

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

UNIVERSITE MOHAMED EL-BACHIR EL-IBRAHIMI- BORDJ BOU ARRERIDJ

FACULTE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE



MEMOIRE de MASTER

FILIERE : TELECOMMUNICATION

SPECIALITE : SYSTEMES DE TELECOMMUNICATIONS

THEME

**Etude de conception d'une antenne compacte multi-bandes à
polarisation circulaire**

Présenté par le binôme :

Yalaoui Imane

Azzoug Anfel

Évalué le : 03/07/2023

Par la commission composée de

Président : Pr. AIDEL Salih

MCA

Examineur : Dr. BEHIH Mohamed

MCA

Encadrant : DR. ATIA Salim

MCA

Année Universitaire : 2022/2023

Dédicace

Je dédie ce travail

À bon dieu qui m'a donné la patience et le courage de continuer sans cesse et de réaliser ce travail modeste

À ma famille, elle, qui m'a doté d'une éducation digne, son amour a fait de moi ce qui je suis aujourd'hui

À mes parents qui ont été toujours à mes cotées

À mon frère et mes sœurs

À mes meilleures amies : Dounia, Aya, Sara, Manel, Belkis, Yousra et Yazid.

À mon binôme et meilleure amie Anfel.

À notre cher encadrant Dr. Attia Salim

À tous les professeurs qui m'ont enseigné tout au long de mon parcours Académique.

À tous ceux que j'aime

Yalaoui Imane

Dédicace

Tout d'abord, je tiens à remercier DIEU

De m'avoir donné la force et le courage de mener à bien ce modeste travail.

Je tiens à dédier cet humble travail à :

Ma tendre mère Farida et mon cher père Kamel

Mes sœurs : Chaima, Israa

Toute ma famille

Imane, chère amie avant d'être binôme

Mes meilleurs amis :

Wafa, Ferial, Katia, Houda, Sara, Amina, Zina, Dalel, Ahlem, Hadjer, wissal, Rihem, Maroua,

Chafika, Meriem, Yazid et Issam.

Spécial dédicace à notre cher encadreur :

Dr Salim Attia

Tous ceux qui m'aiment et que j'aime

Azzoug Anfel

Remerciement

Nous remercions tout d'abord Dieu le tout puissant qui nous a accordé la volonté et le courage pour l'accomplissement de ce travail.

Nous exprimons nos remerciements avec un grand plaisir et un grand respect à notre cher encadrant Dr Attia Salim qui nous a proposé le sujet de ce mémoire, pour sa disponibilité, sa gentillesse, son soutien et ses encouragements, nous ne le remercions jamais assez.

Nous remercions également tous nos professeurs pendant notre cursus universitaire au sein de l'université de Mohamed El Bachir El Ibrahimi pour leur soutien et leur accueil chaleureux et sympathique.

Nous tenons à remercier également les membres du Jury pour avoir accepté d'examiner ce travail.

Et, pour toutes les raisons possibles et imaginables, nous ne remercierons jamais assez nos parents pour leur dévouement.

Encore un dernier remerciement à toute personne qui a contribué de près ou de loin dans la réussite de ce modeste travail.

Merci infiniment

Résumé

Ce travail présente l'étude et l'analyse de la conception d'une antenne à patchs empilés multi-bandes de polarisation circulaire dédiée aux applications GNSS aux bandes L5, L2 et L1 et aux systèmes de communication cellulaires 5G sur la fréquence 2,3 GHz. Le logiciel CST a été utilisé pour concevoir l'antenne proposée et valider les résultats s'y afférant. Les résultats des différentes caractéristiques de l'antenne ont permis de valoriser la qualité de performance de l'antenne. Sa bonne adaptation d'impédance, sa bande passante de rapport axial et ses caractéristiques de rayonnement aux quatre bandes de fonctionnement ciblées qualifient cette antenne d'être un bon candidat pour les GNSSs actuels et futurs, et les application 5G/B5G.

Abstract

This work presents the study and analysis of the design of a circularly polarized multi-band stacked patch antenna dedicated to GNSS applications at the L5, L2 and L1 bands and to 5G cellular communication systems on the 2.3 GHz frequency. The CST software was used to design the proposed antenna and validate the related results. The results of the different characteristics of the antenna made it possible to enhance the performance quality of the antenna. Its good impedance matching, axial ratio bandwidth and radiation characteristics at the four targeted operating bands qualify this antenna as a good candidate for current and future GNSSs, and 5G/B5G applications.

ملخص

يقدم هذا العمل دراسة وتحليل تصميم هوائي ذورقعات مكدسة متعدد النطاقات مستقطب دائريًا مخصصًا لتطبيقات GNSS في نطاقات L5 و L2 و L1 وأنظمة الاتصالات الخلوية G5 على تردد 2.3 GHz. تم استخدام برنامج CST لتصميم الهوائي المقترح والتحقق من النتائج ذات الصلة. أتاحت نتائج الخصائص المختلفة للهوائي تحسين جودة أداء الهوائي. إن مطابقة الممانعة الجيدة وعرض النطاق الترددي للنسبة المحورية وخصائص الإشعاع في نطاقات التشغيل الأربعة المستهدفة تؤهل هذا الهوائي ليكون مرشحًا جيدًا لتطبيقات GNSSs الحالية والمستقبلية وتطبيقات 5G/B5G.

Sommaire

Introduction générale	1
I.1 Introduction.....	4
I.2 Technologie réseau mobile « 5G ».....	4
I.2.1 Définition	4
I.2.2 Objectif de la 5G.....	5
I.2.3 Architecture du réseau 5G.....	5
I.2.4 Fréquences utilisés.....	6
I.3 Systèmes de positionnement par satellites	7
I.3.1 Définition	7
I.3.2 Principe du positionnement.....	8
I.3.3 Récepteur GNSS	8
I.3.4 GNSS Multi-Constellation/Multifréquences	9
I.4 Les Signaux GNSS	9
I.4.1 Signaux GPS	9
I.4.2 Signaux Galileo.....	10
I.4.3 Signaux Glonass	10
I.4.4 Signaux Beidou.....	10
I.5 Antennes patch.....	11
I.5.1 Définition	11
I.5.2 Structure	11
I.5.3 Techniques d'alimentation.....	12
I.5.4 Caractéristiques de l'antenne Planaire	13
I.5.4.1 Paramètres électriques	13
I.5.4.2 Paramètres de rayonnement	15
I.6 Conclusion.....	17
II.1 Introduction.....	19
II.2 Antennes multi-bandes.....	19
II.2.1 Définition	19
II.2.2 Avantages.....	20
II.2.3 Inconvénients.....	20
II.2.4 Technique de patchs empilés	20
II.3 Polarisation circulaire	21

II.3.1 Définition	21
II.3.2 Trajet multiples.....	22
II.4 Etat de l'art	23
II.5 Conclusion	30
III.1 Introduction	32
III.2 Structure et caractéristiques de l'antenne proposée.....	32
III.3 Conception de l'antenne proposée	33
III.4 Signaux interceptés par l'antenne	33
III.5 Résultats de simulation et discussion	35
III.5.1 Coefficient de réflexion.....	36
III.5.2 Rapport axial	37
III.5.3 Diagramme de rayonnement	38
III.5.4 Gain.....	40
III.6 Étude paramétrique	40
III.6.1 Effet de la coupure angulaire du patch	40
III.6.2 Effet de surface du plan de masse.....	41
III.7 Conclusion.....	42
Conclusion générale.....	43

Liste des figures

FIGURE I.1 COMPARAISON 4G/5G [2].....	5
FIGURE I.2 CE QUI EST FAIT AUJOURD'HUI EN UNE MINUTE SUR INTERNET [3].	5
FIGURE I.3 ARCHITECTURE DU RESEAU 5G [4].	6
FIGURE I.4 ARCHITECTURE FONCTIONNELLE DU RESEAU 5G [4].	6
FIGURE I.5 SPECTRE DES FREQUENCES 5G [5].	7
FIGURE I.6 PRINCIPE DE POSITIONNEMENT PAR SATELLITES D'UN RECEPTEUR [8].	8
FIGURE I.7 GNSS ET SES DIFFERENTES BANDES DE FREQUENCE [13].....	10
FIGURE I.8 GEOMETRIE D'UNE ANTENNE PATCH [14].....	11
FIGURE I.9 STRUCTURE DE L'ANTENNE PLANAIRE.....	11
FIGURE I.10 PATCH AVEC UNE ALIMENTATION PAR LIGNE MICRO RUBAN.....	12
FIGURE I.11 ALIMENTATION PAR SONDE COAXIALE.	12
FIGURE I.12 ALIMENTATION PAR UNE SONDE COAXIALE [17].....	12

FIGURE I.13 METHODE D'ALIMENTATION PAR COUPLAGE DE PROXIMITE [18].	13
FIGURE I.14 ILLUSTRATION DU COEFFICIENT DE REFLEXION EN ENTREE D'UNE ANTENNE.	13
FIGURE I.15 DIAGRAMMES DE RAYONNEMENT : A) 2D POLAIRE B) 2D CARTESIEN C) 3D.	16
FIGURE I.16 LES TROIS TYPES DE LA POLARISATION.	16
FIGURE II.1 POLARISATION CIRCULAIRE [25].	22
FIGURE II.2 LES DEUX SENS DE LA POLARISATION CIRCULAIRE [26].	22
FIGURE II.3 TRAJETS MULTIPLES DE SIGNAUX GNSS.	23
FIGURE II.4 GEOMETRIE DE L'ANTENNE DE PC A PATCH EMPILEES PROPOSEE MONTRANT : (A) VUE LATÉRALE ; (B) PATCH SUPÉRIEUR ; (C) PATCH CENTRAL ; ET (D) PATCH INFÉRIEUR.	24
FIGURE II.5 COEFFICIENTS DE REFLEXION MESURES ET SIMULES DE L'ANTENNE PROPOSEE.	25
FIGURE II.6 RAPPORT AXIAL SIMULE DE L'ANTENNE PROPOSEE	26
FIGURE II.7 (A) DIAGRAMME DE RAYONNEMENT TOTAL (LP) MESURE ET SIMULE A : A) 1,176; B) 1,227; C) 1,575 GHz. (B) MODELE DE RAYONNEMENT SIMULE AUX PLANS X-Z ET Y-Z DE L'ANTENNE PROPOSEE A : A) 1,176; B) 1,227; C) 1,575 GHz.	26
FIGURE II.8 TRACE CARTESIEN (AR) DE L'ANTENNE PROPOSEE MONTRANT UN FAISCEAU PLUS LARGE DANS L'HEMISPHERE SUPÉRIEUR.	27
FIGURE II.9 GEOMETRIE DE LA STRUCTURE PROPOSEE ET SES DIMENSIONS.	28
FIGURE II.10 COEFFICIENT DE REFLEXION SIMULE DE LA STRUCTURE PROPOSEE.	29
FIGURE II.11 DIAGRAMMES DE GAIN D'ELEVATION LHCP ET RHCP DE L'ANTENNE DE RACCORDEMENT EMPILEE A 1,55 GHz.	29
FIGURE II.12 DIAGRAMMES DE GAIN D'ELEVATION LHCP ET RHCP DE L'ANTENNE DE RACCORDEMENT EMPILEE A 2.33 GHz.	29
FIGURE III 1 GEOMETRIE DE L'ANTENNE PROPOSEE (VUE DE DESSUS).	34
FIGURE III 2 REPOSE SIMULEE DU COEFFICIENT DE REFLEXION POUR CHAQUE BANDE.	36
FIGURE III 3 RAPPORT AXIAL SIMULE DE L'ANTENNE PROPOSEE.	37
FIGURE III 4 DIAGRAMMES DE RAYONNEMENT LHCP ET RHCP SIMULES.	39
FIGURE III 5 GAIN SIMULE POUR L'ANTENNE PROPOSEE.	40
FIGURE III 6 EFFET DE LONGUEUR DE LA DIMENSION TPCUT SUR LE COEFFICIENT DE REFLEXION.	41

FIGURE III 7 EFFET DE LONGUEUR DU PLAN DE MASSE	42
---	----

Liste des tableaux

TABLEAU III.1 CAHIER DES CHARGES.	35
TABLEAU III.2 LES DIMENSIONS DE L'ANTENNE CONÇUE.....	35
TABLEAU III.3 BANDES PASSANTES DES SIGNAUX L5, L2, L1, G5.	37
TABLEAU III.4 SOMMAIRE DU RAPPORT AXIAL DE L'ANTENNE SIMULEE.	38

Liste des abréviations

5G : cinquième génération

GNSS : global navigation satellite systems

CST : computer simulation technology

2G : deuxième génération

3G : troisième génération

4G : quatrième génération

gnb: gNodeB

ng-eNB: next generation eNodeB

AMF: Access and Mobility Management Function

UPF: User Plan Function

Ng-RAN: next generation Radio Access Network

TDD: time-division duplex

FDD: frequency-division duplex

ARCEP : Autorité de régulation des communications électroniques, des postes et de la distribution de la presse

GPS: Global Positioning System

Glonass: Globalnaya Navigazionnaya Sputnikovaya Sistema

ASIC: application-specific integrated circuit

MC: Multi-Constellations

MF: Multifréquences

code SPS: Standard Positioning Service

PPS: Precise Positioning Service

W: width

L : length

H : height

ROS : rapport d'ondes stationnaires

VSWR: voltage standing wave ratio

BP : bande passante

TOS : taux d'onde stationnaire

RHCP: right hand circular polarization

LHCP: left hand circular polarization

TM : trajets multiples

MIMO : Multiple Input Multiple output

CDMA : Code-Division Multiple Access

PC : Polarisation circulaire

DB : décibel

RA : Rapport axial

RHCP: Right-Hand Circular Polarization

LHCP: Left-Hand Circular Polarization

VLP : Polarisation Linéaire Verticale

SDARS : Satellite Digital Audio Radio Systems

FIT : Finit Intégration Technique

3D: Three dimensions

B5G: Beyond 5G

QZSS: Quasi-Zenith Satellite System

gnd: ground plane

Lp: Lower patch

Mp: Middle patch

Up: Upper patch

Tp : Topmost patch

Introduction générale

En raison de la forte demande de la population et du secteur industriel civil et militaire, les services fournis par les systèmes globaux de navigation par satellites (GNSS pour Global Navigation Satellite System en anglais) et les communications cellulaires de la 5G ont connus des progrès technologiques faramineux. D'un autre côté, en plus du GPS (Américain), plusieurs nouveaux systèmes ont vu le jour, notamment : GLONASS (Russe), Beidou (Indien) et Galiléo (Européen). Ainsi, le nombre de constellations et par conséquent le nombre de signaux GNSS (multi-constellation) disponibles sur différentes porteuses (multifréquences) et occupant différentes bandes (multi-bandes) de fréquences a considérablement augmenté [8].

