

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة سعد دحلب البليدة
Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا
Faculté de Technologie

قسم الإلكترونيك
Département d'Électronique



Mémoire de Projet de Fin d'Études

présenté par

ABDELHADI Amine

&

HAROUN Imene

pour l'obtention du diplôme de Master en Electronique option Télécommunication & Réseau

Thème

Conception et réalisation d'une antenne multi bande pour le système GNSS

Proposé par : Dr. Mustapha DJEBARI

Année Universitaire 2011-2012

Remerciements

Nous ne pourrions commencer ce rapport sans présenter nos remerciements les plus sincères à Mr. **DJEBARI Mustapha**, qui n'a épargné aucun effort pour le bon déroulement de ce travail. Ses remarques et ses consignes ont été pour nous d'un grand apport.

Nous tenons aussi à exprimer nos remerciements à tout le personnel d'EMP et très particulièrement à Mr. KIMOUCHE Hocine chef du laboratoire micro-ondes, M. Hamid qui nous ont toujours aidé et nous ont offert une agréable ambiance de travail afin d'effectuer ce projet dans les meilleures conditions.

Nos sincères remerciements iront aussi à tout le personnel de ATMobilis et très particulièrement à Mr WAFI directeur de formation et Mme ZAREB Amina qui nous ont également aidé dans ce projet de fin d'études.

Finalement, merci à toute personne qui nous a aidés pour la réalisation de ce travail.

Du fond du cœur, merci.

ملخص:

نموذج من هوائي مسطح ذو تكنولوجيا الشريط الدقيق متعدد النطاق و الأخرى مناسب لتطبيقات نظام تحديد المواقع العالمي في المستقبل، تم اقتراحه، تنفيذه، محاكاته و إنجازة.

وقد أعطى الهوائي الأداء الجيد، الذي سيسمح له لاستقبال عدة اشارات من الأقمار الصناعية GNSS .
نتائج المحاكاة والقياس المتحصل عليها هي في اتفاق جيد.

كلمات المفاتيح: هوائيات؛ مسطحة؛ شريط دقيق؛ متعددة النطاق؛ GNSS .

Résumé: Une antenne prototype de technologie micro-ruban plane multi bande appropriée pour les futures applications GNSS est proposée, implémentée, simulée et réalisée. L'antenne a donnée de bonnes performances, ce qui lui permettra de recevoir plusieurs signaux à partir des satellites GNSS.

Les résultats simulés et mesurés sont en bonne concordance.

Mots clés : Antennes; plane; Micro-ruban; Multi bandes; GNSS.

Abstract: A planar micro strip multiband prototypes antennas appropriate for future applications of GNSS is proposed, implemented, simulated and realized

The antenna has given good performance, allowing it to receive several signals from GNSS satellites.

The simulated and measured results are in good agreement.

Keywords : Antennas; Planar, Microstrip; multiband; GNSS

Listes des acronymes et abréviations

EM	Electromagnétique.
CST	Computer Simulation Technology.
DBS	Direct broadcast satellite
GLONASS	Global Orbiting Navigation Satellite System.
GNSS	Global Navigation Satellite System.
GPS	Global Positioning System.
GSM	Global System for Mobile Communications.
RF	Radiofréquence.
TOS	Taux d'onde stationnaire.
TV	Télévision.
URSS	Union des républiques socialistes soviétiques.
VSWR	Voltage standing wave ratio.
WLAN	<i>Wireless Local Area Network.</i>

Symboles

Δf	Largeur de bande passante.)
Θ	Thêta.
ϕ	Phi.
C	Vélocité de la lumière.
ϵ_r	La permittivité relative du substrat diélectrique.
λ	Longueur d'onde dans le vide.
λ_g	Longueur d'onde guidée.
B_r	Largeur de bande relative.
dB	Décibel.
dB _i	Décibel isotopique.
E	Champ électrique.
H	Champ magnétique.
h	Epaisseur du substrat diélectrique.
P_a	Puissance d'alimentation.
P_r	Puissance rayonnée.
R_A	Résistance d'entrée.
S_{11}	Coefficient de réflexion (Pertes de retour).
X_A	Réactance de l'antenne.
Z_A	Impédance d'entrée de l'antenne.
Z_0	L'impédance caractéristique.
$\partial/\partial t$	dérivées partielles.
Δt	différentielles.

Table des matières

Remerciements

Listes des acronymes et abréviations

Symboles

Introduction générale	1
Chapitre 1 Introduction au système GNSS et généralités sur les antennes	4
1.1 Introduction	4
1.2 Principe de fonctionnement	4
1.3 Structure de GNSS.....	6
1.3.1 GPS.....	6
1.3.2 GLONASS.....	6
1.3.3 GALILEO	7
1.4 Applications du GNSS.....	8
1.5 Notions de base sur l'antenne GNSS.....	8
1.5.1 Exigences des performances de l'antenne GNSS.....	9
1.6 Conclusion.....	10
1.7 Généralités sur les antennes.....	11
1.7.1 Définition d'une antenne.....	11
1.8 Caractéristiques d'antenne.....	11
1.8.1 Caractéristiques électriques	12
1.8.2 Caractéristiques électromagnétique	14
1.9 Types d'antennes	18
1.10 Les différentes sortes d'antennes.....	19
1.10.1 Antennes filaires.....	19
1.10.2 Antennes à ouverture rayonnante	19
1.10.3 Antennes à réflecteurs	20
1.10.4 Les antennes imprimées.....	20
1.11 Conclusion.....	21
Chapitre 2 Antennes planes à micro rubans.....	22
2.1 Introduction	22
2.2 Les applications des antennes imprimées	22

2.3	Avantages et inconvénients des antennes micro rubans	23
2.3.1	Avantages	24
2.3.2	Inconvénients	24
2.4	Structure d'une antenne micro ruban	25
2.5	Les techniques d'alimentations	26
2.5.1	Alimentations par Sonde coaxial	26
2.5.2	Alimentation par couplage par Proximité	27
2.5.3	Alimentation par une ligne micro ruban	27
2.6	Principe de fonctionnement	27
2.7	Influence des paramètres géométriques sur les caractéristiques d'antenne .	29
2.7.2	Largeur W du patch	30
2.7.3	Longueur L du patch	31
2.8	Techniques de miniaturisation et d'élargissement de la bande passante	31
2.8.1	Modification de la forme de l'élément rayonnant	32
2.8.2	Insertion de fentes dans le pavé rayonnant	32
2.8.3	Allongement des longueurs électriques	32
2.8.4	Création de nouveaux résonateurs	33
2.8.5	Combinaison des effets	33
2.9	Conclusion	34
Chapitre 3	Conception, simulation et réalisation	35
3.1	Introduction	35
3.2	Cahier de charges	35
3.3	Choix de l'outil de simulation	36
3.4	Excitation de l'antenne	37
3.5	Conception d'une antenne rectangulaire	37
3.5.1	Etude paramétrique de l'antenne rectangulaire	37
3.5.2	Configuration optimale de l'antenne rectangulaire	41
3.5.3	Conclusion	43
3.5.4	Insertion des fentes dans l'antenne rectangulaire	44
3.5.5	Influence paramétrique de la longueur des languettes	46
3.5.6	Polarisation, diagramme de rayonnement et gain de l'antenne multi bande	49
3.5.7	Conclusion	55

3.6	Conception d'une antenne large bande	56
3.6.1	Etude paramétrique de l'antenne circulaire	56
3.6.2	Antenne circulaire optimisée	59
3.6.3	Conclusion	60
3.6.4	Etude paramétrique de l'antenne circulaire à masse réduite.....	61
3.6.5	Insertion des fentes.....	64
3.6.6	Etudes des performances de l'antenne large bande.....	67
3.6.7	Conclusion	71
3.7	Réalisation Et Mesure	72
3.7.1	Introduction.....	72
3.7.2	Appareil de mesure (Analyseur de réseaux)	72
3.7.3	Prototypes réalisées	73
3.7.4	Mesure du coefficient de réflexion	73
3.7.5	Conclusion	77
	Conclusion générale.....	78

Liste des figures

<i>Figure 1.1</i>	Illustrations des différents segments constitutifs d'un système GNSS.	5
<i>Figure 1.2</i>	Satellite GPS.	6
<i>Figure 1.3</i>	Satellite GLONASS.	7
<i>Figure 1.4</i>	Satellite GALILEO.	7
<i>Figure 1.5</i>	Spectre des fréquences system GNSS.	8
<i>Figure 1.6</i>	Représentation en quadripôle.	12
<i>Figure 1.7</i>	Représentation des courants surfaciques dans le plan E et le plan H d'une antenne plaquée.....	14
<i>Figure 1.8</i>	Diagramme de rayonnement.	15
<i>Figure 1.9</i>	Angle d'ouverture.	15
<i>Figure 1.10</i>	Représentation d'une onde électromagnétique se propageant dans l'espace.....	16
<i>Figure 1.11</i>	Représentation d'une onde électromagnétique se propageant dans l'espace.....	16
<i>Figure 1.12</i>	Les zones de rayonnement d'une antenne.....	17
<i>Figure 1.13</i>	Exemples d'antennes filaires.	19
<i>Figure 1.14</i>	Exemples d'antennes à ouverture rayonnante.....	19
<i>Figure 1.15</i>	Exemples d'Antennes à réflecteurs.....	20
<i>Figure 1.16</i>	Exemples d'Antenne imprimé.....	20
<i>Figure 2.1</i>	Exemples des antennes patches.	23
<i>Figure 2.2</i>	Divers types d'éléments rayonnants.....	25
<i>Figure 2.3</i>	Structure d'une antenne patch rectangulaire.	25
<i>Figure 2.4</i>	Alimentations par Sonde coaxial.....	26
<i>Figure 2.5</i>	Alimentation par couplage par Proximité.....	27
<i>Figure 2.6</i>	Alimentation par une ligne micro ruban.....	27
<i>Figure 2.7</i>	Rayonnement d'une antenne patch rectangulaire.....	28
<i>Figure 2.8</i>	Principe de Babinet.	32
<i>Figure 3.1</i>	Antenne excitée par un port coaxial.	37
<i>Figure 3.2</i>	Dimensions de l'antenne rectangulaire référence.....	38
<i>Figure 3.3</i>	Calcul de la Largeur de la ligne d'alimentation Wf.	38
<i>Figure 3.4</i>	Evolution du module du coefficient de réflexion en fonction de la longueur Lp.	39
<i>Figure 3.5</i>	Evolution du module du coefficient de réflexion en fonction de la largeur Wp.....	40
<i>Figure 3.6</i>	Evolution du module du coefficient de réflexion en fonction du largeur Wg.	40
<i>Figure 3.7</i>	Module du coefficient de réflexion de l'antenne rectangulaire simulée.....	41
<i>Figure 3.8</i>	Taux d'onde stationnaire de l'antenne rectangulaire simulée.	42
<i>Figure 3.9</i>	Impédance d'entrée sur l'abaque de Smith de l'antenne rectangulaire.	42
<i>Figure 3.10</i>	Diagramme de rayonnement de l'antenne rectangulaire.	43
<i>Figure 3.11</i>	Antenne rectangulaire à fente.	44
<i>Figure 3.12</i>	Evolution de l'antenne multibande en fonction du coefficient de réflexion.....	45
<i>Figure 3.13</i>	Dimensions optimales de l'antenne multi bande.	45
<i>Figure 3.14</i>	Evolution du module du coefficient de réflexion en fonction de la longueur L1. ...	47
<i>Figure 3.15</i>	Evolution du module du coefficient de réflexion en fonction de la longueur L4. ...	47
<i>Figure 3.16</i>	Evolution du module du coefficient de réflexion en fonction de la longueur L2. ...	48

<i>Figure 3.17</i> Distribution de courant électrique pour différentes phases.	49
<i>Figure 3.18</i> Distribution de courant surfacique sur l'élément rayonnant et le plan de masse. .	50
<i>Figure 3.19</i> Diagramme de rayonnement de l'antenne simulée pour $\phi=0^\circ$	51
<i>Figure 3.20</i> Diagramme de rayonnement de l'antenne simulée pour $\phi=90^\circ$	52
<i>Figure 3.21</i> Impédance d'entrée de l'antenne simulée.	53
<i>Figure 3.22</i> Taux d'ondes stationnaires de l'antenne simulée.	53
<i>Figure 3.23</i> Module du coefficient de réflexion de l'antenne multi bande à fentes simulée.....	54
<i>Figure 3.24</i> Antenne circulaire de référence.	57
<i>Figure 3.25</i> Evolution du module du coefficient de réflexion en fonction du rayon.	57
<i>Figure 3.26</i> Evolution du module du coefficient de réflexion en fonction de L_g	58
<i>Figure 3.27</i> Module du coefficient de réflexion de l'antenne circulaire.	59
<i>Figure 3.28</i> Taux d'onde stationnaire de l'antenne circulaire simulée.	60
<i>Figure 3.29</i> Impédance d'entrée de l'antenne circulaire simulée	60
<i>Figure 3.30</i> Antenne circulaire à masse réduite.	62
<i>Figure 3.31</i> Evolution du module du coefficient de réflexion en fonction des paramètres r , L_g et h	63
<i>Figure 3.32</i> Module du coefficient de réflexion en fonction des paramètres optimaux.	63
<i>Figure 3.33</i> Taux d'onde stationnaire en fonction des paramètres optimaux.	64
<i>Figure 3.34</i> Antenne large bande.	65
<i>Figure 3.35</i> La répartition du courant surfacique de l'antenne circulaire à masse réduite.	66
<i>Figure 3.36</i> Evolution de l'antenne circulaire en fonction du coefficient de réflexion.	66
<i>Figure 3.37</i> Diagramme de rayonnement de l'antenne simulée pour $\phi=0^\circ$	67
<i>Figure 3.38</i> Diagramme de rayonnement de l'antenne simulée pour $\phi=90^\circ$	68
<i>Figure 3.39</i> Impédance d'entrée de l'antenne large bande.	69
<i>Figure 3.40</i> Taux d'onde stationnaire de l'antenne large bande.	70
<i>Figure 3.41</i> Coefficient de réflexion de l'antenne large bande.	70
<i>Figure 3.42</i> Analyseur de réseaux.	72
<i>Figure 3.43</i> Antenne multi-bande (à gauche) et Antenne large bande (à droite).	73
<i>Figure 3.44</i> Coefficient de réflexion de l'antenne multi bande simulée et mesurée.	74
<i>Figure 3.45</i> Coefficient de réflexion de l'antenne large bande simulée et mesurée.	75

Liste des tableaux

<i>Tableau 1.1</i>	Types d'antennes.....	18
<i>Tableau 2.1</i>	Quelques applications des Antenne micro rubans.....	23
<i>Tableau 2.2</i>	Principaux substrats utilisés dans le domaine des hyperfréquences.....	30
<i>Tableau 2.3</i>	Techniques de miniaturisation et d'élargissement des bandes.....	33
<i>Tableau 3.1</i>	Les bandes de fréquence du système GNSS.....	36
<i>Tableau 3.2</i>	Paramètres optimaux de l'antenne rectangulaire simulée en mm.....	41
<i>Tableau 3.3</i>	Dimensions optimales de l'antenne multi bande en mm.....	46
<i>Tableau 3.4</i>	Gain et angle d'ouverture de l'antenne simulée pour $\phi=0^\circ$ et $\phi=90^\circ$	52
<i>Tableau 3.5</i>	Module du coefficient de réflexion et bande passante de l'antenne multi bande simulée.. ..	54
<i>Tableau 3.6</i>	Dimensions optimales de l'antenne circulaire en mm.....	59
<i>Tableau 3.7</i>	Dimensions optimales l'antenne circulaire à masse réduite en mm.....	62
<i>Tableau 3.8</i>	Dimensions optimales de l'antenne large bande.....	65
<i>Tableau 3.9</i>	Gain et angle d'ouverture de l'antenne simulée pour $\phi=0^\circ$ et $\phi=90^\circ$. ..	68
<i>Tableau 3.10</i>	Modules du coefficient de réflexion et bande passante de l'antenne large bande simulée.. ..	71
<i>Tableau 3.11</i>	Modules du coefficient de réflexion en simulation et en mesure.....	76
<i>Tableau 3.12</i>	Points forts et faibles des antennes multi-bandes et large-bandes.....	77

Introduction générale

Depuis quelques années, face à la multiplication des standards et la diversité de leurs spécifications, une nouvelle tendance cherchant à concevoir des antennes supportant plusieurs standards est apparue. L'antenne doit répondre aux contraintes de multiplication de bandes de fréquences et d'intégration dans les émetteurs et récepteurs.

L'intérêt pour les antennes multi-bandes ne fait que croître, en particulier dans le but de réduire le nombre d'antennes embarquées en associant plusieurs applications sur une même antenne. Cependant, les performances des antennes multi-bandes actuelles sont traditionnellement limitées par la forme et l'arrangement de leurs éléments rayonnants.

Dans ce travail de projet de fin d'études, nous nous proposons de concevoir une antenne multi-bande pour la réception des signaux du system GNSS (Global Navigation Satellite System) qui est un système de positionnement et radionavigation par satellite permettent à un utilisateur disposant d'un récepteur de se positionner dans l'espace et dans le temps.

Le système GNSS émerge plusieurs standard tel que le GPS américain, GLONASS le russe et prochainement GALILEO l'europpéen. En particulier, la diffusion croissante de ces systèmes de radionavigation a permis le développement de nouvelles architectures d'antennes combinant deux systèmes de radionavigation ou plus; ce dernier est en plein essor et augmentera l'offre de l'infrastructure globale de navigation par satellite.

Les progrès concernant la multiplication des bandes de fréquences ont généré un besoin croissant d'antennes multi-bandes ou large-bandes. En effet, l'emploi de telles antennes s'est généralisé dans divers systèmes de télécommunications modernes. Cependant, la diversité des caractéristiques de différentes bandes (la forme des

diagrammes de rayonnement, le type de polarisation, la largeur de bande nécessaire) ont augmenté la difficulté de la conception de ces antennes. Les antennes permettant un contrôle de ces caractéristiques pour les différentes bandes de fréquences et présentant une méthodologie de dimensionnement aisée qui seront l'objet de ce mémoire.

Le mémoire est organisé comme suit:

- Le premier chapitre est consacré à la présentation générale du système GNSS et un état de l'art sur les antennes. Au début, une introduction aux systèmes GNSS et leurs divers standards sont décrits, plus particulièrement le standard GPS ainsi que ses deux concurrents, l'un européen nommé GALILEO et l'autre russe GLONASS. Après une brève étude sur l'évolution de ces standards, leurs structures de base, leur principe de fonctionnement et leurs applications ainsi que les critères de choix de l'antenne GNSS. Ensuite, une vision non exhaustive des différents paramètres caractéristiques des antennes utilisées est discutée. Nous clôturons cette partie de ce chapitre par un aperçu sur quelques types d'antennes.

- Le deuxième chapitre est consacré à l'étude théorique des antennes micro-rubans. Nous commençons par un historique et une définition des antennes imprimées outre ses applications et leurs avantages et inconvénients. Ensuite nous présentons la structure générale d'une antenne patch et les différentes techniques d'alimentations employées ainsi que son principe de fonctionnement. Après, l'influence des paramètres géométriques sur les caractéristiques du résonateur est discutée.

A la fin de cette partie nous nous intéressons aux antennes multi-bandes. Cela dit, les principales techniques d'obtention d'antennes multi bande et large bande passante seront décrites. Les performances obtenues discutées et conclues par un tableau résumant les différents points de chaque technique.

- Dans le troisième chapitre nous mettrons le point en particulier sur la conception et la réalisation d'antenne.

D'après le cahier de charges et le choix de l'outil de simulation qui est une étape indispensable pour la réalisation réelle des antennes, puisqu'elle nous guide et nous oriente vers la bonne sélection des paramètres statiques et des conditions de fonctionnement selon l'objectif fixé pour la réalisation, Nous allons étudier les

différents paramètres caractéristiques simulés et leurs effets sur les performances de l'antenne. Nous présentons dans une première partie, une antenne multi bande, les différentes étapes de conception sont détaillées et les résultats de simulation sont discutés. Cette étude décrit l'impact de ces différents paramètres sur les performances d'antenne et permet de tirer quelques règles de conception.

Une seconde partie est réservée à la conception d'une antenne large bande afin de faire la comparaison entre les deux.

En se basant sur les résultats de la simulation deux prototypes sont réalisés et mesurés par l'analyseur de réseaux et les performances simulées et mesurées vont être comparés. Cette phase de mesure est indispensable dans la conception des antennes, car elle permet soit de valider les concepts développés, soit de mettre à jour des erreurs ou imprécisions dans la simulation ou la réalisation des prototypes avant d'être commercialiser.

Chapitre 1 Introduction au système GNSS et généralités sur les antennes

1.1 Introduction

L'acronyme GNSS (Global Navigation Satellite System) désigne l'ensemble des systèmes mondiaux de radio-positionnement par satellites. Aujourd'hui le GPS (Global Positioning System) américain, fort de ses 10 ans d'opérationnalité, domine le marché, le GLONASS (Global Orbiting Navigation Satellite System) russe est en phase de revitalisation, tandis que le système européen Galileo lance ses premiers satellites. Chacun de ces GNSS [1] est nominalelement constitué d'une constellation d'une trentaine de satellites dédiés qui émettent de façon continue des signaux radioélectriques dont la structure est parfaitement définie. Les utilisateurs équipés de récepteurs, peuvent, si au moins quatre satellites sont en visibilité, déterminer l'heure et leur propre position, en mesurant la distance qui les sépare de ces satellites dont les coordonnées sont connues.

1.2 Principe de fonctionnement

Les systèmes de navigation par satellite GNSS [2] permettent à un utilisateur disposant d'un récepteur de se positionner dans l'espace et dans le temps. Chaque système GNSS (GPS, Galileo, GLONASS) dispose d'une constellation de satellites dont les positions sont connues avec précision. A partir du principe de la triangulation, l'utilisateur estime grâce aux signaux envoyés par chacun des satellites le pseudo distances le séparant de chacun d'eux. A partir de cette estimation du pseudo distances sur un minimum de 4 satellites, les coordonnées de l'utilisateur et la date (temps) sont déterminées. Ainsi

l'utilisateur est capable de se positionner dans l'espace et le temps en tout point du globe avec une grande précision.

Ces systèmes ont trouvé de nombreuses applications dans divers domaines (défense, aviation civile, automobile, agriculture, géologie...). Ces systèmes sont désormais devenus incontournables et représentent des enjeux tant stratégiques que commerciaux.

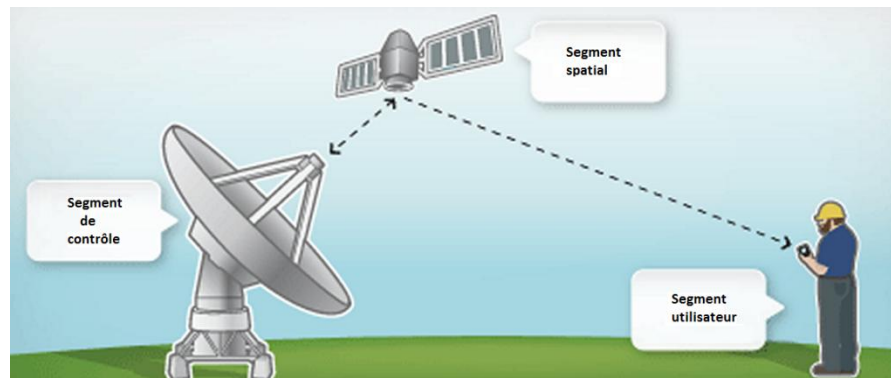


Figure 1.1: Illustrations des différents segments constitutifs d'un système GNSS.

