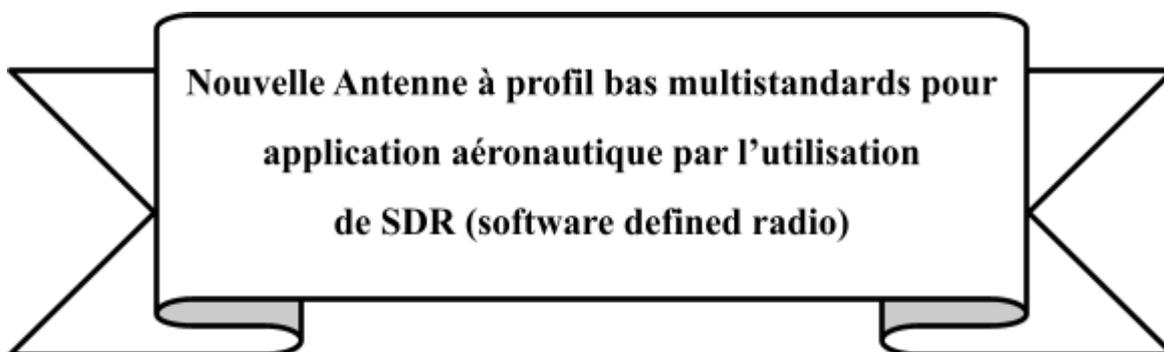


Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université de Blida 1
Institut d'Aéronautique et des études spatiales
Département de la navigation aérienne
Spécialité :
Communication Navigation Surveillance
Air Traffic Management



Thème



Sujet Proposé par :

Centre de Développement des Technologies Avancées (CDTA)

Réalisé par :

Mlle. Kobbi Amani

Encadré par :

Mme. Azine Houria

M. Zoubiri Bachir

Année universitaire : 2023/2024

Résumé

Le développement d'antenne dans le secteur aéronautique joue un rôle fondamental dans l'assurance d'une connectivité fiable et performante entre les systèmes de navigation et de communication à bord des aéronefs et leur environnement. Ces antennes couvrent une vaste gamme de fréquences, allant de 0,19 MHz à 40 GHz, et sont indispensables pour la transmission et la réception des signaux dans différents systèmes avioniques.

Historiquement, chaque système avionique était relié à une ou plusieurs antennes dédiées, placées sur le fuselage de l'avion, via des câbles. Toutefois, la tendance actuelle s'oriente vers des architectures compactes multi-systèmes, utilisant la radio logicielle (SDR), ce qui permet de réduire le poids en diminuant le nombre requis de câbles et d'équipements avioniques. Cette méthode contribue également à diminuer la traînée de l'avion en réduisant le nombre et la dimension des antennes situées en surface. Dans ce cadre, notre recherche propose une nouvelle architecture : une conception d'antenne multi-standards pour les équipements de mesure de distance (DME), le système de prévention des collisions (TCAS) et la diffusion de surveillance dépendante automatique (ADS-B) dans la bande L. La conception retenue est une antenne patch à polarisation linéaire, sélectionnée pour ses performances optimisées en matière de gain et de diagramme de rayonnement, et qui répond ainsi aux normes rigoureuses des systèmes TCAS et ADS-B.

Pour garantir et améliorer cette conception, l'antenne sera soumise à une simulation à l'aide de CST Microwave Studio, un logiciel reconnu dans le domaine de la simulation électromagnétique. Cette étape permettra de perfectionner les caractéristiques de l'antenne, telles que son efficacité, sa directivité et sa capacité à fonctionner de manière optimale aux fréquences spécifiques utilisées par les systèmes avioniques en question.

Ainsi, ce travail de recherche vise à introduire une technologie d'antenne novatrice qui renforce non seulement les performances des systèmes avioniques essentiels, mais qui contribue également à alléger le poids et à réduire la traînée des aéronefs, tout en préservant la fiabilité et la sécurité des communications et de la navigation aérienne.

Mots clés : Antenne patch elliptique large bande, multi-standards, Antennes pour applications aéronautique en bande L, DME (Distance Measuring Equipment), TCAS (Traffic Collision Avoidance System), ADS-B (Automatic Dependent Surveillance-Broadcast), radio logicielle (SDR), CST Microwave Studio

Abstract

The development of antennas in aeronautics is crucial to ensuring reliable and efficient connectivity between onboard navigation and communication systems and their external environment. These antennas cover a wide range of frequencies, from 0.19 MHz to 40 GHz, and are essential for the transmission and reception of signals in various avionic systems.