Cette nouvelle conjoncture n'a pas laissé les chercheurs indifférents. D'un côté, il fallait profiter au maximum de la grande quantité de satellites visibles par chaque récepteur GNSS pour améliorer la précision du positionnement, et d'un autre côté, on doit développer de nouveaux récepteurs qui peuvent s'adapter à la nouvelle technologie des GNSS. Dans ce travail, on s'intéresse plus spécifiquement aux antennes miniatures utilisées dans les récepteurs GNSS. Ces dernières se contentaient, autrefois, des conceptions d'antennes patchs classiques, à bande étroite et mono-bande qui étaient simples et compactes. Actuellement, ce type d'antenne est dépassé et c'est la nouvelle architecture d'antenne patch multi-bande destinée aux signaux multifréquences et multi-constellation qui s'impose.

Désormais, la conception de ce nouveau type d'antenne ne peut être réalisée sans prendre en compte certain problèmes qui peuvent la compromettre à savoir, ceux liés à la largeur de la bande passante, la compacité, le maintien de la polarisation circulaire, l'angle d'ouverture, etc. C'est dans ce contexte que se situe la problématique visée par ce travail. Parmi les nouvelles techniques d'architectures d'antennes adoptées comme solutions il y-a la structure de l'antenne multi-bandes à patchs empilés. L'objectif de ce travail consiste à valider, étudier et analyser la conception d'une antenne multi-bande à patch empilés avec polarisation circulaire, destinée aux applications des bandes GNSS L1(1.575 GHz), L2 (1.227 GHz) et L5 (1.176 GHz) et de la bande 2,3 GHz de la 5G [7].

Ce travail se compose de trois chapitres :

Dans le premier chapitre on expose dans un premier temps les caractéristiques générales des communications cellulaire 5G et des systèmes de navigation par satellites. Cette partie est suivie d'une étude détaillée des bandes de fréquences et des signaux alloués à chacune de ces technologies. Ensuite, on termine avec la présentation des antennes patchs et de leurs caractéristiques théorique et pratiques.

Le deuxième chapitre est consacré tout d'abord aux antennes patch multi-bandes et les différents paramètres déterminant dans la conception d'antenne à patch empilés. Par la suite, on enchaîne avec l'état de l'art concernant la solution proposée.

Le troisième chapitre est dédié à la présentation et la discussion des résultats de simulation obtenus après validation.

Finalement on termine par une conclusion générale.

Chapitre I

Les antennes patch dans les systèmes GNSS et 5G.

I.1 Introduction

Depuis que le progrès de la technologie a fourni une connectivité sans précédent et une large gamme de services librement disponibles, les télécommunications ont joué un rôle crucial dans notre société, changeant la façon dont nous interagissons et communiquons avec ceux qui nous entourent.

Dans ce monde numérique toujours changeant, deux technologies émergentes se démarquent : la 5G (cinquième génération des réseaux mobiles) et le GNSS (Global Navigation Satellite System). L'indépendance entre les deux domaines ne les empêche pas d'être convergents quant aux nouvelles opportunités qu'ils offrent dans la connectivité et la localisation.

Dans ce chapitre, on commencera par définir ces deux technologies de communication sans fil, tout en donnant les caractéristiques correspondantes à chacune d'elles. Par ailleurs, une attention particulière sera donnée aux signaux et aux bandes passantes des deux techniques. Enfin, on se penchera sur les antennes patchs utilisées dans le récepteur 5G et GNSS et les nouvelles exigences dans leur conception compte tenu des nouveaux progrès. Ensuite on parlera des antennes patchs, leurs structures, caractéristiques et techniques d'alimentation.

I.2 Technologie réseau mobile « 5G »

I.2.1 Définition

La 5G est la 5ème génération de technologie réseau mobile conçue pour répondre à la croissance faramineuse des données et à la connectivité de la société moderne [1]. Celle-ci est survenue après quatre versions précédentes :

- La première génération « 1G » en 1986 qui permettait de passer simplement des appels.
- La 2G, au début des années 1990, qui pouvait envoyer des SMS ou des photos.
- La 3G en 2004, qui permettait de surfer sur le web et d'envoyer des MMS via son téléphone.
- La 4G en 2011 permettant le développement d'internet mobile plus largement et avec une plus grande rapidité.

La 5G, quand-à-elle, est en mesure de faire un saut de performance en termes de débit (multiplié par 1000), de délai de transmission (divisé par 45) et de fiabilité de la communication [2].

I.2.2 Objectif de la 5G

L'objectif de la 5G est d'améliorer les performances des réseaux de communication sans fil actuels en offrant des taux de transfert de données plus rapides, une latence plus faible, une plus grande capacité de réseau et une connectivité plus fiable pour répondre aux besoins de plus en plus complexes des utilisateurs et des entreprises [3]. De ce fait, elle permet de gérer une large gamme d'appareils et d'applications connectés telle que montrée sur la figure I.1, de l'autonomie-véhicules et villes intelligentes à la réalité virtuelle et augmentée, en passant par la télémédecine et la communication industrielle avancée [3].

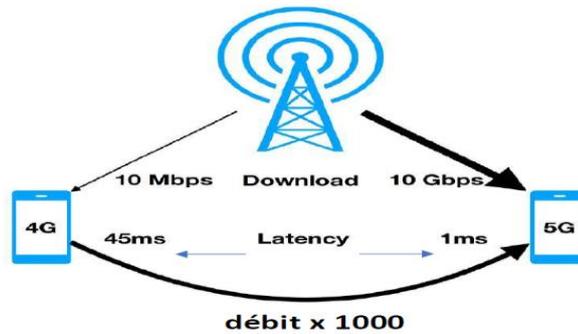


Figure I.1 comparaison 4G/5G [2].



Figure I.2 Ce qui est fait aujourd'hui en une minute sur internet [3].

I.2.3 Architecture du réseau 5G

La figure I.3 présente le schéma de l'architecture simplifiée du réseau 5G. les stations de base sont soit des gNB (5G NodeB) qui fournissent l'utilisateur du plan et des terminaisons de protocole de contrôle, soit des ng-eNB (next generation eNodeB) qui fournissent ces terminaisons.

L'interface Xn assure l'interconnexion entre les stations gNB et ng-eNB. Le réseau d'accès de nouvelle génération NG-RAN (Next Generation-Radio Access Network) est constitué par l'ensemble de ces stations. Les fonctions réseau AMF (Access and Mobility Management Function) et UPF (User Plan Function) du cœur permettent l'interconnexion des gNB et ng-eNB avec le réseau cœur (5GC, 5G Core) via l'interface NG [4].

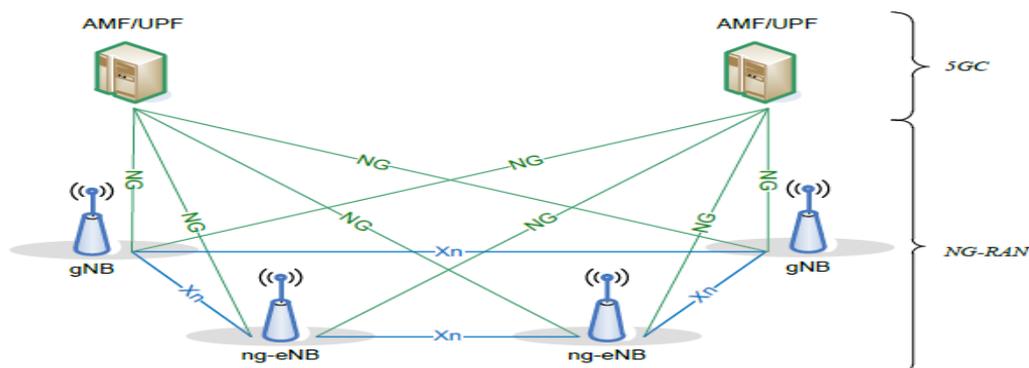


Figure I.3 Architecture du réseau 5G [4].

Les fonctions du réseau cœur qui s'interfaçent avec le réseau d'accès sont AMF et UPF. Les autres fonctions du réseau cœur sont représentées sur la figure I.4 [4].

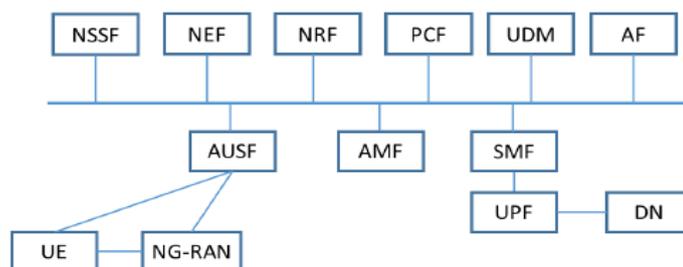


Figure I.4 Architecture fonctionnelle du réseau 5G [4].

I.2.4 Fréquences utilisés

Afin de bien couvrir l'ensemble des populations, les réseaux de téléphonie mobile cherchent un équilibre entre les bandes basses et les bandes hautes pour assurer une bonne capacité dans les zones où les demandes de trafic sont les plus importantes. La 5G pourra être déployée sur une gamme de fréquences plus large, en réutilisant le spectre déjà alloué pour la téléphonie mobile, notamment les bandes basses autour de 1 GHz, pour une couverture optimale. De plus, de nouvelles bandes de fréquences seront attribuées, notamment dans les bandes millimétriques,

qui permettront d'augmenter la capacité (la figure I.5) et seront utilisées pour la première fois pour des services grand public [5].

Actuellement, les opérateurs mobiles français disposent de cinq bandes toutes technologies (2G, 3G et 4G) confondues : 800, 900, 1800, 2100 et 2600 MHz. Ils disposeront chacun d'ici peu d'une partie de la bande 700 MHz qui pourra être utilisée pour la 4G mais aussi pour la 5G .

La bande L (bande 32) devrait être la future bande de fréquences mise aux enchères en France qui sera utilisée pour la 4G ou la 5G. Elle n'est toutefois pas toute seule, puisque les bandes 2,6 GHz TDD (bande 38) et 2,3 GHz TDD (bande 40) devraient la suivre de près [6].

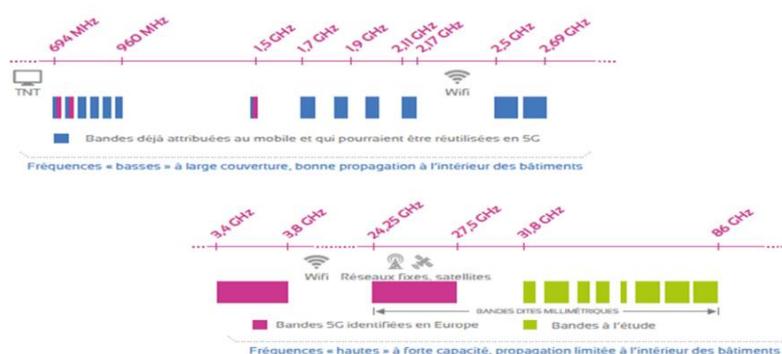


Figure I.5 Spectre des fréquences 5G [5].

La bande 2,3 GHz prise en charge par l'antenne conçue dans la référence [7] et qui fera l'objectif du troisième chapitre, pourrait être utilisée en mode TDD en France – contrairement au mode FDD des bandes actuelles. Cette bande est actuellement utilisée par l'ARCEP (pour les radios amateurs ou les liaisons vidéo mobiles) ainsi que le ministère de la Défense [6].

I.3 Systèmes de positionnement par satellites

I.3.1 Définition

Les systèmes de navigation par satellites sont connus par le sigle GNSS (Global Navigation Satellite Systems). De tels systèmes à couverture mondiale diffusent des signaux de l'espace avec des informations de positionnement et de synchronisation. Ces signaux sont captés par des récepteurs qui utilisent ensuite ces renseignements pour déterminer avec précision leur vitesse, le temps ainsi que leur emplacement géographique en termes de longitude, de latitude et de hauteur [8]. Le premier système qui a vu le jour dans le début des années 80, est le GPS (Global

Positioning System) (Américain). Actuellement, plusieurs autres systèmes de positionnement sont installés, notamment, GLONASS (Russe), Galileo (Européen), Beidou (Chinois), ... Chacun de ces systèmes dispose de sa propre constellation de satellites, en orbite autour de la terre, de ses propres bandes de fréquences et, donc, ses propres signaux.

I.3.2 Principe du positionnement

La figure I.6 illustre le principe du positionnement des GNSS. Pour un positionnement standard par un GNSS, on doit utiliser au minimum quatre satellites visibles. Les signaux interceptés permettront de déterminer 4 inconnues [8] :

- Trois inconnues de position en trois D (x,y,z), dans un repère géocentrique, lié à un système de référence propre au GNSS ;
- Une inconnue de temps, liée à la désynchronisation du récepteur avec le temps GNSS.

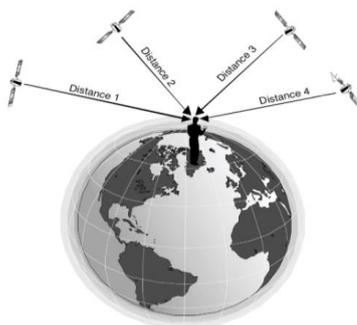


Figure I.6 Principe de positionnement par satellites d'un récepteur [8].

I.3.3 Récepteur GNSS

Un appareil récepteur GNSS combine du matériel spécialisé avec des fonctions logicielles sophistiquées afin qu'il puisse être capable de recevoir les différents signaux émis par plusieurs satellites du GNSS, et d'exécuter diverses opérations nécessaires pour déterminer le temps, la vitesse et la position de l'utilisateur. L'architecture du récepteur conventionnel GNSS est basée sur une antenne reliée à une série de circuits intégrés spécifiques (ASIC); le tout est contrôlé par un processeur central. La combinaison entre les parties matérielle et logicielle réalise toutes les fonctions du récepteur [9].