Tout système de navigation par satellite est constitué de 3 segments (Figure 1.1) :

- **Le segment spatial** : constitué des satellites émetteurs en orbite autour de la terre. Ce segment est constitué à l'origine de plusieurs satellites répartis suivant des plans orbitaux. La période orbitale de chaque satellite de la constellation est d'environ 12 heures à une altitude d'environ 20000 Km. Les différents systèmes tels que GPS (Américain), GLONASS (Russe), Galileo (Européen) possèdent des constellations différentes (nombre de plans orbitaux, nombre de satellites, fréquences d'émission...) mais ils fonctionnent sur le même principe.
- **Le segment de contrôle** : constitué des stations sol. Ce segment est constitué d'une station mère, des stations sol recevant les signaux en provenance des satellites et des stations d'émission pour apporter les corrections nécessaires au bon fonctionnement du système (paramètres orbitaux, correction d'horloge).
- **Le segment utilisateur** : constitué d'un récepteur GNSS. Cet équipement permet à l'utilisateur de poursuivre et recevoir simultanément les signaux de chaque satellite visible. Il permet d'obtenir avec précision son positionnement (coordonnées et temps) ainsi que sa vitesse. Les performances du récepteur

s'améliorent avec l'augmentation du nombre de satellites visibles de la constellation.

1.3 Structure de GNSS

Le système GNSS combine l'utilisation des satellites GPS, GLONASS et GALILEO.

1.3.1 GPS

Le GPS (figure 1.2) est le second système de navigation par satellite développé par les Etats-Unis, après Transit. Son développement commença dans les années 70 mais le système ne fut pleinement opérationnel que dans les années 90 lorsque la constellation initialement prévue fut atteinte.



Figure 1.2: Satellite GPS.

Le segment spatial est constitué actuellement d'une constellation de 31 satellites suivent une orbite quasi circulaire de rayon orbital moyen 26560 km qu'ils parcourent en un demi jour sidéral, soit en 11h 58min 02s.

1.3.2 GLONASS

Le GLONASS (figure 1.3) est le premier système de navigation par satellite développé par l'URSS, puis par la Russie. Son développement commença dans les années 70 avec pour but d'être pleinement opérationnel dans les années 90. La chute de l'URSS a entraîné son déclin mais, en 2001, la Russie s'est engagée à restaurer le système.

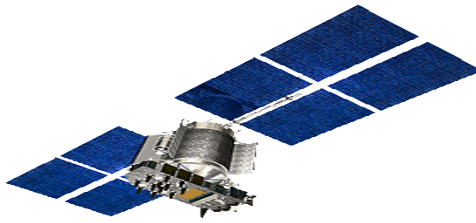


Figure 1.3: Satellite GLONASS.

Le segment spatial est constitué actuellement d'une constellation de 20 satellites, dont 19 sont opérationnels et 24 prévus pour fin 2009.

1.3.3 GALILEO

C'est le futur GNSS européen (figure 1.4) qui devrait être pleinement opérationnel en 2013 et qui sera sous contrôle strictement civil, contrairement aux autres systèmes existants. Le segment spatial sera composé de trente satellites placés sur trois orbites circulaires de rayon orbital moyen 29600 km.



Figure 1.4: Satellite GALILEO.

Tous les trois systèmes diffuseront des signaux sur plusieurs bandes, la figure 1.5 illustre la majorité des signaux du système GNSS.

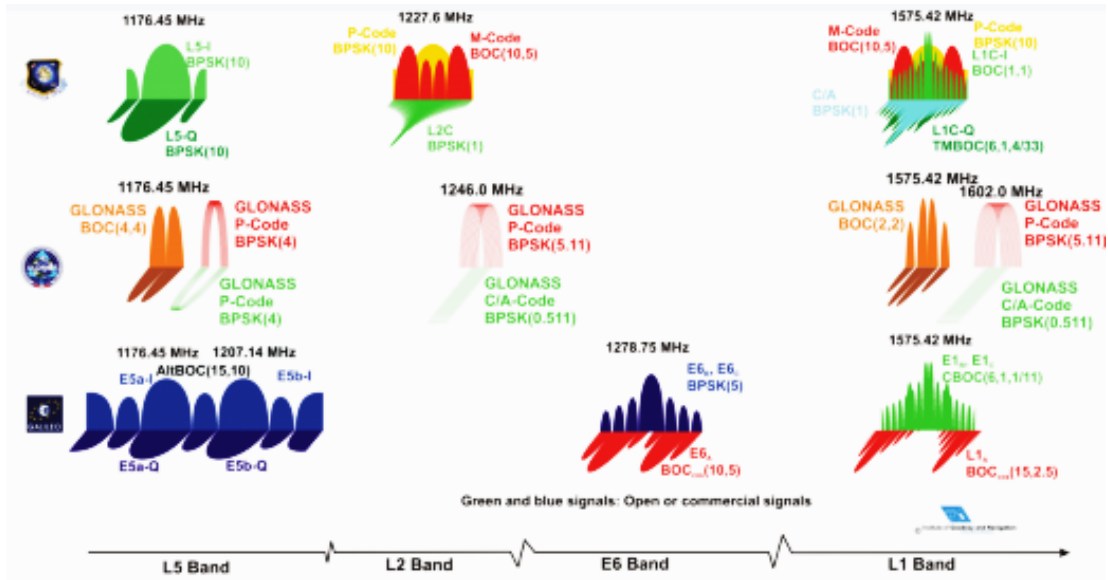


Figure 1.5: Spectre des fréquences system GNSS.

1.4 Applications du GNSS

Quelques applications [3] du GNSS:

- ✓ La navigation, depuis les récepteurs portables, les navigateurs de véhicules, jusqu'aux centrales de navigation des avions et navires.
- ✓ Le transfert de temps et la synchronisation, scientifique ou pour les télécommunications
- ✓ La topographie, en constructions ou travaux publics.
- ✓ La géophysique, par exemple la surveillance des failles.
- ✓ La gestion de réseaux de transport, bus, remorques.
- ✓ La surveillance des zones de pêche.

1.5 Notions de base sur l'antenne GNSS

Dans cette section, les objectifs de performances de l'antenne GNSS sont répertoriés à partir de performance du système GNSS, suivi par des critères de sélection d'antenne basé sur des considérations de performance combinés, de coût et de l'application. Différents conceptions d'antennes patch GNSS sont disponibles dans le commerce des antennes.

1.5.1 Exigences des performances de l'antenne GNSS

Plusieurs caractéristiques [4] du point de vue conception de l'antenne en général, tels que la fréquence centrale, la bande passante, et la polarisation, sont d'abord définis avec des applications GNSS à l'esprit. Puis quelques autres critiques et exigences de performance d'antenne sont pris en considération pour applications GNSS diverses décrit.

a) Fréquence de résonance

En réalité, la fréquence de résonance se déplacerait à cause de l'emballage d'antenne, donc la conception des éléments sera de 5 MHz "haute", une fois le radôme est installé, la fréquence sera décaler vers le bas à la fréquence de fonctionnement. En outre, la fréquence de décalage peut résulter de différentes tailles de plan de masse pour les antennes micro ruban.

b) Taux d'ondes stationnaires

Le TOS est très important pour les antennes GNSS parce que les signaux reçus des satellites sont généralement très faible et les réflexions sont indésirables sur la ligne de transmission reliant l'antenne et le récepteur GNSS. Une valeur de TOS inférieur à 2:1 est considéré comme acceptable pour la plupart des applications GNSS.

c) Bande passante

Les antennes GNSS devrait avoir juste assez suffisante bande passante pour les signaux GNSS, qui est environ 20 MHz pour les signaux GNSS modernisées autour de la fréquence centrale.

d) Polarisation

Dans les applications du GNSS, les signaux transmis par satellites ont une polarisation circulaire pour minimiser les fluctuations de puissance du signal dues aux effets de propagation et de l'orientation plate-forme de l'utilisateur.

e) Diagramme de rayonnement

Une bonne couverture sur l'hémisphère supérieur pour une antenne GNSS signifie idéalement l'antenne aurait un gain uniforme dans la région où les satellites sont visibles du zénith. En raison de la taille d'ouverture, le coût, et d'autres raisons, les performances souhaitables de l'antenne réelle est souvent inférieure à ces caractéristiques. Le gain de l'antenne devrait être suffisant pour maintenir le signal reçu à partir des satellites pour répondre à la réception de signal minimum demande de puissance du récepteur GNSS pour bonne localisation par satellite.

1.6 Conclusion

Dans un premier temps, nous avons présenté une introduction générale au standard GNSS, son principe de fonctionnement et sa structure qu'a connue dans les dernières années et qu'il va connaître dans les années à venir.

Après nous avons exposé les différentes fréquences usées dans ce système ainsi que les principaux domaines d'applications utilisés de ce dernier.

Enfin des exigences et des critères de choix d'antennes GNSS ont été décrits pour performances de l'antenne.

1.7 Généralités sur les antennes

1.7.1 Définition d'une antenne

Une antenne [5] est un transducteur entre la ligne de transmission connectée à un générateur et le milieu où l'onde rayonne. Elle permet de recevoir et d'émettre les ondes radioélectriques et transforme l'énergie guidée en énergie rayonnée et vice versa.

Lorsqu'elle est utilisée pour transmettre l'énergie électromagnétique d'une source radioélectrique vers le milieu de propagation, on l'appelle antenne d'émission. Par contre, lorsqu'elle est utilisée en sens inverse, on l'appelle antenne de réception.

L'antenne a plusieurs rôles dont les principaux sont les suivants :

- ✓ Permettre une adaptation correcte entre l'équipement radioélectrique et le milieu de propagation.
- ✓ Assurer la transmission ou la réception de l'énergie dans des directions privilégiées.
- ✓ Transmettre le plus fidèlement possible une information.

1.8 Caractéristiques d'antenne

Afin de décrire les caractéristiques [6] et les performances des antennes, divers paramètres sont utilisés. Ces paramètres sont classés en deux groupes:

- ✓ Le premier groupe caractérise l'antenne comme un élément de circuit électrique (Z_A et S_{11}).
- ✓ le second groupe s'intéresse à ses propriétés de rayonnement, tel que le diagramme de rayonnement, la directivité et le gain.

Enfin, précisons que la notion de puissance rayonnée joue un rôle important dans l'étude des antennes plaquées que nous développerons ultérieurement.

1.8.1 Caractéristiques électriques

a) Impédance d'entrée

On appelle impédance d'entrée de l'antenne l'impédance vue à l'entrée de ce composant. Elle est représentée par:

$$Z_A = R_A + jX_A \quad (1.1)$$

L'impédance de l'antenne est influencée par les objets environnants, en particulier par des objets ou des plans métalliques proches ou par d'autres antennes.

Nous ne traiterons dans ce paragraphe que de l'impédance propre de l'antenne, c'est-à-dire celle de l'antenne placée seule et rayonnant dans l'espace vide infini.

La résistance d'entrée R_A représente un terme de dissipation. Il est lié, d'une part à la puissance rayonnée et d'autre part, à la puissance perdue par effet Joule. Cette dernière est en général petite par rapport à la puissance rayonnée pour assurer le fonctionnement optimal de l'antenne.

Cependant les pertes par effet Joule peuvent représenter des valeurs non négligeables en fonction de la géométrie de l'antenne. Les pertes dans le plan de masse sont aussi à prendre en compte.

La réactance X_A est liée à la puissance réactive stockée au voisinage de l'antenne.

Cette notion est très importante pour l'adaptation des antennes aux feeders qui les alimentent pour éviter toute réflexion.

b) Coefficient de réflexion S_{11}

Une antenne peut être représentée comme un quadripôle (figure 1.6), défini par les paramètres S :

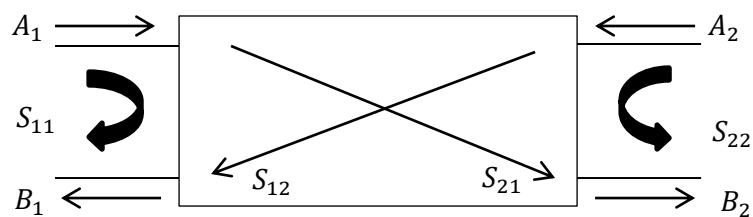


Figure 1.6: Représentation en quadripôle.

Le coefficient de réflexion S_{11} met en évidence l'absorption de l'énergie par l'antenne. C'est sur ce paramètre que l'on se base lors de l'optimisation des antennes.

L'impédance d'entrée de l'antenne est utilisée pour insérer cet élément de façon optimale dans la chaîne de l'émetteur ou du récepteur. Si l'impédance caractéristique de la ligne de propagation est Z_0 et l'impédance d'entrée de l'antenne Z_A , le signal se réfléchit à l'entrée de l'antenne avec un coefficient Γ dont l'expression est :

$$\Gamma = \frac{Z_A - Z_0}{Z_A + Z_0} \quad (1.2)$$

Dans le cas où le coefficient de réflexion est non nul, un système d'ondes stationnaires apparaît et la puissance émise par le générateur n'est pas transmise de façon optimale à l'antenne.

C'est donc ce cas de réflexion minimale à l'entrée de l'antenne qu'on visera. Il correspond à un coefficient de réflexion S_{11} proche de 0 en valeurs linéaires. On admet qu'une bonne adaptation est obtenue lorsque le coefficient de réflexion est inférieur à -10 dB. Cela correspond à un rapport d'ondes stationnaires (VSWR), compris entre 1 et 1.2. Le rapport d'ondes stationnaires est défini comme le rapport de la tension maximale à la tension minimale sur une ligne.

c) Largeur de bande

La largeur de bande [7], appelée aussi bande passante, d'une antenne définit le domaine de fréquences dans lequel le rayonnement de l'antenne présente les caractéristiques requises. Il s'agit la plupart du temps de la puissance transmise par l'antenne.

La valeur des limites sur les critères de fonctionnement de l'antenne définit un domaine de fréquences situé entre une valeur minimale f_1 et une valeur maximale f_2 . La bande de fréquence Δf est définie par la différence entre ces deux fréquences :

$$\Delta f = f_2 - f_1 \quad (1.3)$$

La largeur relative de bande B_r est un pourcentage exprimant le rapport de la bande à la fréquence centrale f_0 .

$$B_r = \frac{f_2 - f_1}{f_0} \quad (1.4)$$

1.8.2 Caractéristiques électromagnétique

a) diagramme de rayonnement

La représentation graphique de la fonction caractéristique de l'antenne porte le nom de diagramme de rayonnement. La direction du maximum de rayonnement est appelée l'axe de rayonnement de l'antenne.

Le diagramme de rayonnement [8] indique les variations de champ ou de puissance en fonction des deux coordonnées sphériques θ et ϕ .

Lorsque la polarisation de l'antenne est linéaire, le diagramme est celui d'un dipôle magnétique, il est généralement représenté dans deux plans de coupe particuliers

- Le plan E,
- Le plan H.

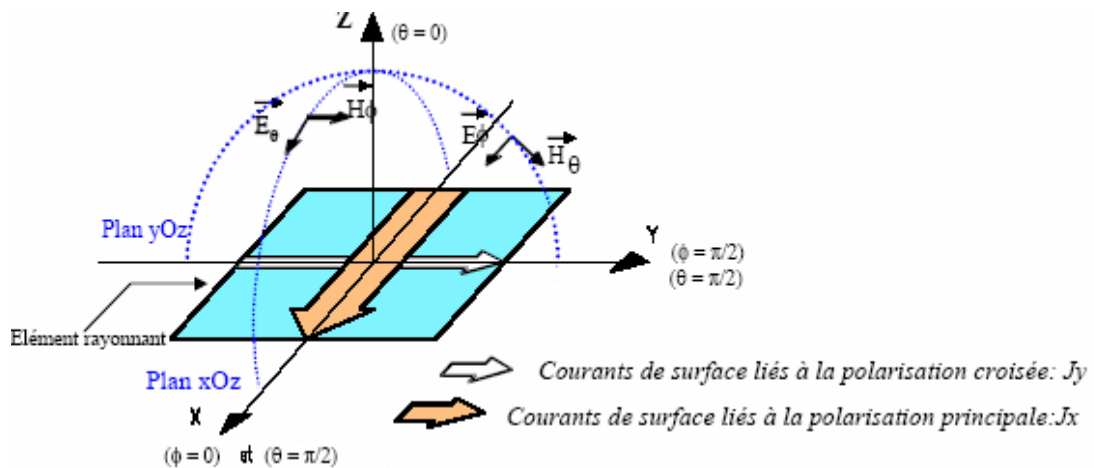


Figure 1.7: Représentation des courants surfaciques dans le plan E et le plan H d'une antenne plaquée.

Ces deux plans contiennent le vecteur de courant surfacique dirigé suivant l'axe du mode excité. Toutefois, à ce courant principal vient s'ajouter un courant surfacique perpendiculaire (Figure 1.7) dû à l'excitation des modes supérieurs de la cavité. De ce fait, ce courant perpendiculaire favorise l'apparition de composantes croisées du champ rayonné. Ci-dessous la figure 1.8 présente les définitions des principaux paramètres associés à un diagramme de rayonnement :

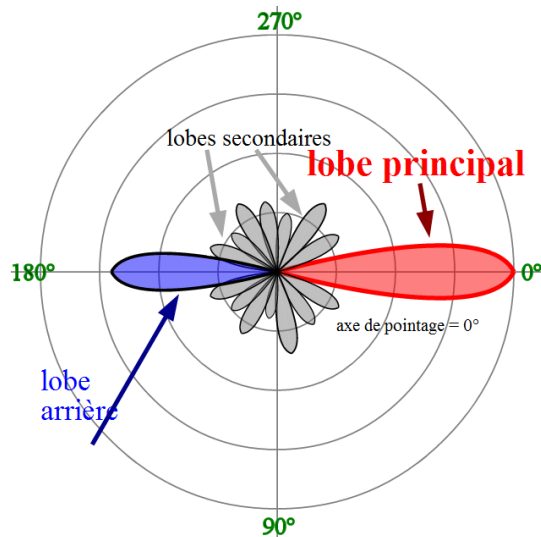


Figure 1.8: Diagramme de rayonnement.

b) Angle d'ouverture

L'angle d'ouverture (figure 1.9) caractérise la largeur du lobe principal. L'angle d'ouverture à 3 dB représente la portion de l'espace dans lequel la majeure partie de la puissance est rayonnée.

Il s'agit de l'angle entre les deux directions autour du lobe principal où la puissance rayonnée est égale à la moitié de la puissance rayonnée dans la direction de rayonnement maximal.

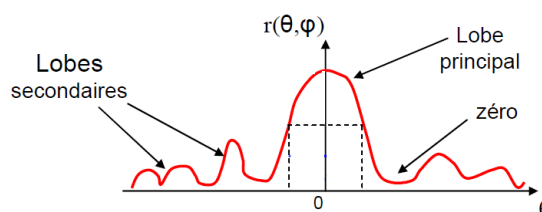


Figure 1.9: Angle d'ouverture.

c) Polarisation

On sait qu'à une grande distance des sources le champ électromagnétique est constitué par des vibrations transversales. Ces vibrations sont définies par deux vecteurs perpendiculaires : le champ électrique E et le champ magnétique H .

Par convention la polarisation de l'onde (figure 1.10) est la direction du champ électrique E .

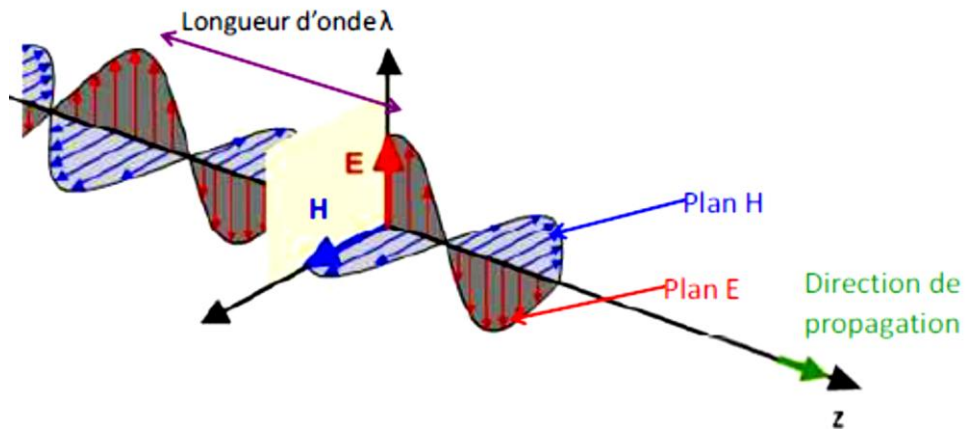


Figure 1.10: Représentation d'une onde électromagnétique se propageant dans l'espace.

Si le vecteur champ électrique conserve une direction fixe durant une alternance de l'onde on parle de Polarisation Rectiligne.

Lorsque ce vecteur tourne d'un tour complet pendant une alternance, son extrémité décrit alors une ellipse, et on parle de Polarisation Elliptique (figure 1.11).

Un cas particulier de polarisation elliptique est la Polarisation Circulaire.

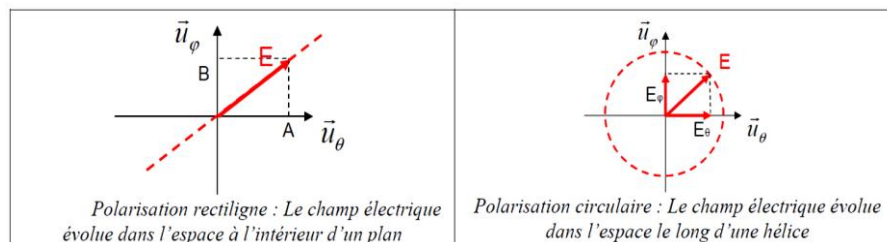


Figure 1.11: Représentation d'une onde électromagnétique se propageant dans l'espace.

d) Zones de rayonnement d'une antenne

On distingue pour chaque type d'antenne trois zones de rayonnement (figure 1.12) :

- Zone de Rayleigh ou zone de champ proche: la densité de puissance est quasi constante dans cette zone. Celle-ci est valable jusqu'à une distance r inférieure à $D^2/2\lambda$, où D est la plus grande dimension de l'antenne.
- Zone de Fresnel : dans cette zone la densité de puissance est fluctuante. Elle est délimitée par la limite de la zone du champ proche et la limite de la zone du champ lointain. Celle-ci commence à une distance de $2D^2/\lambda$.
- Zone de Fraunhofer ou zone de champ lointain: elle concerne les distances supérieures à $2D^2/\lambda$. Dans cette zone les champs sont rayonnés sous la forme d'une onde plane. La densité de puissance décroît en $1/r^2$.

Où D : est le diamètre de la surface équivalente de l'antenne.
 r : la distance de l'antenne.

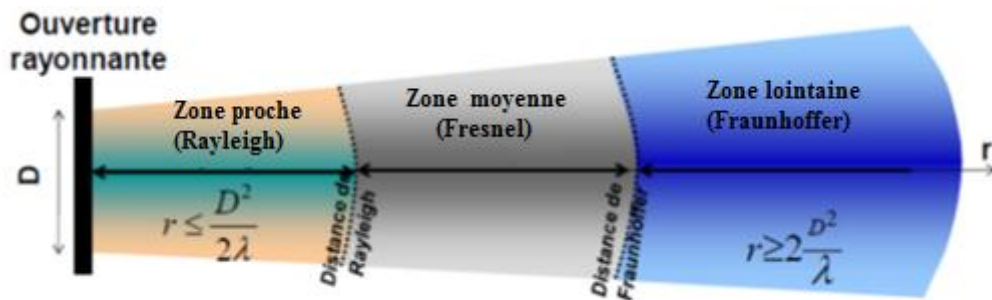


Figure 1.12: Les zones de rayonnement d'une antenne.

e) Directivité

La directivité d'une antenne dans une direction (φ, θ) donnée peut être exprimée par le rapport de la densité de puissance rayonnée P_r par la puissance rayonnée par une antenne isotrope.

$$D(\varphi, \theta) = \frac{P_r(\varphi, \theta)}{P_{r_{isotrope}}/4\pi} \quad (1.5)$$

f) Gain

Le gain d'une antenne dans une direction peut être exprimé par le rapport de la puissance rayonnée dans une direction par la puissance absorbée par une antenne isotrope.

Dans une antenne, la puissance d'alimentation P_a n'est pas nécessairement rayonnée en totalité, du faite des pertes intrinsèques dans les matériaux constituant l'antenne. Par conséquent, si on remplace P_r par P_a dans la relation, on obtient une quantité $G(\varphi, \theta)$ appelée gain dans la direction (φ, θ) , tel que :

$$G(\varphi, \theta) = \frac{P_r(\varphi, \theta)}{P_a/4\pi} \quad (1.6)$$

Avec : $P_r = P_a \cdot \eta$ où η est le rendement d'antenne.

