à patch sont positionnées autour de l'élément central et ont des phases relatives modifiées pour produire deux nules aux directions spécifiées. Les patches sont imprimés sur des substrats céramiques carrés avec une épaisseur de 4 mm, une largeur latérale de 25 mm et une perméabilité relative de 19,58. Cette conception a été choisie pour obtenir une antenne compacte et minimiser l'effet de couplage. Les angles du patch en argent sont coupés pour assurer une polarisation circulaire.

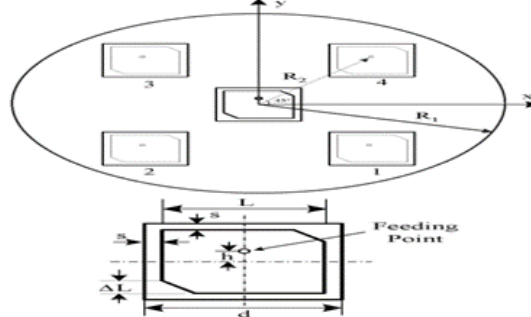


Figure.II. 5 : Géométrie de l'antenne à 5 éléments

Le modèle de rayonnement de l'antenne présente une bonne polarisation circulaire et une différence de plus de 15 dB entre le lobe principal et celui latéral, ce qui assure un bon faisceau de rayonnement de l'antenne à l'extérieur. La perte de retour simulée et le rapport axial simulé de l'antenne proposée sont respectivement illustrés dans les figures (II.6 (a)) et (II.6 (b)). Le diagramme de rayonnement du réseau d'antennes proposé est donné dans la figure (II.7) et montre une assez bonne polarisation circulaire.

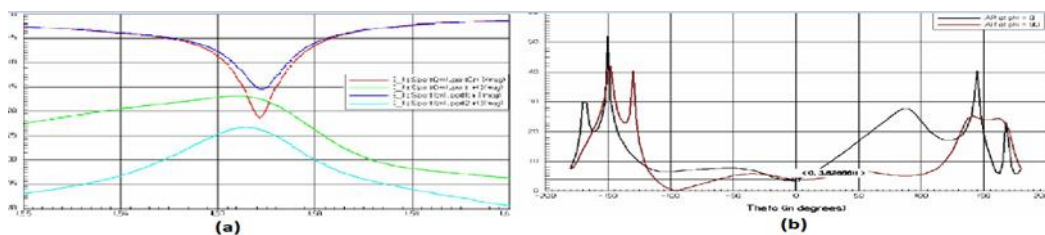


Figure.II. 6 : (a) Paramètre S simulé pour le réseau GPS proposé. (b) Rapport axial simulé du réseau d'antennes GPS à 5 éléments.

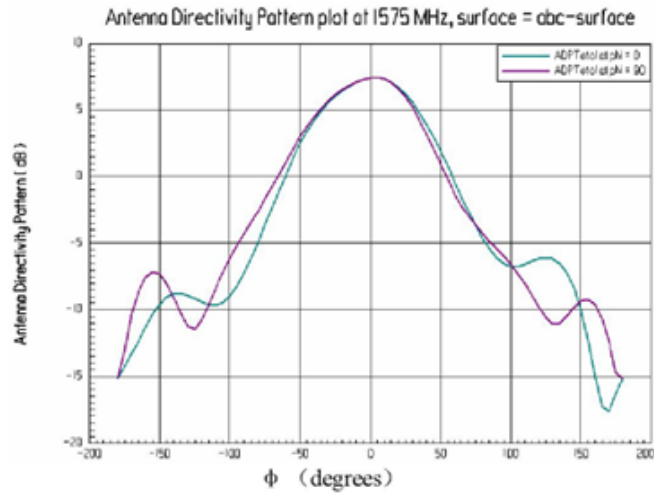


Figure.II. 7 : Diagramme de rayonnement simulé du réseau d'antennes GPS à 5 éléments.

Les auteurs dans la référence [36] ont proposé une conception d'un réseau d'antennes à diagramme de réception contrôlé (CRPA pour Controlled Reception Pattern Antenna en anglais) afin d'augmenter efficacement les caractéristiques d'isolation d'un petit réseau pour une profondeur nulle améliorée à des angles de faible élévation. Elle est composée de trois antennes identiques montées sur une plate-forme au sol circulaire de 5,5 pouces. Le réseau CRPA proposé, tel qu'illustré sur la figure (II.8), est fabriqué sur un substrat en céramique et chaque antenne comprend un patch rayonnant et deux bandes parasites avec des dimensions ajustées pour contrôler le couplage capacitif.

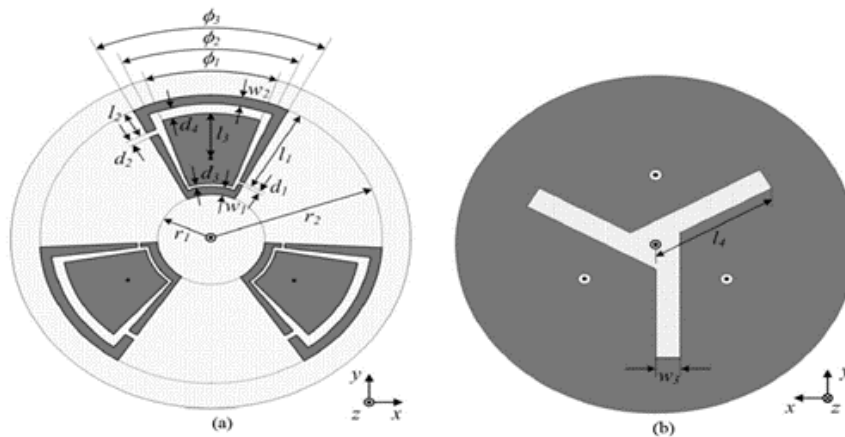


Figure.II. 8 : Géométrie du réseau CPRA.

Le coefficient de réflexion mesuré est $-10,8\text{dB}$ à $1,57\text{ GHz}$ tel que montré sur la figure (II.9).

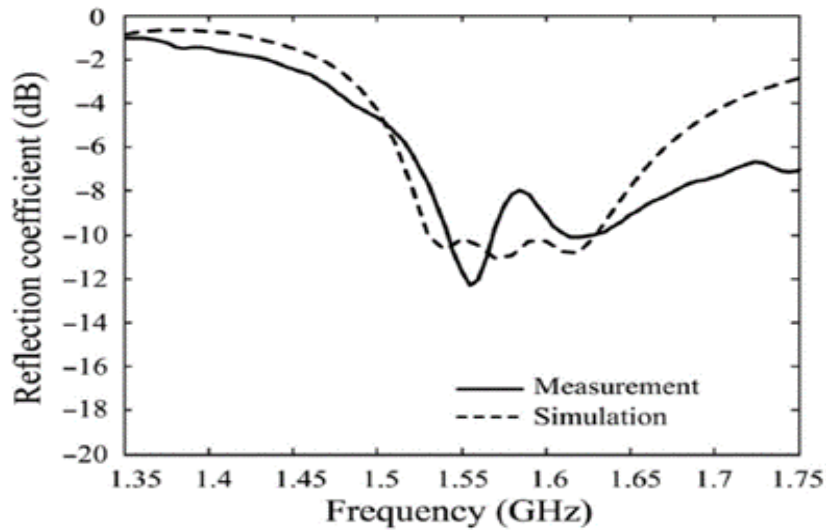


Figure.II. 9 : Coefficient de réflexion d'une antenne CRPA

La figure (II.10) présente le gain de visée mesuré de l'antenne proposée par rapport à la simulation pour les polarisations circulaire droite (RHCP) et circulaire gauche (LHCP), respectivement.