Dans le cadre de la conception des récepteurs GNSS, il est primordial d'améliorer sans cesse ces différentes composantes à leur tête l'antenne réceptrice à l'entrée, qui fait l'objet de notre travail.

I.3.4 GNSS Multi-Constellation/Multifréquences

Après le GPS et avec l'avènement des nouveaux GNSS (GPS, GLONASS, Galileo, Beidou...), la situation a totalement changé ; on s'est retrouvé avec une panoplie de constellations offrant une plus grande diversité de signaux visibles pour chaque satellite. Comme conséquence, dans le domaine des fréquences allouées, on trouve d'un côté, des bandes partagées par plusieurs systèmes et, d'un autre côté un nombre de bandes (c'est-à-dire de fréquences porteuses) beaucoup plus important.

Cette nouvelle situation, connue sous le nom de GNSS Multi-Constellations/Multi-Fréquences (MCMF), a incitée les chercheurs à concevoir continuellement de nouvelles conceptions pour le récepteur GNSS et en ce qui nous concerne l'antenne « front end » qui lui soit adaptée.

I.4 Les Signaux GNSS

Les signaux utilisés par les différents systèmes GNSS existants ou opérationnels sont rassemblés sur la figure I.7.

I.4.1 Signaux GPS

- Chaque satellite GPS émet en permanence sur deux fréquences différentes : L1 et L2 en plus du nouveau signal L5 à usage civil. [10].
 - **Bande L1** : de fréquence 1575.42 MHz, elle est utilisée couramment dans toutes les applications civiles fondées sur le GPS et est utilisée pour le message de navigation et les signaux du code SPS (Standard Positioning Service).
 - **Bande L2** : de fréquence 1227,60 MHz, elle est principalement destinée aux forces armées et agences gouvernementales américaines. Elle est utilisée dans le service PPS (Precise Positioning Service) qui est peut effectuer une correction des erreurs ionosphériques grâce aux mesures bi fréquence.
 - **Bande L5** : de fréquence 1176.45 MHz [10].

I.4.2 Signaux Galileo

Les signaux diffusés par les satellites Galileo utilisent les fréquences suivantes, la figure I.7 illustre la structure des signaux Galileo :

- E5a et E5b, respectivement centrés sur les fréquences 1 176 MHz et 1 207 MHz.
- E6-A et E-B, multiplexés et centrés sur la fréquence 1 279 MHz.
- L1-A et L1-B, multiplexés et centrés sur la fréquence 1 575 MHz [10].

I.4.3 Signaux Glonass

Les satellites Glonass émettent dans deux bandes de fréquences différentes, G1 (1 598-1 604 MHz) et G2 (1 243-1 247 MHz) (également nommées Glonass L1 et L2). Ces fréquences sont proches des fréquences GPS et Galileo, comme l'illustre la figure I.7 [11].

I.4.4 Signaux Beidou

Le système utilise 3 ondes porteuses : B1 à 1 561,098 MHz, B2 à 1 207,14 MHz et B3 à 1268,52 MHz. Une autre porteuse, voisine de B1, devrait permettre une interopérabilité avec GPS, Glonass et Galileo [12].

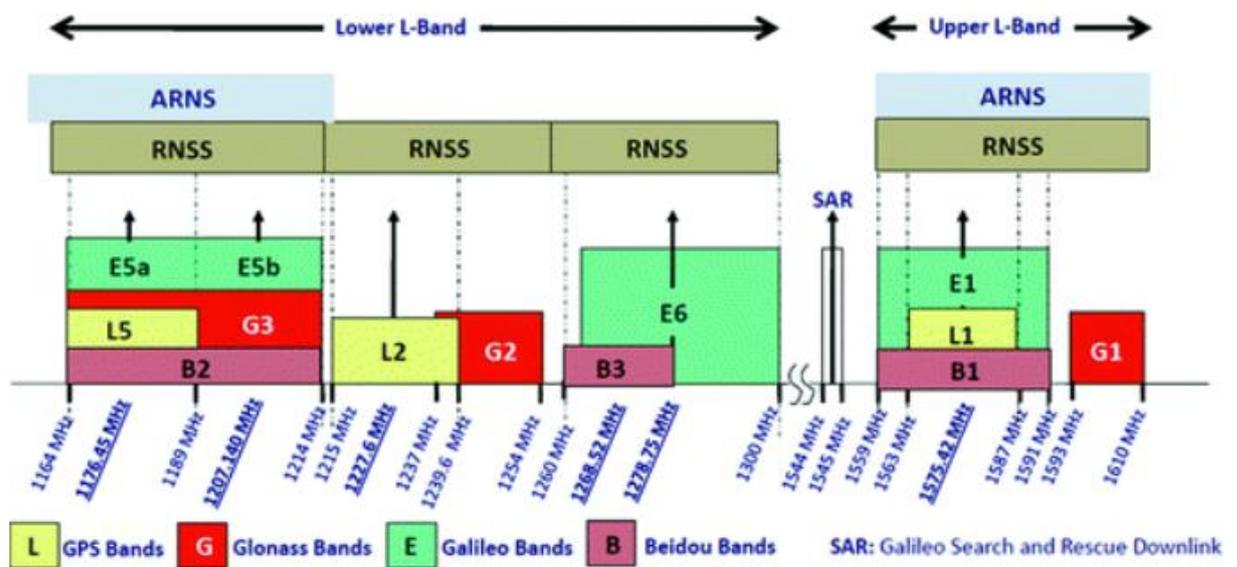


Figure I.7 GNSS et ses différentes bandes de fréquence [13].

I.5 Antennes patch

Vu les dimensions restreintes de la structure du récepteur 5G ou GNSS, il est évident que l'antenne la plus appropriée soit l'antenne patch. Dans ce qui suit on citera les principales caractéristiques d'une telle antenne.

I.5.1 Définition

L'antenne patch micro-ruban est une conception d'une couche qui se constitue généralement de quatre éléments : le patch (élément rayonnant), le plan de masse, le substrat et la partie alimentation [14]. La figure I.8, présente un exemple de la structure géométrique d'une antenne miniature.

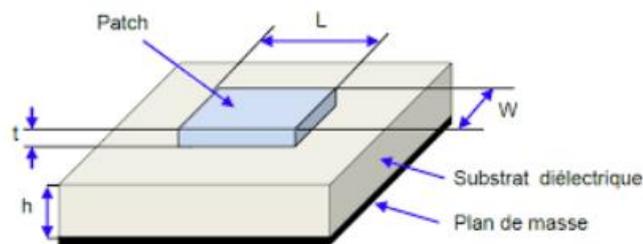


Figure I.8 Géométrie d'une antenne patch [14].

I.5.2 Structure

Les antennes patchs sont composées d'éléments métalliques de toute forme (rectangulaires, circulaires, à fentes ou de formes plus complexes) déposés à la surface d'un substrat diélectrique avec un plan de masse de l'autre côté du substrat diélectrique. La figure I.9 représente une structure détaillée qui montre les différentes composantes [15].

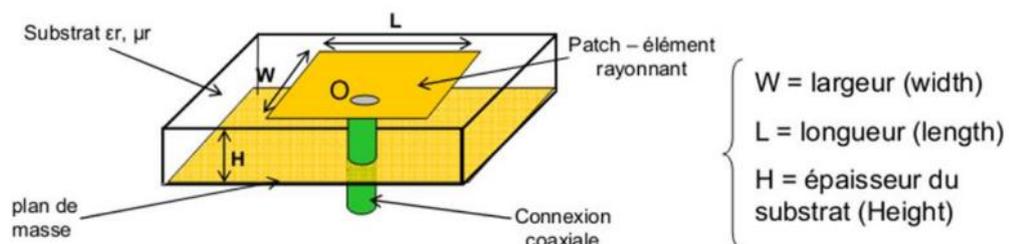


Figure I.9 Structure de l'antenne planaire.

I.5.3 Techniques d'alimentation

a) Par ligne micro-ruban

Cette méthode d'alimentation est très simple à concevoir et à analyser, et très facile à fabriquer. La figure I.10, montre un patch avec une alimentation par ligne micro-ruban (généralement de 50Ω) du côté du patch [16].

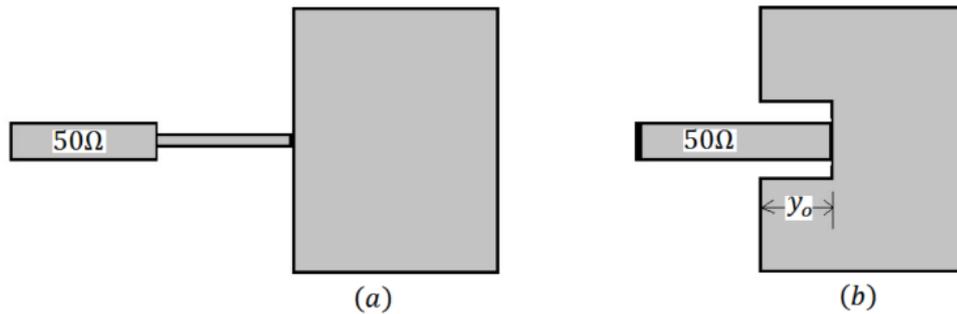


Figure I.10 Patch avec une alimentation par ligne micro ruban.

b) Par sonde coaxiale

Cette méthode est assez simple et efficace. Si le concepteur ajuste le point d'alimentation à 50Ω , alors il lui suffit d'utiliser un câble coaxial de 50Ω avec un connecteur coaxial de type N. Le connecteur coaxial de type N est couplé à la face arrière de l'antenne micro-ruban (le plan de masse) et le connecteur central du coaxial passera à travers le substrat et sera soudé au patch, comme indiqué sur la figure I.11 [17].

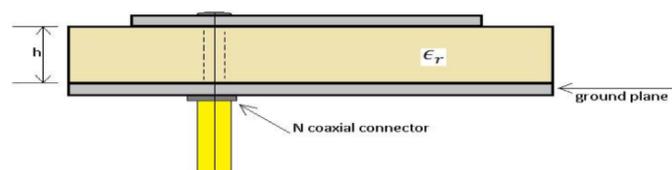


Figure I.11 Alimentation par sonde coaxiale.

c) Par Couplage de proximité

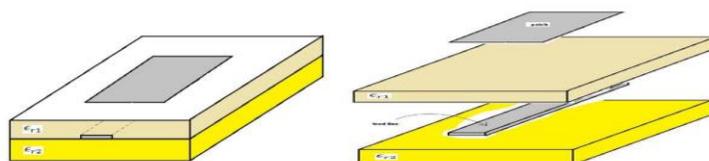


Figure I.12 Alimentation par une sonde coaxiale [17].

Le couplage de proximité implique l'utilisation de deux substrats ϵ_{r1} et ϵ_{r2} . Le patch est en haut, le plan de masse est en bas et la micro-ruban est connectée à l'alimentation et est située entre les deux substrats, comme illustré sur la figure I.12. Ce type est également appelé « alimentation micro-ruban à couplage électromagnétique ». Le principe de ce mécanisme est que le comportement entre le patch et la ligne d'alimentation de la bande est capacitif [17].

d) Par Couplage d'ouverture (fente)

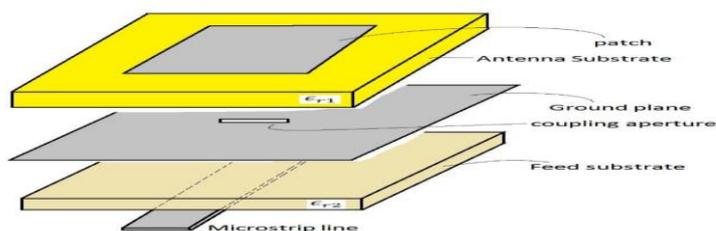


Figure I.13 Méthode d'alimentation par couplage de proximité [18].

La figure I.13 montre les couches de l'antenne patch micro-ruban utilisant le mécanisme d'ouverture. Le plan de masse présente une ouverture en forme de cercle ou de rectangle et sépare deux substrats : le substrat supérieur ϵ_{r1} sur lequel se trouve le patch et le substrat inférieur ϵ_{r2} sur lequel se trouve la ligne d'alimentation en micro-ruban. Ce type de couplage permet d'obtenir une bande passante plus large [18].

I.5.4 Caractéristiques de l'antenne Planaire

Trois paramètres principaux peuvent être distingués [19] :

I.5.4.1 Paramètres électriques

a) Coefficient de réflexion S11

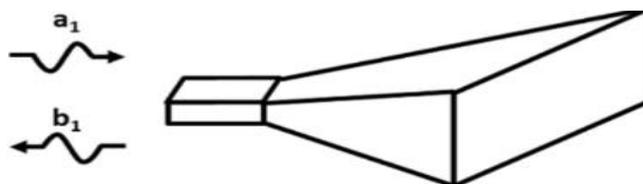


Figure I.14 Illustration du coefficient de réflexion en entrée d'une antenne.

Le coefficient de réflexion est le rapport de l'onde réfléchie b_1 à l'onde incidente (ou de rentrée) a_1 (Figure I.14). Habituellement enregistré comme Γ ou S_{11} . Il est généralement exprimé en décibels (dB). Le lien entre la grandeur exprimée en décibels est donné par l'équation :

$$S_{11}(dB) = 20 \times \log_{10}(|S_{11}|) \quad I.1$$

C'est grâce au coefficient de réflexion qu'on définit la notion d'adaptation et la bande de fréquence (bande passante) où l'antenne a un coefficient de réflexion inférieur à un certain niveau (généralement -10dB).

b) Impédance d'entrée

L'impédance d'entrée de l'antenne est l'impédance vue de la part de la ligne d'alimentation au niveau de l'antenne.

Cette impédance est donnée par la formule :

$$Z_{in} = Z_0 \frac{1+S_{11}}{1-S_{11}} \quad I.2$$

Z_0 : Impédance caractéristique de la ligne d'alimentation, en générale égale 50Ω .

c) Le ROS ou VSWR

Le Rapport d'Onde Stationnaire (ROS) ou (VSWR pour voltage standing wave ratio en anglais), tout comme le coefficient de réflexion reflète l'adaptation ou la désadaptation d'impédance entre deux composants (antenne et circuit émetteur).

Le ROS est donné par :

$$ROS = \frac{1+S_{11}}{1-S_{11}} \quad I.3$$

d) Bande passante (BP)

Pour les antennes à bande étroite la bande passante BP est généralement exprimée en % par rapport à la fréquence centrale comme suit :

$$BP(\%) = \left[\frac{f_{max} - f_{min}}{f_c} \right] 100 \quad I.4$$

f_{max} : Fréquence maximal.

f_{min} : Fréquence minimal.

f_c : Fréquence central ou fréquence de résonance.