Si l'antenne est omnidirectionnelle et sans pertes, son gain vaut 1 ou 0 dB. Le gain est généralement exprimé en dB ou en dBi car une antenne isotrope est utilisée comme référence.

1.9 Types d'antennes

Il existe deux types [6] d'antennes directives et omnidirectionnelles présentée dans le tableau 1.1.

	Caractéristiques	Usage:	Types d'antennes
Antennes directives	- Gain élevé.	- faisceaux hertziens. - satellites.	- Antennes paraboliques. - Antenne YAGI.
Antennes omnidirectionnelles	- Gain plus ou moins constant dans le plan horizontal ou dans un secteur donné.	- Radio / TV. - Communications mobiles.	- Brin vertical.

Tableau 1.1: Types d'antennes.

1.10 Les différentes sortes d'antennes

Parmi les antennes les plus couramment utilisées nous en introduisons cinq groupes principaux qui sont : les antennes filaires, les antennes à ouverture rayonnante, les antennes à réflecteur et les antennes imprimées.

1.10.1 Antennes filaires

Les antennes filaires (figure 1.13) sont les plus courantes. Elles sont utilisées pour des types de transmissions très différents : sur les véhicules, les bâtiments, les bateaux, les avions... etc. Il en existe de différents types, de type fil rectiligne dipôle, en boucle ou en hélice pour les plus communes. La combinaison de ces différentes formes de base pour former une antenne unique est également possible.

L'antenne dipôle est souvent utilisée comme antenne de référence dans les systèmes radio-mobiles. C'est en effet le type le plus simple.

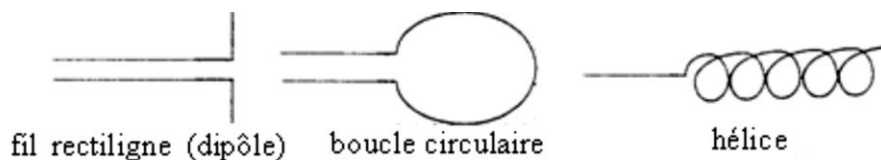


Figure 1.13: Exemples d'antennes filaires.

1.10.2 Antennes à ouverture rayonnante

Les antennes à ouverture rayonnante (figure 1.14) sont plus récentes que les précédentes. Leur utilisation est motivée par les émissions à des fréquences plus hautes. Compte tenu de leur facilité de montage ces antennes sont très couramment utilisées dans le domaine de l'aviation. Elles peuvent être couvertes d'un matériau diélectrique les protégeant contre les conditions aléatoires de l'environnement.

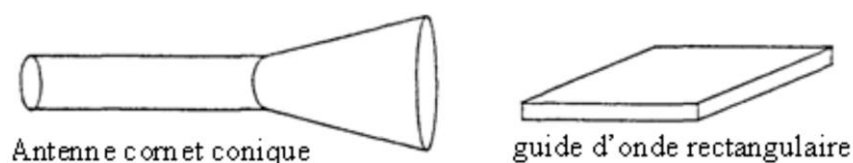


Figure 1.14: Exemples d'antennes à ouverture rayonnante.

1.10.3 Antennes à réflecteurs

Ces antennes (figure 1.15) consistent principalement en une source illuminant une surface réfléchissante. Les applications principales de ce type d'antennes se situent dans le domaine des communications spatiales qui nécessitent des antennes capables de communiquer sur des distances importantes de plusieurs millions de kilomètre. Le réflecteur parabolique est la forme la plus connue de ce type d'antennes.

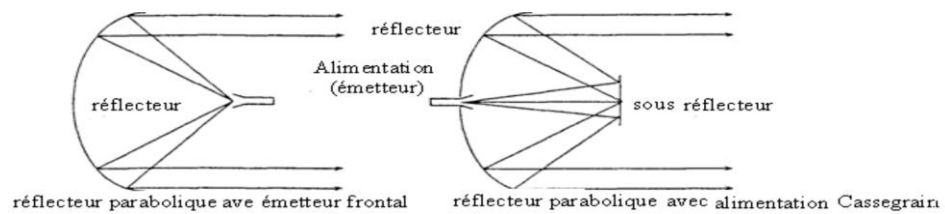


Figure 1.15: Exemples d'antennes à réflecteurs.

1.10.4 Les antennes imprimées

L'antenne imprimées (figure 1.16) ou plaquées appelée aussi antenne patch est un type récent d'antenne dont le développement et l'utilisation sont de plus en plus fréquents.

Ce type d'antenne que nous avons choisi de concevoir dans le cadre de ce travail et que nous allons définir dans le prochain chapitre.

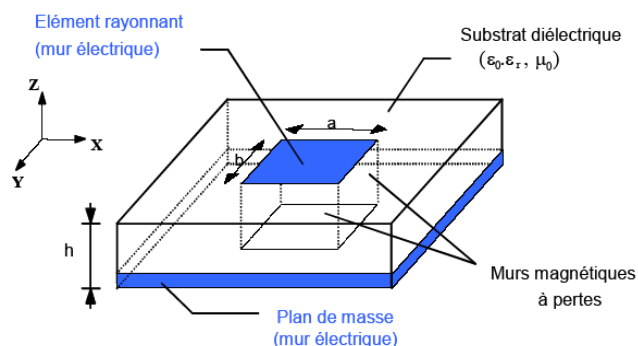


Figure 1.16: Exemples d'antenne imprimé.

1.11 Conclusion

Dans cette partie du chapitre on a présenté un bref aperçu sur les antennes qui sont généralement à la base de propagation des ondes électromagnétiques dans l'air.

Les paramètres électriques et électromagnétiques sont décrits ainsi que les différentes types et sortes d'antenne.

Chapitre 2 Antennes planes à micro rubans

2.1 Introduction

Dans ce chapitre, un bref historique et description des éléments rayonnants seront présentés. Un aperçu sur les antennes micro rubans, leurs applications, leurs avantages et inconvénients. Ainsi que, les différents types d'alimentations et les techniques de miniaturisations les plus utilisées dans ce domaine.

Les antennes micro rubans sont une extension de la ligne de transmission micro ruban proposée en 1952 par Grieg et Engelmann [9]. Les premiers travaux concernant un élément rayonnant à micro ruban ont été apparus avec Deschamps en 1953 [10]. Quelques années plus tard Gutton et Baissinot [11] ont breveté une antenne basée sur micro ruban. La recherche a stagné pour une période de 15 ans, et en 1970, le développement des antennes micro rubans a été réanimé par Munson et Howell [12].

Les antennes imprimées [13] ou micro rubans, dite aussi patches sont des éléments rayonnants planaires sont réalisées par gravure d'un circuit imprimé.

De par leur technologie de fabrication, ceux-ci peuvent être intégrés au plus près des circuits électroniques en occupant un volume réduit et se conformant à différents types de surface.

2.2 Les applications des antennes imprimées

Les domaines [14] d'utilisation privilégiés des antennes micro rubans sont: les télécommunications spatiales, le téléguidage des missiles, la navigation aérienne ou terrestre, applications soumises à des critères sélectifs d'aérodynamiques et à des limitations de poids, de volume et d'épaisseur, la surveillance de locaux ou carrefours routiers, la régulation du trafic routier. Elles sont également utiles pour la

communication entre mobiles et dans des nouveaux domaines tels que la médecine ou le téléphone mobile.

La figure 2.1 et le tableau 2.1 suivant illustrent quelques applications:



Figure 2.1: Exemples des antennes patchs.

Applications	Fréquences
Positionnement Global par Satellite (GPS)	1575 MHz et 1227 MHz
Bip sonore	931-932 MHz
Téléphone cellulaire	824-849MHz et 869-895 MHz
Système de communication personnel	1.85-1.99 GHz et 2.18-2.20 GHz
Système Mobil Global (anglais : GSM)	890-915 MHz et 935-960 MHz
Réseaux à Région locale sans Fil (anglais : WLAN)	2.40-2.48 GHz et 5.4 GHz
Vidéo cellulaire	28 GHz
Transmission Directe par Satellite (anglais : DBS)	11.7-12.5 GHz
Radar anticollision	60 GHz, 77GHz et 94 GHz
Réseaux d'ordinateurs à région large	600 GHz
Autre : Missiles, Avions et bateaux, Spatial, Biomédical...	

Tableau 2.1: Quelques applications des antennes micro rubans.

2.3 Avantages et inconvénients des antennes micro rubans

Par rapport aux antennes classiques les antennes micro rubans offrent une multitude d'avantages et des inconvénients.

2.3.1 Avantages

Les avantages d'antennes micro rubans par rapport aux antennes classiques (Hélix, corne, réflecteur, etc.) sont les suivants:

- Le profil extrêmement bas de l'antenne micro ruban le rend léger et il occupe un volume très peu de la structure.
Il peut être monté d'une façon conforme sur une surface incurvée de sorte qu'il soit esthétique et aérodynamiques. Les réseaux micro rubans à ouverture sur les écrans plats peuvent être pliables pour des applications spatiales.
- Lorsque l'élément patch ou un réseau d'éléments de raccordement, est produit en grande quantité, il peut être fabriqué avec un procédé de gravure simple, qui peut conduire à un coût réduit de fabrication.
- L'antenne patch peut également être intégrée avec d'autres composants micro-ondes actifs ou passifs.

Ces avantages rendent ces antennes patches beaucoup plus approprié pour les avions, engins spatiaux et les missiles que les antennes classiques comme ils n'interfèrent pas avec l'aérodynamisme de ces valides mobiles.

2.3.2 Inconvénients

Les inconvénients des antennes micro rubans sont les suivants :

- Une antenne patch avec un substrat mince a généralement une largeur de bande passante étroite de moins de 5%. Toutefois, avec l'avancement de la technologie, jusqu'à 50% des bandes passantes ont été atteints.
- L'antenne micro ruban peut gérer des puissances RF relativement plus faible en raison de la petite séparation entre le patch et son plan de masse. Généralement, des dizaines de Watts de puissance moyenne sont considérées comme sûre.
- L'antenne micro ruban a généralement une plus grande perte d'insertion ohmique que d'autres types d'antennes. Cette perte ohmique se produit principalement dans le substrat diélectrique et le conducteur métallique.
- les réseaux d'éléments imprimés à hautes performances nécessitent des systèmes d'alimentation complexes.

2.4 Structure d'une antenne micro ruban

Une antenne patch consiste en un élément métallique (figure 2.2) de forme quelconque (rectangulaire, circulaire, à fente ou formes plus élaborées) déposé sur la surface d'un substrat diélectrique qui présente sur l'autre face un plan conducteur (plan de masse).

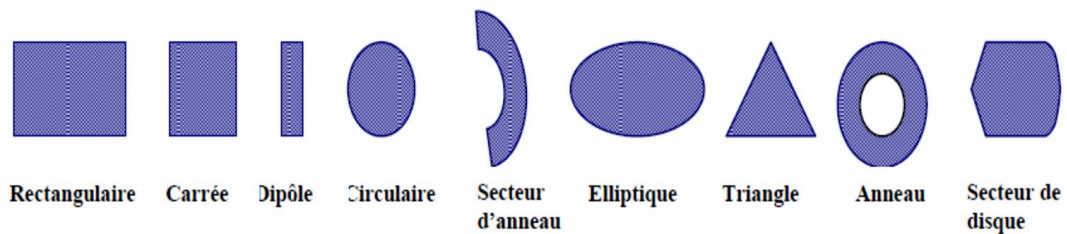


Figure 2.2: Divers types d'éléments rayonnants.

Les dimensions du patch sont généralement de l'ordre de la demi-longueur d'onde. Le choix de la longueur est guidé par la fréquence de résonance à donner à l'antenne.

Le plan de masse ne pouvant pas être infini, il peut être égal à trois ou quatre fois la longueur d'onde, ce qui représente parfois un encombrement trop important. Un plan de masse plus petit conduira à une modification des propriétés de l'antenne.

Les caractéristiques du substrat influent sur celles de l'antenne. En général, sa permittivité doit être faible et d'épaisseur négligeable devant la longueur d'onde.

Une antenne patch rectangulaire est l'antenne patch la plus courante.

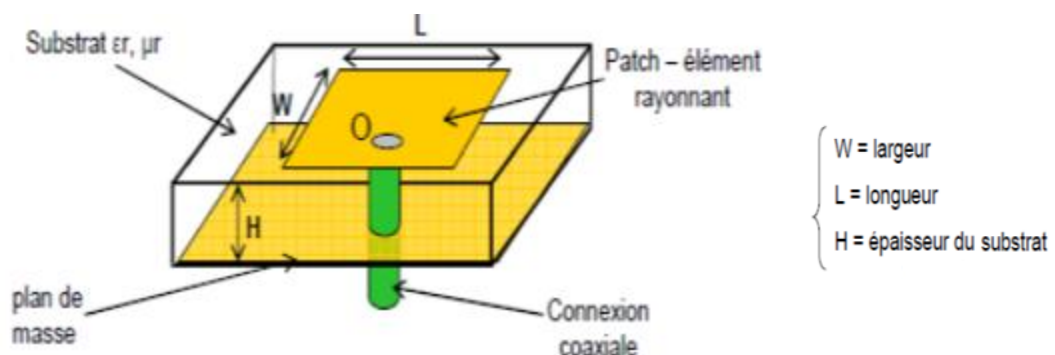


Figure 2.3: Structure d'une antenne patch rectangulaire.

En effet, l'antenne imprimée excitée sur l'un de ces modes génère par essence une onde à polarisation rectiligne. Cependant la création de déformations dans la structure

de base de ces antennes (figure 2.3), un type d'excitation particulier ou encore l'utilisation ingénieusement combinée de plusieurs de ces antennes peut permettre l'apparition de la polarisation circulaire.

2.5 Les techniques d'alimentations

L'excitation [15] est un point très important à prendre en compte lors de l'étude des antennes imprimées. En effet, la manière dont l'énergie est fournie à l'élément rayonnant peut influencer directement sur son rayonnement et modifier ses performances. Différents modes d'alimentation sont couramment employés : alimentation par sonde coaxiale, alimentation par proximité, alimentation par ouverture dans le plan de masse ou encore alimentation directe par ligne micro ruban. C'est cette dernière solution que nous emploierons du fait de sa simplicité de réalisation notamment.

2.5.1 Alimentations par Sonde coaxial

L'élément rayonnant est connecté à l'âme centrale d'un connecteur coaxial (figure 2.4) traversant le plan de masse et le substrat diélectrique. L'embase du connecteur est directement soudée au plan de masse. On peut ainsi connecter la sonde à n'importe quel endroit sur l'aérien et donc favoriser ou annuler certains modes de résonance. L'adaptation est également très aisée avec cette technique.

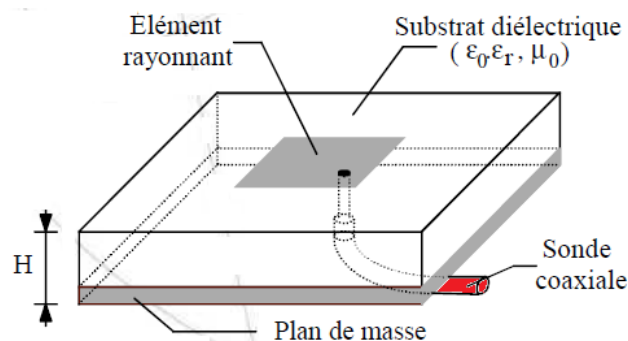


Figure 2.4: Alimentations par Sonde coaxial.

Il est toutefois à noter que ce type d'alimentation peut perturber le rayonnement de l'antenne. En effet la connexion de la sonde génère un pic de courant localisé qui peut

introduire des dissymétries dans le diagramme de rayonnement.

De plus le perçage du diélectrique, du plan de masse et de l'élément rayonnant augmente les pertes notamment lorsque l'on monte en fréquence.

2.5.2 Alimentation par couplage par Proximité

Parmi les différents types d'alimentation [16], le couplage par proximité (figure 2.5) offre la meilleure bande passante. Il est facile à modéliser, et présente un rayonnement parasite faible. La distance entre la ligne d'alimentation et le patch peut être utilisée pour adapter l'impédance de l'antenne. Le principal inconvénient de ce type d'alimentation la difficulté de le mettre en œuvre.

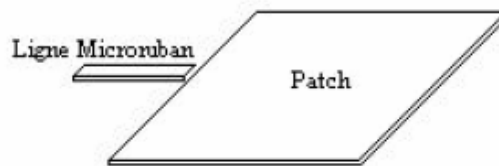


Figure 2.5: Alimentation par couplage par Proximité.

2.5.3 Alimentation par une ligne micro ruban

La figure 2.6 montre que la ligne micro ruban d'alimentation constitue également un élément rayonnant, dont la largeur est généralement très inférieure par rapport à celle du patch.

Ce type d'alimentation est facile à mettre en œuvre et permet une adaptation d'impédance facile par simple positionnement du point de contact. Par contre, on a un rayonnement parasite qui peut devenir considérable.

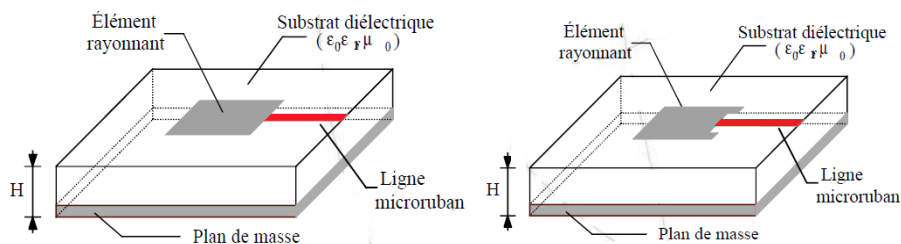


Figure 2.6: Alimentation par une ligne micro ruban.

2.6 Principe de fonctionnement

La compréhension physique du fonctionnement des antennes plaquées (figure 2.7) passe par la connaissance du champ électromagnétique en zone proche de la structure rayonnante. Pour simplifier ce problème on assimile l'antenne à une cavité limitée par deux « murs électriques » horizontaux, qui correspondent à l'élément rayonnant et au plan de masse.

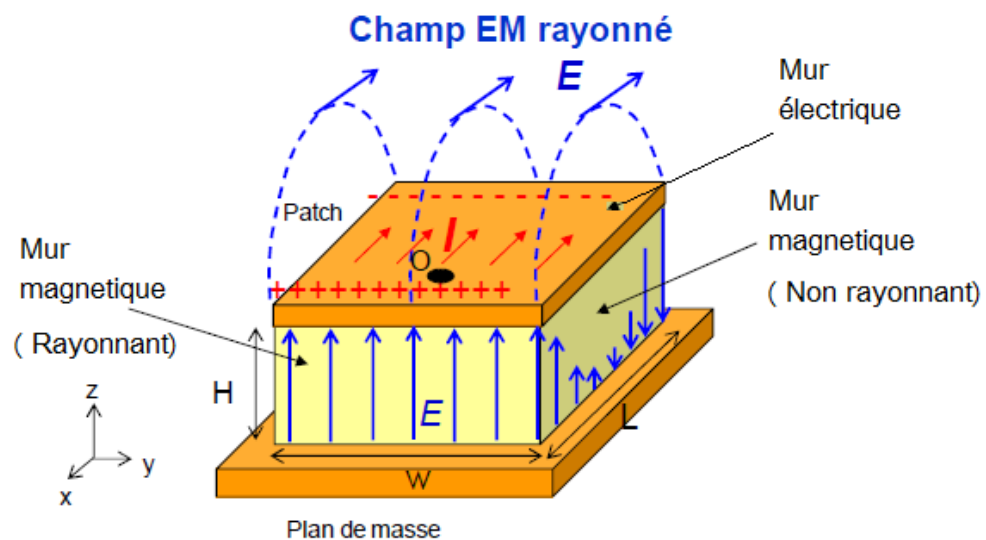


Figure 2.7: Rayonnement d'une antenne patch rectangulaire.

La manière de traiter une antenne patch est de la considérer comme une cavité résonante formée par le patch, le plan de masse et les quatre murs.

En basse fréquence, la cavité peut être considérée comme une capacité qui stocke des charges et dans laquelle un champ électrique uniforme est créé entre le patch et le plan de masse. Tant que l'épaisseur du substrat est faible, le champ électrique est orienté selon l'axe Z.

En pratique, l'épaisseur doit rester telle que :

$$h \leq \frac{c}{4f\sqrt{\epsilon_r - 1}} \quad (2.1)$$

Pour des fréquences particulières liées aux dimensions de la cavité rectangulaire, la fréquence de résonance peut être calculée par l'équation suivante :

$$F_{m,n} = \frac{c}{2\pi\sqrt{\epsilon_r}} \sqrt{\left(\frac{m}{L}\right)^2 + \left(\frac{n}{W}\right)^2} \quad (2.1)$$

- $F_{m,n}$: Fréquence de résonance.
 c : Vitesse de la lumière dans le vide.
 ϵ_r : Permittivité relative du substrat diélectrique.
 m et n : Modes de cavités, entiers ≥ 0 .
 L : Longueur du patch.
 W : Largeur du patch.
 h : Epaisseur du substrat diélectrique.

2.7 Influence des paramètres géométriques sur les caractéristiques d'antenne

2.7.1 caractéristique du substrat diélectrique

Les résonateurs micro rubans rayonnent principalement en raison des champs marginaux entre le bord du patch et le plan de masse, pour la bonne performance du résonateur. Un substrat diélectrique épais ayant une faible constante diélectrique est souhaitable, puisque ceci fournit une meilleure efficacité, une largeur de bande passante plus grande et un meilleur rayonnement mais avec un encombrement accru du résonateur.

Le substrat sert de support mécanique aux conducteurs, il influe les propriétés électriques du résonateur via ses paramètres constitutifs permittivité diélectrique ϵ_r et perméabilité magnétique μ_r ; pour la plupart des applications courantes $\mu_r = 1$.

Il est cependant très important de noter que l'époxy est un substrat extrêmement répandu et peu cher ce qui lui confère donc un intérêt immense notamment pour notre application.

Le tableau 2.2 résume quelques modèles de substrats.

Matériau	ϵ_r à 10 GHz	$\Delta\epsilon_r/\epsilon_r$	$\tan \delta$ à 10 GHz (pertes)
RT/DUROÏD 5880	2,2	$\pm 1 \%$	0,0009
RO 3003	3,0	$\pm 1,33\%$	0,0013
FR4 VERRE EPOXY	4,3	$\pm 1,5 \%$	0,025
ALUMINE (Al ₂ O ₃)	9,8	$\pm 1 \%$	0,0003

Tableau 2.2: Principaux substrats utilisés dans le domaine des hyperfréquences.

L'onde électromagnétique se propage à la fois dans l'air et dans le diélectrique avec deux milieux de constante diélectrique différente. Pour rendre compte de ce phénomène, le résonateur micro ruban se modélise par un milieu effectif où la propagation s'effectuerait dans un milieu homogène de constante diélectrique équivalente :

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + 10 \frac{h}{W}\right)^2 \quad (2.3)$$

2.7.2 Largeur W du patch

La largeur du patch a un effet mineur sur les fréquences de résonance et sur le diagramme de rayonnement de du résonateur. Par contre, elle joue un rôle pour l'impédance d'entrée du résonateur et la bande passante à ses résonances.

Pour permettre un bon rendement du résonateur, une largeur W pratique est :

$$W = \frac{c}{2f_{01}} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (2.4)$$

Où le terme f_{01} représente la fréquence du mode fondamentale du résonateur.

2.7.3 Longueur L du patch

La longueur du patch détermine les fréquences de résonance du résonateur. Il ne faut surtout pas oublier de retrancher la longueur ΔL correspond aux extensions des champs.

$$L = \frac{2}{2f_{01}\sqrt{\epsilon_r}} - 2\Delta L \quad (2.5)$$

Calcul de l'extension de longueur du patch ΔL :

$$\Delta L = 0.412h \frac{(\epsilon_{eff}+0.3)}{(\epsilon_{eff}-0.258)} + \frac{\frac{W}{h}+0.264}{\frac{W}{h}+0.8} \quad (2.6)$$

2.8 Techniques de miniaturisation et d'élargissement de la bande passante

Le but est de concevoir des antennes capables de couvrir de multiples normes, et qui soient les moins encombrantes possibles afin d'être intégré dans des émetteurs et récepteurs.