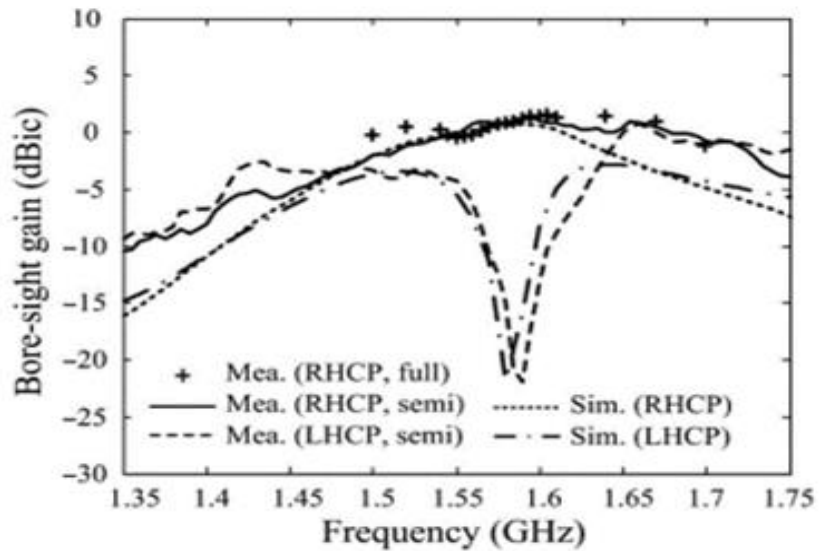


Figure.II. 10 : Gain de visée de l'antenne CRPA.

Les figures II.11 (a) et (b) illustrent, les diagrammes de rayonnement dans le plan zx et zy, respectivement

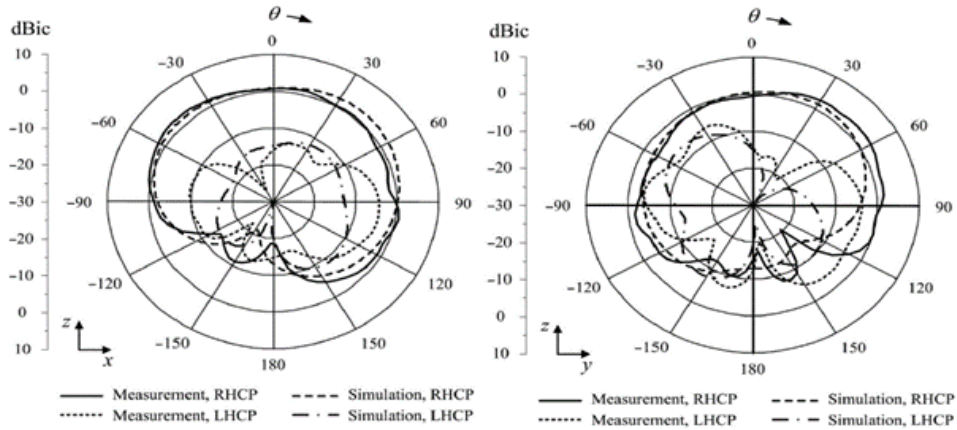


Figure.II. 11 : Diagrammes de rayonnement d'une antenne CRPA. (a) plan zx. (b) plan zy.

La variation de la température affecte la résonance centrale, la fréquence et la bande passante de l'antenne ce qui a suscité les auteurs de la référence [37] a concevoir un réseau d'antennes qui fonctionne de manière stable dans un environnement à haute température de 400°C. L'antenne proposée d'une taille de 200 mm * 200 mm * 21 mm est constituée de trois parties : un radome en céramique microcristalline, des pièces métalliques et des patches. Sur la figure II-12 (b) et (a) sont présentés respectivement les prototypes simulés et réalisés de l'antenne proposée.

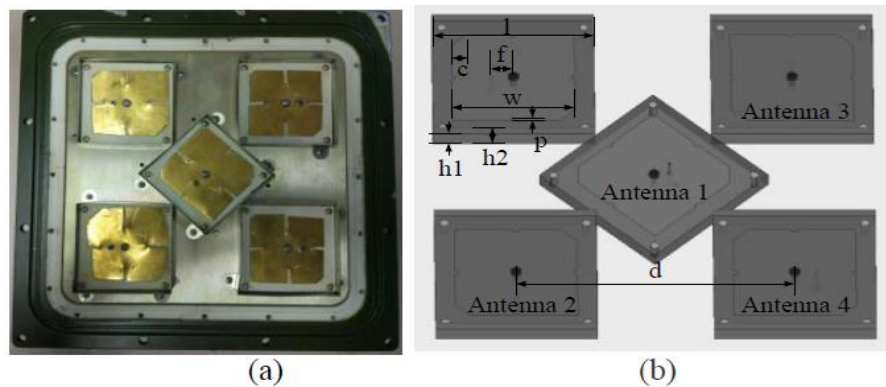


Figure.II. 12 : Géométrie de l'antenne proposée (a) antenne fabriquée. (b) model simulé.

Résultat :

Les paramètres optimaux utilisés sont rassemblés dans le tableau 2 :

Table 2 : Les paramètres optimaux utilisés de la référence [37]

I	58 mm	h_1	6 mm
w	45.5 mm	h_2	10 mm
c	16.9 mm	f	8 mm
d	100 mm	p	2 mm

La performance électrique de l'antenne à température ambiante et à haute température est analysée et vérifiée par simulation et expérimentalement.

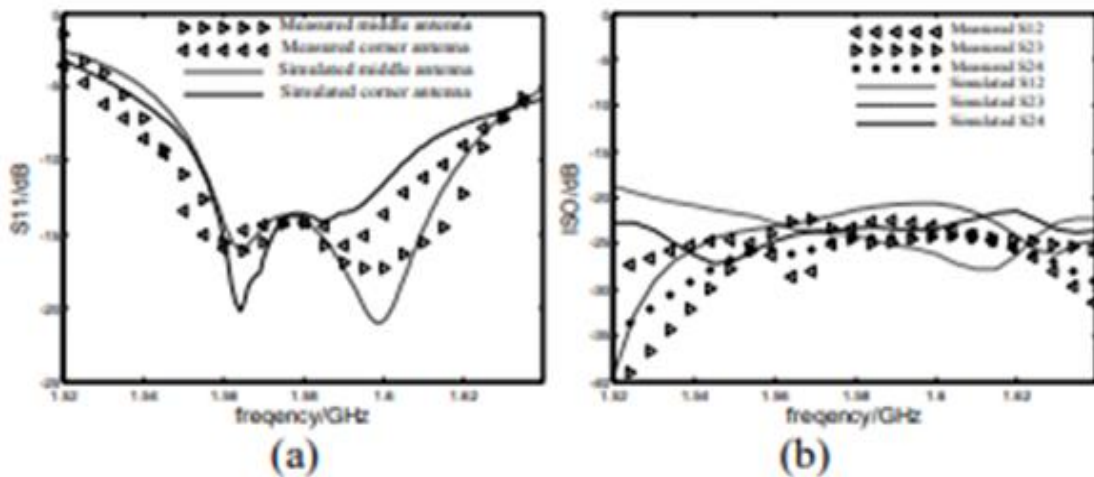


Figure.II. 13 : simulation et mesure des paramètres S à. Température ambiante (a) S11 paramètre. (b) Le paramètre d'isolement.

Le rayonnement simulé et mesuré est supérieur à 6,1 dB et mesuré à 5,4 dB. Le rapport de polarisation croisée est supérieur à 20 dB.