Pour les antennes à plus large bande la manière d'exprimer la bande passante est donnée par :

$$BP = f_{max} / f_{min} \quad I.5$$

I.5.4.2 Paramètres de rayonnement

a) Diagramme de rayonnement

Le diagramme de rayonnement est la représentation spatiale de l'antenne ; il existe quatre types de rayonnement : omnidirectionnel, bidirectionnel, directionnel et isotrope. La densité de puissance rayonnée par l'antenne est répartie dans l'espace environnant selon sa géométrie et son adaptabilité. Le diagramme de rayonnement est utilisé pour représenter graphiquement cette distribution. Ils sont donnés dans la "zone éloignée", généralement en points de référence en coordonnées polaires. Si la distance entre le point de calcul et l'antenne satisfait aux conditions données dans l'équation, le champ électromagnétique est considéré dans la zone éloignée. Ces graphiques peuvent être représentés en 2D (polaire ou cartésien) ou en 3D Figure I.15 [20].

$$R > \frac{2D^2}{\lambda} \quad I.6$$

D : la dimension la plus grande de l'antenne.

λ : la longueur d'onde associé à la fréquence de fonctionnement de l'antenne.

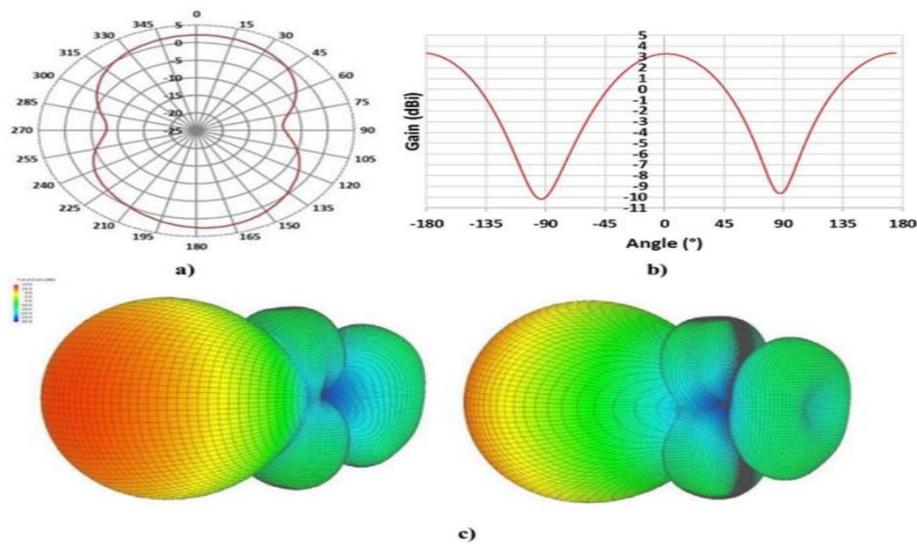


Figure I.15 Diagrammes de rayonnement : a) 2D polaire b) 2D cartésien c) 3D.

b) Polarisation

Les ondes électromagnétiques sont caractérisées par leur direction de propagation, leur amplitude et leur direction dans un plan perpendiculaire à la direction de propagation. Ces paramètres dépendent du temps. L'évolution de la direction de l'onde au cours du temps permet de définir la polarisation de l'antenne dans une direction de propagation donnée [17]. La polarisation peut être linéaire, circulaire ou elliptique, comme le montre la figure ci-dessous [21].

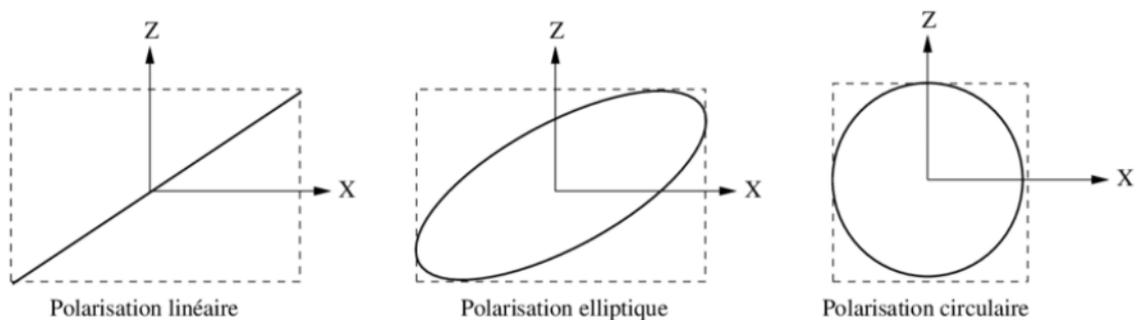


Figure I.16 Les trois types de la polarisation.

I.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons fait une présentation de la 5G en parlant de son objectif, architecture. Ensuite on a parlé des systèmes GNSS. À la fin on a également défini les antennes patchs avec leurs structure, techniques d'alimentation net caractéristiques.

Chapitre II

Antenne GNSS multi-bande à patchs empilés

II.1 Introduction

Au début des années 80, il n'existait que le GPS Américain comme système mondial de navigation par satellite. De nos jours, on peut dire, tel que mentionné dans le premier chapitre, que chacune des grandes puissances dans ce monde possède son propre système de navigation par satellite (GPS, Galileo, Glonass, Beidou, etc...). Cette nouvelle situation s'est traduite par l'instauration d'une multitude de constellations de satellites (Multi Constellation) qui utilisent différentes bandes de fréquences à largeurs distinctes (Multi-bandes) et différentes fréquences porteuses (Multifréquences).

Afin de s'adapter à cette nouvelle structure des GNSSs, la recherche de nouvelles conceptions d'antennes pour les récepteurs est devenue incontournable. Dans ce chapitre les exigences d'antennes MC/MF seront abordées en détail. On commencera par définir certains paramètres déterminant dans la conception de ce type d'antennes à savoir, le concept de multi-bandes et la polarisation circulaire. Finalement, un état de l'art est établi pour consulter investiguer certains travaux antérieurs traitant la même problématique.

II.2 Antennes multi-bandes

II.2.1 Définition

Une antenne multi-bande est une antenne qui résonne sur au moins deux fréquences tout en conservant les mêmes exigences en termes d'adaptation, de valeur du coefficient de réflexion, de gain ...). L'emploi d'antennes multi-bandes s'est généralisé pour divers systèmes de télécommunications modernes.

Le fonctionnement de cette antenne sur l'une des bandes de fréquence se traduit généralement par une adaptation « raisonnable » de l'antenne pour toutes les fréquences de la bande. Cette adaptation « raisonnable » est définie par un coefficient de réflexion ou un taux d'onde stationnaire (TOS) à l'entrée de l'antenne inférieur à une valeur fixée. (Couramment : -10 dB, -15 dB, ou -20 dB pour le coefficient de réflexion et 2, 1.5, 1.2 pour le TOS) [22].

II.2.2 Avantages

- Une antenne multi-bande est une antenne beaucoup plus sélective qu'une antenne large bande. Autrement dit, elle ne permet de faire passer que les bandes d'intérêt en jouant le rôle d'un filtre. Ceci lui confère un post-traitement beaucoup moins important et par conséquent, moins de complexité pour le récepteur.
- Un autre avantage des antennes multi-bandes est la possibilité d'utiliser des éléments rayonnants indépendants pour chaque bande.
- Il est aisé de faire varier la zone de couverture d'une des bandes sans modifier les couvertures des autres bandes de l'antenne. La variation de la couverture d'une bande est obtenue par une variation de l'élément rayonnant responsable de cette bande [22].

II.2.3 Inconvénients

Bien que la conception d'antennes multi-bandes paraisse prometteuse comme solution aux nouvelles exigences des récepteurs GNSS, celle-ci doit surmonter certains défis. D'un côté, elle doit prouver sa capacité à bien contrôler la diversité des caractéristiques de diverses bandes notamment, la largeur de bande souhaitée, le type de polarisation, le gain exigé et la forme du diagramme de rayonnement ; d'un autre côté, sa structure doit présenter une bonne compacité (taille, poids) et une complexité de réalisation minimale (facilité de fabrication et d'intégration) [22].

II.2.4 Technique de patchs empilés

Il existe plusieurs techniques très variées pour faire résonner une antenne à plusieurs fréquences (multi bandes). Dans ce travail la technique de réalisation d'intérêt est celle adoptant la combinaison de plusieurs éléments rayonnants. Dans le cas des antennes imprimées, l'association de plusieurs éléments rayonnants peut se faire de deux façons différentes : soit ces éléments sont juxtaposés dans le même plan, soit ils sont empilés les uns sur les autres.

La conception par combinaison de patchs empilés a aidé à résoudre le problème de largeur de bande étroite dans les antennes patch micro-ruban. Cette technique utilise la combinaison de deux ou plusieurs éléments rayonnants mono-bande qui peuvent être de même type ou différents les uns des autres. Les éléments constituant ces antennes multibandes peuvent être alimentés de deux manières différentes [7] :

- Alimentation directe par port d'excitation.
- Alimentation par couplage électromagnétique avec élément rayonnant voisin alimenté directement

Les différents éléments rayonnants de ces antennes créent leurs propres fréquences de résonance. Si l'on désire obtenir une large bande passante, il faut choisir les longueurs résonnantes de ces éléments du même ordre de grandeur. Si l'on souhaite plutôt travailler sur plusieurs bandes de fréquences distinctes, il faut alors dimensionner différemment chaque résonateur. En cumulant les deux principes précédents, il est ainsi possible de réaliser des antennes à la fois large-bandes et multi-bandes.

Les avantages de cette méthode peuvent être résumés comme suit [7]:

- Facilité du premier dimensionnement des éléments constitutifs
- Rayonnement relativement identique sur toute la large bande couverte
- Bonne efficacité

II.3 Polarisation circulaire

La plupart des systèmes de communications satellitaires requièrent des antennes à polarisation circulaire. L'intérêt de celle-ci s'explique par la faible dépolarisation de l'onde lors de la traversée de l'ionosphère (effet Faraday) et une meilleure résistance aux réflexions liées aux trajets multiples. Elle élimine donc l'importance de l'orientation de l'antenne dans le plan perpendiculaire à la direction de propagation et donne beaucoup plus de flexibilité à l'angle entre les antennes d'émission et de réception [23].

II.3.1 Définition

La polarisation de l'onde est dite circulaire lorsque le champ électrique E décrit une hélice à section droite circulaire au cours du temps. Si on projette l'extrémité de E sur un plan orthogonal (figure II.1), on obtient un cercle. Ce cercle peut être décrit en fonction du temps dans un sens ou dans l'autre : on parle alors de polarisation circulaire droite (RHCP) ou gauche (LHCP). [24].

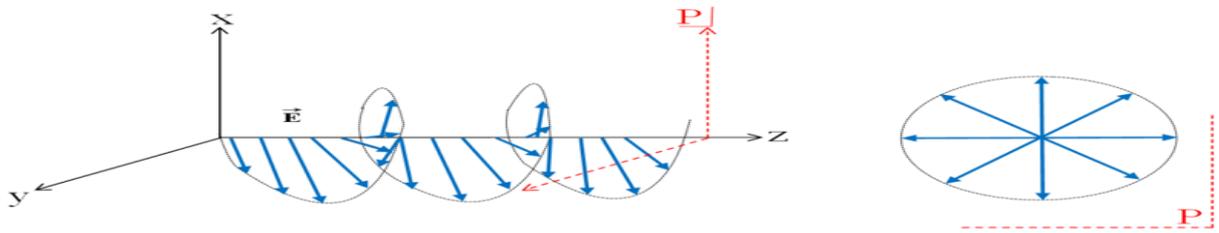


Figure II.1 Polarisation circulaire [24].

La polarisation circulaire peut être obtenue si deux modes orthogonaux sont excités avec une différence de phase de 90° entre eux. Cela peut être réalisé en ajustant les dimensions physiques du patch et en utilisant une ou deux alimentations ou plus [14].

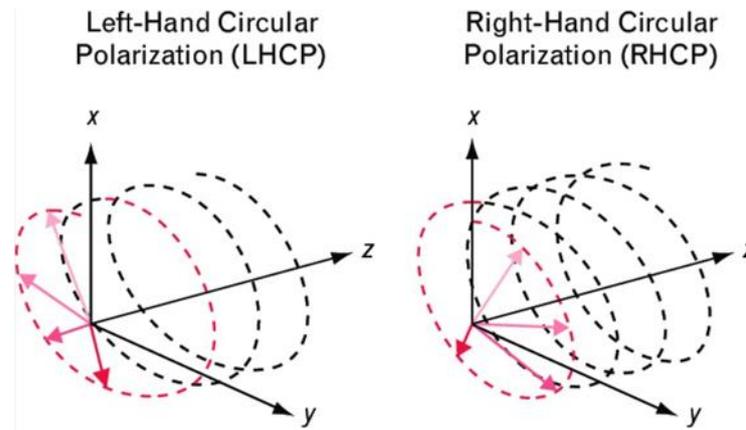


Figure II.2 Les deux sens de la polarisation circulaire [25].

II.3.2 Trajet multiples

On parle de trajets multiples (TM) lorsqu'un signal émis par un satellite suit une multitude de chemins de propagation depuis l'antenne jusqu'au récepteur. Tous ces chemins forment le signal reçu. Comme montré sur la figure II.3, Il est ainsi composé des rayons réfléchis ou diffractés, qui arrivent avec un retard par rapport au rayon direct. On les appelle parfois des échos. Le canal de propagation est généralement connu à partir de sa réponse impulsionnelle dans le temps (eq 1). Il est écrit comme une somme finie de P exponentiels, chacun représentant un chemin de propagation modélisé par une distribution de Dirac :

$$h(\tau, t) \approx \sum_{i=1}^P a_i(t) e^{-j\varphi_i(t)} \delta(\tau - \tau_i(t)) \quad (1)$$

Où a_i est l'atténuation du $i^{\text{ème}}$ trajet, et φ_i et τ_i sont respectivement la phase et le retard absolu du $i^{\text{ème}}$ trajet.