Ces contraintes [6] nous amènent à chercher des techniques appropriées à savoir :

- Les techniques de miniaturisation.
- Les techniques pour un fonctionnement large bande.
- Les techniques pour un fonctionnement multi bandes.

Les principales techniques utilisées sont les suivantes :

- ✓ La modification de la forme de l'élément rayonnant.
- ✓ L'insertion de fentes dans le pavé rayonnant.
- ✓ L'emploi combiné de plusieurs de ces techniques.

Nous allons maintenant voir en détail les principes de ces différentes techniques.

2.8.1 Modification de la forme de l'élément rayonnant

Le principe de base recherché par la technique de modification de la forme de l'élément rayonnant est d'allonger les trajets en courants à la surface du pavé afin de diminuer les fréquences de résonance du mode fondamental.

2.8.2 Insertion de fentes dans le pavé rayonnant

Si l'on pratique une ouverture de forme quelconque dans une surface conductrice et que l'on applique une différence de potentiel entre deux bords opposés de cette ouverture, on obtient un système rayonnant appelé fente. Dans le cas général, la fente rayonne de façon identique dans les deux demi-espaces délimités par la surface conductrice. Si l'on désire que la fente rayonne seulement vers un demi-espace, il est nécessaire de blinder le côté opposé à ce demi-espace en adossant la fente à une cavité.

L'étude théorique des antennes à fente se simplifie considérablement grâce à l'utilisation du principe de Babinet [16]. En effet, ce principe indique qu'il y a équivalence entre le comportement radioélectrique d'un plan conducteur infini sur lequel on a découpé une figure et cette figure conductrice seule. Dans le cas simple de la Figure 2.8, on compare une fente et un dipôle élémentaire de mêmes dimensions.

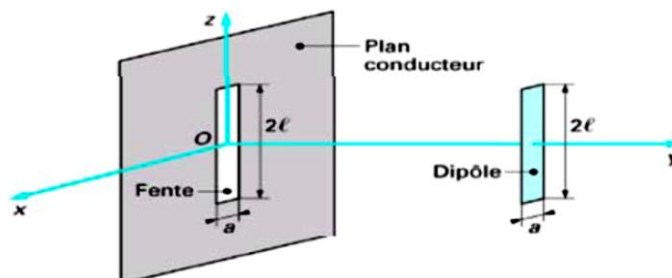


Figure 2.8: Principe de Babinet.

2.8.3 Allongement des longueurs électriques

Le principe [17] utilisé est de forcer les courants conditionnant les fréquences de résonances à contourner les fentes inscrites, ce qui permet d'allonger leur trajet et engendre une diminution des fréquences de résonances.

Ces techniques consiste à disposer des fentes sur un l'élément rayonnant ou le plan de masse de l'antenne, ceci obligeant en fait les courants à accomplir le nouveau chemin.

2.8.4 Création de nouveaux résonateurs

La découpe de fentes dans certaines parties d'un élément rayonnant peut permettre l'émergence de nouveaux résonateurs. Nous pouvons par exemple citer l'utilisation d'une fente en forme de U ou l'utilisation de fentes de formes quelconques. Grâce à ce procédé et aux effets capacitifs créés, des antennes à la fois miniatures, larges bandes et multi bandes peuvent être conçues.

2.8.5 Combinaison des effets

Il est également possible d'obtenir simultanément deux des effets précédents.

- Des fentes de formes quelconques créent chacune leur propre résonance quart d'onde et permettent un allongement des longueurs électriques.
- L'autre combinaison possible est d'allonger les longueurs électriques et de créer de nouveaux résonateurs, ceci aussi est réalisé grâce à plusieurs fentes de formes quelconques.

Dans le paragraphe qui précède, nous avons exposé brièvement les différentes techniques les plus utilisées pour la miniaturisation des antennes. Le tableau 2.3 donne un résumé des performances de l'antenne obtenue après application de l'une de ces techniques.

Techniques	Objectifs		
	Miniaturisation	Large bande	Multi bande
Modification de la forme de l'élément rayonnant	✓		✓
Insertion de fentes dans l'élément rayonnant	✓	✓	✓
Allongement des longueurs électriques	✓		✓

Tableau 2.3: Techniques de miniaturisation et d'élargissement des bandes.

2.9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons montré le rôle et l'évolution technologique des patches, ainsi que leurs avantages et leurs inconvénients.

Nous avons présenté également quelques techniques d'alimentation, les techniques de miniaturisation et leurs effets sur les performances de l'antenne.

Chapitre 3 Conception, simulation et réalisation

3.1 Introduction

En premier lieu, l'objectif étant de concevoir une antenne fonctionnant dans toutes les bandes du système GNSS on s'est basé sur le cahier de charges.

L'étude est composée de deux étapes: La première est la conception et simulation des antennes et la deuxième est l'amélioration de ses performances.

La première étape sera composée de deux thèmes principaux, une antenne multi bande d'une part et une antenne large bande d'autre part.

Pour cela, nous avons mené deux études parallèles avec deux approches différentes,

La première approche est la conception d'une antenne multi bande (antenne rectangulaire) en suite nous comparons la deuxième approche qui consiste à une antenne large bande par rapport à l'antenne précédente.

3.2 Cahier de charges

Concernant les spécifications demandées par les constructeurs, elles varient bien évidemment d'un fabricant à l'autre, notamment à propos de la valeur de gain souhaitée. En résumé, le tableau 3.1 propose le cahier de charges généralement réclamé pour les bandes de fréquences du system GNSS [18] pour un coefficient de réflexion inferieur à -10 dB.

GNSS	BANDES	PORTEUSES	f_{\min} [MHz]	f_{\max} [MHz]
GPS	L1	1575.42	1563	1587
	L2	1227.6	1215	1237
	L5	1176.45	1164	1191
GLONASS	G1	1602	1593	1612
	G2	1246	1238	1255
	G3	1204.704	1198	1213
GALILEO	E1	1575.42	1559	1591
	E6	1278.75	1260	1300
	E5a	1176.45	1164	1191
	E5b	1207.14	1191	1214

Tableau 3.1: Les bandes de fréquence du système GNSS.

Les exigences en taux d'onde stationnaire :

- T.O.S < 2.

Les exigences en gain sont :

- $\theta = 0^\circ$ 2,5 dBi.
- $30^\circ < \theta < 60^\circ$ -8 dBi.
- $60^\circ < \theta < 70^\circ$ -10 dBi.

3.3 Choix de l'outil de simulation

Nous utilisons le logiciel Microwave-studio de CST [19] (Computer Simulation Technology). Celui-ci utilise la méthode des intégrales finies (Finite Integral Technique) qui a été proposée par Weiland en 1977. Cette méthode consiste à échantillonner spatialement les équations de Maxwell sous leur forme intégrale. Le maillage généré est donc volumique. Dans Microwave-studio, chaque cellule du maillage est cubique. L'outil de résolution temporelle remplace les dérivées partielles $\partial/\partial t$ par des différentielles Δt . Nous avons choisi ce logiciel car l'utilisation d'un outil de résolution dans le domaine temporel est très avantageuse en termes de temps de calcul pour la simulation d'antenne.

3.4 Excitation de l'antenne

L'antenne est alimentée par une ligne de transmission de type micro ruban. Cette ligne est excitée avec un port "waveguide port" défini par le logiciel CST Microwave Studio. Ce type de port d'excitation permet d'obtenir des informations sur la propagation des lignes du champ électromagnétique à cet endroit de la structure, contrairement au fonctionnement d'un port discret, qui lui n'est défini que par son impédance.

L'emplacement du "waveguide port" et la distribution du champ sont illustrés dans la figure 3.1.

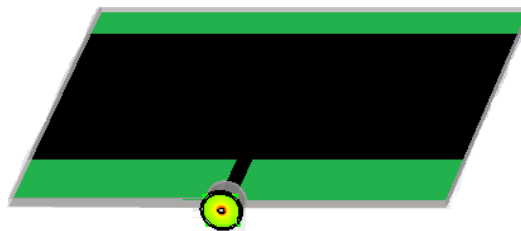


Figure 3.1: Antenne excitée par un port coaxial.

3.5 Conception d'une antenne rectangulaire

3.5.1 Etude paramétrique de l'antenne rectangulaire

Dans un premier temps, nous allons analyser le comportement d'une antenne rectangulaire en fonction de sa longueur (L) et sa largeur (W). Pour cela, les caractéristiques EM, module du coefficient de réflexion en entrée, gain, impédance d'entrée et VSWR sont calculés à l'aide de logiciel Microwave-studio pour plusieurs paramètres.

Le design de cette antenne (figure 3.2) selon la méthode exposée précédemment dans le second chapitre suit les étapes suivantes :

- Le type du substrat choisi est le (FR4 EPOXY) pour sa disponibilité au niveau de la partie pratique, avec une permittivité diélectrique $\epsilon_r = 4.3$ et une hauteur du substrat $h = 1.6$ mm
- Une largeur $W = 78.30$ mm En utilisant l'équation (2.4)

- Une longueur $L = 61.30 \text{ mm}$ En utilisant l'équation (2.5)
- Une extension de longueur $\Delta L = 0.74611 \text{ mm}$ En utilisant l'équation (2.6)
- $\epsilon_{\text{eff}} = 4.1287$ En utilisant l'équation (2.3)

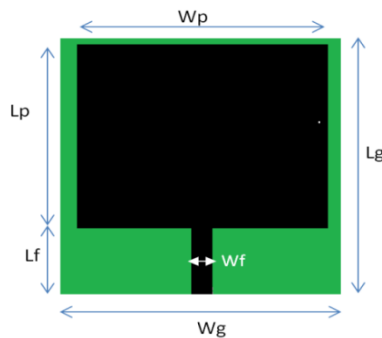


Figure 3 2: Dimensions de l'antenne rectangulaire référence.

Cette étude va nous permettre de dimensionner correctement l'élément rayonnant pour qu'il fonctionne à une fréquence $f = 1.176 \text{ GHz}$ avec une bande passante de 24 MHz . Le but ici est d'analyser tous les paramètres de l'antenne.

a) Etudes paramétriques de la ligne d'alimentation

La ligne ayant une impédance caractéristique de 50 Ohms et le calcul de la largeur de la ligne d'alimentation a été fait à l'aide de calculateur d'impédance (figure 3.3) du logiciel Microwave-studio de CST.

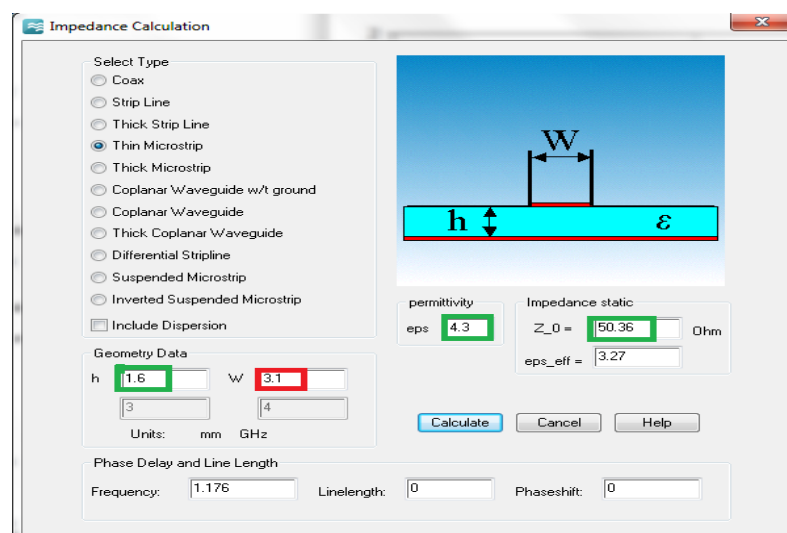


Figure 3.3: Calcul de la Largeur de la ligne d'alimentation W_f .

La longueur de la ligne d'alimentation égale à $\lambda_g/4$ où λ_g est la longueur d'onde guidée pour une fréquence de résonance $f = 1.176$ GHz et une permittivité diélectrique $\epsilon_r = 4.3$.

Maintenant que l'antenne est paramétrée, que la ligne micro ruban a une impédance caractéristique de 50 Ohms, que la distribution des lignes de champ est conforme au type d'alimentation, les différentes études paramétriques peuvent être effectuées. Ces résultats seront présentés sous deux formes :

L'amplitude du coefficient de réflexion S_{11} en dB et l'impédance d'entrée de l'antenne.

b) Etude de l'effet de la longueur L_p

En premier lieu, l'objectif étant de concevoir une antenne fonctionnant à une fréquence de résonance $f=1.176$ GHz, On s'est basé sur le patch rectangulaire imprimé déjà vu précédemment (Chapitre 2).

Pour faire cette analyse, on varie la longueur du patch L_p et on fixe les autres dimensions la figure 3.4 représente le coefficient de réflexion de l'antenne simulée.

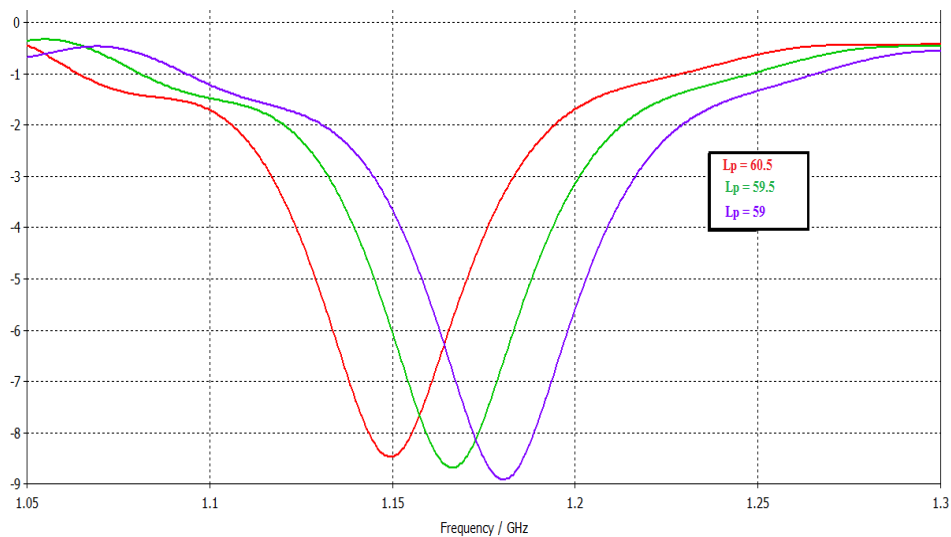


Figure 3.4: Evolution du module du coefficient de réflexion en fonction de la longueur L_p .

Nous remarquons sur la figure 3.4 que la longueur du patch n'influe que sur la fréquence de résonance. Plus la longueur de l'antenne est petite, plus la fréquence de résonance est élevée et vice versa.

c) Etude de l'effet de la largeur W_p

Nous allons maintenant varier la largeur du patch W_p et fixer les autres dimensions. La figure 3.5 représente le coefficient de réflexion de l'antenne simulé.

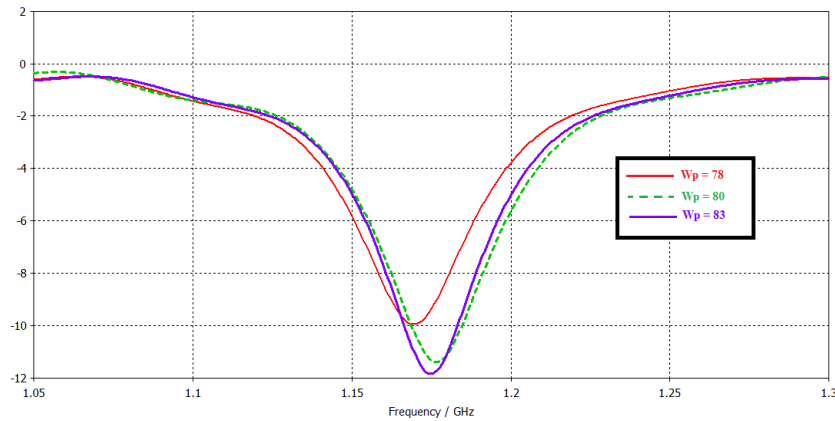


Figure 3.5: Evolution du module du coefficient de réflexion en fonction de la largeur W_p .

Il est évident d'après l'allure des courbes que l'antenne ne conserve pas totalement les mêmes propriétés du point de vue d'adaptation et de largeur de bande passante en fonction de la largeur de l'élément rayonnant. Nous observons que plus la largeur du patch est grande, plus l'adaptation est bonne avec une légère augmentation la largeur de bande passante.

d) Etude de l'effet de la largeur W_g

Pour cette partie de l'étude, la largeur du plan de masse W_g va être variée. La figure 3.6 représente le coefficient de réflexion de l'antenne simulé.

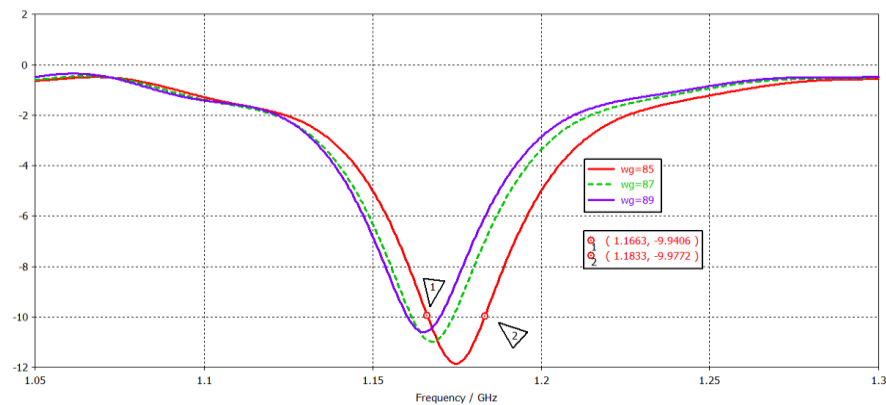


Figure 3.6: Evolution du module du coefficient de réflexion en fonction du largeur W_g .

Nous constatons que la largeur du plan de masse W_g influe sur l'adaptation et la bande passante de l'antenne.

3.5.2 Configuration optimale de l'antenne rectangulaire

Après avoir étudié l'influence de chaque paramètre sur les performances de l'antenne, l'objectif est de choisir les valeurs géométriques pour lesquels on obtient des résultats qui satisfont les critères de bande passante et dont les dimensions sont les plus faibles possibles. Dans un premier temps, il faut s'intéresser à régler la fréquence de résonance parce qu'elle conditionne principalement la taille de l'antenne. On s'occupera ensuite de l'amélioration de l'adaptation de l'antenne et la bande passante. Concernant la ligne d'alimentation, la longueur est de l'ordre de $\lambda_g/4$. Les valeurs qui peuvent être retenues se trouvent dans le tableau 3.2.

Lp	Wp	Lg	Wg
59	83	105	85
Lf	Wf	h	ϵ_r
27.05	3.1	1.6	4.3

Tableau 3.2: Paramètres optimaux de l'antenne rectangulaire simulée en mm.

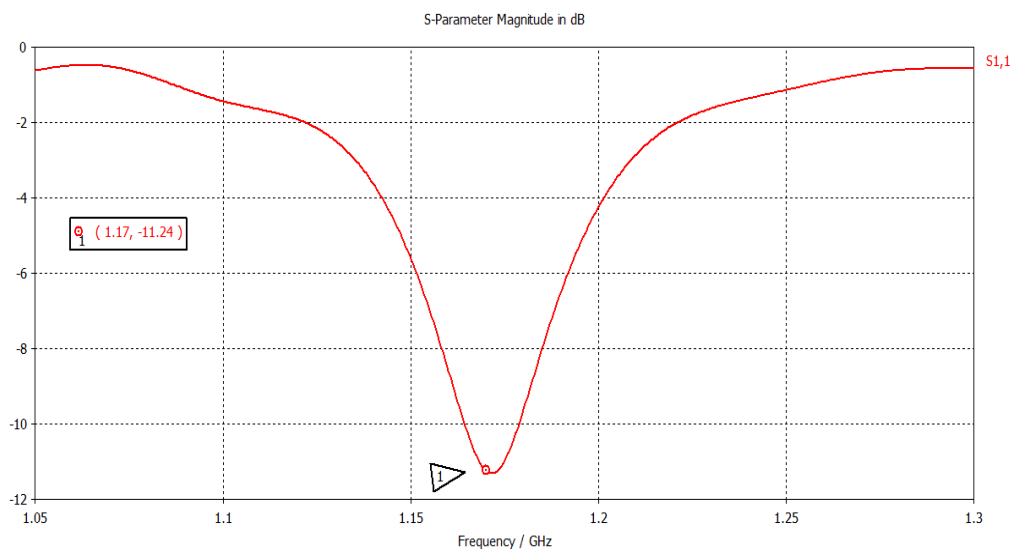


Figure 3.7: Module du coefficient de réflexion de l'antenne rectangulaire simulée.

La figure 3.7 montre que L'antenne a été adaptée pour résonner à une fréquence centrale de 1.17 GHz avec une largeur de bande de 15 MHz et un module de coefficient de réflexion $S_{11} < -10$ dB.

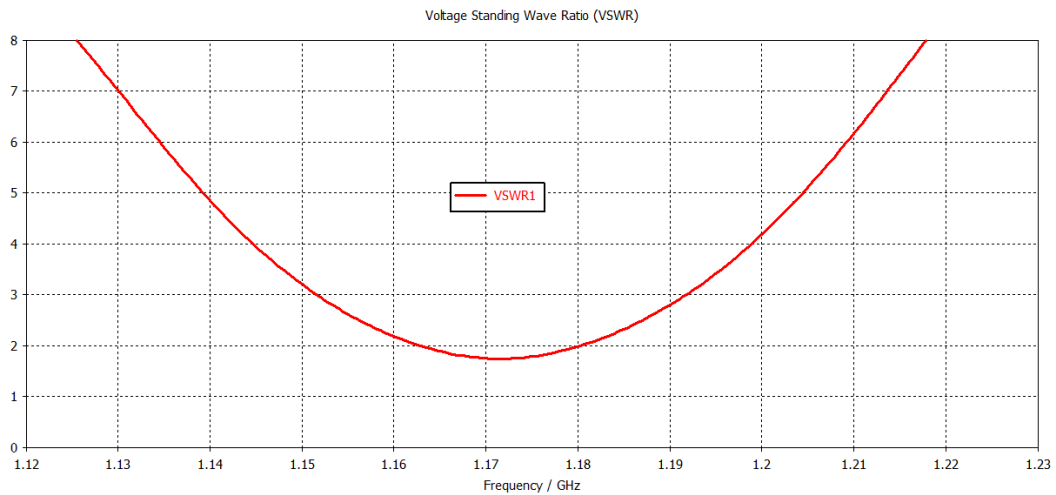


Figure 3.8: Taux d'onde stationnaire de l'antenne rectangulaire simulée.

La figure 3.8 représente le taux d'onde stationnaire TOS (VSWR) de l'antenne simulée. Elle fait objet d'une bonne adaptation sur la toute la bande de fréquence.

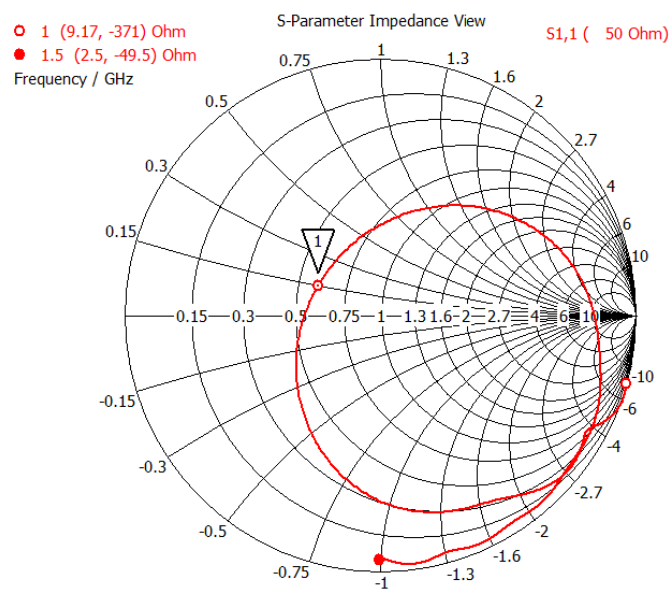


Figure 3.9: Impédance d'entrée sur l'abaque de Smith de l'antenne rectangulaire.