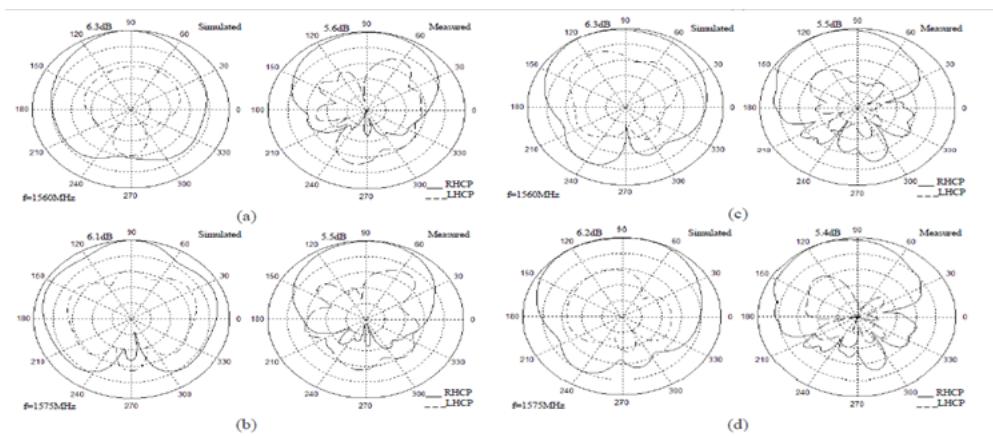


Figure.II. 14 : Diagramme de rayonnement CP du plan E normalisé à température ambiante (a) Antenne centrale dans BDS_B1. (b) Antenne centrale dans GPS_L1.

(c) Antenne d'angle dans BDS_B1. (d) Antenne d'angle dans GPS_L1.

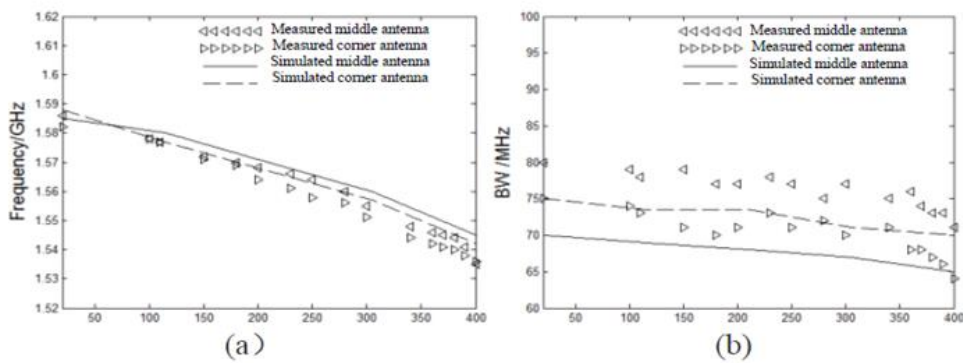


Figure.II. 15 : Relation entre la fréquence de fonctionnement et la température (a) La fréquence centrale. (b) La bande passante.

La fréquence de fonctionnement couvre la bande L1 du GPS et la bande B1 Du BDS II sur toute la plage de température.

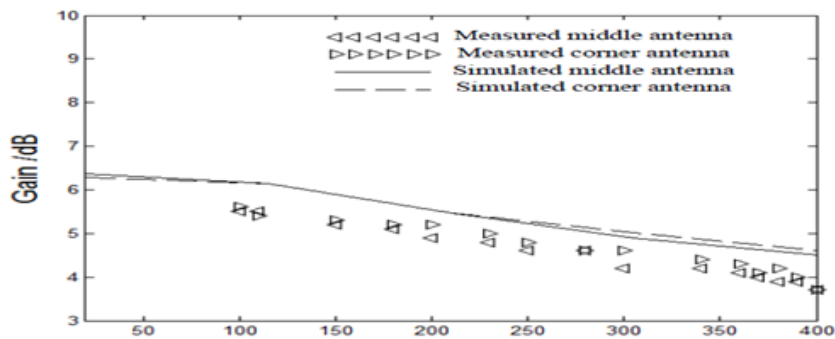


Figure.II. 16 : Relation entre le gain RHCP et la température

Les mesures expérimentales à température ambiante et à haute température confirment la bonne stabilité thermique de l'antenne. De plus, l'antenne proposée présente d'excellentes performances et remplit les exigences de conception [36].

La référence [38] décrit la conception d'un réseau d'antennes GPS compact à quatre éléments fabriqués à partir d'éléments d'antenne micro-ruban empilés. Ce réseau d'antennes, de taille 4,625 pouces carrés, est censé être capable de répondre aux exigences de performance du code M aux deux fréquences L1 et L2. Comme ce réseau d'antenne proposé est destiné aux plates-formes aéroportées militaires où l'espace pour l'installation des antennes est limité on se confronte, alors, au problème de couplage mutuel entre les éléments d'antenne.

Le couplage mutuel affecte la fréquence de résonance des éléments d'antenne dans le réseau et les besoins à prendre en compte lors du réglage de la résonance des éléments à la fréquence désirée ; le couplage mutuel peut également affecter la polarisation circulaire de l'antenne.

Le couplage mutuel des plans E et H entre les éléments d'antenne micro-ruban carrés utilisés dans le réseau dépend de la distance de séparation entre les bords des éléments d'antenne micro-ruban, de la constante diélectrique du matériau du substrat et de l'épaisseur du substrat.

Dans cette référence les résultats ont montré, d'un côté, en mesurant la fidélité du signal de la corrélation, que la performance du code M est satisfaisante ; alors que, d'un autre côté, une étude comparative a exhibé un couplage aussi fort que -8 dB pour certains éléments d'antenne et seulement -13 dB pour d'autres. Cette différence de couplage peut entraîner des changements significatifs dans le rapport axial des champs rayonnés par ces éléments d'antenne.



Figure.II. 17 : Image des matrices adaptatives à quatre éléments miniaturisées GPS utilisant un substrat 6010 LM (gauche) et un substrat TMM13i (à droite)

II.4. Conclusion

Après avoir investigué les notions de bases concernant les antennes réseaux, ainsi que les caractéristiques des réseaux d'antennes patchs, nous nous sommes penchés sur la problématique visée par notre travail dans ce mémoire. Par la suite, nous avons présenté un état de l'art qui a permis de consulter les différents travaux, parmi les plus récents, qui ont déjà travaillé sur des solutions reliées à la même problématique.

Chapitre III :

Conception d'un réseau d'antennes patch à large bande à 4 éléments compacts à haute isolation pour les applications GNSS

III.1. Introduction

La problématique visée, tel que évoquée dans le deuxième chapitre, est directement liée au défi principal dans la conception d'un réseau d'antennes GNSS compacte anti brouillage qui est l'exigence de maintenir une large bande passante tout en gardant le couplage mutuel entre les différents éléments d'antennes à un niveau minimum.

D'après l'état de l'art du chapitre deux, on constate que la plupart des solutions déjà proposées sont soit à bande étroite et complexe à fabriquer ou ils ne traitent que la question du couplage mutuel pour les réseaux d'antennes à polarisation linéaire.

Cependant, dans la référence [39], les auteurs ont pu concevoir un réseau d'antennes patch compact qui couvre une large bande de fréquence d'intérêt (1559 MHz 1610 MHz) tout en maintenant une excellente performance de couplage mutuel. L'importance de cette solution pour les futures systèmes GNSS nous a encouragé à valider, dans ce qui suit, l'ensemble des travaux publiés dans [39] et d'investiguer en détail les résultats de simulation s'y afférant.

III.2. Outils de simulation

III.2.1. Logiciel CST

CST (Computer simulation Technology) Microwave Studio est un logiciel de simulation électromagnétique de structures passives en 3 dimensions basé sur la résolution des équations de Maxwell suivant la technique des équations intégrales finies. Cette méthode numérique offre une discrétisation de l'espace permettant la description directement en 3 dimensions de tous les composants des systèmes décrits, ce qui lui permet d'être appliqué à de nombreux problèmes électromagnétiques. Dans ce travail, le CST sera l'outil de base utilisé dans la simulation.

III.2.2. Description générale de l'interface CST

Une fois le projet est créé, on accède à l'interface d'utilisateur du CST telle que présentée sur la figure III.1.