Suivant l'utilisation du signal, la nature ou la situation du milieu de propagation, les multi-trajets peuvent dans certains cas être bénéfiques. C'est en particulier le cas de certains systèmes de télécommunications, où il est important de recevoir le maximum de signaux disponibles. Ainsi, les systèmes MIMO (Multiple Input Multiple output) tirent avantage de la présence des multi-trajets pour accroître leurs performances [26].

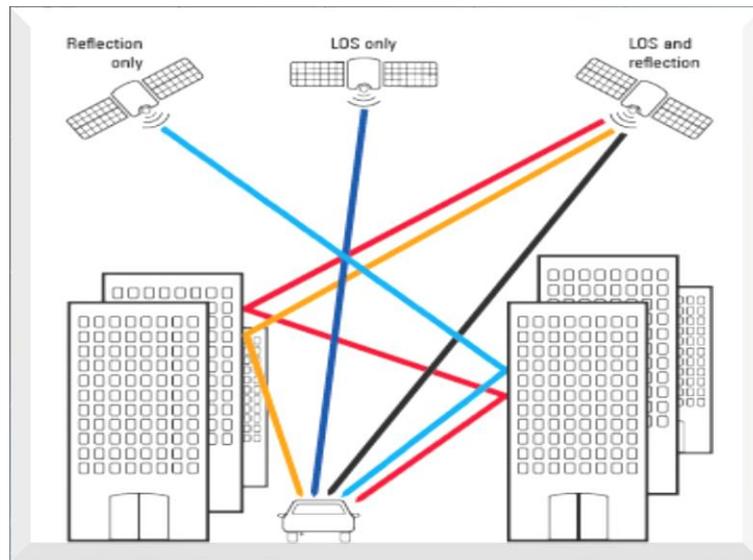


Figure II.3 Trajets Multiples de signaux GNSS

Dans les récepteurs GNSS, utilisant la technique de multiplexage CDMA, le code du signal reçu est corrélé avec celui du code local. Le temps correspondant au pic de cette corrélation est par la suite décelé par une boucle de poursuite de code. Ce dernier correspond au retard entre le code reçu et le code local et il permet le calcul exact de la position du récepteur. Dans un milieu TM le retard du signal direct est différent de celui du signal multi-trajet. Comme conséquence, dans le cas où la boucle de poursuite se verrouille sur pic multi-trajet, le positionnement est erroné. Afin d'améliorer la précision du positionnement des GNSS, la polarisation circulaire est incontournable [27]

II.4 Etat de l'art

La technique d'antenne patch empilées a été adoptée par un bon nombre de chercheurs comme solution à la problématique des GNSS MCMF. Avant d'aborder la méthode la plus récente

proposée dans la référence [7], dont l'étude et la validation seront exposés au troisième chapitre, une idée générale sur un certain nombre de travaux antérieurs sera établie dans ce qui suit.

1- Antenne à patchs empilées pour récepteur GPS triple bandes

Dans la référence [28], a été présenté une nouvelle conception d'antenne à patchs empilées avec PC et à alimentation unique pour les signaux GPS en bande L1(1.575 GHz), L2(1.227 GHz), et L5(1.176 GHz). L'originalité de cette conception est sa compacité, simplicité, et séparation distincte des trois bandes avec une bonne largeur de la bande d'impédance et de celle du rapport axial.

La géométrie de l'antenne proposée est montrée sur la figure II.3. Les patchs sont gravés sur trois substrats différents. Le substrat inférieur une épaisseur $h_3=1,524$ mm et une permittivité de $\epsilon_r = 3,38$; les substrats moyen et supérieur sont similaires avec une épaisseur $h_1=h_2= 1,6$ mm et une permittivité $\epsilon_r = 4,4$. Les patchs inférieur, moyen et supérieur sont conçus pour résonner aux bandes de fréquences L5, L2 et L1, respectivement. La taille du plan de masse est de 80mm x 80mm ; les patchs du bas (P3), du milieu (P2) et le patchs supérieur (P1) ont une longueur de 66, 56 et 45 mm, respectivement. La hauteur totale de l'antenne à partir du plan de masse est 4,8 mm. Les autres dimensions optimisées pour 'antenne proposée sont illustrées à la figure II.4.

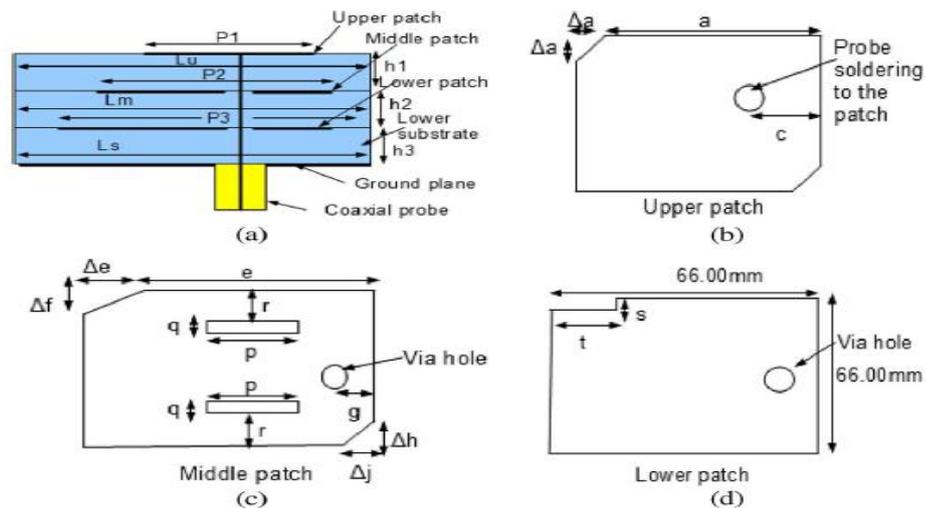


Figure II.4 Géométrie de l'antenne de PC à patch empilés proposée montrant : (a) vue latérale ; (b) patch supérieur ; (c) patch central ; et (d) patch inférieur.

Une seule sonde d'alimentation d'impédance d'entrée 50 ohms est connectée au patch supérieur à travers des trous au patch du milieu et du bas tandis que les patches moyens et inférieurs sont excités par couplage électromagnétique.

L'utilisation de fente sur le bord du patch inférieur introduit le mode orthogonal double nécessaire pour le diagramme de rayonnement à PC. Les patches du milieu et du haut sont perturbés par la troncature de coin qui produit un mode de résonance presque dégénérée entraînant une polarisation circulaire.

La position de la sonde d'alimentation ainsi que l'alignement des centres des trois patches ont été optimisés après plusieurs simulations successives dans le but d'obtenir l'adaptation d'impédance souhaitée dans les différentes bandes de fréquences.

Afin d'atteindre un rapport axial inférieur à 3dB, une fente est réalisée dans le patch inférieur et une troncature dans les coins des patches moyen et supérieurs.

Les résultats mesurés et simulés sous logiciel CST des coefficients de réflexion, du rapport axial et du diagramme de rayonnement, concernant l'antenne proposée dans [29], sont illustrés respectivement sur les figures II.5, II.6 et II.7.

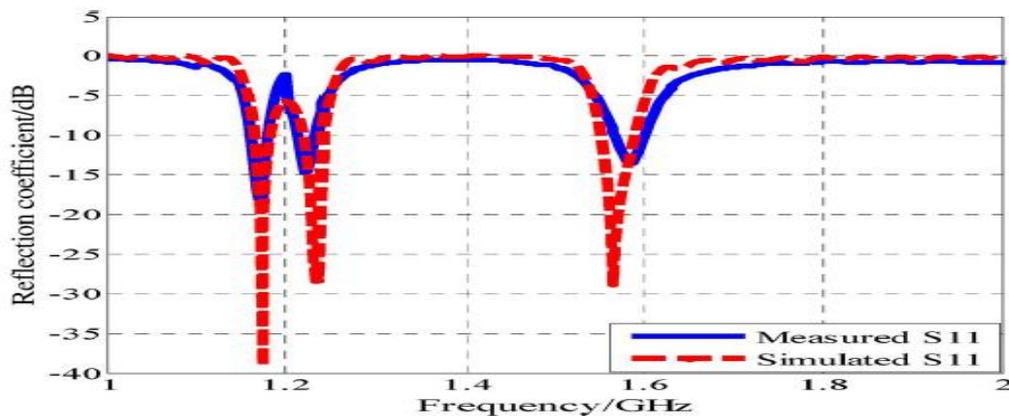


Figure II.5 Coefficients de réflexion mesurés et simulés de l'antenne proposée.

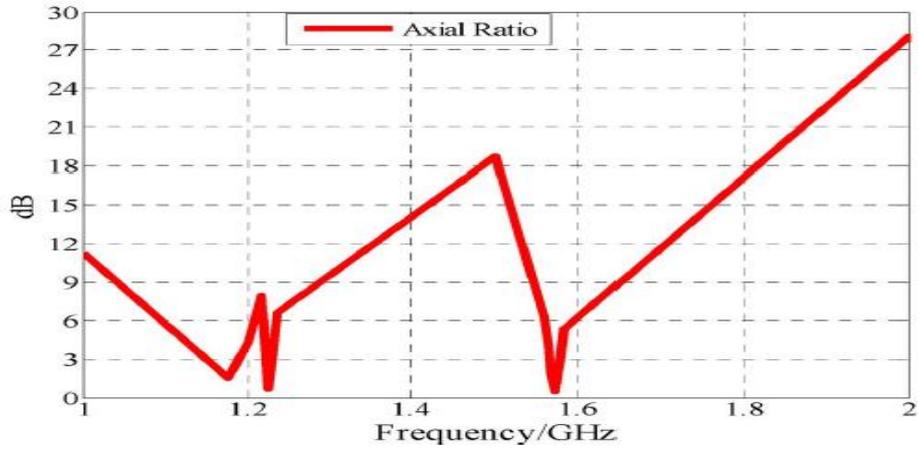


Figure II.6 Rapport axial simulé de l'antenne proposée

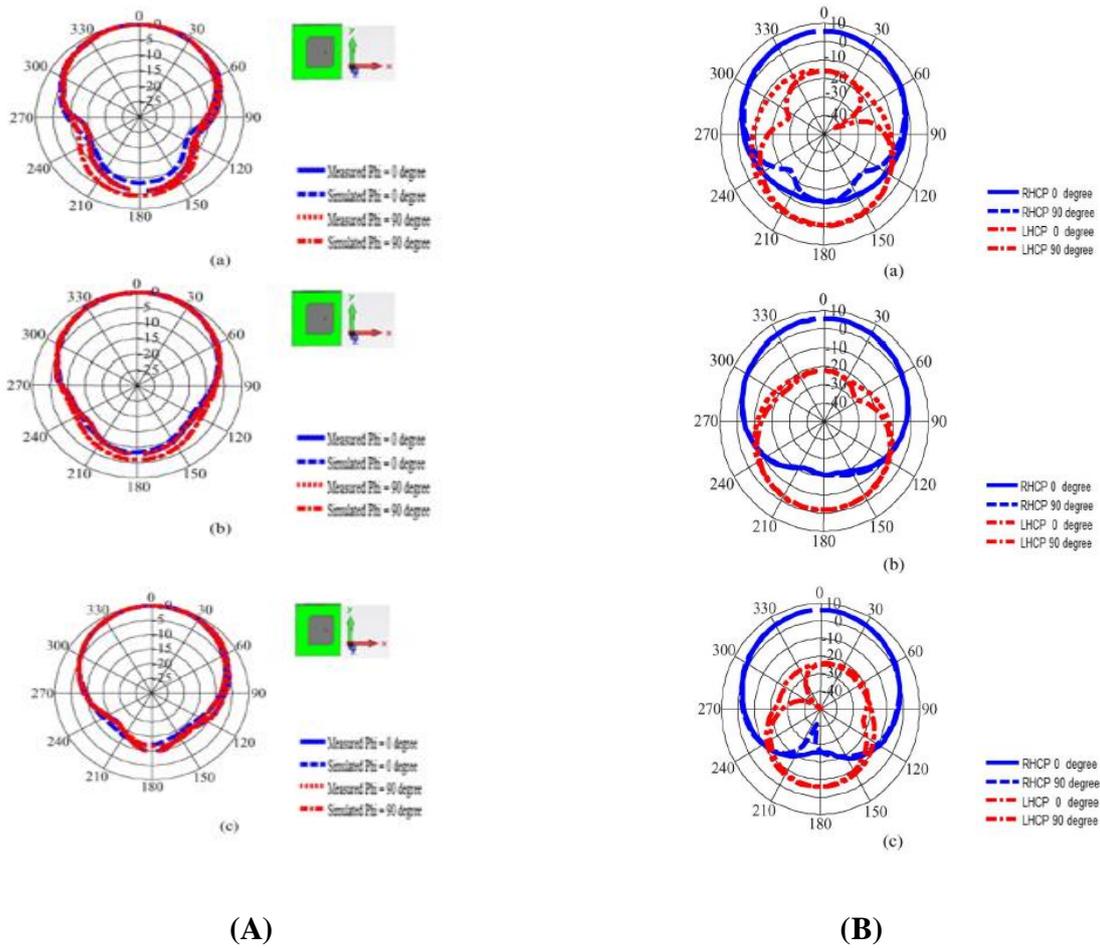


Figure II.7 (A) Diagramme de rayonnement total (LP) mesuré et simulé à : a)1,176; b) 1,227; c) 1,575 GHz. (B) Modèle de rayonnement simulé aux plans x-z et y-z de l'antenne proposée à : a) 1,176; b) 1,227; c) 1,575 GHz.

Les schémas de rayonnement simulés de l'antenne dans les plans x-z et y-z pour les trois bandes de fréquences sont illustrés à la figure II.7(B). Dans les deux plans, le faisceau est large d'environ 172, 161, et 205 dans l'hémisphère supérieur.

- La figure II.8 illustre les tracés cartésiens de la RA aux trois fréquences centrales de 1,176, 1,227 et 1,575 GHz.