On remarque sur le diagramme de Smith (figure 3.9) que l'antenne présente une adaptation d'impédance suffisante assez bonne.

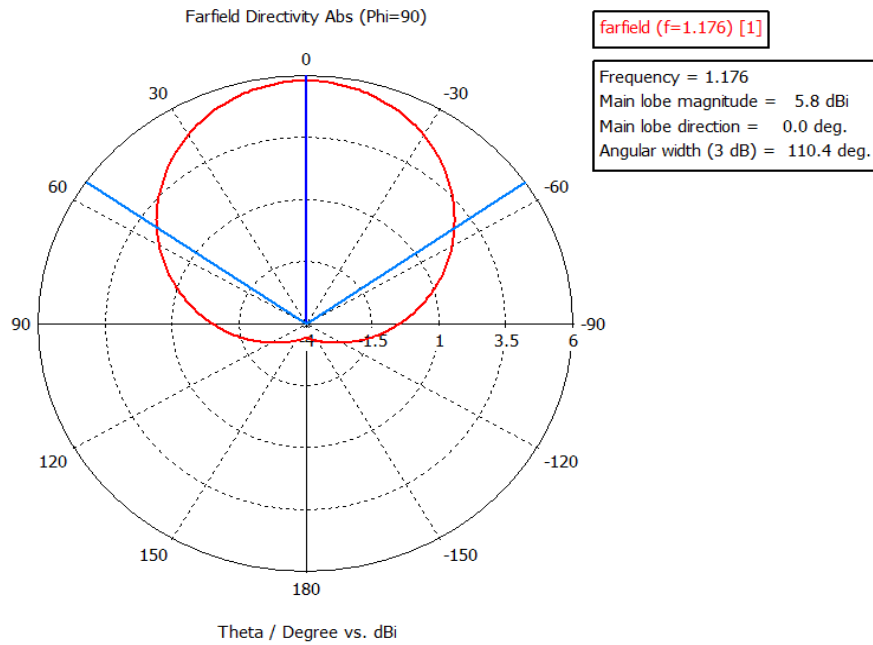


Figure 3.10: Diagramme de rayonnement de l'antenne rectangulaire.

Le diagramme de rayonnement (figure 3.10) présente un lobe directif en sens vertical avec un gain maximal de 5.8 dBi et un angle d'ouverture de 110° calculé à 3 dB.

3.5.3 Conclusion

Cette antenne rectangulaire fonctionne à une seule fréquence de travail, elle présente une bande passante étroite autour de la fréquence de résonance. Par conséquent, d'après les performances en bande passante, gain et en rayonnement; l'élément rectangulaire sera l'élément de référence pour la conception de l'antenne multi bande.

3.5.4 Insertion des fentes dans l'antenne rectangulaire

Bien que la structure antennaire précédente permette d'opérer correctement dans la bande 1.176 GHz mais la bande passante est très limitée.

Plusieurs facteurs peuvent influencer sur la fréquence de résonance et le fonctionnement de l'antenne. Il est donc indispensable d'élargir la bande passante et rajouter des nouvelles résonances afin d'assurer un fonctionnement dans toutes les bandes désirées avec un profil bas.

Plusieurs techniques classiques permettent d'ajouter une ou plusieurs résonances supplémentaires sur une antenne, notamment l'utilisation d'éléments parasites et la création de fentes. En s'inspirant de ces méthodes, nous allons élargir la bande passante et développer d'autres résonances proches.

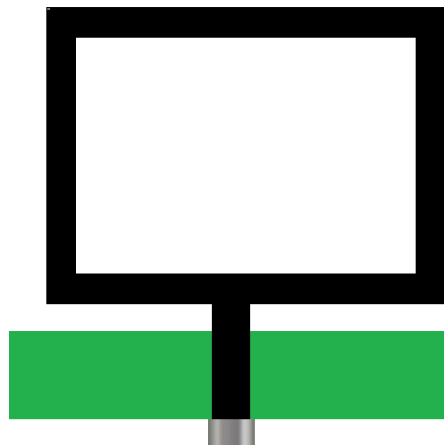


Figure 3.11: Antenne rectangulaire à fente.

Afin de réduire les dimensions de l'antenne, des études menées grâce aux outils d'optimisation ont permis de miniaturiser la taille d'antenne par la technique d'insertion des fentes (figure 3.11) qui a été étudiée dans le chapitre 2.

Pour conserver le même comportement d'antenne, il faut changer les dimensions de l'élément rayonnant, le plan de masse et la ligne d'alimentation.

La taille de l'élément rayonnant s'est diminué de 20 % et le plan de masse de 89 %. Par contre, les dimensions de la ligne d'alimentation ont augmenté de 16 %.

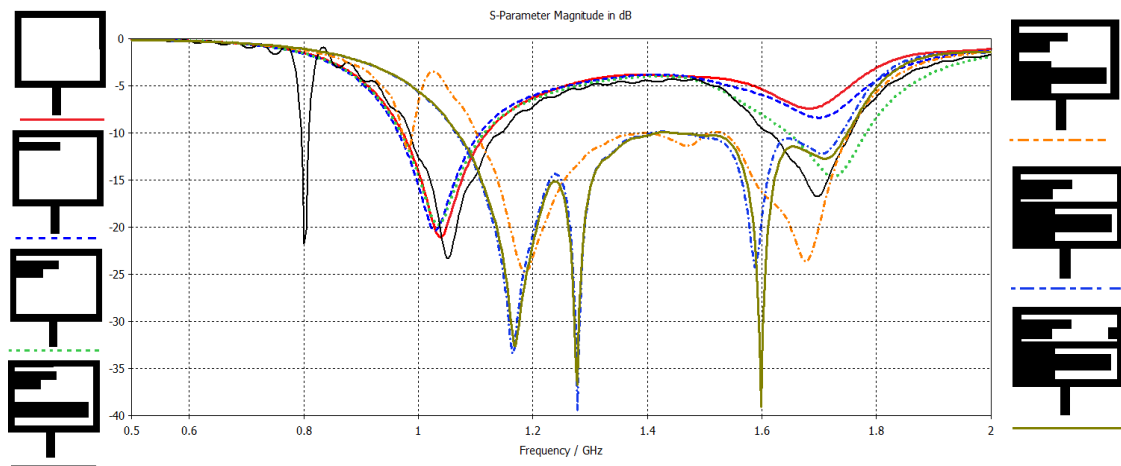


Figure 3.12: Evolution de l'antenne multi bande en fonction du coefficient de réflexion.

La figure 3.12 représente l'évolution du coefficient de réflexion en fonction des fentes et languettes insérés dans l'élément rayonnant de l'antenne.

L'ajout d'une fente permet de miniaturiser l'antenne et d'élargir la bande passante.

Par la suite plusieurs languettes micro rubans ont été insérées dans le but de créer d'autres fréquences de résonances.

Finalement, après optimisations nous aboutissons à la structure finale et optimale de l'antenne représentée sur la figure 3.13 qui respecte toutes les contraintes imposées par le cahier de charges.

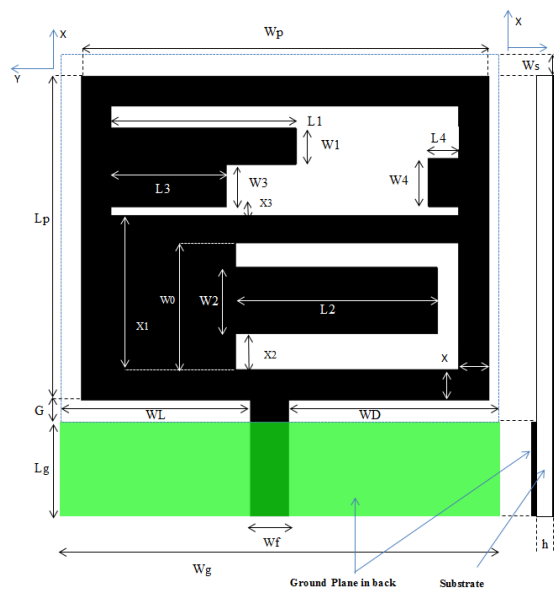


Figure 3.13: Dimensions optimales de l'antenne multi bande.

L_p	W_p	L_g	W_g	W_L	W_D
53.59	72.69	12.43	75.88	42.94	37.94
W_f	h	G	W_s	L1	L2
6.35	1.6	3.72	6.8	30.74	33.48
L3	L4	W₀	X	X1	X2
19.5	5	21	5	25.59	6
W1	W2	W3	W4	L_f	
6	11	7	8	15.87	

Tableau 3.3: Dimensions optimales de l'antenne multi bande en mm.

Dans ce paragraphe, nous allons voir l'influence de ces paramètres sur les performances de l'antenne. Nous étudierons l'effet que jouent ces paramètres sur la résonance, le rayonnement, le gain et la bande passante à la fréquence de résonance. La configuration de la structure optimale prise pour l'étude paramétrique est présentée sur le tableau 3.3.

Tous ces paramètres variables permettent à l'antenne d'avoir une grande souplesse d'utilisation et de répondre mieux aux données imposées par un cahier de charges.

Une bonne connaissance de l'influence de ces paramètres est indispensable pour adapter correctement l'antenne, ces éléments de l'antenne vont être analysés en détail.

3.5.5 Influence paramétrique de la longueur des languettes

a) Etude l'effet de la longueur de la languette L1

Nous allons tout d'abord varier la longueur de la languette L1 qui se trouve dans la fente supérieure de l'élément rayonnant.

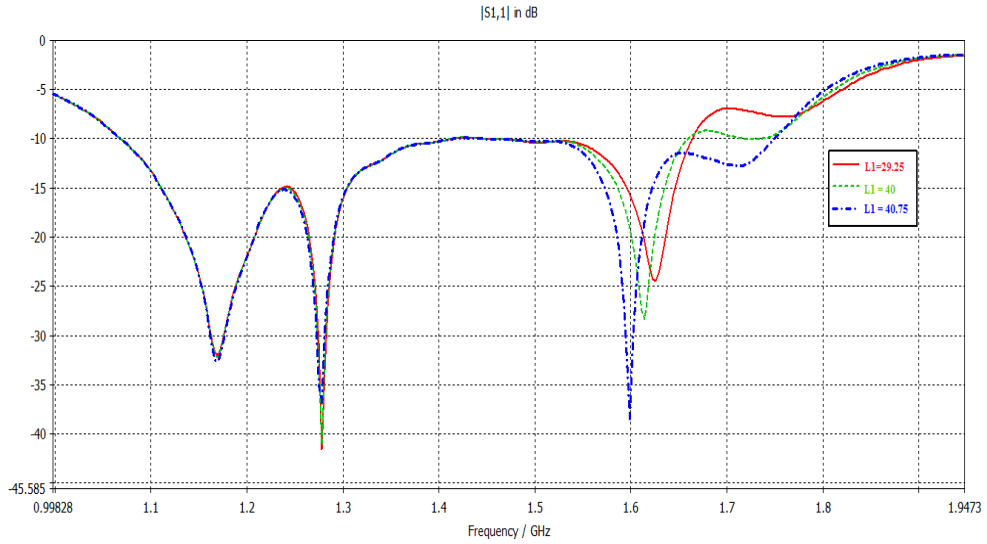


Figure 3.14: Evolution du module du coefficient de réflexion en fonction de la longueur L1.

La simulation de coefficient de réflexion à -10 dB pour différentes longueurs du paramètre L1 de l'antenne est présentée dans la figure 3.14. On observe que plus cette longueur diminue la troisième bande se désadapte petit à petit et la fréquence de travail augmente très légèrement.

Les autres bandes ne sont pas affectées par cette variation.

b) Etude l'effet de longueur de la languette L4

Nous allons varier maintenant la longueur de la languette L4 et qui est présentée dans la figure 3.15.

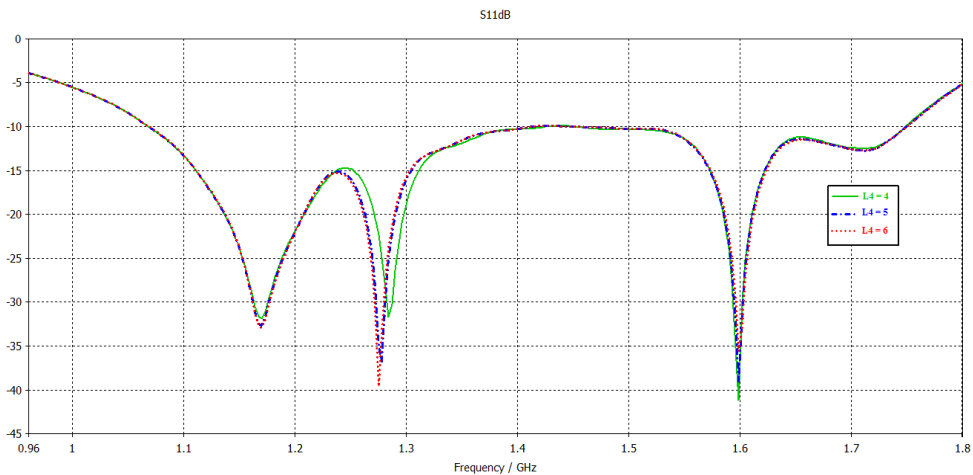


Figure 3.15: Evolution du module du coefficient de réflexion en fonction de la longueur L4.

La première et la troisième bande ne sont pas influencées par cette variation. C'est dans la bande centrale où l'adaptation de l'antenne est affectée. En effet, nous remarquons qu'en augmentant ou diminuant cette longueur la fréquence de travail de la bande centrale est affectée.

Lorsque $L_4 = 5 \text{ mm}$ (Valeur optimale) on obtient une meilleure adaptation dans cette bande de résonance.

c) Etude l'effet de la longueur De la languette L_2

Grâce à de nombreuses simulations (figure 3.16) et des expériences, il a été constaté que la longueur de la languette L_2 est le paramètre le plus influent sur le comportement de l'antenne qui doit être choisi à $L_2 = 33.48 \text{ mm}$. Des petits changements dans ce paramètre provoquera un décalage de fréquence vers la gauche et la droite dans la bande centrale et tend à une moins bonne adaptation.

Par contre la première bande de travail, son adaptation s'améliore en augmentant la longueur L_4 et il n'y a aucun effet sur la troisième bande.

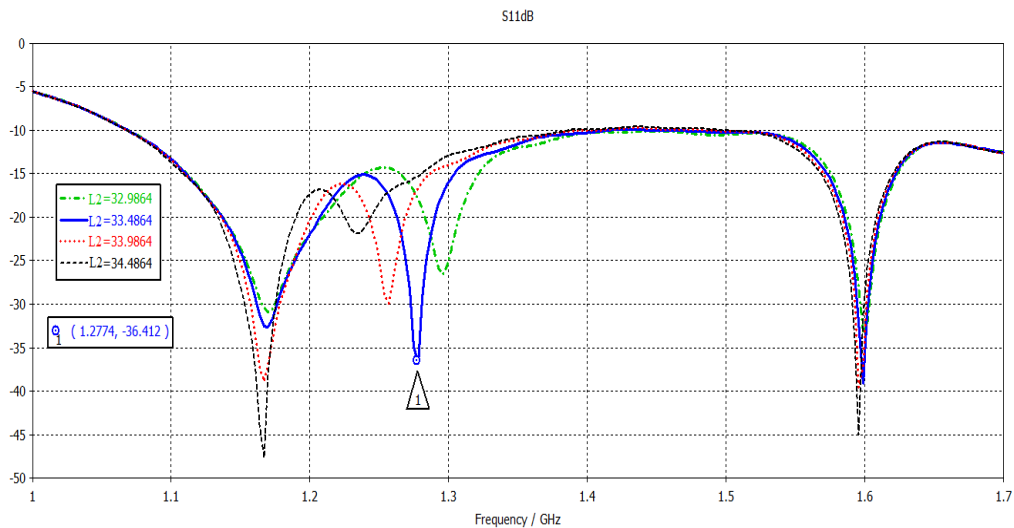


Figure 3.16: Evolution du module du coefficient de réflexion en fonction de la longueur L_2 .

3.5.6 Polarisation, diagramme de rayonnement et gain de l'antenne multi bande

a) Polarisation de l'antenne multi bande

Pour illustrer le mécanisme de polarisation circulaire, qui nécessite modes de grandeur égaux qui sont en opposition de phase. Les distributions de courant de l'antenne simulées du côté micro ruban sont illustrées dans la figure 3.17. La direction des courants de surface sur les fentes d'antenne et la ligne d'alimentation micro ruban est présentée à 1.278 GHz avec le changement de phase de 0 à 270 degrés.

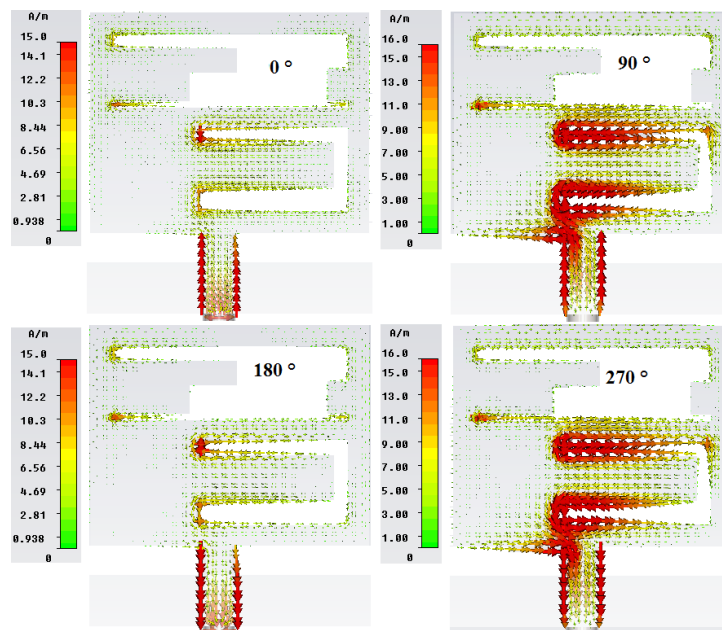


Figure 3.17: Distribution de courant électrique pour différentes phases.

Nous observons que la distribution de courant surfacique en 90 et 270 degrés sont égaux en amplitude et opposée en phase et même pour 0 et 180 degrés.

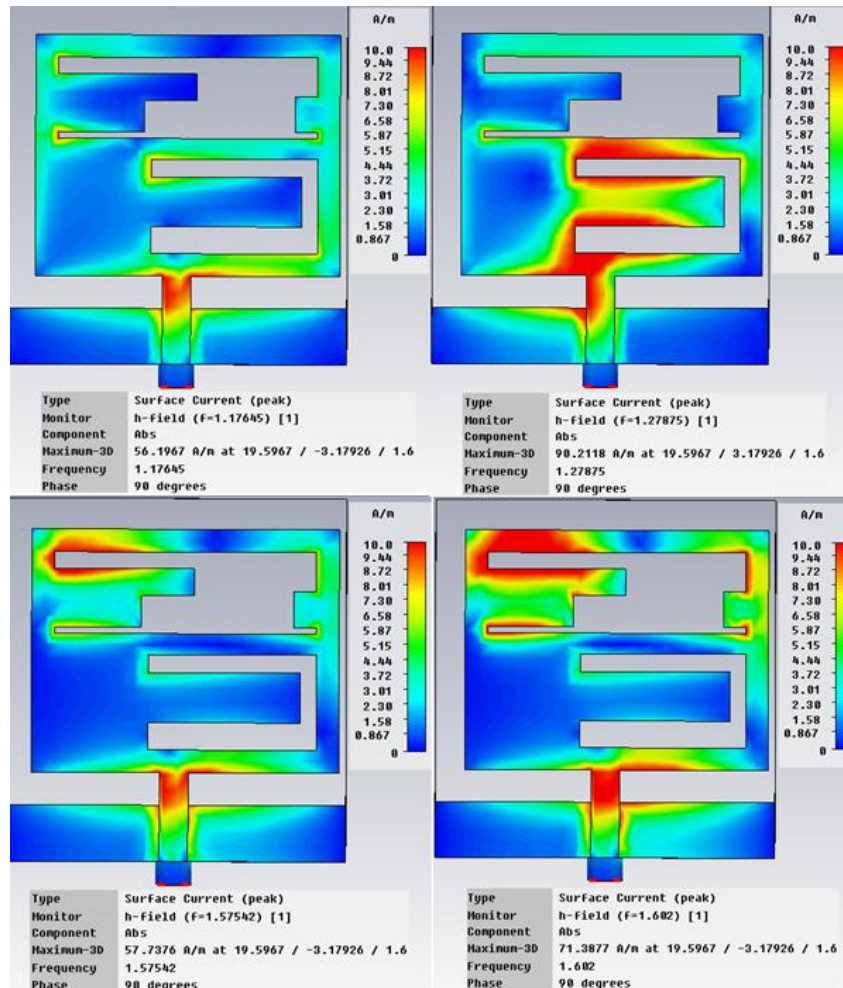


Figure 3.18: Distribution de courant surfacique sur l'élément rayonnant et le plan de masse.

La distribution des courants de surface (figure 3.18) montre qu'à la fréquence de résonance initiale (1.176 GHz) les courants se situent principalement au niveau inférieur de l'élément rayonnant pré de la ligne d'alimentation micro ruban.

A la deuxième fréquence (1.278 GHz), les courants sont situés majoritairement sur la languette micro ruban L2 et à l'extrémité de la fente adjacente.

A la fréquence de résonance (1.575 GHz), les courants sont concentrés entre la languette micro ruban L1 et le niveau haut gauche de l'élément rayonnant.

Et pour la fréquence haute (1.602 GHz), les courants de surface se concentrent à la même place que la fréquence précédente mais avec plus de densité et aussi au niveau de la languette L4.

b) Diagramme de rayonnement et gain de l'antenne multi bande

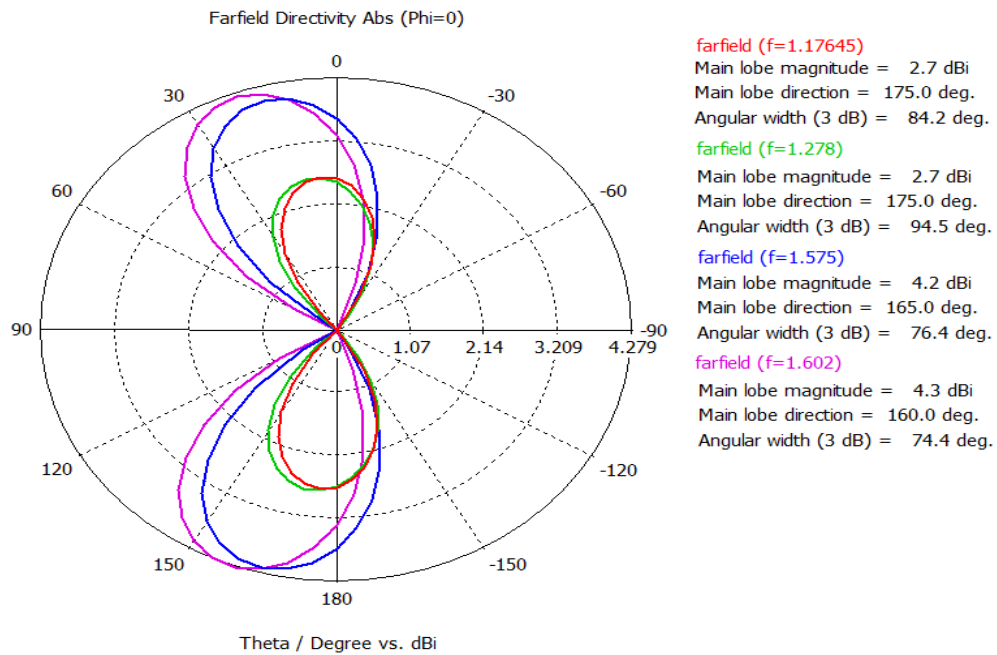


Figure 3.19: Diagramme de rayonnement de l'antenne simulée pour $\phi=0^\circ$.