Chapitre III : Conception d'un réseau d'antennes patch à large bande à 4 éléments compacts à haute isolation pour les applications GNSS réseau d'antennes dans les récepteurs GNSS

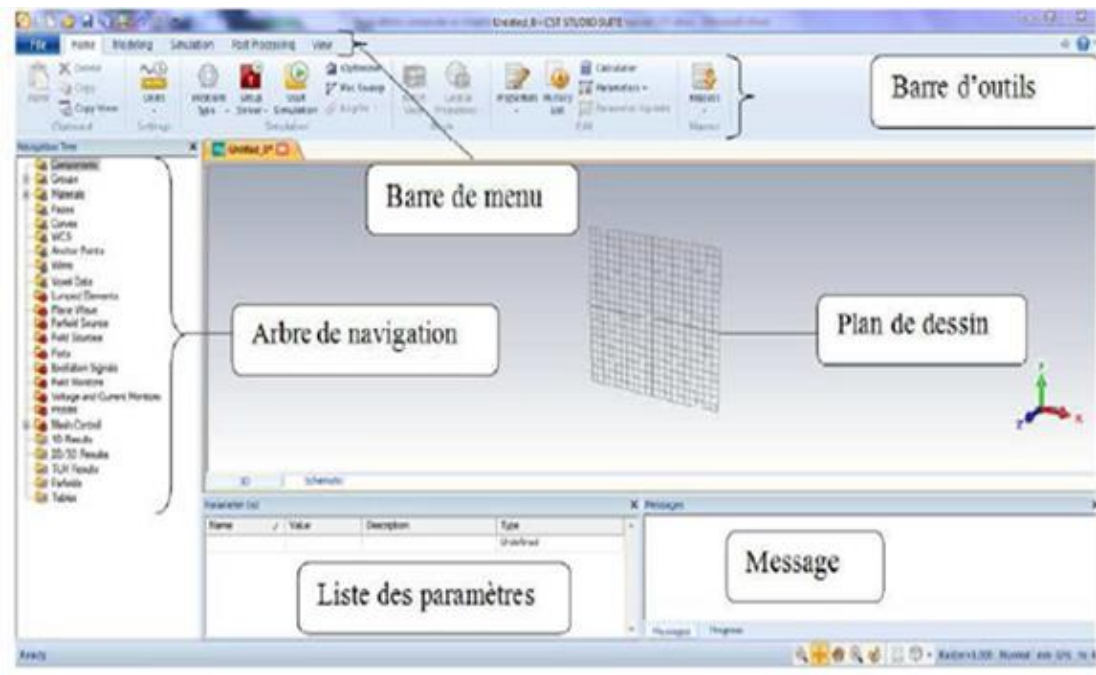


Figure.III. 1 : Interface du CST.

- 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. Conception de l'antenne

III.3.1. Élément d'antenne unique

Avant d'étudier et de valider la conception l'antenne réseau proposée dans [39], il fallait tout d'abord investiguer l'unité d'antenne patch compacte élémentaire primordiale dans la composition de cette dernière.

Chapitre III : Conception d'un réseau d'antennes patch à large bande à 4 éléments compacts à haute isolation pour les applications GNSS réseau d'antennes dans les récepteurs GNSS

Cet élément d'antenne patch compacte tel qu'utilisé dans [39] a une forme carrée avec des coins opposés tronqués pour obtenir une polarisation circulaire à droite (RHCP) comme illustré à la Figure III.2. Afin d'obtenir une antenne patch compacte, c'est le substrat Rogers TMM10i ($\epsilon_r=9,8$, $\tan\delta=0,002$) qui a été utilisé. Une épaisseur standard de 5,08 mm est choisie pour couvrir toute la bande d'intérêt (1559 MHz – 1610 MHz).

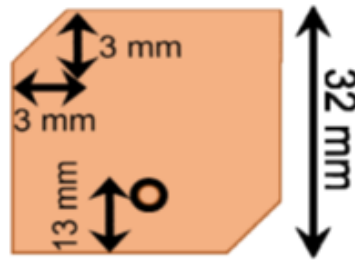


Figure.III. 2 : Géométrie de conception d'un élément d'antenne à patch unique.

III.3.2. Résultats de simulation

Les systèmes GNSS utilisent des antennes à polarisation circulaire à droite RHCP (right hand circular polarization) en raison de divers avantages tels que l'immunité à la rotation de Faraday et moins de pertes de propagation par trajets multiples. Pour de bonnes performances CP, le rapport axial d'une antenne doit être inférieur à 3dB [39]. Pour générer une CP dans une antenne, le champ électrique doit avoir deux composantes de même grandeur avec un déphasage de 90° [39].

Il existe de nombreuses techniques pour atteindre la CP, telles que l'utilisation de réseaux à double alimentation, de diviseurs de puissance et de déphaseurs. Cependant, ces techniques augmentent la complexité de conception. L'approche la plus simple pour générer une CP consiste à exciter les modes orthogonaux en raison d'une irrégularité dans les dimensions du patch [40]. Par conséquent, les coins opposés de l'antenne patch élémentaire illustrée sur la Fig.III.2 ont été tronqués et optimisés pour obtenir un déphasage de 90° avec un rapport axial inférieur à 3 dB. Les Figures III.3 (a) et (b) montrent respectivement les résultats de simulation de sa réponse d'impédance ainsi que le rapport axial.

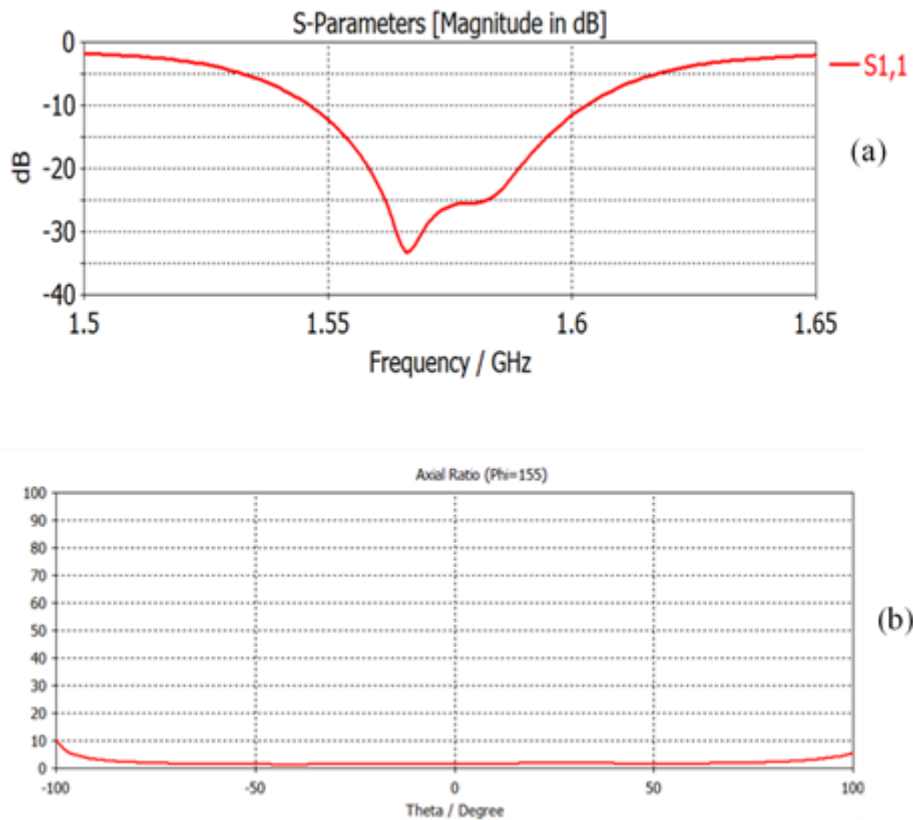


Figure.III. 3 : Résultats de simulation de l'élément d'antenne patch. (a) Réponse d'impédance. (b)Rapport axial.