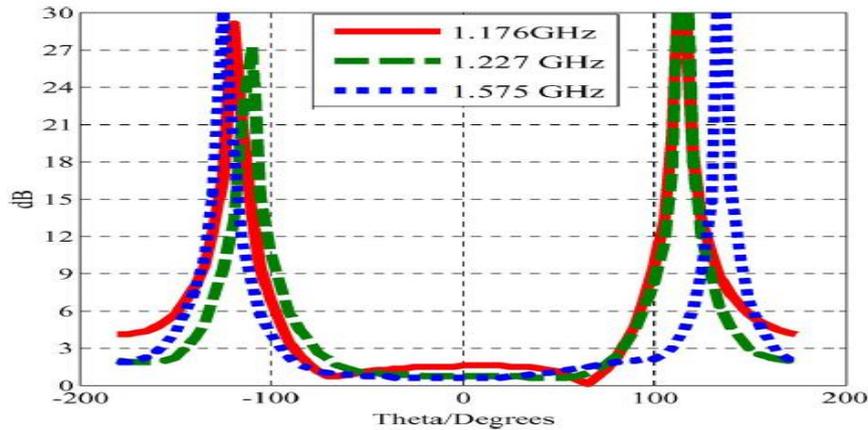


Figure II.8 Tracé cartésien (AR) de l'antenne proposée montrant un faisceau plus large dans l'hémisphère supérieur.

D'après ces résultats, on peut dire que l'antenne fonctionne en triple bande avec de bonnes performances pour les signaux GPS L1, L2 et L5. L'option triple bande est obtenue en utilisant trois patchs empilés les uns sur les autres. Des techniques d'optimisation des différents paramètres dans la conception ont permis l'amélioration de la bande passante opérationnelle et du rapport axial minimum. La largeur importante du faisceau, la faible polarisation croisée et le gain élevé de cette antenne lui permettent une bonne adaptation aux applications GPS.

2- Antenne de raccordement empilée double bande à alimentation unique pour GPS à polarisation circulaire orthogonale et Applications du SDARS

Dans la référence [29], une antenne de raccordement empilée à une seule alimentation a été présentée. Sa conception est capable de recevoir simultanément les signaux satellites à polarisation circulaire (RHCP) dans la bande GPS L1 et polarisation circulaire gauche dans la bande de fréquences du SDARS. En outre, la conception offre un gain amélioré (pour SDARS) à polarisation linéaire verticale (VLP) pour la réception du signal du répéteur terrestre à faible angles d'élévation.

Le composant GPS se compose d'un métal carré sur un substrat diélectrique. Il contient une pièce métallique carrée légèrement plus petite au-dessus du substrat non arrondi, mis en contact avec le haut du patch GPS. Le patch SDARS est directement alimenté par la broche conductrice centrale d'un connecteur coaxial, alors que le patch GPS est alimenté par un coupleur à ouverture circulaire qui est gravé dans la plaque métallique du GPS.

Le même matériel diélectrique constant est choisi pour le bas et le haut substrat afin de minimiser la complexité, sa constante diélectrique est 9.7. Le choix d'utiliser un coupleur à large ouverture est approprié pour l'alimentation par pièce métallique inférieure afin de minimiser la sensibilité de la structure pour alimenter le placement de la broche. En général, tous les paramètres dimensionnels et matériels sont nécessaires pour obtenir des performances optimales.

La figure II.10 montre la structure de cette antenne GPS/SDARS et ses différentes dimensions.

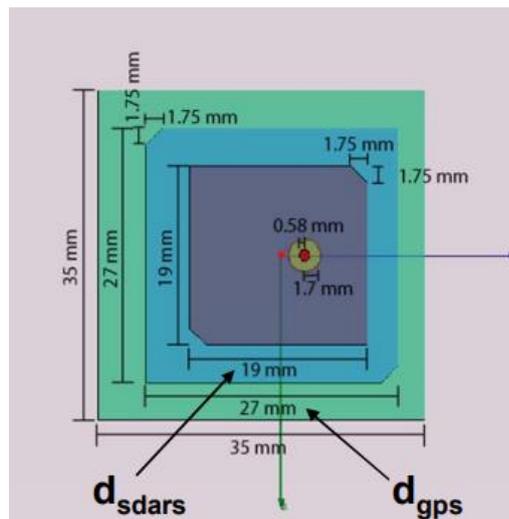


Figure II.9 Géométrie de la structure proposée et ses dimensions.

Les résultats simulés des coefficients de réflexion, du rapport axial et des diagrammes de gain d'élévation LHCP et RHCP, relatifs à la structure proposée dans [30], sont données respectivement sur les figures II.11, II.12 et II.13.

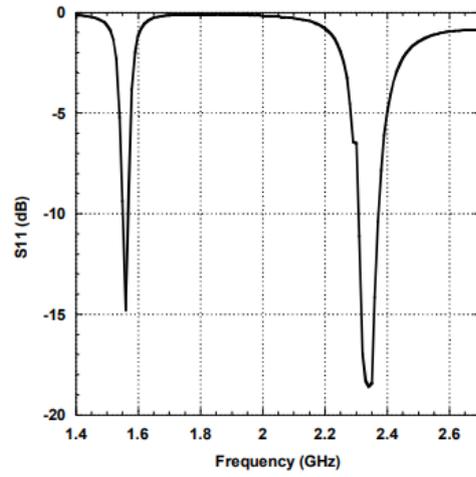


Figure II.10 Coefficient de réflexion simulé de la structure proposée.

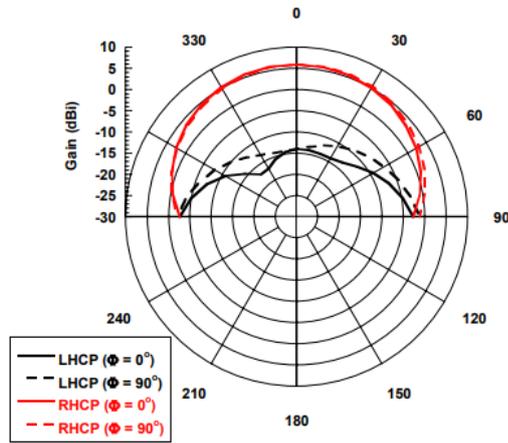


Figure II.11 Diagrammes de gain d'élévation LHCP et RHCP de l'antenne de raccordement empilée à 1,55 GHz.

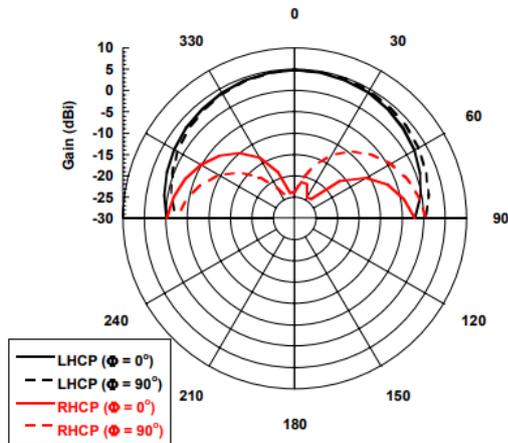


Figure II.12 Diagrammes de gain d'élévation LHCP et RHCP de l'antenne de raccordement empilée à 2,33 GHz.

L'antenne réseau empilée obtenue est capable de recevoir simultanément les deux signaux GPS L1 de RHCP et Signaux SDARS LHCP. Cette conception compacte réduit la taille et la surface de l'antenne proposée. L'utilisation d'un seul flux pour GPS L1 et les bandes fréquentielles réduit la complexité et le cout de cette conception. L'optimisation de certains paramètres sont faites afin d'avoir des meilleurs résultats. En général, cette conception peut être mise à l'échelle et réoptimisée afin de fournir une antenne réseau empilée compacte, haute performance et à alimentation unique en utilisant deux bandes fréquentielles.

II.5 Conclusion

Les antennes multi-bandes avec polarisation circulaire sont une solution prometteuse pour surmonter les défis liés aux multi-trajets dans les communications sans fil. Elles offrent une meilleure qualité de signal, une plus grande résistance aux interférences et une amélioration globale des performances du système de communication. L'utilisation de telles antennes peut contribuer à une meilleure connectivité, une plus grande capacité du réseau et une expérience utilisateur améliorée dans les applications sans fil d'aujourd'hui et de demain.

Chapitre III :

Etude de la conception d'une antenne GNSS/5G compact multi-bandes de structure à patchs empilés avec alimentation unique pour les applications GNSS et 5G/B5G.

III.1 Introduction

Dans ce chapitre nous allons étudier, analyser et valider les résultats de simulations concernant la conception de l'antenne compact multi bande à PC proposée dans la référence [22]. Les résultats obtenus seront commentés et comparés à ceux proposés dans [22]. Par ailleurs, une étude paramétrique sera établie afin de montrer l'effet de certains paramètres de l'antenne, sur ses principales caractéristiques et donc d'optimiser les performances de l'antenne.

III.2 Structure et caractéristiques de l'antenne proposée

Dans la référence [7] les auteurs ont proposé une antenne multi-bandes/multifréquences à structure empilée utilisant une alimentation unique et à polarisation circulaire dédiée aux applications des GNSS dans les bandes de L1, L2, and L5, et des communications cellulaires de la 5G dans la bande de fréquence de 2.3 GHz. Cette antenne, a été conçue dans le but d'assurer une meilleure performance en termes de compacité, de simplicité et de couplage mutuel.

La polarisation circulaire a été choisie pour une meilleure robustesse contre les effets de Faraday et une meilleure résistance aux multi-trajets et, donc, une meilleure qualité de signal.

La structure empilée est d'une importance remarquable pour les antennes multi-bandes, car elles permettent de mieux contrôler les caractéristiques de rayonnement des bandes d'exploitation individuelles où chaque patch soutient l'une ou l'autre bande d'exploitation. De plus, elle offre une impédance améliorée, un rapport axial plus large, et un meilleur gain par rapport à la structure traditionnel.

Pour valider les résultats de simulation de la référence [7], on a utilisé le logiciel de simulation CST (Computer Simulation Technology) qui est un outil spécialisé pour la simulation en 3D des composants à haute fréquence basé sur la résolution des équations de MAXWELL suivant la technique des intégrales finies (FIT, Finit Intégration Technique). Comme tous les simulateurs 3D, l'avantage de cet outil est la possibilité de traiter toutes sortes de structures homogènes quelle que soit la technologie utilisée.

III.3 Conception de l'antenne proposée

L'antenne proposée dans [7], utilise une structure empilée composée de quatre couches de patchs rayonnantes et de substrats empilés les uns sur les autres et d'un plan de masse en bas de la structure. La couche du patch inférieure est imprimée sur le substrat R04003 de Roger d'épaisseur 1,524 mm, de permittivité relative 3,38 et de tangente de perte 0,0027. Les trois couches supérieures, quant-à-elles, utilisent des substrats FR4 d'épaisseur 1,6 mm, de permittivité relative 4,4 et de tangente de perte 0,02. Le patch inférieur est utilisé pour générer la bande L5 (bande 1); le patch central produit la bande GPS L2 (bande 2) ; le patch supérieur permet à l'antenne de résonner à la bande L1 (bande 3), et le dernier patch supérieur produit une résonance à 2,3 GHz (bande 4) pour les applications 5G (5G/B5G).

III.4 Signaux interceptés par l'antenne

Les bandes L1 et L5 sont commune à la plupart des GNSS, notamment le GPS, Galileo, BeiDou et QZSS (Japon) tandis que la bande L2 est spécifique aux GPS mais peut être facilement remplacé par toute autre bande de fréquences des GNSS.

En plus des fréquences L5 et L2, l'antenne proposée dans [7] convient pour les bandes L1 (GPS), G1 (Glonass), B1 et B1-2 (BeiDou). Cette panoplie de systèmes GNSS qui peuvent être servi par l'antenne proposée, la qualifie d'être appropriée aux nouvelles structures d'antennes MC/MF.

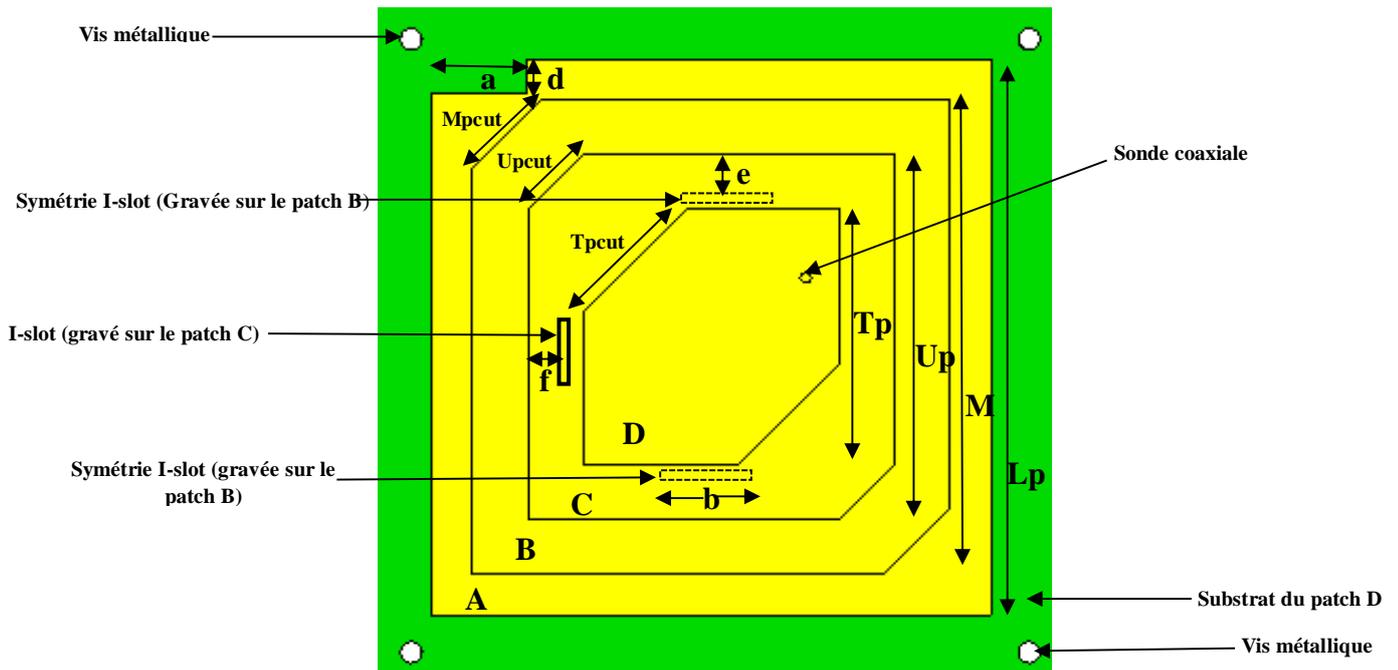


Figure III.1 Géométrie de l'antenne proposée (vue de dessus).