Traditionally, each avionic system is connected to one or more specific antennas located on the aircraft's fuselage via cables. However, the shift towards compact multi-system architectures through the use of software-defined radio (SDR) allows for weight reduction by decreasing the number of cables and avionic equipment required. This approach also helps to reduce aircraft drag by minimizing the number and size of surface-mounted antennas.

In this context, our thesis aims to propose a new architecture, namely a multi-standard antenna design for DME (Distance Measuring Equipment), TCAS (Traffic Collision Avoidance System), and ADS-B (Automatic Dependent Surveillance-Broadcast) systems in the L-band. The proposed antenna is a linearly polarized patch antenna, chosen for its optimized performance in terms of gain and radiation pattern, thus meeting the stringent requirements of TCAS and ADS-B standards.

To validate and optimize this design, the antenna will be simulated using CST Microwave Studio, a renowned electromagnetic simulation software in the industry. This simulation will refine the antenna's characteristics, such as its efficiency, directivity, and ability to operate effectively within the specific frequencies used by the aforementioned avionic systems.

Therefore, this thesis aims to introduce an innovative antenna technology that not only enhances the performance of essential avionic systems but also contributes to reducing the weight and drag of aircraft, while maintaining the reliability and safety of air communication and navigation.

Keywords:

Wideband elliptical patch antenna, multi-standard, Antennas for aeronautical applications in L-band, DME (Distance Measuring Equipment), TCAS (Traffic Collision Avoidance System), ADS-B (Automatic Dependent Surveillance-Broadcast), software-defined radio (SDR), CST Microwave Studio

ملخص

تعتبر تطوير الهوائيات في الطيران أمرًا حيويًا لضمان الاتصال الموثوق والفعال بين أنظمة الملاحة والاتصالات على متن الطائرات وبيئتها الخارجية. تغطي هذه الهوائيات نطاقًا واسعًا من الترددات، من 0.19 ميغاهرتز إلى 40 جيجاهرتز، وهي أساسية لنقل واستقبال الإشارات في مختلف الأنظمة الجوية.

تقليديًا، يتم توصيل كل نظام جوي بواحد أو أكثر من الهوائيات المحددة الموجودة على جسم الطائرة عبر كابلات. ومع ذلك، فإن التحول نحو الهياكل متعددة الأنظمة المدمجة من خلال استخدام الراديو المُعرَّف برمجيًا (SDR) يسمح بتقليل الوزن عن طريق تقليل عدد الكابلات والمعدات الجوية المطلوبة. تساعد هذه المقاربة أيضًا في تقليل مقاومة الهواء للطائرة من خلال تقليل عدد وحجم الهوائيات المركبة على السطح.

في هذا السياق، تهدف أطروحتنا إلى اقتراح هيكل جديد، وهو تصميم هوائي متعدد المعايير لأنظمة DME (معدات قياس المسافة) و TCAS (نظام تجنب التصادم المروري) و ADS-B (البث التلقائي التابع للمراقبة) في نطاق L. الهوائي المقترح هو هوائي رقعة مستقطب خطيًا، تم اختياره لأدائه المحسن من حيث الكسب ونمط الإشعاع، وبالتالي تلبية المتطلبات الصارمة لمعايير TCAS و ADS-B.

للتحقق من صحة هذا التصميم وتحسينه، سيتم محاكاة الهوائي باستخدام برنامج CST Microwave Studio، وهو برنامج محاكاة كهرومغناطيسية مشهور في الصناعة. ستساعد هذه المحاكاة في تحسين خصائص الهوائي مثل كفاءته وتوجيهه وقدرته على العمل بفعالية ضمن الترددات المحددة المستخدمة بواسطة الأنظمة الجوية المذكورة أعلاه.

لذلك، تهدف هذه الأطروحة إلى تقديم تقنية هوائيات مبتكرة لا تعزز فقط أداء الأنظمة الجوية الأساسية، ولكنها تسهم أيضًا في تقليل وزن ومقاومة الهواء للطائرات، مع الحفاظ على موثوقية وسلامة الاتصالات والملاحة الجوية.