III.3.3. Conception du réseau d'antenne

L'efficacité des résultats obtenus ci-dessus ont encouragé les auteurs dans [39] à proposer leur conception du réseau d'antenne qui va être décrite et étudiée en détail dans ce qui suit puis simulée sous CST.

Contrairement aux conceptions où les éléments individuels sont placés dans des orientations similaires c'est l'architecture à rotation séquentielle qui a été choisie. Cette géométrie a été utilisée pour générer une PC à partir de quatre éléments d'antenne polarisés linéairement. Comme les substrats épais sont connus pour produire des ondes de surface, il a fallu donc couper le substrat supplémentaire juste à la limite des éléments de patch métalliques et utiliser une plaque d'aluminium (1,5 mm d'épaisseur) comme plan de masse, comme illustré sur la Fig III.4. Ceci offre également un avantage supplémentaire de coût réduit car la quantité de substrat consommée est minimisée.

Chapitre III : Conception d'un réseau d'antennes patch à large bande à 4 éléments compacts à haute isolation pour les applications GNSS réseau d'antennes dans les récepteurs GNSS

Etant donné qu'un couplage mutuel maximal se produit dans les éléments d'antenne couplés au champ E, donc, en utilisant architecture à rotation séquentielle proposée, les éléments adjacents sont tournés de 90 degrés. Comme les éléments d'antenne sont tournés séquentiellement, afin d'obtenir un diagramme de gain RHCP sans zéro, les ports sont alimentés par les phases $P1= 0^\circ$, $P2= 90^\circ$, $P3= 180^\circ$, et $P4= 270^\circ$. En coupant le substrat épais juste aux coins de l'élément de patch rayonnants et en les plaçant dans un réseau tourné séquentiellement, le couplage mutuel maximal est réduit à 16 dB pour les éléments opposés et 14 dB pour les éléments adjacents [39].

Afin de réduire davantage le couplage mutuel, un absorbeur de micro-ondes MT-30 ($\epsilon_r=15,79$, $\tan\delta= 1.944$) a été incorporé dans la conception de l'antenne réseau proposée. Il remplit les espaces entre les vides créés par la découpe du substrat TMM10i (FigIII.4). L'introduction de MT-30 à proximité immédiate des éléments de patch rayonnants a pour but de modifier l'impédance d'entrée des patchs et a donc un impact sur leurs performances en termes d'adaptation d'impédance, de gain maximal réalisable et de rapport axial. C'est ainsi que les auteurs dans [39] ont pu ré-optimisé les emplacements des points d'alimentation du réseau proposé ainsi que la distance entre les bords des éléments patch de l'absorbeur.

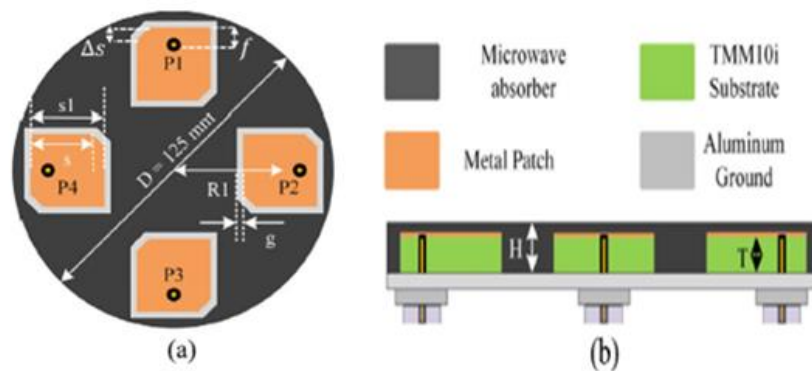


Figure.III. 4 : La géométrie du réseau d'antennes patch à 4 éléments proposé pour les applications GNSS. (a) Vue de dessus. (b) Vue latérale.

III.4. Résultats de l'analyse paramétrique

En plus de l'emplacement des points d'alimentation, l'épaisseur H de l'absorbeur de micro-ondes, la distance inter-éléments g , qui est directement contrôlée par la distance $R1$ entre l'origine de la plaque de masse circulaire et le centre de chaque patch, ainsi que le couplage mutuel sont des paramètres de conception critiques. Ces derniers sont détaillés sur la figure III.4.

III.5. Impacts du paramètre H

III.5.1. Impacts sur l'adaptation d'impédance

Pour une valeur fixe de $R1$, si on augmente l'épaisseur H on constate un déplacement de S_{11} légèrement vers le spectre des fréquences inférieures avec également un élargissement de l'adaptation d'impédance, comme illustré sur la fig. III 5.

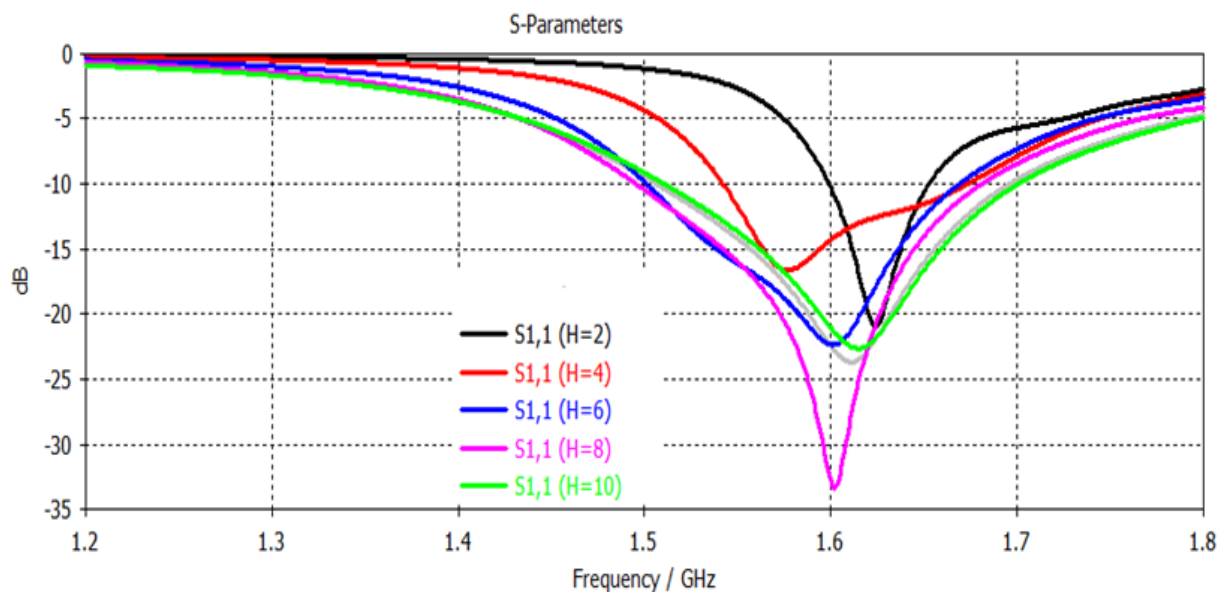


Figure.III. 5 : Impact du paramètre H sur l'adaptation d'impédance.