Les diagrammes de rayonnement (figure 3.19) présentent un lobe directif dans les deux sens de l'axe vertical et une directivité sans lobes secondaires pour toutes les fréquences. Ces diagrammes sont d'ailleurs assez similaires sur toutes les bandes des fréquences.

Le gain maximal vaut 4.3 dBi pour la fréquence $f=1.602$ GHz avec un angle ouverture de 74.4° calculé à 3 dB par rapport au gain maximal.

A la première fréquence $f=1.176$ GHz, le gain minimal pour $\phi=0$ est d'environ 2.7 dBi qui est supérieur à 2.5 dBi.

Pour la deuxième et la troisième fréquence le gain est supérieur à 2.5 dBi avec un angle d'ouverture entre 76° et 94° .

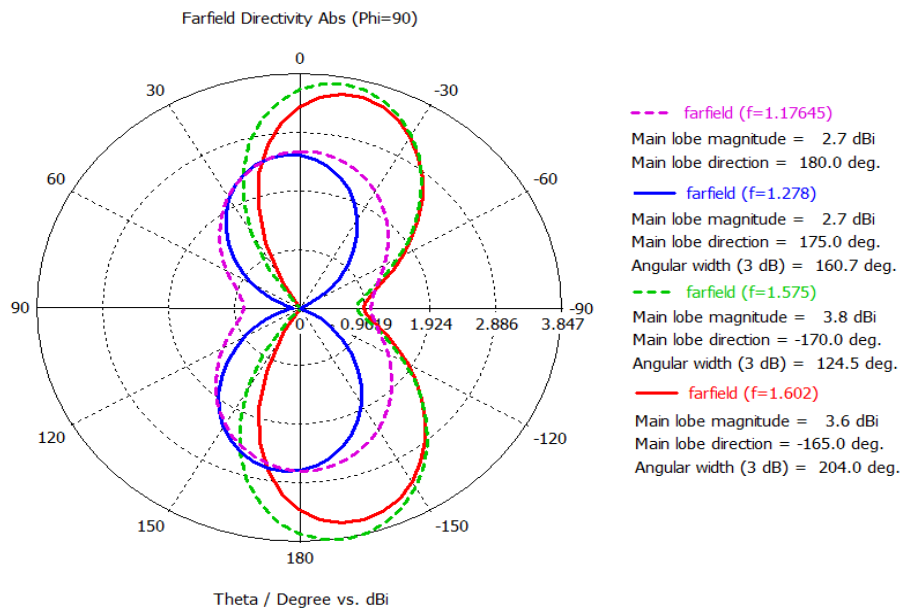


Figure 3.20: Diagramme de rayonnement de l'antenne simulée pour $\phi=90^\circ$.

Le gain maximal (figure 3.20) pour $\phi=90^\circ$ vaut 3.6 dBi et l'angle d'ouverture calculé à 3 dB par rapport au gain maximal est de 204° pour la fréquence haute.

La largeur de faisceau de l'antenne à 3 dB est 124° jusqu'à 180 avec un gain allant de 2.7 dBi à 3.8 dBi pour les autres fréquences.

Le tableau 3.4 résume les gains et les angles d'ouverture pour les différentes bandes de fréquences de l'antenne simulée.

Fréquence (GHz)	1.176	1.278	1.575	1.602
Gain $\phi=0^\circ$ (dbi)	2.7	2.7	4.2	4.3
Angle d'ouverture $\phi=0^\circ$ (°)	84.2	94.5	76.4	74.4
Gain $\phi=90^\circ$ (dBi)	2.7	2.7	3.8	3.6
Angle d'ouverture $\phi=90^\circ$ (°)	-	160.7	124.5	204

Tableau 3.4: Gain et angle d'ouverture de l'antenne simulée pour $\phi=0^\circ$ et $\phi=90^\circ$.

c) Impédance d'entrée sur l'Abaque de Smith

Cette impédance est normalisée à 50Ω . Sur cet abaque, la fréquence varie de $f=0\text{GHz}$ à $f=3\text{GHz}$ comme nous pouvons observer sur la figure 3.21, la partie réelle et la partie imaginaire de l'impédance sont relativement satisfaisantes, la valeur moyenne de la partie réelle est autour de 50Ω et la partie imaginaire est presque nulle. Ce qui traduit une bonne adaptation à toutes les fréquences de résonances.

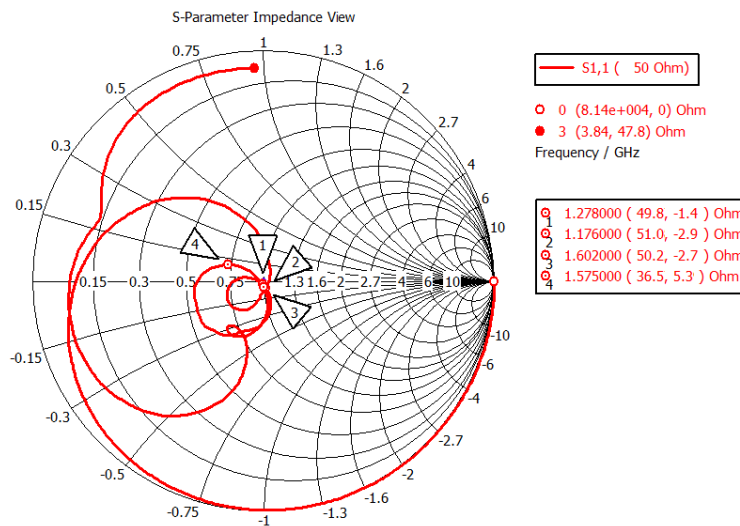


Figure 3.21: Impédance d'entrée de l'antenne simulée.

d) Taux d'onde stationnaire

Le taux d'ondes stationnaires de l'antenne micro ruban représenté sur la figure 3.22 montre que les valeurs maximum du TOS est moins de 2 ($\text{TOS} < 2$) à toutes les fréquences de résonances.

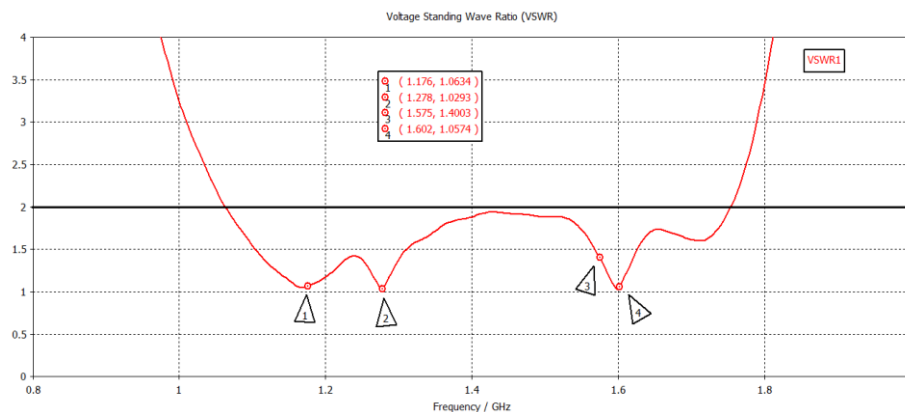


Figure 3.22: Taux d'ondes stationnaires de l'antenne simulée.

e) Coefficient de réflexion S_{11}

Le coefficient de réflexion qui est représenté sur la figure 3.23 indique une bonne adaptation à moins de 10 dB sur les bandes de travail avec une largeur de bande suffisamment pour toutes les fréquences exigées par le cahier de charge.

Ce qui ressort de cette étude, c'est l'influence importante des paramètres liés à l'alimentation, au plan de masse, fentes et languettes. En effet, c'est dans cette zone que sont concentrés les courants aux fréquences de résonances.

Le tableau 3.5 résume les résultats de coefficient de réflexion et largeurs de bandes de l'antenne simulée pour différents fréquences.

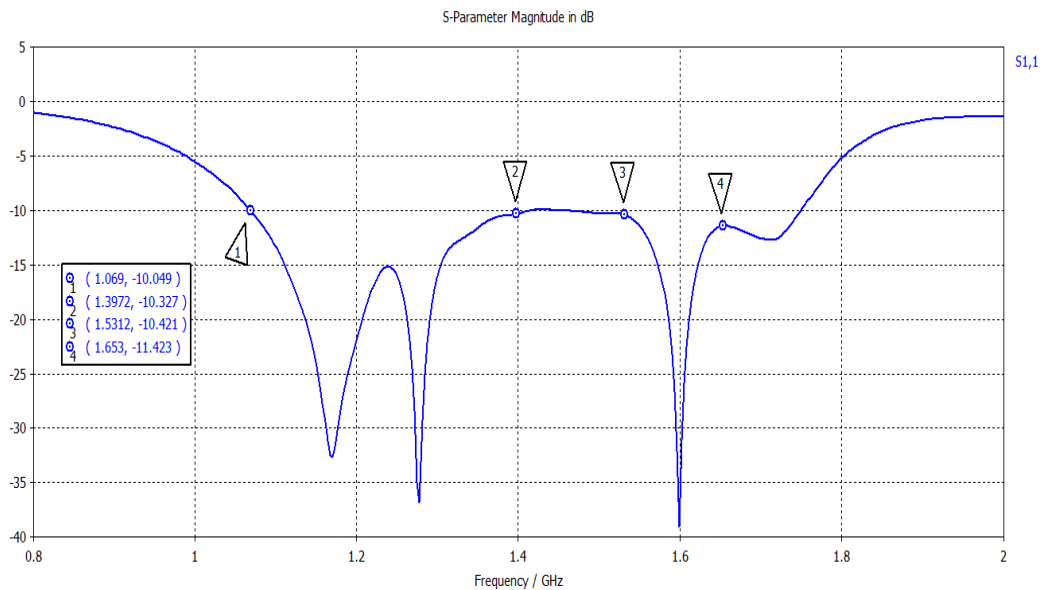


Figure 3.23: Module du coefficient de réflexion de l'antenne multi bande à fentes simulée.

Fréquences de résonances [GHz]	f_{\min} [MHz]	f_{\max} [MHz]	Bande passante [MHz]	S_{11} (dB)
1.176	1069	1239	170	-32.47
1.278	1239	1414	175	-36.805
1.602-1.575	1553	1675	122	-39.08

Tableau 3.5: Module du coefficient de réflexion et bande passante de l'antenne multi bande simulée.

3.5.7 Conclusion

Notre étude a débuté sur la base d'une antenne rectangulaire mono bande à bande étroite comme référence. Par la suite, nous avons tenté d'élargir la bande passante et rajouter des nouvelles résonances afin de couvrir toutes les bandes de fréquences du système GNSS.

Une fente et des languettes de différentes longueurs rajoutées à l'élément rayonnant ont été étudiées et analysées. Après, nous avons essayé d'adapter la bande passante, le gain et d'autres paramètres pour les trois bandes considérées.

Nous avons finalement opté pour l'antenne multi bande qui permet de satisfaire les principaux critères d'adaptation.

3.6 Conception d'une antenne large bande

Pour mettre en œuvre notre travail nous allons procéder à une comparaison entre l'antenne multi bande et une antenne large bande regroupant toutes les fréquences du système GNSS qu'on va concevoir.

Nous proposons de mettre en lumière tout d'abord les principaux paramètres de dimensionnement de cette antenne suivant les caractéristiques désirées. Une antenne visée sera alors proposée, ce qui fixera les limites intrinsèques de cette structure. Une nouvelle géométrie sera proposée à fin de répondre aux exigences au cahier de charges. Cette antenne sera constituée d'un élément circulaire alimenté par une ligne micro ruban. Un premier travail sur la géométrie de la ligne d'alimentation permettra de présenter une structure adaptée à 50 Ohms sur une large bande de fréquence. Une étude du plan de masse avec variation de taille de ce dernier dans le but de réduire son encombrement et de pouvoir également contrôler son rayonnement. L'optimisation de cette structure sera finalisée par l'insertion des fentes dans l'élément rayonnant ce qui conduira à la réalisation d'une antenne à la fois mieux adaptée et de dimension réduite.

3.6.1 Etude paramétrique de l'antenne circulaire

Afin de commencer l'étude paramétrique de l'antenne circulaire, il convient de définir une structure de référence ; Cette recherche permet de décrire le comportement et le dimensionnement d'antenne en fonction des caractéristiques désirée.

Les différents paramètres définissent la géométrie de l'antenne circulaire seront donc varier un par un afin de constater leur influence sur les performances de la structure, notamment en terme de stabilité d'impédance sur une large bande de fréquence. La base de l'étude sera donc définie dans la figure 3.24, c'est-à-dire constitué d'un cercle de rayon r et une ligne micro ruban de longueur L_f imprimés sur un substrat FR4 EPOXY de 1.6mm d'épaisseur.

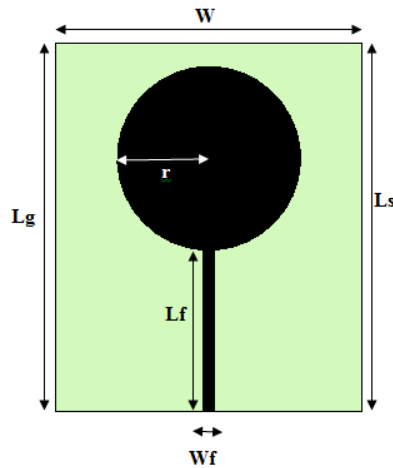


Figure 3.24: Antenne circulaire de référence.

Le design de cette antenne suit les étapes suivantes :

Une longueur $L_s = L_g = 100\text{mm}$.

Une largeur $W = 80\text{mm}$.

Cette étude va nous permettre de dimensionner correctement l'élément rayonnant pour qu'il fonctionne à une fréquence $f = 1.176\text{ GHz}$ avec une bande passante de 630 MHz. Le but ici est d'analyser tous les paramètres de l'antenne.

a) Etude de l'effet du rayon du patch circulaire

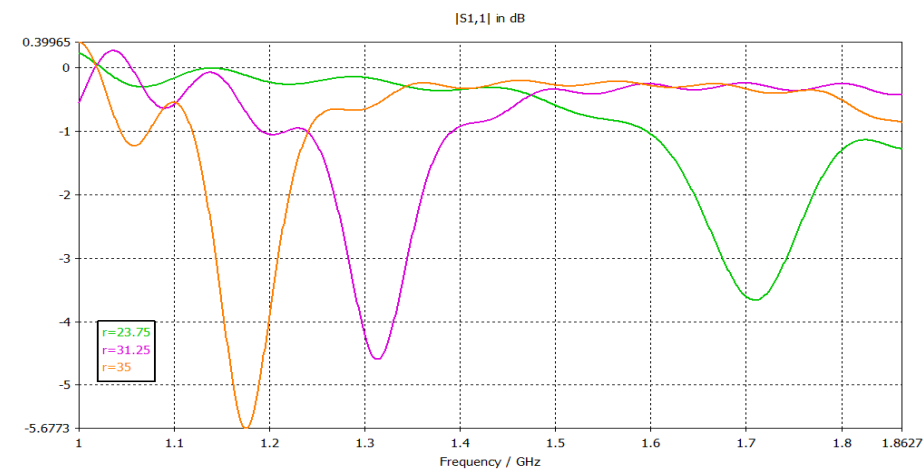


Figure 3.25: Evolution du module du coefficient de réflexion en fonction du rayon.

En partant de la base d'étude, le rayon r a été augmenté de 40 à 70 mm afin d'évaluer son influence sur le comportement globale de l'antenne en terme de fréquence et de bande passante. La figure 3.25 représente le coefficient de réflexion de l'antenne simulée pour différentes valeurs de r .

En effet, les courbes du coefficient de réflexion nous mène à constater que l'augmentation du rayon influe directement sur la fréquence ; c'est-à-dire, plus on augmente r plus la fréquence diminue et plus le rayon diminue plus la fréquence augmente.

b) Etude de l'effet de la Longueur de la masse

Dans cette optique de l'étude seule la longueur de masse est augmenté de 30 à 108.75mm. Les résultats les plus significatifs de l'évolution du coefficient de réflexion en fonction de la longueur du patch L_g sont représentés à la figure 3.26.

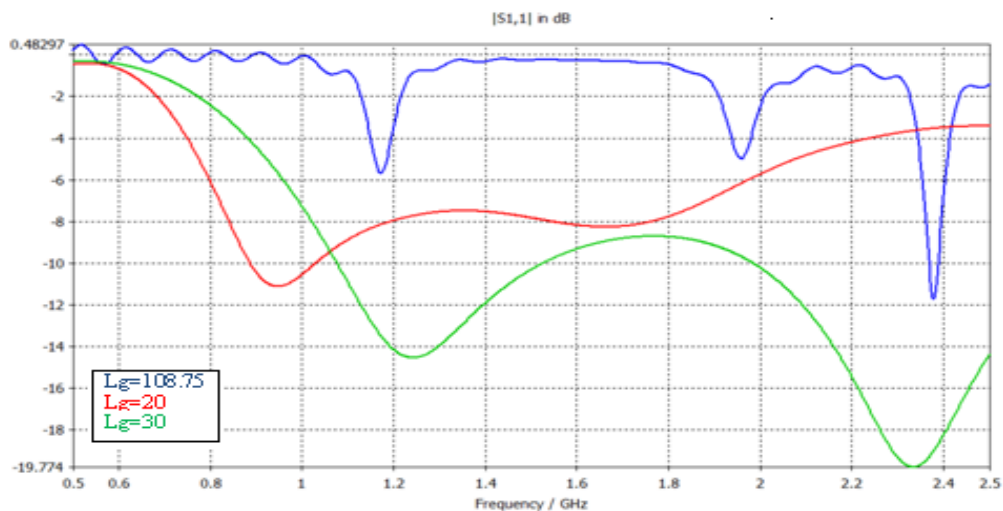


Figure 3.26: Evolution du module du coefficient de réflexion en fonction de L_g .

Cette étude de la longueur de masse a une influence non négligeable dans ce qui concerne l'adaptation et largeur de bande. Nous pouvons constater que pour une valeur de L_g inférieur ou égale à la longueur de ligne d'alimentation nous avons une

meilleure adaptation dans la fréquence désirée ainsi qu'une large bande passante par rapport au plan de masse qui couvre tout le substrat.

3.6.2 Antenne circulaire optimisée

A partir des études paramétriques menées précédemment, nous pouvons déduire les paramètres importants affectent les performances d'adaptation de l'antenne circulaire. Une antenne optimisée peut donc prendre les valeurs illustrées dans le tableau 3.6 :

r	Ls	Lg	W
35	108.75	30	80
Lf	Wf	H	ϵ_r
30	3.1	1.6	4.3

Tableau 3.6: Dimensions optimales de l'antenne circulaire en mm.

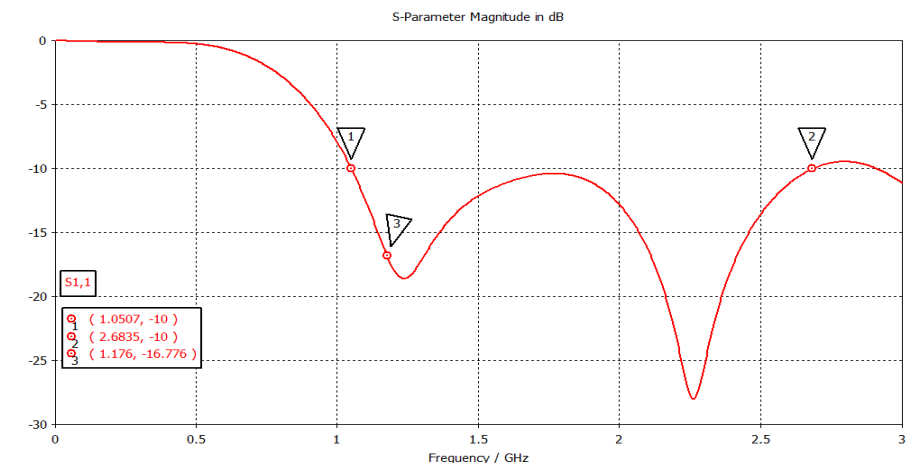


Figure 3.27: Module du coefficient de réflexion de l'antenne circulaire.

Le résultat présenté (figure 3.27) est obtenu à partir de l'étude de chaque paramètre de cette antenne afin d'en trouver des valeurs optimales qui puissent satisfaire à ce qui est demandé dans le cahier de charges en ce qui concerne l'adaptation, la bande passante et coefficient de réflexion < -10 dB.

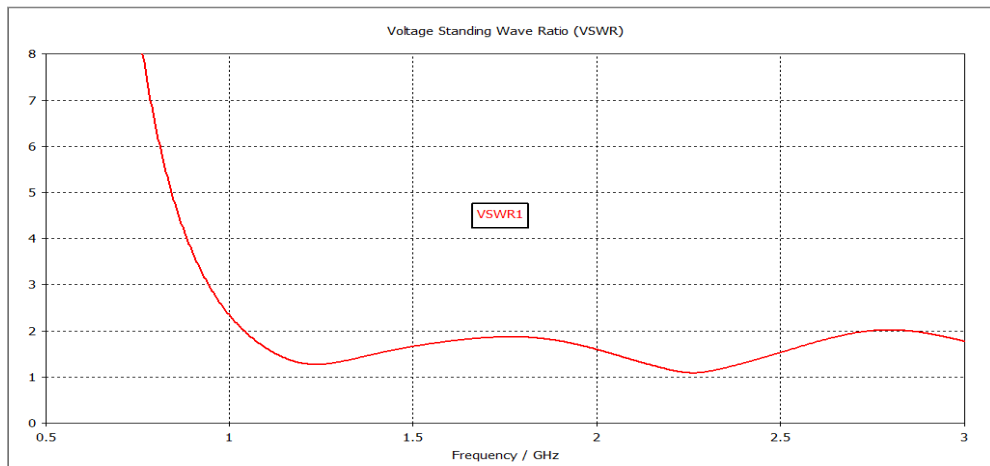


Figure 3.28: Taux d'onde stationnaire de l'antenne circulaire simulée.

D'après le résultat de la simulation (figure 3.28 et figure 3.29) nous verrons bien que nous avons fait une bonne adaptation.

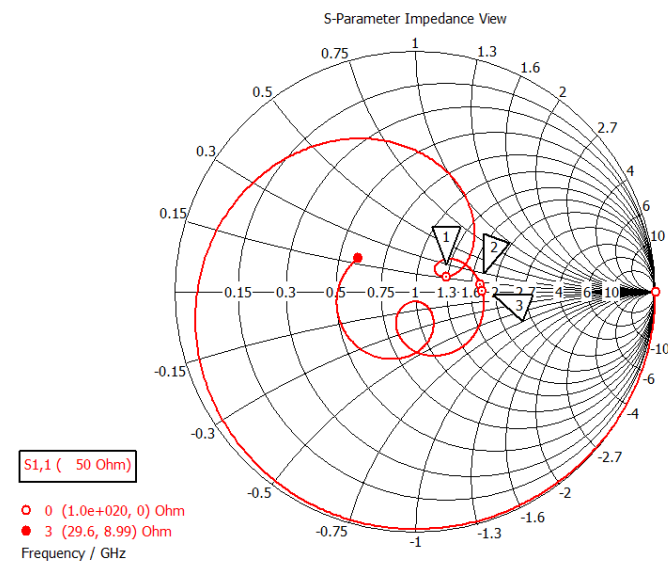


Figure 3.29: Impédance d'entrée de l'antenne circulaire simulée.

3.6.3 Conclusion

L'antenne circulaire imprimée sur substrat a donc été étudiée dans cette partie. Nous avons pris en compte l'influence du rayon de l'élément rayonnant (cercle) et il a été montré que le paramètre le plus influent sur le comportement de cette antenne est la longueur de plan de masse ; il agit à la fois sur l'adaptation mais aussi sur sa fréquence

basse. Une antenne optimisée pour nos applications a alors pu être présentée. Elle répond au cahier des charges en termes de largeur de bande seulement. Cependant, son encombrement de $80 \times 108.75 \text{ mm}^2$ et son adaptation à 50 Ohms restent des contraintes très importantes qui nuisent à son intégration dans les systèmes large bande. La solution proposée c'est l'insertion de fentes pour la miniaturisation et l'adaptation, donc plusieurs simulations ont été faites pour arriver à une antenne mieux adaptée et miniature.