الكلمات المفتاحية: هوائي رقعة بيضاوي عريض النطاق، متعدد المعايير، الهوائيات في الطيران، الأنظمة الجوية، الاتصال، نطاق الترددات، الراديو المُعرَّف برمجيًا (SDR)، الهياكل متعددة الأنظمة المدمجة، تقليل الوزن، مقاومة الهواء للطائرة، DME (معدات قياس المسافة)، TCAS (نظام تجنب التصادم المروري)، ADS-B (البث التلقائي التابع للمراقبة)، نطاق L،

CST Microwave Studio

Remerciement

Tout d'abord, je souhaite exprimer ma reconnaissance envers Dieu le Tout-Puissant et Miséricordieux pour m'avoir accordé la force, le courage, la volonté et la santé nécessaires pour mener à bien ce travail.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude envers Madame Azine Houria, ma promotrice, pour avoir accepté de me guider et pour sa disponibilité tout au long de l'élaboration de ce mémoire. Ses conseils précieux ont été essentiels pour la réussite de ce travail, et j'ai grandement profité de son expérience et de sa sagesse.

Je tiens également à remercier Monsieur Zoubiri Bachir, mon encadreur, pour la confiance qu'il m'a témoignée en proposant ce sujet.

Mes remerciements les plus sincères vont également aux membres du jury pour l'attention qu'ils ont portée à mon travail en l'examinant minutieusement et pour leurs suggestions qui ont enrichi mon mémoire.

Enfin, je souhaite exprimer ma profonde gratitude à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire. Votre soutien et votre collaboration ont joué un rôle crucial pour moi, et je vous en suis extrêmement reconnaissante.

الإهداء

تمَّ إنجازُ هذه المذكرة في نفس السَّنة التي بدأ فيها طُوفان الأقصى؛
فما ضمَّت المعلومات العلمية فقط و لو بدت كذلك، إنَّما ضمَّت في كلِّ حَرْفٍ مِنْهَا فِكْرَةً و شُعوراً و نَهضةً !
لذلك فالإهداء الأوَّل إلى أهلنا في فلسطين، وكذلك في السودان و في كلِّ بلاد المسلمين.
نسأل الله أن يُعوضَ أهلنا خيراً، و أن يغفِرَ لنا التَّقصير، و أن يستخدمنا و أن لا يستبدلنا ~

إلى والديَّ الكريمين؛
اللذان لو عِشْتُ ضِعْفُ عُمرِي ما استطعت أن أجزيهما أجر ما عملا، جزاهما الله عني كلَّ خيرٍ، و بلَّغني كبرهما و رزقني برَّهما.

إلى عائلتي المحبَّة المُساندة؛
بدايةً من إخوتي، إلى إمتداد العائلة الكبيرة.

إلى صديقاتي؛
اللواتي لم يبخلن لا بوقتٍ و لا بجهدٍ و لا حتَّى يشعورن في سبيل مُساعدتي لإتمام هذه المذكرة.
و إلى كلِّ من كان له عونٌ في إنجاز هذه المذكرة، من قريبٍ أو من بعيدٍ و لو كان دُعاءً بظهر الغيب.

أُماني قُبِّي

Table des matières

Table des matières.....	6
INTRODUCTION GENERALE.....	11
1.1 Éléments de la problématique.....	11
1.2 Objectifs de la recherche.....	11
1.3 Plan du mémoire.....	12
CHAPITRE 1 GÉNÉRALITÉS SUR LES ANTENNES.....	13
1.1 Introduction.....	13
1.2 Antennes : Définition, historique et applications.....	13
1.2.1 Définition.....	13
1.2.2 Bref historique.....	13
1.2.3 Applications des antennes.....	14
1.3 Caractéristiques principales d'une antenne :.....	16
1.3.1 Paramètres radioélectrique.....	16
a. Impédance d'entrée.....	16
b. Coefficient de réflexion Γ (ou bien S11).....	17
c. Bande passante.....	17
1.3.2 Paramètres de rayonnement.....	17
a. Diagramme de rayonnement.....	18
c. La directivité et le gain :.....	19
d. Efficacité du rayonnement.....	20
e. La polarisation.....	20
1.4 Les antennes imprimées :.....	20
1.4.1 Différentes formes d'une antenne imprimée.....	21
1.4.2 Techniques de alimentation.....	21
1.4.3 Avantages et inconvénients des antennes imprimées.....	23
1.4.4 Technique d'élargissement de la bande passante d'une antenne patch.....	25
Conclusion.....	26
CHAPITRE 2 :NOTIONS SUR LES SYSTÈMES AÉRONAUTIQUES.....	27
2.1 Introduction.....	27
2.2 Définitions des système aéronautique en bande L.....	27
➤ DME (Distance Measuring Equipment).....	28
➤ TCAS (Traffic Collision Avoidance System).....	28
➤ ADS-B (Automatic Dependent Surveillance-Broadcast).....	29
2.3 Importance et Applications.....	30
2.4 Emplacement d'antennes à applications aéronautique :.....	30
2.5 type antenne sur un avion.....	32
1. Antennes Blade (ou antennes ailerons) :.....	32
2. Antennes Patch :.....	33
3. Antennes Whip (ou antennes fouet) :.....	34
4. Antennes de Radôme :.....	36