Les longueurs des patches A, B, C et D sont, respectivement, $L_p = 65,4$ mm, $M_p = 55,8$ mm, $U_p = 42,9$ mm, et $T_p = 30,0$ mm. Le plan de masse mesure $80\text{mm} \times 80\text{mm}$. L'antenne est excitée par une seule sonde coaxiale de 50Ω connectée au patch le plus haut D à travers les trous dans les patches inférieurs. L'excitation des autres patches successifs se fait par couplage électromagnétique. Les fentes rectangulaires I de symétrie sont gravées sur les patches B et C pour obtenir un RA inférieure à 3 dB. Ceci permet également de faire coïncider le rapport axial minimum avec la fréquence de chaque bande. Les dimensions de la fente I dans le patch B sont $b = 10$ mm \times 1 mm à $e = 6,9$ mm tandis que celle de la fente I dans la pièce supérieure est $c = 8$ mm \times 1 mm à $f = 1,45$ mm.

Un mode dégénéré orthogonal double est introduit au niveau du patch inférieur à travers la fente tandis que la trajectoire du courant sur les autres patches est perturbée à travers la troncature des coins opposés de chaque patch pour obtenir des polarisations circulaires. Quatre vis métalliques sont utilisées aux quatre coins de l'antenne pour pré-aérer l'espace et améliorer une prise ferme.

Un résumé du cahier des charges de l'antenne proposée est donné sur le tableau III.1. Dans le tableau III.2 sont rassemblées les dimensions des différents éléments de conception de l'antenne proposée.

Tableau III.1 Cahier des charges.

	Matériel	Épaisseur	Longueur et largeur	Positionnement
Plan de masse	Copper (annealed)	0.017mm	70mm	Première couche
Substrat (patch A)	Rogers RO4003C (lossy)	1.524mm	70mm	Au-dessus du plan de masse
Patch A	Copper (annealed)	0.017mm	65.4mm	Au-dessus du substrat (patch A)
Substrat (patch B)	FR-4 (lossy)	1.6mm	70mm	Au-dessus patch A
Patch B	Copper (annealed)	0.017mm	55.8mm	Au-dessus du substrat (patch B)
Substrat (patch C)	FR-4 (lossy)	1.6mm	70mm	Au-dessus du patch B
Patch C	Copper (annealed)	0.017mm	42.9mm	Au-dessus du substrat (patch C)
Substrat (patch D)	FR-4 (lossy)	1.6mm	70mm	Au-dessus du patch C
Patch D	Copper (annealed)	0.017	30mm	Au-dessus du substrat (patch D)

Tableau III.2 les dimensions de l'antenne conçue.

Paramètres	gnd	Lp	Mp	Up	Tp	a	B	c	D	e	F	X1	Y1
Valeur (mm)	80	65.4	55.8	42.9	30	10	10×1	8×1	4	6.9	1.45	11	7
%μParamètres	Mpcut	Upcut	Tpcut										
Valeur (mm)	13.7	12.59	18.4										

III.5 Résultats de simulation et discussion

Les principaux paramètres qui permettent d'évaluer et déterminer les performances d'une antenne sont le coefficient de réflexion, la largeur de la bande ou des bandes interceptées, le rapport axial et le diagramme de rayonnement. Dans ce qui suit les résultats de simulation de

chacun de ces critères de performance seront donnés, discutés et comparés à ceux de la conception proposée dans [22].

III.5.1 Coefficient de réflexion

Les résultats de simulation des coefficients de réflexion S_{11} et des bandes passantes relatifs à chacun des quatre signaux interceptés par l'antenne proposée sont illustrés sur la figure III.2 et leurs valeurs respectives sont donnée dans le tableau III.3.

Le tableau III.3 permet également de faire une comparaison entre les valeurs simulées des bandes passantes et des coefficients de réflexion obtenus pour les quatre signaux avec ceux proposés dans [7]. On constate que la bande passante trouvée pour L5 est inférieure à celle proposée, alors que les autres bandes passantes (L2, L1 et G5) sont supérieures à ceux proposées. De plus, toujours d'après le même tableau, on remarque que les signaux L2, L1 et G5 possèdent de larges bandes de fréquence dans les deux cas, simulés et proposés, ce qui est réconfortant pour les antennes GNSS. Par contre, la bande passante de L5 est très limitée, ce qui représente un inconvénient pour ces antennes. Une comparaison entre les valeurs de S_{11} trouvées pour les différents signaux simulés avec celles proposées montre que celles-ci sont pratiquement les mêmes en termes de performance du fait qu'elles vérifient le critère d'être inférieures à -10dB.

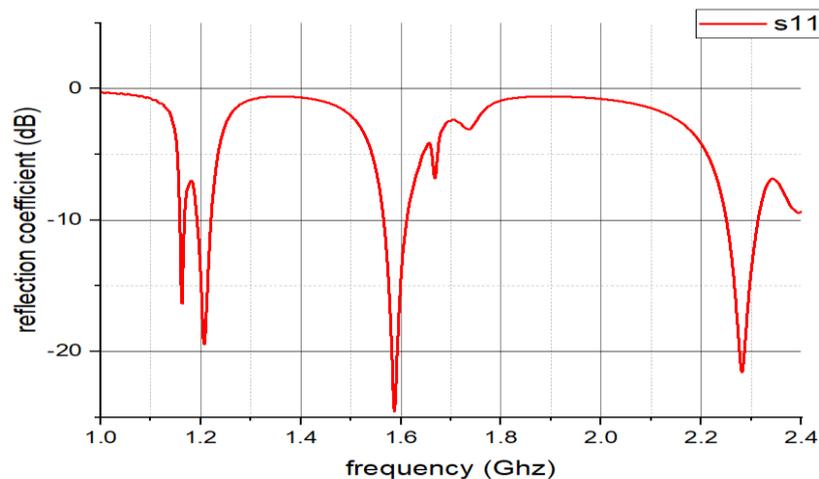


Figure III.2 Réponse simulée du coefficient de réflexion pour chaque bande.

Tableau III.3 Bandes passantes des signaux L5, L2, L1, G5.

Bande opérationnelle	Bande Passante obtenue		S_{11} Des fréquences de résonance obtenues	Bandes passantes proposées		S_{11} Des fréquences de résonance proposée
	MHz	%		MHz	%	
L5	8.5	0.7	-17	17	1.4	-16
L2	28	3	-20	25	2.0	-27
L1	46.3	4	-25	40	2.3	-16
G5	63.4	5	-22	54	2.3	-18

III.5.2 Rapport axial

Les résultats de simulation du rapport axial obtenus sont présentés sur la figure III.3. En observant cette figure, on peut déduire que la bande la plus large est L5, la largeur du rapport axial dans cette bande est due à la présence de deux diélectriques différents. L'épaisseur du substrat est également un facteur contributif qui augmente l'efficacité de l'onde de surface et donc, améliore la largeur de bande du rapport axial dans cette bande de fréquence. Le tableau III.4 donne les directions relatives aux rapports axiaux des différents signaux.

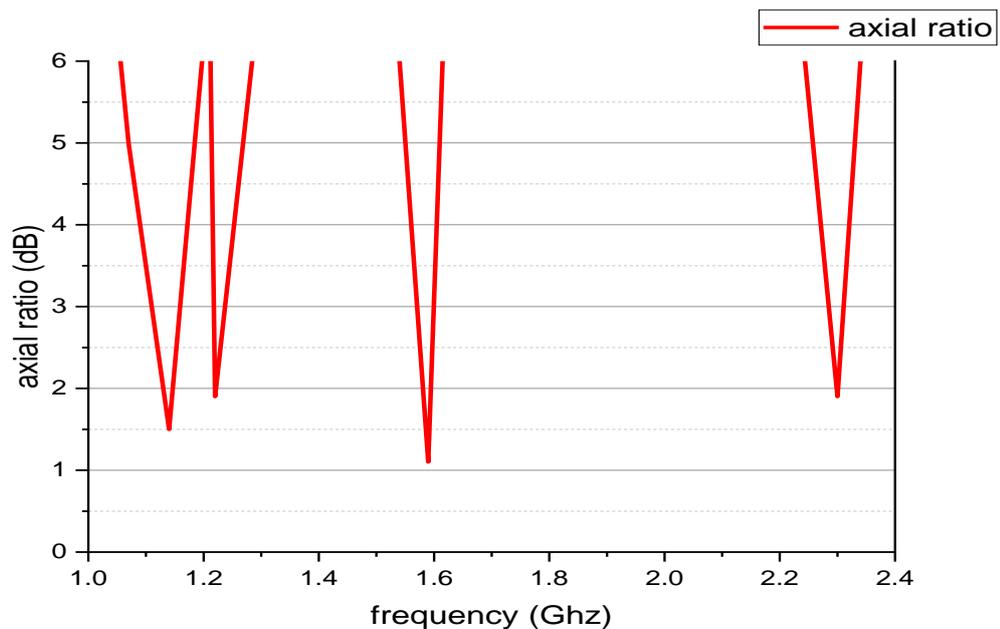


Figure III.3 Rapport axial simulé de l'antenne proposée.

Tableau III.4 Sommaire du rapport axial de l'antenne simulée.

Bande opérationnelle	Angles θ et φ
L5	$\theta = 90^\circ$ $\varphi = -100^\circ$
L2	$\theta = 90^\circ$ $\varphi = -100^\circ$
L1	$\theta = 120^\circ$ $\varphi = -100^\circ$
G5	$\theta = 100$ $\varphi = -90^\circ$

III.5.3 Diagramme de rayonnement

Les diagrammes de rayonnement RHCP et LHCP pour les quatre signaux L5, L2, L1 et G5 sont respectivement représentés sur les figures III.5 (a) et III.5 (b).

En observant les résultats obtenus et en faisant une comparaison avec ceux de la conception proposée dans la référence [7], on déduit que la polarisation circulaire droite RHCP est toujours plus forte que la polarisation circulaire gauche LHCP.

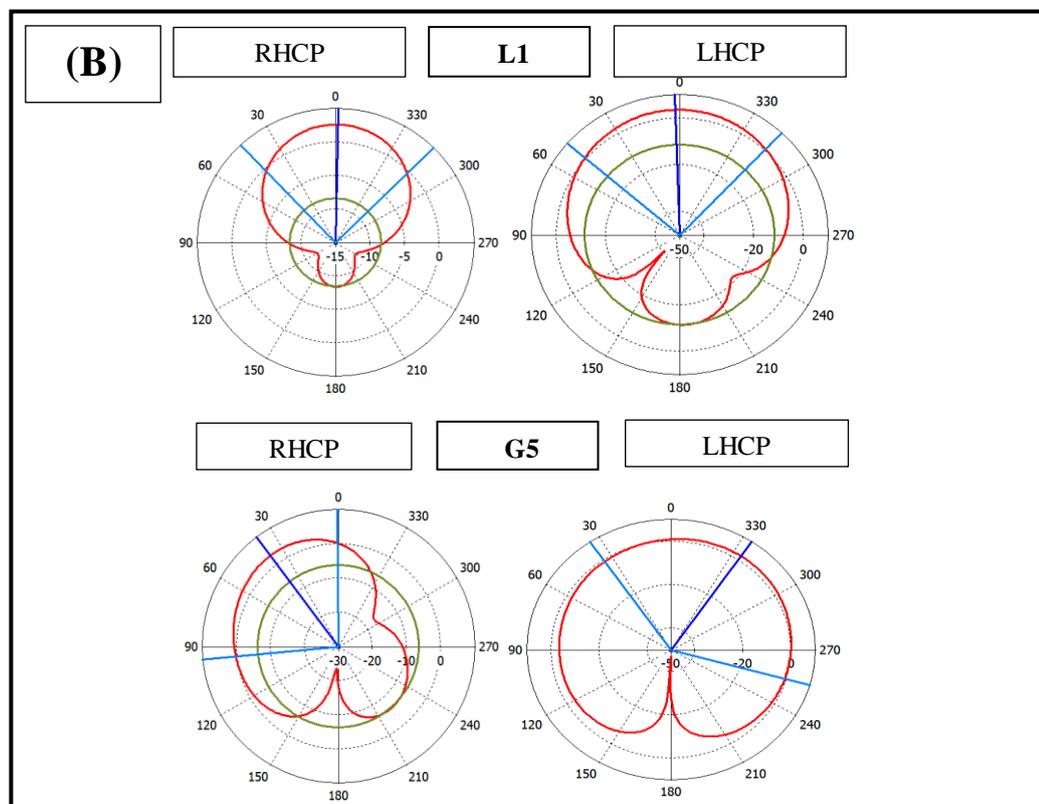
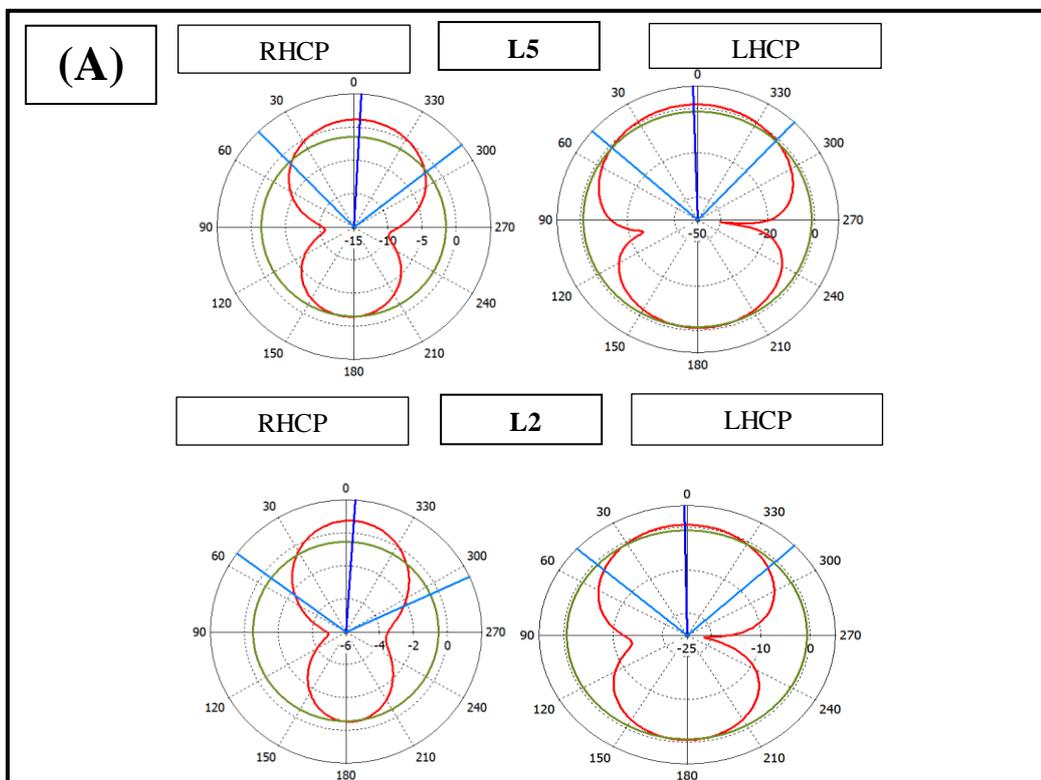


Figure III.4 Diagrammes de rayonnement LHCP et RHCP simulés.