3.6.4 Etude paramétrique de l'antenne circulaire à masse réduite

Dans cette partie nous allons étudier tous les paramètres qui peuvent influencer sur l'encombrement et l'adaptation d'antenne. C'est-à-dire faire varier tous les paramètres ensemble pour une optimisation en premier temps. En second lieu, une étude sera menée sur l'insertion des fentes dans le patch et dans le plan de masse pour pouvoir voir leur influence sur le comportement de l'antenne. Enfin, ces études seront aussi menées dans la recherche d'une structure finale la moins encombrante possible, tout en maintenant une bonne qualité d'adaptation.

Comme nous avons dit au paravent l'effet des paramètres d'antenne sur son adaptation en termes de la stabilité de l'impédance d'entrée ainsi que sur sa bande de fréquence ont été étudiées précédemment. Le but étant d'obtenir une structure miniature, l'étude a donc été menée dans le sens de diminution de la taille de l'antenne. Elle met donc en lumière les paramètres qui contribuent directement sur les performances d'antenne.

Nous allons varier tous les paramètres d'antenne, en commençant par r de 22 à 24 mm, par la suite h de 1 à 3 mm et enfin L_g de 30 à 40 mm.

La figure 3.30 et le tableau 3.7 illustrent le nouveau dimensionnement de cette antenne.

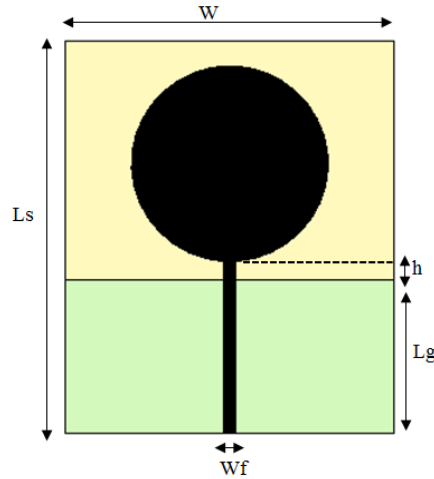


Figure 3.30: Antenne circulaire à masse réduite.

Où :

- W : Largeur de l'antenne.
- L_s : La longueur d'antenne.
- L_g : La longueur de plan de masse.
- h : Distance qui sépare le plan de masse du patch.
- Sans oublier que la longueur de la ligne d'alimentation $L_f = L_g + h$.

r	L_s	L_g	W
24	96.25	40	80
L_f	W_f	H	ϵ_r
42.25	3.1	1.6	4.3

Tableau 3.7: Dimensions optimales de l'antenne circulaire à masse réduite en mm.

Cette modification de la géométrie a été effectuée dans le but de pouvoir miniaturiser la taille d'antenne et conserver la première bande de fréquence en la mieux adaptant.

Il a fallu donc changer les dimensions de l'élément rayonnant, le plan de masse et la longueur de ligne d'alimentation.

La taille de l'élément rayonnant s'est diminué de 31,42 % et le plan de masse de 63,21 % environ. De même, les dimensions de la ligne d'alimentation ont augmenté de 29 %.

Comme nous pouvons visualiser les résultats de simulation du module de coefficient de réflexion pour les valeurs optimales dans la figure 3.31.

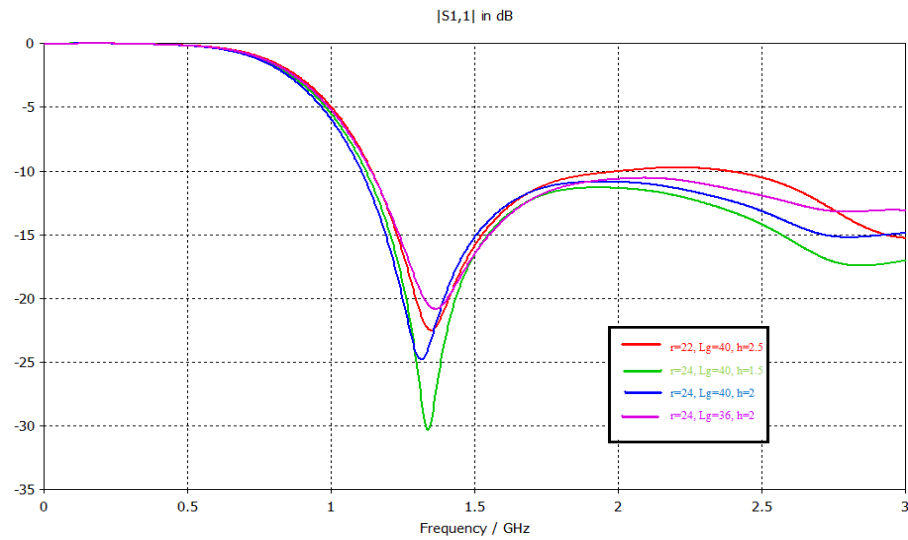


Figure3.31: Evolution du module du coefficient de réflexion en fonction des paramètres r , L_g et h .

Après cette étude, nous prenons les valeurs des paramètres optimaux et nous lançons la simulation une autre fois afin de déterminer la fréquence de résonance et la bande passante de cette antenne. Les résultats obtenus (S_{11} et TOS) sont illustrés dans la figure 3.32 et la figure 3.33.

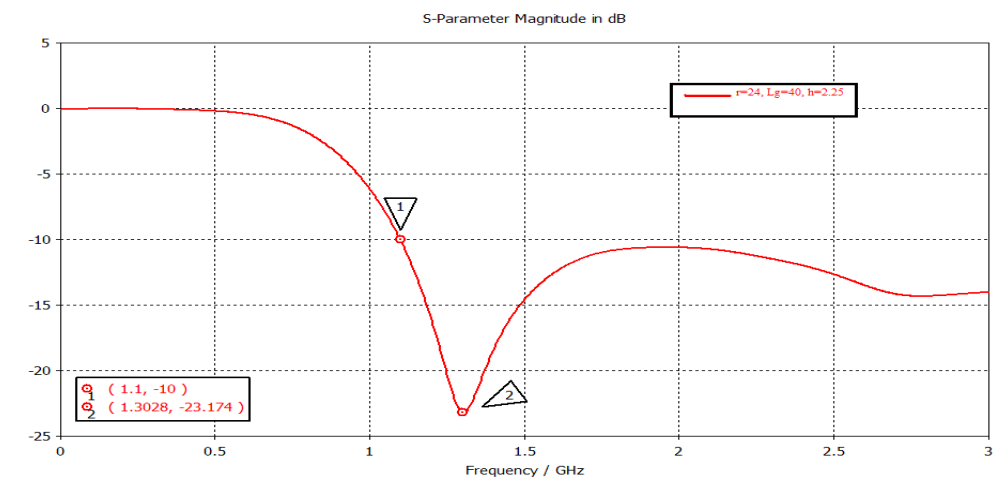


Figure 3.32: Module du coefficient de réflexion en fonction des paramètres optimaux.

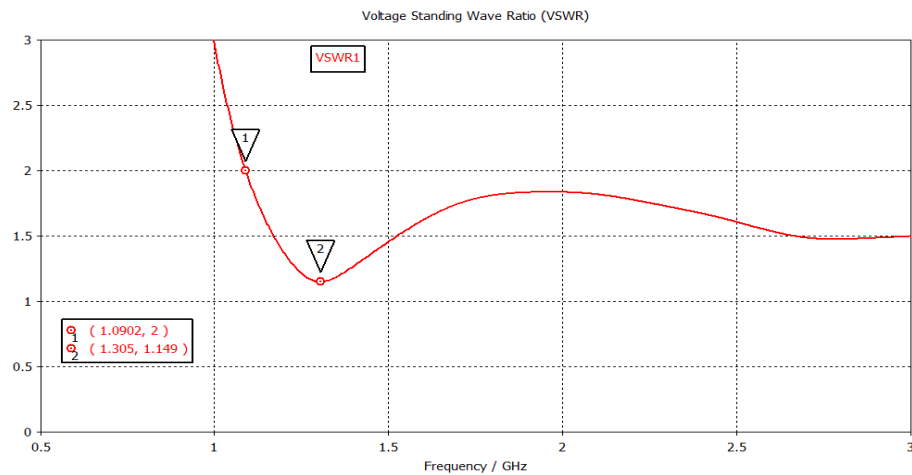


Figure 3.33: Taux d'onde stationnaire en fonction des paramètres optimaux.

Nous obtenons une fréquence de résonances de 1.305 GHz, ainsi qu'une très large bande passante (Pour un TOS ≤ 2).

La valeur du TOS à cette fréquence de résonance est de l'ordre de 1.149 et par conséquent l'antenne est bien adaptée.

En se référant à l'étude précédente, on peut remarquer que l'antenne résonne sur une très large bande qui dépasse les 2 GHz. Pour cela une technique d'insertion de fentes est utilisée à fin de bien déterminer la bande souhaitable.

3.6.5 Insertion des fentes

La découpe des ouvertures a été choisie dans l'élément rayonnant et le plan de masse (figure 3.34) dans le but d'obtenir une large bande (tableau 3.8) entre 1 et 2 GHz ainsi qu'une très bonne qualité d'adaptation. Les résultats obtenus des différentes insertions de fentes seront donc comparés au résultats de l'antenne précédente en terme d'adaptation et de largeur de bande.

W	Wf	Wb	Wa	W1	W2	W3	H
80	3.1	2	24	4	18	3	1.6
h	Ls	Lg	La	Lb	Lc	L	r
2.25	96.25	40	3.42	3	8	22	24

Tableau 3.8: Dimensions optimales de l'antenne large bande.

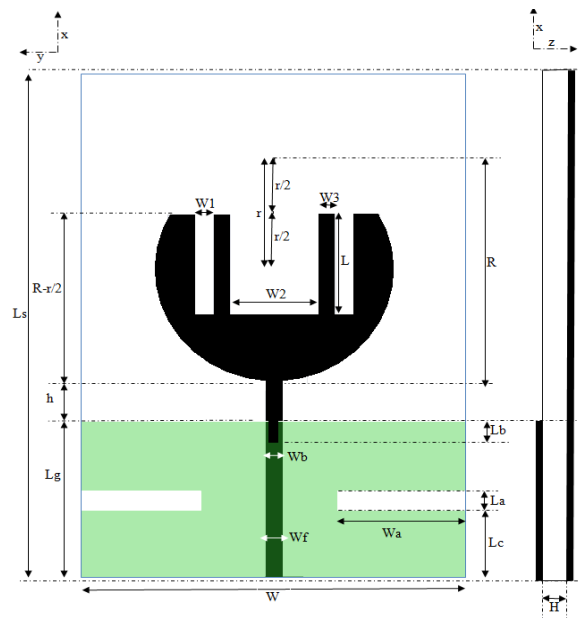


Figure 3.34: Antenne large bande.

Avant d'insérer les fentes, une étude sera menée sur la distribution du courant surfacique de l'élément rayonnant et le plan de masse afin de rechercher le choix de la forme et le dimensionnement des fentes ainsi que leur positionnement. La figure 3.35 illustre la répartition du courant électrique surfacique pour les fréquences $f_1=1.176$, $f_2=1.575$ et $f_3=1.602$ GHz.

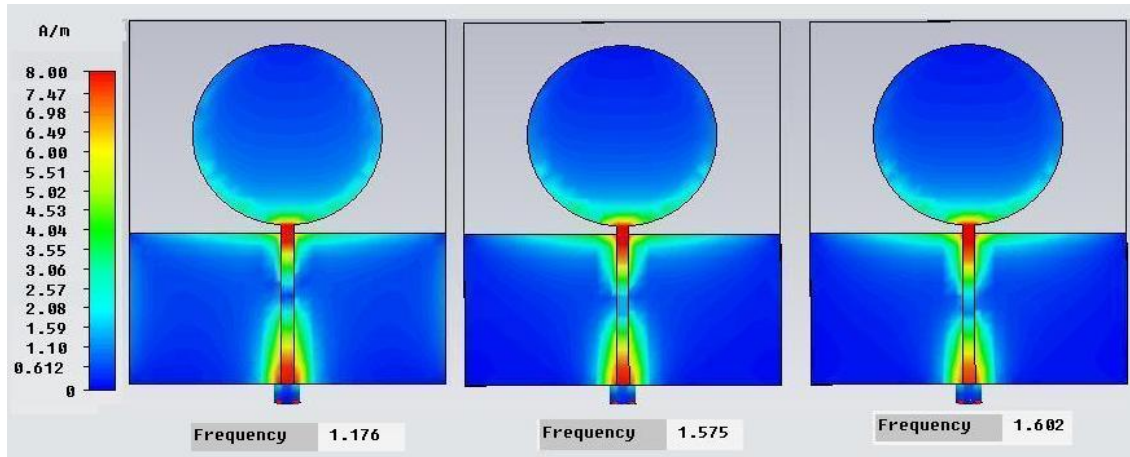


Figure 3.35: La répartition du courant surfacique de l'antenne circulaire à masse réduite.

On peut remarquer que les courants se concentrent tout au long de la ligne d'alimentation dans les trois fréquences de résonnances avant d'arriver à l'extrémité supérieure du plan de masse et autour du périmètre du cercle le plus proche de plan de masse.

Par conséquent, nous allons insérer les fentes au niveau de la surface la moins encombrante en courant électrique.

Les résultats de simulation de l'évolution du coefficient de réflexion en fonction des fentes insérées sont illustrés dans la figure 3.36.

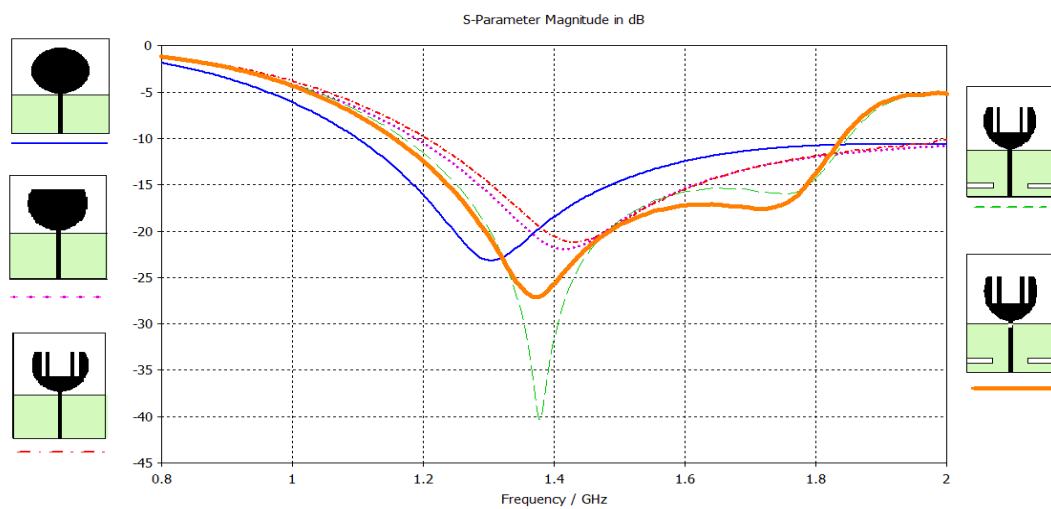


Figure 3.36: Evolution de l'antenne circulaire en fonction du coefficient de réflexion.

Les résultats obtenus peuvent expliquer l'effet des fentes sur le comportement d'antenne.

Comme nous pouvons remarquer, les fentes insérées dans le patch influent directement sur le décalage de la bande de fréquence ; par contre les fentes insérées dans le plan de masse influent à la fois sur le décalage de la fréquence de résonance et l'adaptation de l'antenne.

Le fait d'insérer les fentes dans l'élément rayonnant et dans le plan de masse constitue donc un paramètre non négligeable puisqu'il améliore sensiblement l'adaptation sur sa bande passante.

3.6.6 Etudes des performances de l'antenne large bande

a) Diagramme de rayonnement et gain

Nous proposons dans ce paragraphe de visualiser les diagrammes de rayonnement de l'antenne conçue (figure 3.37).

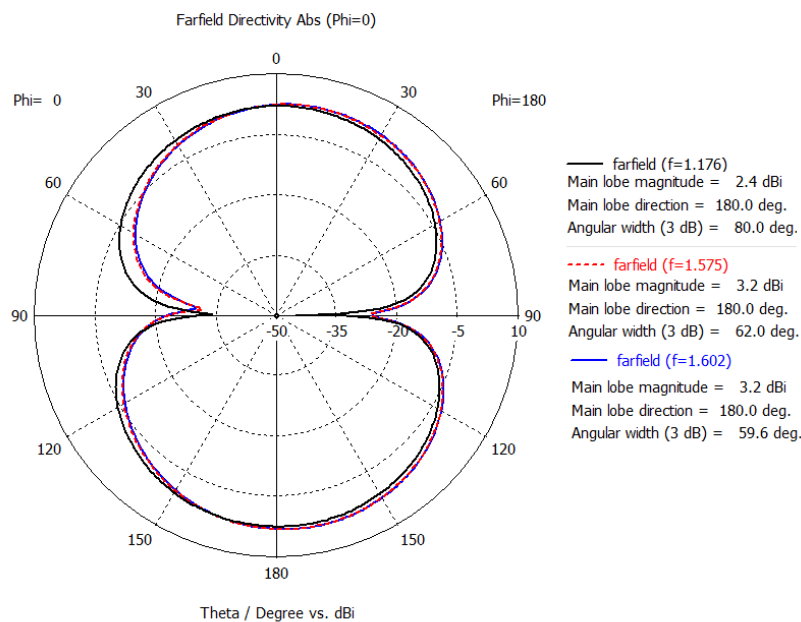


Figure 3.37: Diagramme de rayonnement de l'antenne simulée pour $\phi=0^\circ$.

Dans le plan $\phi=0^\circ$, le gain maximal de l'antenne pour la première fréquence $f_1=1.176$ GHz est de 2.4 dBi avec une ouverture de 80° à 3 dB par rapport au gain maximal.

Pour la seconde et la troisième fréquence $f_2=1.575$ et $f_3=1.602$ GHz le gain maximal est de 3.2 dBi avec une ouverture de 62° et 59.6° respectivement à 3dB par rapport au gain maximal.

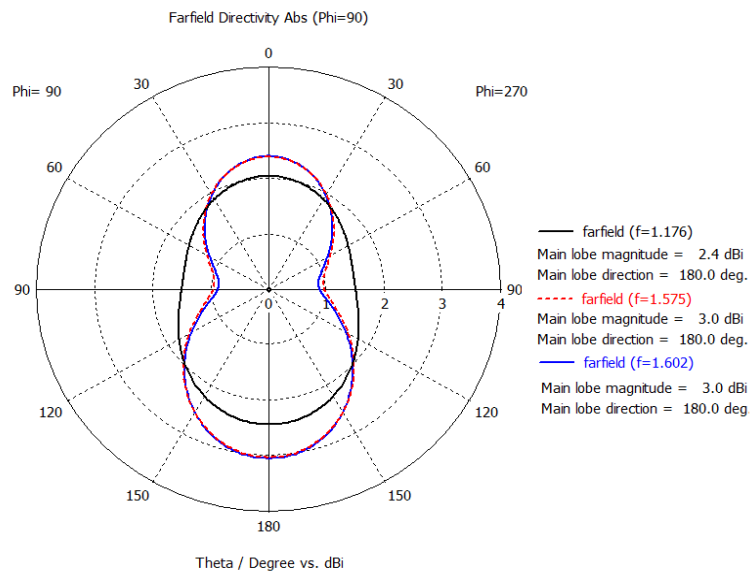


Figure 3.38: Diagramme de rayonnement de l'antenne simulée pour $\phi=90^\circ$.

Le diagramme de rayonnement (figure 3.38) dans le plan $\phi=90^\circ$, présente un gain de 2.4 dBi pour la première fréquence $f_1=1.176$ GHz et 3 dBi pour les deux autres fréquences $f_2=1.575$ GHz et $f_3=1.602$ GHz.

Ces résultats sont en accord avec un principe bien connu et qui réponds à l'exigence de cahier de charges.

Le tableau 3.9 résume les gains et les différentes bandes de fréquences de l'antenne simulée.

Fréquence (GHz)	1.176	1.575	1.602
Gain $\phi=0^\circ$ (dBi)	2.4	3.2	3.2
Angle d'ouverture $\phi=0^\circ$ ($^\circ$)	80	62.	59.6
Gain $\phi=90^\circ$ (dBi)	2.4	3	3
Angle d'ouverture $\phi=90^\circ$ ($^\circ$)	-	-	-

Tableau 3.9: Gain et angle d'ouverture de l'antenne simulée pour $\phi=0^\circ$ et $\phi=90^\circ$.

b) Impédance d'entrée sur l'abaque de Smith

En visualisant la figure 3.39 qui représente l'impédance d'entrée sur l'abaque de Smith pour les fréquences de la bande nous déduisons que l'antenne possède une bonne adaptation en ce qui concerne la partie réelle et imaginaire de l'impédance.

La partie réelle de l'impédance est au voisinage de 50 ohms (entre 47 et 69 Ohms) et pour la partie imaginaire la majorité de résultats sont au voisinage de 0 (entre -11 et -2) ce qui nous permet de dire que notre antenne est adaptée.

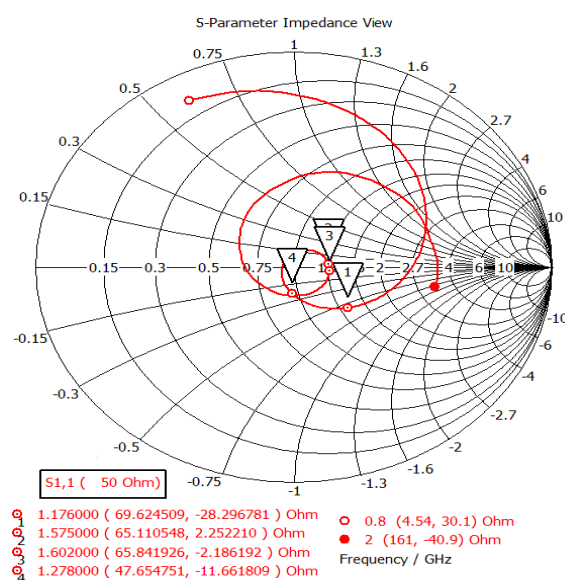


Figure 3.39: Impédance d'entrée de l'antenne large bande.

c) Taux d'onde stationnaire et coefficient de réflexion S_{11}

Afin de déterminer la bande passante de cette antenne, nous allons refaire la simulation de cette dernière. Les résultats obtenus (TOS et S_{11}) sont illustrés dans la figure 3.40 et la figure 3.41 respectivement.

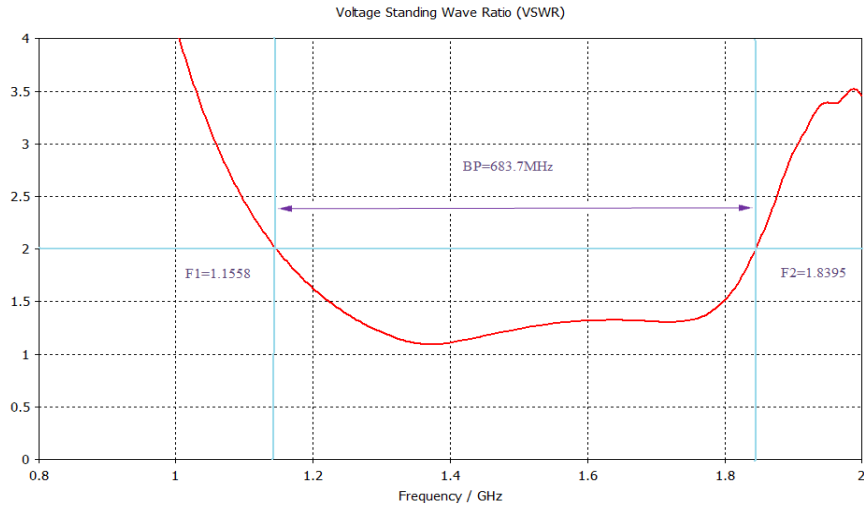


Figure 3.40: Taux d'onde stationnaire de l'antenne large bande.