5. Antennes Satcom (Communications Satellite) :.....	37
7. Antennes de navigation :.....	39
Conclusion.....	42
.....	42
CHAPITRE 3: CONCEPTION ET SIMULATION DE L'ANTENNE PATCH MULTI STANDARDS POUR LA BANDE L.....	43
3.1 Introduction.....	43
3.2 Spécifications techniques.....	44
3.3 Configuration de l'antenne et conception.....	44
3.3.1 Les étapes de conception de patch.....	44
• Une étude paramétrique sur une antenne patch circulaire alimenté par une ligne de transmission.....	46
3.4 Etude paramétrique.....	50
• Effet de rayon du patch selon l'axe x R1.....	51
• Effet de rayon du patch selon l'axe y R2.....	51
• Effet de la largeur de plan de masse W_g	52
3.5 Résultats de simulation.....	52
3.6 Implémentation de l'Antenne à travers la Technologie SDR (software defined radio) : Révolutionnant l'Avionique Moderne.....	57
3.6.1 Définition et Importance des SDR (Software Defined Radios) :.....	57
3.6.2 Motivation en Radiofréquence pour les systèmes de communication, navigation et surveillance (CNS) et l'avionique Moderne :.....	58
Conclusion.....	59
CONCLUSION GÉNÉRALE.....	60
Références.....	62

Liste de Figures

La figure 1.1: Systèmes de repères pour l'étude de l'antenne.....	12
La figure 1.2 : Heinrich Rudolf Hertz.....	13
La figure 1.3 : Bref historique sur les antennes.....	13
La figure 1.4 : Un schéma synoptique des diverses applications des antennes.....	14
La Figure 1.5: Schéma pour les caractéristiques des antennes.....	15
Figure 1.6 : Antenne en mode émetteur [5].....	16
Figure 1.7 : présentation de la bande passante.....	16
Figure 1.8: Systèmes de repères pour l'étude de l'antenne.....	17
Figure 1.9 : Exemples de polarisation.....	19
Figure 1.10: Un exemple d'antenne patch.....	20
Figure 1.11. Différentes formes de l'élément rayonnant.....	20
Figure 1.13: Alimentation par ligne microstrip.....	21
Figure 1.14 Alimentation par couplage de proximité.....	21
La Figure 1.15: Alimentation par couplage par ouverture.....	22
La Figure 1.16 Alimentation coaxiale.....	22
Figure 1.17 : Schéma pour les techniques d'élargissement de la bande passante d'une antenne patch.....	24
Figure 2.2 : Placement des antennes - Boeing 73.....	29
Figure 2.3 Placement des antennes - Bombardier Global.....	30
Figure 2.4 : une antenne lame DME.....	32
Figure 2.5: Un exemple d'antenne patch.....	32
Figure 2.6 : le placement des antennes whip.....	33
Figure 2.6 : le placement d'un radôme.....	33
Figure 2.7 : le placement d'un SATCOM.....	34
Figure 3.2 : Une antenne patch circulaire alimenté par une ligne de transmission.....	38
Figure 3.4 :Le gain en fonction de la fréquence de l'antenne.....	39
Figure 3.5 : La deuxième étape de l'antenne patch.....	39
Figure 3.6 :Coefficient de réflexion en fonction de la fréquence de l'antenne.....	40
Figure 3.7 : Le gain en fonction de la fréquence de l'antenne.....	40
Figure 3.8 : La troisième étape de l'antenne patch.....	40
Figure 3.9 : Coefficient de réflexion en fonction de la fréquence de l'antenne.....	41
Figure 3.10 : Le gain en fonction de la fréquence de l'antenne.....	41
Figure 3.11 : La quatrième étape de l'antenne patch.....	42
Figure 3.12 : Coefficient de réflexion en fonction de la fréquence de l'antenne.....	42
Figure 3.13 : Le gain en fonction de la fréquence de l'antenne.....	42
Figure 3.13 : L'effet de rayon du patch selon l'axe x R1 sur le coefficient de réflexion en fonction de la fréquence de l'antenne.....	43
Figure 3.14 : Effet de rayon du patch selon l'axe y R2sur le coefficient de réflexion en fonction de la fréquence de l'antenne.....	43
Figure 3.15 : Effet de la largeur de plan de masse W_g sur le coefficient de réflexion en fonction de la fréquence de l'antenne.....	44
(a) (b).....	45
Figure 3.16 : La configuration finale de l'antenne proposée (a et b : devant et derrière)....	45