III.5.4 Gain

Les résultats de simulation du gain obtenus sont présentés sur la figure III.5. On observe que le gain est acceptable pour les quatre fréquences données, respectivement, L5, L2, L1 et G5 est leur gain est 1.7dB, 1.58dB, 2.15dB et 1.98dB.

On considère ces gains obtenus comme des résultats agréables pour ce type des antennes, vu que cette conception est circulairement polarisée.

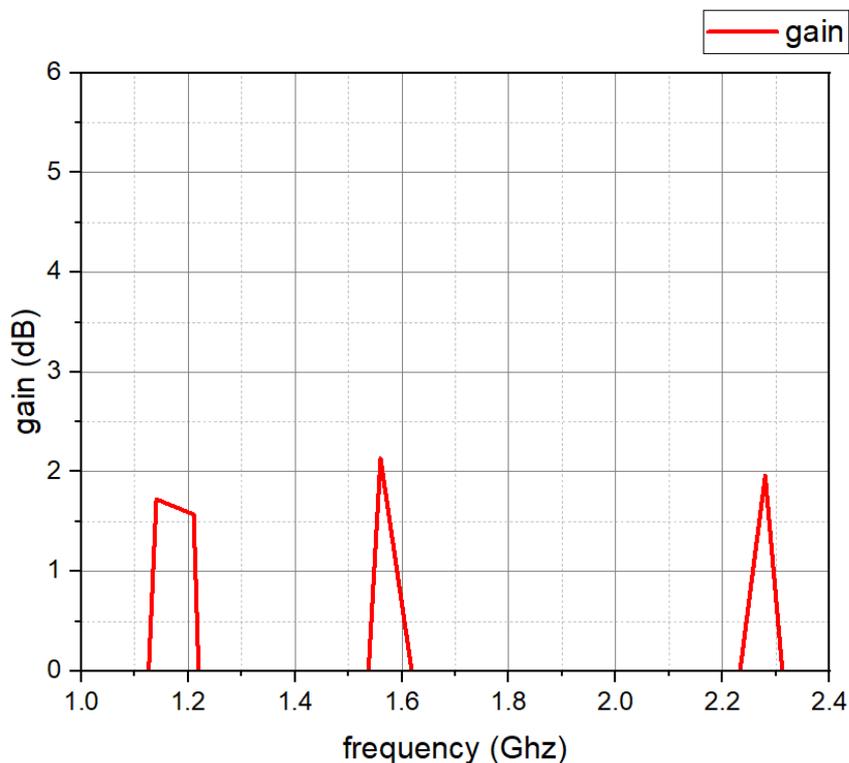


Figure III.5 Gain simulé pour l'antenne proposée.

III.6 Étude paramétrique

III.6.1 Effet de la coupure angulaire du patch

A ce niveau, on doit noter que les quatre patchs rayonnants de l'antenne prennent en charge le fonctionnement de l'antenne dans les quatre bandes requises. Le patch A est utilisé pour générer la bande L5 ; le patch B produit la bande L2 ; le patch C et le patch D font résonner l'antenne, respectivement, aux fréquences L1 et G5. Par conséquent, afin de réaliser rigoureusement ces résultats, il fallait jouer essentiellement sur les dimensions de la coupure des angles opposés de

chaque patch (T_{pcut} , U_{pcut} , M_{pcut} et L_{pcut}). Un exemple de simulation montrant l'effet de cette dimension sur les coefficients de réflexion des différentes bandes de l'antenne est donné sur la figure III.6 On constate, d'après cette figure, qu'en variant T_{pcut} seul, la réponse du coefficient de réflexion demeure indifférente pour les bandes de fréquences L5, L2 et L1, alors que, à mesure que T_{pcut} augmente, la fréquence de résonance à la bande de 2,3 GHz diminue.

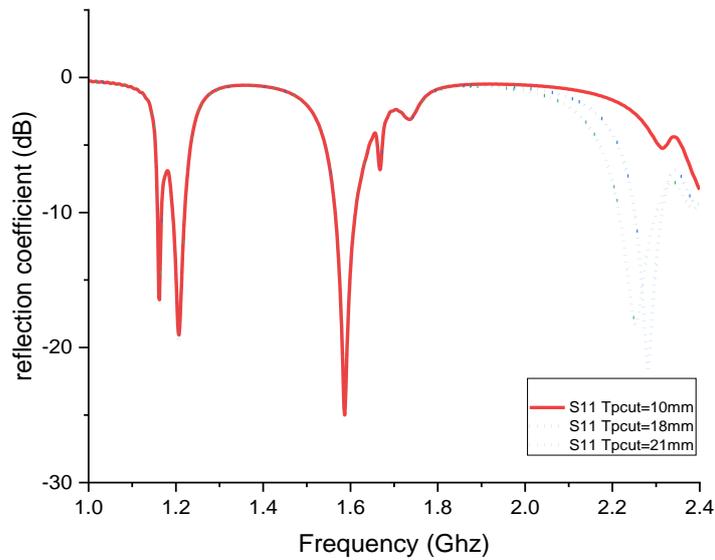


Figure III.6 Effet de longueur de la dimension T_{pcut} sur le coefficient de réflexion.

III.6.2 Effet de surface du plan de masse

La longueur de l'arrête du plan de masse carré affecte également les performances de l'antenne comme le montre la figure III.7 Plus cette longueur augmente, l'adéquation de l'impédance s'améliore. La courbe en rouge, cité plus haut (figure III.2), a été adopté du fait qu'elle coïncide parfaitement avec la courbe désirée.

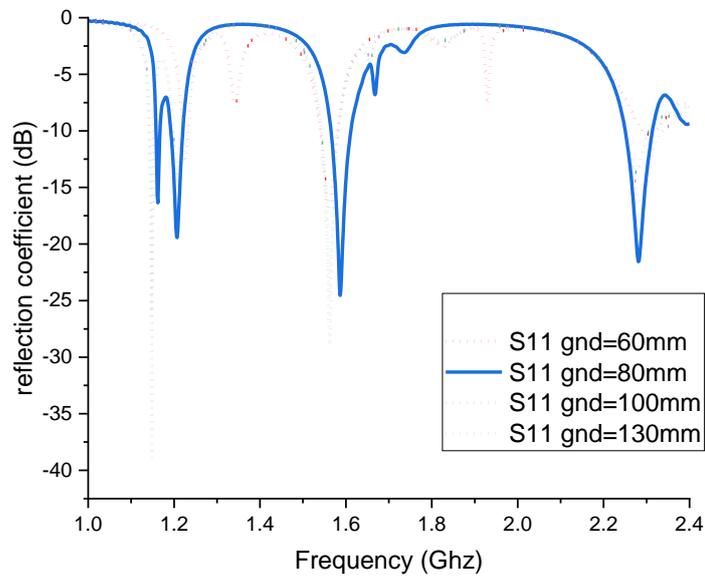


Figure III.7 Effet de longueur du plan de masse

III.7 Conclusion

Les résultats simulés obtenus sont assez proches de ceux trouvés dans la référence validée. L'étude paramétrique réalisée a permis de confirmer l'optimisation des performances de la structure de l'antenne proposée. On peut dire, en conclusion, que celle-ci présente une bonne adaptation d'impédance, un bon rapport axial et de bonnes caractéristiques de rayonnement aux quatre bandes de fonctionnement qui lui permettent d'être candidate pour les applications GNSS/5G, actuelles et futures.

Conclusion générale

L'essentiel du travail dans ce mémoire se focalise sur l'étude et l'analyse des nouvelles techniques de conception d'antennes patch dédiées aux nouvelles technologies des récepteurs GNSS/5G. Les exigences basiques que l'architecture de ces antennes doit satisfaire sont : une largeur de bande suffisante, une structure multi-bande et des caractéristiques réalisant de meilleures performances en termes de gain, d'adaptation d'impédance, d'angle d'ouverture et de résistance aux interférences et aux trajets multiples.

Après étude et analyse de la conception de l'antenne compacte à PC multi-bande à patch empilés de la référence [7], les résultats s'y affèrent ont été approuvés par simulation sous logiciel CST. Les coefficients de réflexion reflètent une bonne adaptation de fréquence pour toutes les bandes servies par l'antenne proposée (L5, L2, L1 et 2,3GHz (G5)). A l'exception de la bande L5, les trois bandes L2, L1 et G5 (2,3GHz) présentent des bandes passantes à -10dB supérieures à 24 MHz, ce qui répond positivement aux exigences du filtre de pré-corrélation à l'entrée du récepteur [27]. Le rapport axial pour les quatre bandes de l'antenne confirme sa polarisation circulaire. Les diagrammes de rayonnement montrent une valeur assez large de l'angle d'ouverture de l'antenne, ce qui est fortement désiré pour augmenter le nombre de satellites visibles des GNSS. En somme, on peut dire que la structure d'antenne à patchs empilés multi-bandes à polarisation circulaire présente effectivement une solution prometteuse pour les nouvelles technologies de systèmes de communication sans fil notamment les GNSSs et la 5G.

Bibliographie :

- [1] : Réseaux orange “ Qu’est-ce que la 5G ? ”site web, 10 septembre 2018.
- [2] : “ La 5G “cinquième génération de réseau mobile” Rapport, 2019.
- [3] : ARCEP “ Les enjeux de la 5G ”, Mars 2017.
- [4] : Emine Moutaly “ Etude d’une architecture radio-sur-fibre pour le fronthaul 5G ”thèse de doctorat soutenue le 11 Février 2020.
- [5] : ANFR “ Evaluation de l’exposition du public aux ondes électromagnétiques 5G ” Rapport, Juillet 2019.
- [6] : Frandroid “ Bande L, 2300 et 2600 MHz TDD : voici les futures bandes de fréquences 4G et 5G ” publié le 27 décembre 2015.
- [7]: Oluyemi P. Falade and al “Design of a compact multiband circularly polarized antenna for global navigation satellite systems and 5G/B5G applications ” publié le 23 January 2020.
- [8] : PIEPLU J-M “Gps et Galileo, Systèmes de navigation par satellites ” livre, Août 2006.
- [9] : Bouziani Mourad “Introduction aux GNSS ”, Mars 2017.
- [10] : Thomas Donal “Système de positionnement par satellite” Formation présenté à Avril 2019.
- [11]: Rodriguez Jonathan, «Fundamentals of 5G mobile networks” livre, ed. John Wiley Sons, 2015.
- [12]: Abdullah Al Mamun, Sultan Anwar, Hassan Ali “4G and 5G Mobile Communication Networks: Features Analysis, Comparison and Proposed Architecture” publié à juin 2016.
- [13] : Zaki Aissam KHEZZAR “Acquisition Rapide des Signaux GNSS Par un Récepteur Logiciel”.
- [14]: A. Balanis, “Antenna theory: analysis and design” livre, third edition, ed. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2005.

- [15]: Ouallil Lamia “Simulation des antennes sous HFSS (High Frequency Structure Simulator)” mémoire de Master de l’université mouloud Mammeri présenté à Tizi-Ouzou, 2012/2013.
- [16]: Yi. Huang and K. Boyle “Antennas from Theory to Practice”, livre, Ed. John Wiley & sons 2008.
- [17]: Diaoui Rida “Conception d’une nouvelle antenne ULB avec caractéristique de suppression de plusieurs bandes (WLAN, WiMax)” mémoire de Master de l’université 8 Mai 1945-Guelma, Mai 2013.
- [18]: Ramesh G. “Microstrip antenna design handbook” publié dans Artech house à 2001.
- [19]: Dahmani Sabra, Kouadri Kawther “Etude et conception des antennes planaires ULB à base de méta matériaux”, Université 8 Mai 1945 Guelma, 2019.
- [20]: D. Orban, G.J.K. Moernaut, “The Basics of Patch Antennas” Orban Microwave Products, Rapport présenté à 2010.
- [21]: Diaoui Rida “Conception d’une nouvelle antenne ULB avec caractéristique de suppression de plusieurs bandes (WLAN, WiMax) ” ” mémoire de Master de l’université 8 Mai 1945-Guelma, Mai 2013.
- [22]: Sami Hebib “nouvelle topologie d’antenne multi-bandes pour applications spatiales” université Paul Sabatier – Toulouse 2008
- [23]: Marwa Shakeeb “Circularly Polarized Microstrip Antenna” thèse de doctorat de Concordia University Montreal Quebec Canada, December 2010.
- [24]: Anne Claire LEPAGE “Caractéristiques des antennes” rapport, Le Doaré Pascal, 1999.
- [25]: TrueRC Canada “RHCP or LHCP” rapport, 20 juillet 2021.
- [26]: Donnay Fleury “Impact des multitrajets sur les performances des systèmes de navigation par satellite : Contribution à l’amélioration de la précision de localisation par modélisation bayésienne”, Ecole Centrale de Lille, 13 Jan 2010.
- [27]: Atia Salim “Annulation des Pics Secondaires de la Fonction de Corrélation des Signaux Modulés en BOC” Thèse de Doctorat, Université de M’Sila, soutenue le 08 janvier 2015.

[28]: Oluyemi P. Falade and al “Single Feed Stacked Patch Circular Polarized Antenna for Triple Band GPS Receivers” publié le 10 octobre 2012.

[29]: Kevin Geary and al “Single-Feed Dual-Band Stacked Patch Antenna for Orthogonal Circularly Polarized GPS and SDARS Applications”, HRL Laboratories, LLC, Malibu, MI USA, 2008.