III.5.2. Impacts du paramètre H sur le gain et le couplage mutuel

Les résultats de simulation tels que présentés sur la FigIII.6, montrent que le gain et le couplage mutuel ont tendance à diminuer avec l'augmentation de H ; on voit aussi que cet impact est plus important lorsque H est situé entre 8 et 10. De même, le rapport axial a tendance à s'élargir avec l'augmentation H , et il devient étroit avec H diminue comme le montre la figIII.8

Chapitre III : Conception d'un réseau d'antennes patch à large bande à 4 éléments compacts à haute isolation pour les applications GNSS réseau d'antennes dans les récepteurs GNSS

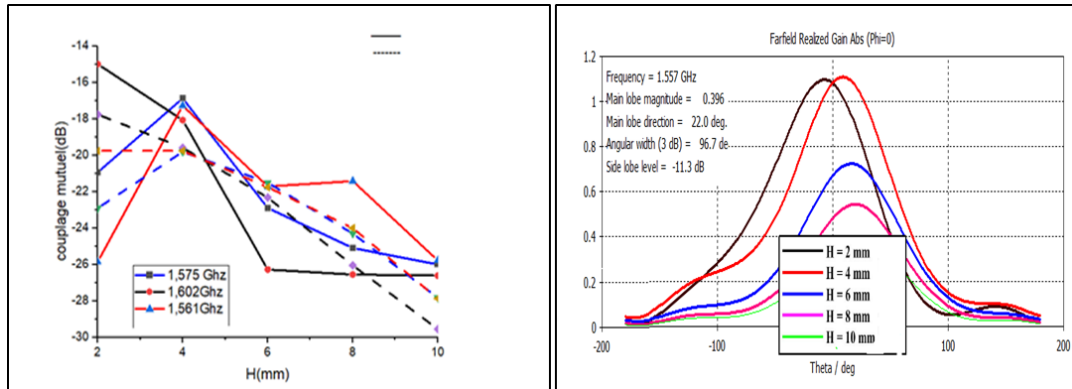


Figure.III. 6 : Impact de H (a) Sur le Couplage mutuel et (b) Sur le gain de l'antenne

III.5.3. Effet du paramètre g sur le gain.

D'après les résultats de simulation montrés sur les figures (III.7) on constate que, comme pour le paramètre H, le gain diminue avec l'augmentation de g.

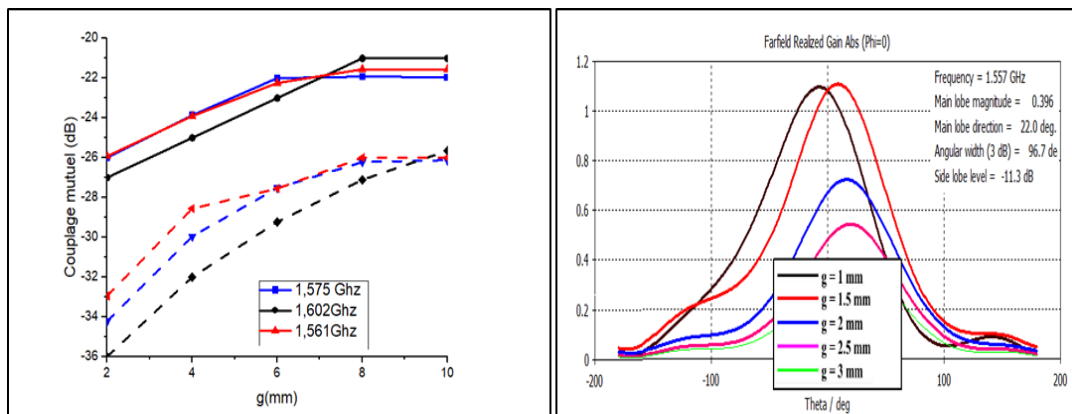


Figure.III. 7 : Impact de g (a) Sur le couplage mutuel (b) Sur le gain de l'antenne.

III.5.4. Optimisation des paramètres

D'après l'étude paramétrique ci-dessus, on voit que la réalisation d'un gain acceptable pour la fréquence désirée de 1,575 GHz on doit choisir H entre 8 et 10 mm et g entre 1,5 et 2,5 mm.

Comme l'épaisseur standard de l'absorbeur de micro-ondes MT-30 disponible dans le commerce est de 3,175X, où X est un nombre entier compris entre 1 et 4, la valeur X=3 (c'est à dire, H=9.525 millimètres) a été choisie dans la conception proposée. Les paramètres de la conception optimisée du réseau d'antennes à 4 éléments sont rassemblés dans le tableau 1

Chapitre III : Conception d'un réseau d'antennes patch à large bande à 4 éléments compacts à haute isolation pour les applications GNSS réseau d'antennes dans les récepteurs GNSS

Table 3 : Paramètres de la conception optimisée.

paramètre	Unité (mm)	paramètre	Unité (mm)
H	9.525	T	5.08
g	1.5	R1	20
s1	32	Δs	6.6
s	25.4	f	5.7

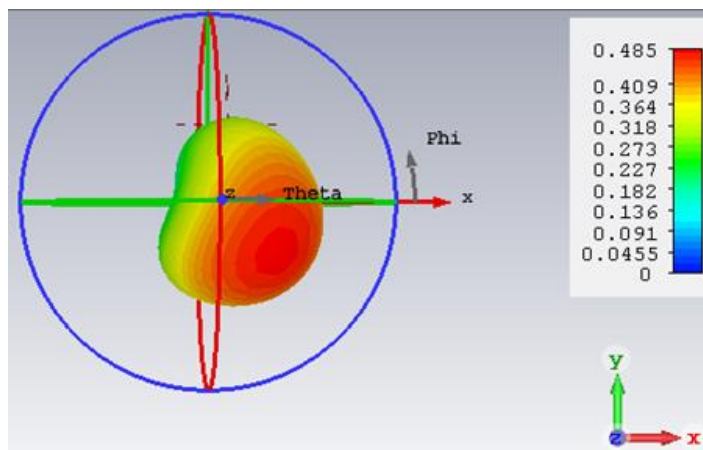


Figure.III. 8 : Gain de l'antenne proposée en 3D.

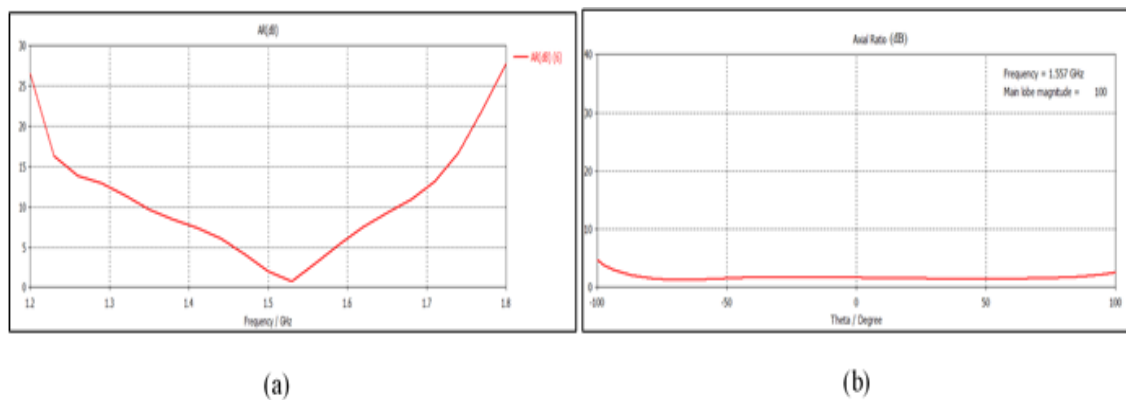


Figure.III. 9 : Rapport axial de l'antenne proposée (a) En fonction de la fréquence (b) En fonction de Thêta

Chapitre III : Conception d'un réseau d'antennes patch à large bande à 4 éléments compacts à haute isolation pour les applications GNSS réseau d'antennes dans les récepteurs GNSS