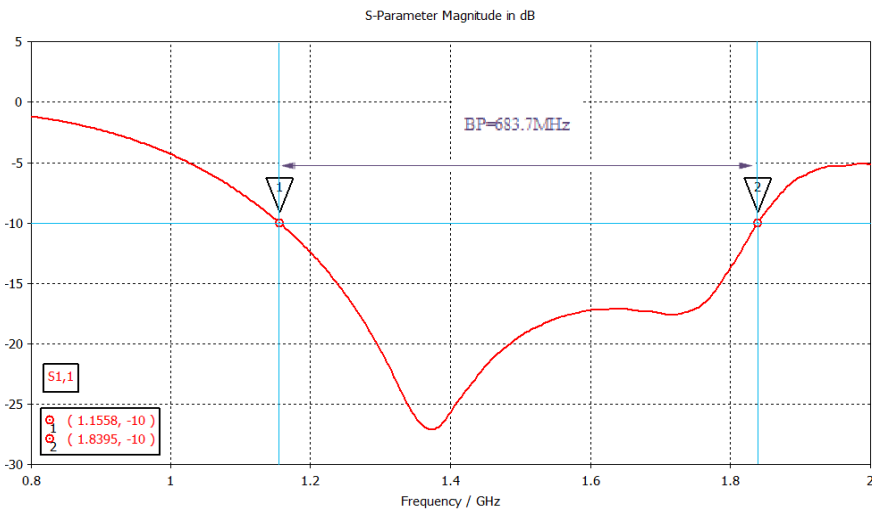


Figure 3.41: Coefficient de réflexion de l'antenne large bande.

Nous obtenons une bande passante (Pour un TOS ≤ 2) de l'ordre de 683.7 MHz. Cette bande passante obtenue permet de couvrir toutes les fréquences de résonances du système GNSS.

La valeur du TOS à ses fréquences de résonances est de l'ordre de 1.2 et par conséquent l'antenne est adaptée.

Le tableau 3.10 suivant résume les résultats du coefficient de réflexion et la largeur de bande de l'antenne large bande simulée pour différents fréquences.

Bande passante (MHz)	f_{\min} (GHz)	f_{\max} (GHz)	Fréquence de résonances (GHz)	S11 (dB)
683.7	1.1558	1.8395	1.176	-11.053
			1.278	-18.348
			1.575	-17.543
			1.602	-17.201

Tableau 3.10: Module du coefficient de réflexion et bande passante de l'antenne large bande simulée.

3.6.7 Conclusion

Nous avons présenté dans cette partie de l'étude une antenne large bande sur un plan de masse réduit.

Ainsi, nous avons pu concevoir cette antenne à partir d'une structure circulaire, en utilisant une technique de miniaturisation qui est l'insertion des fentes.

De plus, cette antenne présente des résultats acceptables sur la totalité de la bande de fréquence couverte.

3.7 Réalisation Et Mesure

3.7.1 Introduction

Nous avons vu que les résultats obtenus par simulation vérifient parfaitement le cahier de charge. Alors, il ne reste plus qu'à réaliser les antennes et les valider par les mesures.

La réalisation s'est déroulée au sein du laboratoire Micro-ondes à l'EMP (Ecole militaire polytechnique) de Borj El Bahri, Alger dans le cadre du projet de fin d'études.

Dans cet objectif, nous sommes passés par deux étapes : l'étape de fabrication des antennes et l'étape de mesures avec l'analyseur de réseaux.

Ce paragraphe décrit ces différentes étapes et présente les différents résultats obtenus. Mais pour commencer, nous allons rappeler les caractéristiques des différents appareils de mesure utilisés.

3.7.2 Appareil de mesure (Analyseur de réseaux)

L'analyseur de réseaux (figure 3.42) sert à mesurer les paramètres S et l'impédance d'entrée de l'antenne.

L'appareil utilisé est de marque Agilent qui permet des mesures de quelque KHz jusqu'à 12 GHz. Cette bande peut couvrir toutes les bandes de fréquences nécessaires.

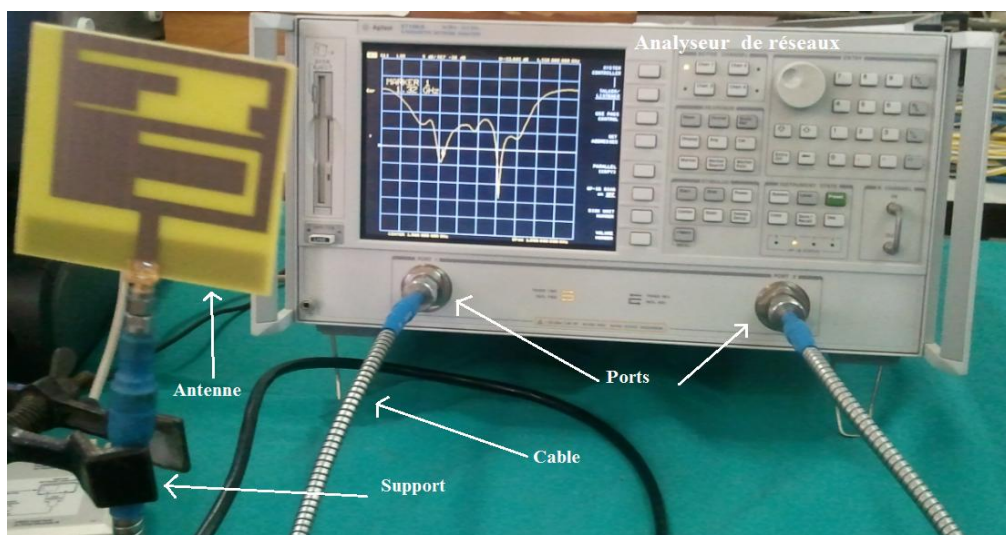


Figure3.42: Analyseur de réseaux.

Dans la majorité des cas, l'antenne est liée à l'analyseur de réseaux à travers des câbles et des connecteurs qui rajoutent au signal un affaiblissement et un déphasage. Alors, il faut éliminer l'influence de cette liaison. L'opération qui permet d'éliminer les erreurs systématiques dues aux câbles et à l'analyseur est appelée calibrage. C'est une opération permet de compenser les erreurs par égalisation. Elle se fait en liant au bout de la liaison, au lieu de l'antenne, une charge assimilée à un circuit ouvert, une charge de 50Ω et enfin un court-circuit.

3.7.3 Prototypes réalisées

Deux prototypes ont été réalisés (figure 3.43) et les résultats expérimentaux obtenus à l'aide des outils d'analyse sont comparés aux résultats théoriques.

L'alimentation est effectuée à partir d'un connecteur SMA femelle standard dont l'âme centrale est soudée au ruban d'alimentation et l'embase au plan de masse.

Le substrat diélectrique est du verre epoxy dont les caractéristiques sont :

$\epsilon_r = 4.3$ $\tan \delta = 0.025$ épaisseur = 1.6 mm.

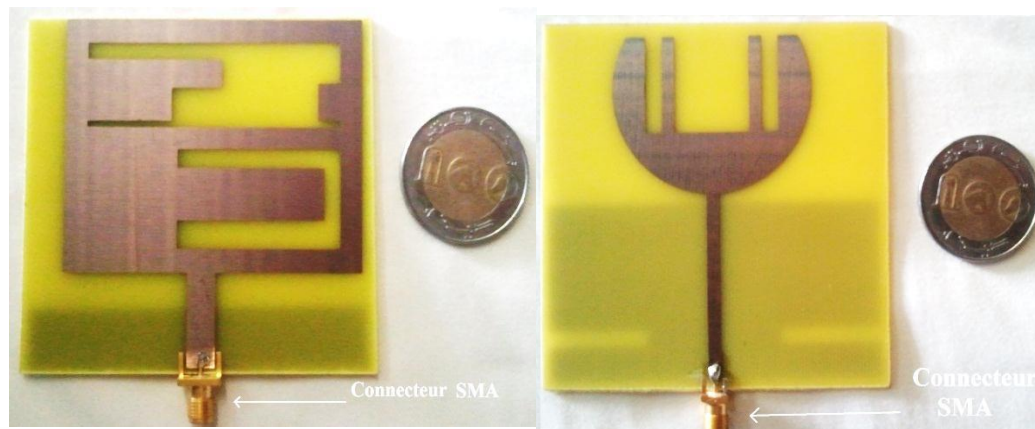


Figure 3.43: Antenne multi bande (à gauche) et Antenne large bande (à droite).

3.7.4 Mesure du coefficient de réflexion

Cette mesure se fait au laboratoire en utilisant l'analyseur de réseaux. Les étapes de mesures sont les suivantes :

- la bande de fréquence Choisie dans laquelle nous allons faire la mesure allant de 1 GHz jusqu'à 2 GHz.

- On monte les liaisons (câbles, connecteurs...) nécessaires pour connecter l'antenne et faire le calibrage.
- On lie l'antenne à la liaison et on voit directement le coefficient de réflexion en fonction de la fréquence.
- Toutefois, on peut choisir le format avec lequel le coefficient de réflexion sera affiché, par exemple : format logarithmique, amplitude, TOS et l'abaque de Smith.

L'analyseur est relié à un ordinateur où on peut enregistrer les résultats.

La comparaison des résultats théoriques et expérimentaux concernant le coefficient de réflexion sont illustrés sur la figure 3.44 et figure 3.45.

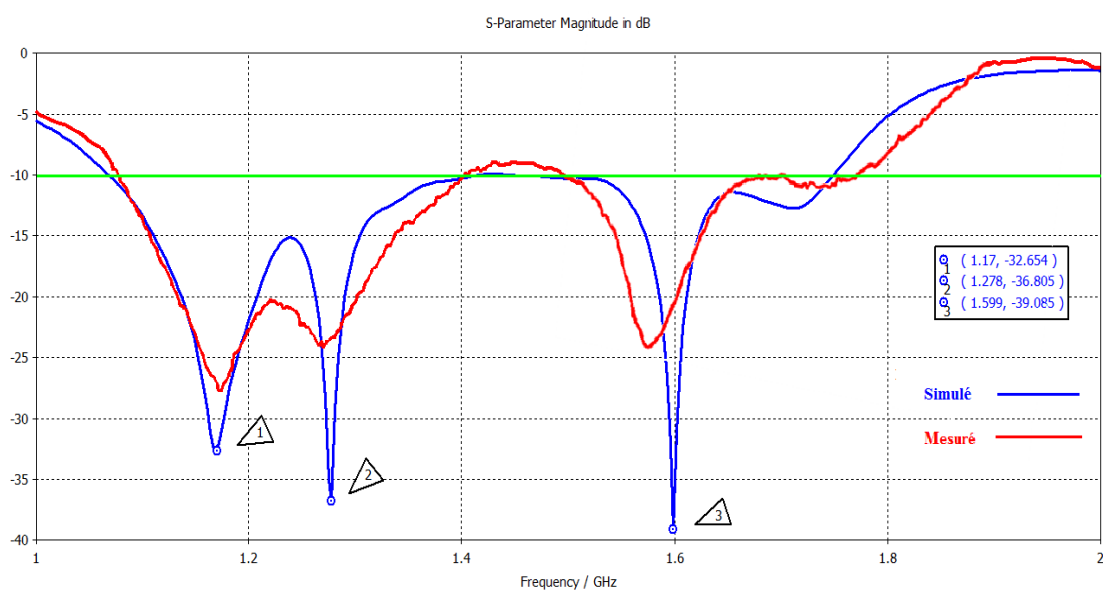


Figure 3.44: Coefficient de réflexion de l'antenne multi bande simulée et mesurée.

En comparant la mesure à la simulation, nous observons un décalage fréquentiel dû à la précision de la réalisation. Les fréquences de travail sont un peu décalées qu'en simulation des deux antennes.

D'après la figure 3.44 on remarque que les deux premières bandes de fréquences mesurées de l'antenne multi bande sont rapprochés l'une de l'autre et cela ne cause aucun changement sur les fréquences de travail par rapport à la simulation car elles restent inclus dans ces bandes.

Pour la troisième bande de fréquence, cette dernière s'est décalée vers des fréquences inférieures à celles de la simulation. Malgré ce décalage la bande de fréquence mesurée couvre toujours les mêmes fréquences qu'en simulation.

Les bandes passantes pour un coefficient de réflexion inférieur à -10 dB sont plus larges en mesure qu'en simulation; cela permet de couvrir toutes les bandes GNSS.

De plus, nous obtenons une bonne adaptation sur toutes les fréquences de travail pour cette antenne.

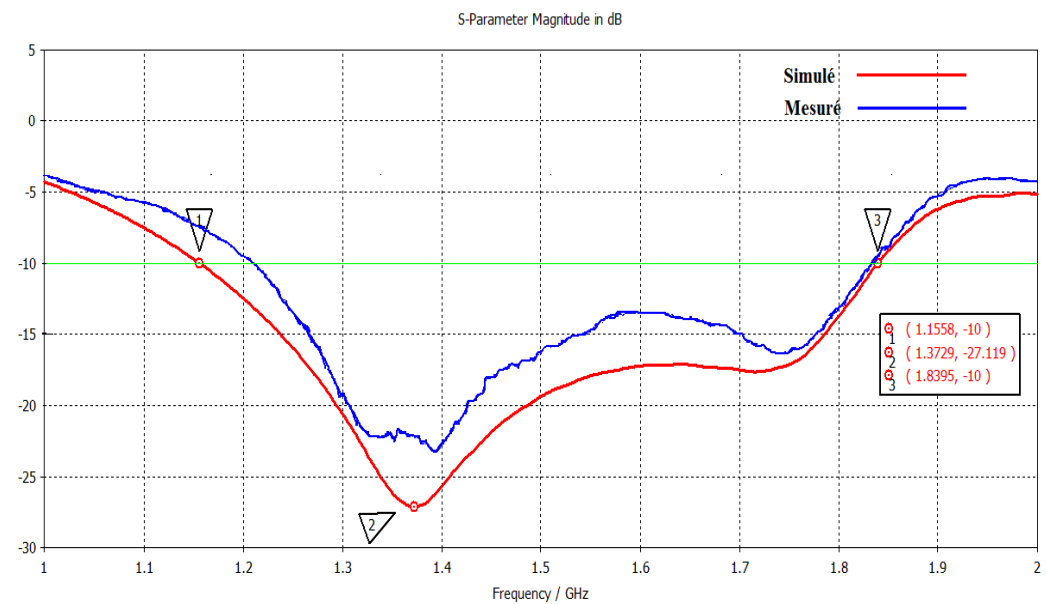


Figure 3.45: Coefficient de réflexion de l'antenne large bande simulée et mesurée.

La figure 3.45 montre la différence entre le module du coefficient de réflexion de la simulation et la mesure de l'antenne large bande.

En simulation le module en dB de S_{11} à son point d'atténuation le plus faible est de l'ordre de -27.11 dB tandis que celui de la réalisation est de l'ordre de -23 dB, l'écart est de l'ordre de -4 dB. La fréquence basse de résonance s'est décalé de 44.20 MHz pour l'antenne large bande.

Même si ce décalage nous a fait perdre la première fréquence de travail ($f=1.176$ GHz), la majorité des fréquences restent inclus dans cette bande.

Le tableau 3.11 suivant résume les résultats obtenus en simulation et en la mesure pour les deux antennes multi bande et large bande

	Fréquences [GHz]	S11 [dB] (Antenne multi bande)	S11 [dB] (Antenne large bande)
Simulation	1.176	-30.248	-11.053
	1.278	-36.805	-18.348
	1.575	-15.588	-17.543
	1.602	-31.088	-17.201
Mesure	1.176	- 27	- 8
	1.278	- 24	- 16
	1.575	-24	- 14
	1.602	-18	- 13.5

Tableau 3.11: Modules du coefficient de réflexion en simulation et en mesure.

Les résultats des mesures sont sensiblement différents à ceux obtenus en simulation. Elles sont principalement attribuables aux conditions d'expérimentation mises en œuvre. En effet, les antennes restent très sensibles aux éléments situés à proximité d'elles, tels que le câble coaxial ou le support d'antenne. La répartition du champ électrique au voisinage de l'antenne est perturbée par la présence du dispositif expérimental et dû aussi aux imprécisions de réalisation de l'antenne.

D'après les résultats obtenus (tableau 3.10) et suivant les performances discutées (diagramme de rayonnement, type de polarisation, gain,..) ainsi que les contraintes fréquentielles (largeur de bande) le tableau 3.12 résume en générale les points forts et faibles des antennes multi bande et large bande.

	Antenne multi bande	Antenne large bande
Points forts	<ul style="list-style-type: none"> - Forte sélectivité. - Post traitement simplifié. 	<ul style="list-style-type: none"> - Conception relativement facile - Moins sensible aux erreurs de Fabrication. - L'antenne peut être également utilisée pour d'autres applications contenues dans la large bande couverte.
Points faibles	<ul style="list-style-type: none"> - Faible maîtrise des rapports de fréquences de fonctionnement. - Plus sensible aux erreurs de Fabrication. 	<ul style="list-style-type: none"> - Adaptation d'impédance souvent délicate dans toute la largeur de la bande. - Post traitement nécessaire pour séparer les bandes. - Largeur de bande limitée. - Faible directivité.

Tableau 3.12: Points forts et faibles des antennes multi-bandes et large-bandes.

3.7.5 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté une antenne multi bande qui permet de recevoir toutes les bandes de fréquences du système GNSS.

La première partie a été consacrée à la conception d'antenne et l'étude de ses performances électriques et électromagnétiques en terme d'adaptation et de rayonnement afin d'obtenir les résultats souhaités.

Après que nous avons obtenu les résultats de simulation qui vérifient le cahier de charges, nous sommes passés à la réalisation de l'antenne.

Finalement, l'antenne a été mesurée, elle permet de valider les résultats obtenus en simulation malgré les difficultés rencontrées dans la mesure.

Les mesures ont été effectuées dans un laboratoire qui ne satisfait pas les conditions de mesure de l'antenne qui nécessite une chambre isolée pour éliminer les influences externes.

Conclusion générale

Les travaux présentés dans ce projet de fin d'études se sont portés sur la conception et l'analyse d'antenne micro ruban multi-bande capable de répondre aux exigences d'antennes pour les applications du système GNSS. La conception de telle antenne ouvre de nouvelles perspectives dans le domaine de radionavigation. Elles permettent de recevoir un maximum de services en un minimum d'encombrement.

Dans le cadre de ce travail, nous avons conçu une antenne plane micro ruban multi bande fonctionnant dans plusieurs bandes de fréquences des trois satellites GPS, GLONASS et GALELIO du système GNSS.

La première partie, qui a fait l'objet du premier chapitre, a permis de décrire la structure du systèmes GNSS, leur principe de fonctionnement ainsi que le domaine d'applications et le choix antennes de ce système. Par la suite l'étude a été menée sur des notions de bases et des généralités sur les antennes.

Dans le second chapitre nous avons vu un aperçu sur les antennes planes à micro-ruban et leurs différentes caractéristiques électriques et électromagnétiques ainsi que les applications et les principales techniques de miniaturisation et d'élargissement de la bande passante dans le but de regrouper toutes les fréquences du système GNSS.

Le troisième chapitre a donc permis, dans un premier temps, la conception de l'antenne multi bande et de comprendre l'influence des différentes paramètres d'antenne sur ses performances. Dans un second temps une antenne large bande a été conçu afin de faire la comparaison entre la première multi bande et celle-ci.

Une étude a pu être menée en prenant en compte la longueur du plan de masse. D'après cette analyse, il a été possible de montrer que la longueur du plan de masse modifiait le comportement d'antenne.

A l'aide de cette méthode de conception et la technique de miniaturisation qui consiste à ajouter des fentes on a pu concevoir une antenne à la fois miniature avec des meilleures performances.

Enfin la réalisation de ces deux antennes nous a permis de faire la comparaison entre la simulation et la mesure en termes d'adaptation et du coefficient de réflexion mais aussi de montrer le petit décalage en fréquences qui est dû aux pertes de mesures et l'imprécision de la réalisation.

A partir de ces travaux de projet de fin d'études, plusieurs perspectives peuvent être avancées sur cette antenne multi bande. Tout d'abord, il paraît intéressant de continuer les recherches sur les antennes micro rubans du système GNSS et de prendre en compte les techniques de miniaturisation. Pour cette dernière, de nombreuses optimisations seront nécessaires. En effet, la priorité des futurs systèmes GNSS est d'avoir un encombrement et des coûts de production réduits ce qui permet à cette antenne d'être commercialiser dans le futur.

Bibliographie

- [1] Félix PEROSAN: 'GALILEO et les GNSS : Interopérabilité Et Futures Applications', Bulletin de la Société géographique de Liège, France, 47, 7-17, 2006, France.
- [2] J. R. De Boer: 'Capteurs MEMS : Optimisation des méthodes de traitement capteurs, de navigation et d'hybridation', thèse, 2009.
- [3] Grégory BEDDELEEM: 'Antennes multistandards combinées à polarisations multiples pour les applications spatiales', thèse de doctorat, 2008, France.
- [4] Sami HEBIB: 'Nouvelle topologie d'antennes multi-bandes pour applications spatiales', thèse de doctorat, 2008, France.
- [5] Mourad HASSAD: 'modélisation d'une antenne patch réalisée sur un substrat à tenseurs de permittivité et de perméabilité diagonaux', thèse de magister, 2009, Algérie.
- [6] 'ZAREB Amina: 'conception d'antenne multi bande pour la téléphonie mobile', thèse d'ingénieur, 2006, USTHB, Algérie
- [7] Constantine A. BALANIS: ' Antenna Theory Analysis and Design', A. John Wiley & Sons, Inc, 2005.
- [8] Odile Picon et coll: 'LES ANTENNES Théorie, conception et application' DUNOD, 2009.
- [9] Grieg, D.D. and H.F. Engelmann, 'A new transmission technique for the Kilomegacycle range', Proc. IRE, Vol. 40, pp. 1644 - 1650.
- [10] Deschamps, G.A.: 'Microstrip microwave antennas', 3rd USAF Simp. Antennas, University of Illinois, Urbana, IL, 1953.
- [11] Gutton, H. and G. Baissinot: 'Hat aerial for ultra-high frequencies', French Patent no. 703113, 1955.
- [12] R.E. Munson, ' Conformable microstrip antennas and microstrip phased arrays', I.E.E.E. Transactions on Antennas and Propagation, January 1974.

- [13] SAHNOUNE NADJET: 'Etude d'une structure microbande rayonnante par la méthode FDTD. Application a une antenne microbande rectangulaire', thèse de magister, 2009, Université Mentouri - Constantine, Algérie
- [14] K. R. Carver and J. W. Mink: 'Microstrip antenna technology'. IEEE Trans. Antennas Propagation, vol. AP- 29, pp. 2-24, Jan.1981.
- [15] Géraldine TROUILLARD: ' contribution à l'étude des phénomènes électromagnétiques liés aux futurs systèmes mobiles de réception hertzienne a bord des véhicules automobiles. Conception, réalisation et tests des antennes correspondantes', thèse de doctorat, UNIVERSITE DE LIMOGES, 2003, France.
- [16] Rabie OULARBIE: 'Antennes multistandards pour communications mobiles', thèse, 2007, École National Polytechnique, France
- [17] P. ciais: 'Antennes multistandards pour communications mobiles',
Thèse de doctorat, Université de Nice-Sophia Antipolis UFR, 2004, France
- [18] Gustavo Adolfo Sotelo Bazán: 'DESIGN OF A CIRCULARLY POLARIZED PATCH ANTENNA FOR SATELLITE MOBILE COMMUNICATIONS IN L-BAND', thèse d'ingénieur, Ecole technique supérieur, 2010, Espagne.
- [19] Ludovic SCHREIDER : 'Antennes à très large bande passante et de très faible épaisseur – Application à l'intégration d'antennes dans des structures de porteurs dans la bande 100MHz-1GHz', these de doctorat, 2006, l'École Nationale Supérieure des Télécommunications, France.

URL

<http://www.antenna-theory.com/>

<http://www.cst.com/>