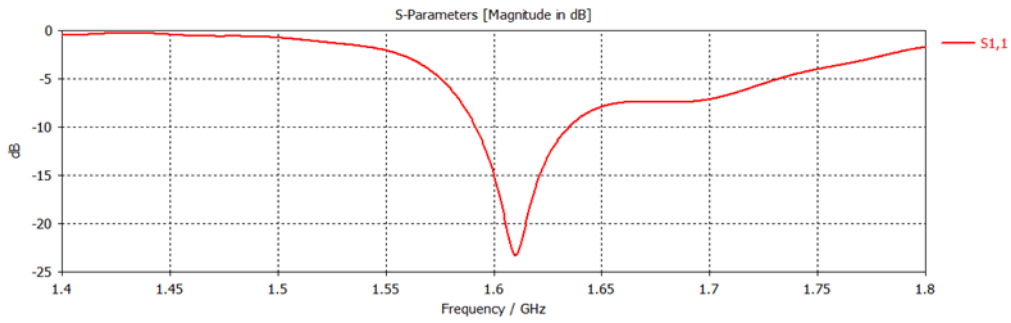


Figure.III. 10 : Réponse d'impédance S_{11}

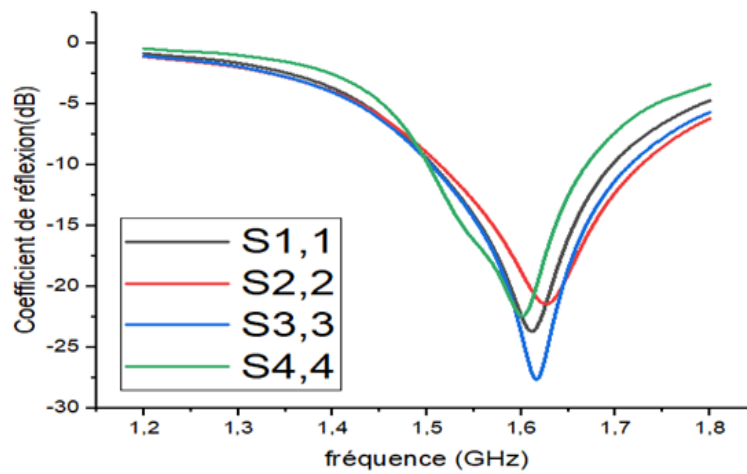


Figure.III. 11 : les performances d'adaptation d'impédance de l'antenne proposée

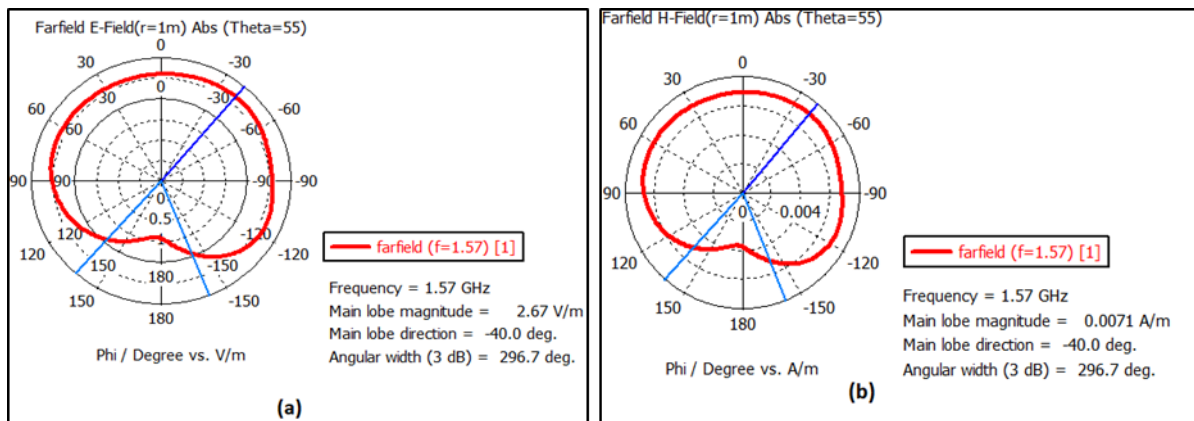


Figure.III. 12 : Diagramme de rayonnement (GPS L1). (a) Plan E. (b) Plan H.

La figure III 12 montre les performances d'adaptation d'impédance de l'antenne proposée. La Fig.III.13 illustre les diagrammes de rayonnement normalisés du plan H et E pour la bande GPS L1 (1,575 GHz) pour un seul élément de l'antenne proposée. Si tous les éléments du réseau sont excités avec un déphasage de 0^0 à chaque port, alors un zéro est formé sur l'axe de visée.

III.6. Etude comparative et commentaires.

Les résultats de simulation présentés sur la figure (III-11) montrent un coefficient de réflexion couvrant toute la plage de fréquences (1,55 à 1,65 GHz) avec une adaptation de l'ordre de -25 dB et un rapport axial inférieur à 3dB. Ces résultats sont en accord avec ceux obtenus dans la référence [39].

Les simulations des diagrammes de rayonnement pour les deux plans E et H, sont aussi très proches de ceux de l'antenne proposée dans [39] ; elles sont caractérisées par un lobe assez large qui est essentiel pour couvrir un nombre de satellites visible satisfaisant pour le positionnement des GNSS MC/MF.

Néanmoins, la valeur du gain trouvée est de 0,46 dB, ce qui est inférieur relativement à celle déterminée dans la référence [39]. Ceci est probablement dû à la qualité du PC utilisé.

Les résultats sur figure (I-23), montre que l'antenne jouie d'une large bande passante de 100 MHz pour chacun des quatre signaux interceptés, ce qui est en accord avec les résultats trouvés dans [39]. Là aussi il faut noter qu'une telle bande passante est bien appropriée pour les récepteurs GNSS.

Concernant le couplage mutuel achevé par la conception simulée, les résultats sur la figure (III-6), montre une valeur inférieure à -25 dB, qui est légèrement meilleure que celle trouvée dans [39]. Cette valeur, bien qu'elle soit la meilleure réalisée jusqu'à l'heure [39], montre la persistance du couplage mutuel et donc ses effets sur la performance de l'antenne. Cette limitation nécessite de poursuivre la recherche de meilleures solutions.

III.7. Conclusion

Ce projet présente une conception de réseau d'antennes compactes à 4 éléments pour les applications GNSS. L'objectif était d'atteindre un faible niveau de couplage mutuel, dans un facteur de forme très compact de seulement 125 mm, la conception utilise une approche économique où quatre éléments d'antenne identiques de 32×32 mm² sont découpés et disposés sur un plan de masse en aluminium. Cela permet de réduire le couplage dû aux ondes de surface. De plus, un matériau absorbant les micro-ondes est utilisé pour minimiser davantage le couplage causé par la propagation des ondes spatiales, la conception proposée présente d'excellentes performances de direction nulle.

Le réseau d'antennes couvre un large spectre de fréquences, de 1,55 à 1,65 GHz, avec un niveau d'isolation élève sur toute cette bande passante. Le rapport axial du réseau conçu est inférieur à 3 dB, ce qui garantit de bonnes performances de polarisation circulaire.

Cette conception de réseau d'antennes compactes à 4 éléments offre un faible couplage mutuel, une large couverture de fréquences de 1,55 à 1,65 GHz, d'excellentes performances de direction nulle et un bon rapport axial. Ces caractéristiques en font une solution prometteuse pour les applications GNSS.

Conclusion générale

Le thème de ce mémoire s'articule essentiellement sur l'utilisation du réseau d'antennes patch large bande à 4 éléments proposés dans la référence [39] comme solution aux nouvelles exigences des applications GNSS MCMF. Dans ce travail, la conception et les résultats s'y afférant ont été étudiés et validés.

Après avoir présenté, dans le premier chapitre les différentes caractéristiques des antennes et plus particulièrement celles de l'antenne patch, nous avons consacré le deuxième chapitre à l'étude générale des systèmes GNSS suivi de l'explication de la problématique visée au sein de ces systèmes. Par la suite, un état de l'art concernant l'utilisation des réseaux d'antennes dans les récepteurs GNSS a été présenté dans ce même chapitre.

Dans le troisième chapitre, ont été rassemblés les résultats de simulation trouvés à l'aide du logiciel CST. Ces derniers ont été commentés et comparés à ceux de la référence validée. La dimension de chaque patch est seulement de $32 \times 32 \times 5.08 \text{ mm}^3$, ce qui offre une bonne compacité à l'antenne proposée. L'antenne dispose d'une large bande passante de 100 MHz (1.55 - 1.65 GHz). Le rapport axial obtenu ($< 3 \text{ dB}$) confirme la polarisation circulaire de l'antenne. L'effet du couplage mutuel, bien qu'il représente un obstacle majeur pour ce type d'antennes, a pu être réduit à des niveaux acceptables en optimisant les paramètres H et g. Les angles d'ouverture à -3dB donnés par les diagrammes de rayonnement sont assez larges ($\approx 280^\circ$), ce qui convient aux applications GNSS qui intercepte un nombre important de satellites visibles. Le gain simulé ($= 0,47 \text{ dB}$) est inférieur à celui trouvé dans [39] ($= 4,96 \text{ dB}$). Les coefficients de réflexion des différentes porteuses sont tous très inférieurs à -10dB et présentes une meilleure adaptation que ceux de la référence [39].

Bibliographie

- [1] C. Balanis, "Antenna Theory: Analysis and Design", 3rd Edition, Wiley- Inter science, 2005.
- [2] O. Picon, Coll les antennes, Théorie, conception et application l'usine du nouvelle, Dunod, 2009.
- [3] A. Ducros les antennes, théorie et pratique .Soracom, 1989.
- [4] https://www.techno-science.net/glossaire-definition/Antenne-radioelectrique.html#ref_2
- [5] H.chorfi université du québec en Abitibi Témiscamingue, conception d'un nouveau système d'antenne réseau conforme en onde millimétrique, mai2012
- [6]D. M. Pozar, "Microwave and RF wireless Systems ", United States of America, John Wiley & Sons, 2001.
- [7] https://www.passeidireto.com/arquivo/1061856/mini-curso-de-antenas?unloggedCheckout=OUT_OF_TEST
- [8]B. Jamel Institut Supérieur des Etudes Technologiques de Nabeul Tunisie, Support du cours, Décembre 2014
- [9] Constantine A. Balanins {Antenna Theory: Analysis and Design} April 1982
- [10] F. Daout, S. Jacquet, X. Durocher, Conception, Simulation, Réalisation et mesure d'une antenne imprimée rectangulaire 2.4 GHz, IUT Ville d'Avray,
- [11] Z. Ahmed « Polycopié de Cours, Antennes, Maître de Conférences Classe B », Septembre, 2018.
- [12] Res PO5 polarisation des oem 2015 sites Lycée Champollion PC
- [13] J. Ledig -Hal open science électromagnétisme et optique géométrique, poly Tech Nancy 2A, correction du TD2 2019/2020
- [14] R. Mohamed Lamine, « Modélisation et simulation des antennes en onde Millimétrique à base de méta matériaux », Université Ziane Achour de Djelfa Faculté des Sciences et de la Technologie2013-2014.
- [15] F. Daout, « Conception, Simulation, Réalisation et mesure d'une antenne imprimée rectangulaire 2.4 GHz » IUT Ville d'Avray, Dep GEII, 50 rue de Sèvres, 92410 Ville D'avray
- [16] Y Daher, "Antenne – Cours Universitaire" Université Libanaise, Faculté de Génie, Branche
- [17] M. Hassad, "Modélisation d'une antenne patch réalisée sur un substrat à tenseur de permittivité et de perméabilité diagonaux ", thèse, Université de Batna, Juin.2009.
- [18] A. balanis, "antenna theory analysis and design," Fourth edition John Wiley & Sons, 2016
- [19] A. Belguessoum, " Conception Et Réalisation D'une Antenne Multi bandes Alimentée Par Un Guide D'onde Coplanaire CPW", Thèse, Université D'Ottawa, 2008
- [41] : livre : Odile Picon et coll. 'LES ANTENNES'
- [20] J.L. Allen A theoretical Limitation on the Formation of Lossless Multiple Beams in Linear Arrays IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 9, No. 7, pp. 350-352, Juillet 1961.
- [21] D. K., Cheng, M. T. Ma A New Mathematical Approach for Linear Array Analysis IRE Trans., Antennas Propagat. Vol. AP-8, pp. 255–259, Mai 1960.
- [22] D. E. N. Davies Circular Arrays: "Their Properties and Potential Applications IEE Second International Conference on Antennas and Propagation", pp. 1–10, April 1981

- [23] T. Y. Lo, H. C. Hsuan "an Equivalence Theorem between Elliptical and Circular Arrays IEEE Transactions on Antennas and Propagation", Vol. AP-13, pp. 247–256, Mars 1965
- [24] O. A. Civil, P. H. Pathak, P. Janpugdee' and B. A. Mu "Surface Waves On A Finite Planar Dipole Array In Free Space IEEE Trans". Antenna Propogate pp 78-81, 2002.
- [25] R.J.Mailloux Phased Array Antenna Handbook, Second Edition Artech House, Inc, 2005.
- [26] L. Josefsson, P. Persson "Conformal Array Antenna Theory and Design. IEEE antenna and propagation society", Wiley-Interscience 2006.
- [27] T.A. Milligan Modern Antenna Design, second edition John Wiley & Sons, Inc, 2005
- [28] Rappaport, T. S. (2019). Wireless communications: principles and practice. Pearson Education.
- [29] A Jain S. Kumar Article: "Characteristics of Patch Antenna Arrays and Their Synthesis Techniques", publié dans le journal "International Journal of Antennas and Propagation" en 2015.
- [31]GNSS Signal-Navipedia. Available : https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/GNSS_signal. Accessed: Sep. 9, 2021 [Online].
- [32] A. A. Althuwayb, "Low-interacted multiple antenna systems based on metasurface-inspired isolation approach for MIMO applications," *Arabian J. Sci. Eng.*, pp. 1–10, May 2021.
- [33] H. chorfi, « Conception D'un Nouveau Système D'antenne Réseau Conforme En Onde Millimétrique », Université Du Québec En Abitibi-Témiscamingue, Mai 2012.
- [33] A. A. Althuwayb, "Low-interacted multiple antenna systems based on metasurface-inspired isolation approach for MIMO applications," *Arabian J. Sci. Eng.*, pp. 1_10, May 2021.
- [34] M. Alibakhshikenari, B. S. Virdee" A comprehensive survey of `metamaterial transmission-line based antennas: Design, challenges, and applications,"*IEEE Access*, vol. 8, pp. 144778_144808, 2020.
- [35] K. Wu, L. Zhang, Z. Shen, "An anti-jamming 5-element GPS antenna array using phase-only nulling," in *Proc. 6th Int. Conf. ITS Telecomm.*, Jun. 2006, pp. 370_373.
- [36] G. Byun, "Design of a small arc-shaped antenna array with high isolation for applications of controlled reception pattern antennas," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 64, no. 4, pp. 1542_1546, Apr. 2016.
- [37] Y. Liu, "A high-temperature stable antenna array for the satellite navigation system," *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.* vol. 16, pp. 1397_1400, 2017.
- [38] B. R. Rao "Characterizing the effects of mutual coupling on the performance of a miniaturized GPS adaptive antenna array," in *Proc. 13th Int. Tech. Meeting Satell. Division Inst. Navigat. Salt lake City, UT, USA*, Sep. 2000, pp. 2491_2498.
- [39]M .awais, M. ABDULLAH (Member, IEEE) « Design of a Compact High Isolation 4-Element Wideband Patch Antenna Array for GNSS Applications » February 7, 2022.
- [40] A. Z. Narbudowicz, "Advanced circularly polarised microstrip patch antennas," Ph.D. dissertation, Dublin Inst. Technol., Dublin, Ireland, 2013.