(a) (b).....	45
Figure 3.17 : Les paramètres de l'antenne finale proposée (a et b : devant et derrière)....	45
Figure 3.18 : Coefficient de réflexion en fonction de la fréquence de l'antenne.....	46
Figure 3.19 : Le gain en fonction de la fréquence de l'antenne.....	46
Figure 3.20 : Le rapport d'ondes stationnaires de tension (ROS) en fonction de la fréquence.....	47
Figure 3.21 : Diagramme de rayonnement pour $f=0.98$	47
Figure 3.22 : Diagramme de rayonnement pour $f=1.1$	48
Figure 3.23 : Diagramme de rayonnement pour $f=1.2$	48
Figure 3.24 : Présentation simplifiée d'une configuration SDR.....	49
Figure 3.25 : Panneau avant USRP.....	50

Liste des Tableau

Tableau 1.1 : Applications des antennes.....	15
Tableau 1.2 : Les types d'antennes.....	18
Tableau 1.3 : Avantages et inconvénients des antennes imprimées.....	23
Tableau 2.1 : Quelques types d'antennes couramment utilisés sur un avion.....	34
(liste non exhaustive).....	34
Tableau 3.1 : spécifications techniques à atteindre.....	36
Tableau 3.2 : Les paramètres de l'antenne initiale.....	38
Tableau 3.2 : Les paramètres de l'antenne simulée.....	45

Liste des abréviations

(A/A) air-air

ADS-B Automatic Dependent Surveillance-Broadcast

ADF Automatic Direction Finder

(A/G) les systèmes de communication air-sol

ATC Air Traffic Control

DME Distance Measuring Equipment

ELT Emergency Locator Transmitter

GPS Global Positioning System

HF Haute Fréquence

IEEE Institute of Electrical and Electronics Engineers

ILS Instrument Landing System

IoT Internet des objets

MIMO Entrées multiples, sorties multiples

MLS Microwave Landing System

OACI l'Organisation de l'aviation civile internationale

PCB Printed Circuit Board

TCAS Traffic Collision Avoidance System

VHF Very High Frequency

VOR VHF Omnidirectional Range

INTRODUCTION GENERALE

Les antennes montées sur les avions pour les systèmes de radionavigation et de communication peuvent poser des problèmes liés à l'aérodynamisme et à la consommation de carburant en raison de leur taille. Pour résoudre ce défi et réduire le poids global des avions, il est essentiel de concevoir des antennes plus compactes intégrées au fuselage, en utilisant des technologies modernes telles que les radios logicielles (SDR).

Les SDR (software defined radio), qui sont des radios numériques programmables, offrent une grande flexibilité sur différentes fréquences, remplacent avantageusement les radios analogiques et permettent de réduire le nombre d'antennes et de câbles, contribuant ainsi à une meilleure efficacité et à une réduction de la traînée de l'avion. Cette approche est particulièrement pertinente pour les systèmes avioniques opérant dans la bande L, comme le DME, le TCAS et l'ADS-B, où des antennes capables de couvrir ces fréquences sont essentielles.

Plan du mémoire

Le présent mémoire est divisé en trois chapitres.

Dans le premier chapitre on présentera des généralités sur les antennes, et une illustration sur les antennes patch précisément .

Dans le deuxième chapitre on présentera les systèmes aéronautiques DME, TCAS, ADS-B ainsi que les bandes de fréquence associées ainsi que la configuration typique des antennes dans un avion commercial.

Le troisième chapitre sera consacré à la conception de l'antenne multi-standard (DME,TCAS,ADS-B) à profil bas, et les résultats de l'antenne prototype sur le CST.

Enfin une conclusion suivie des perspectives envisagées .

CHAPITRE 1 GÉNÉRALITÉS SUR LES ANTENNES

1.1 Introduction

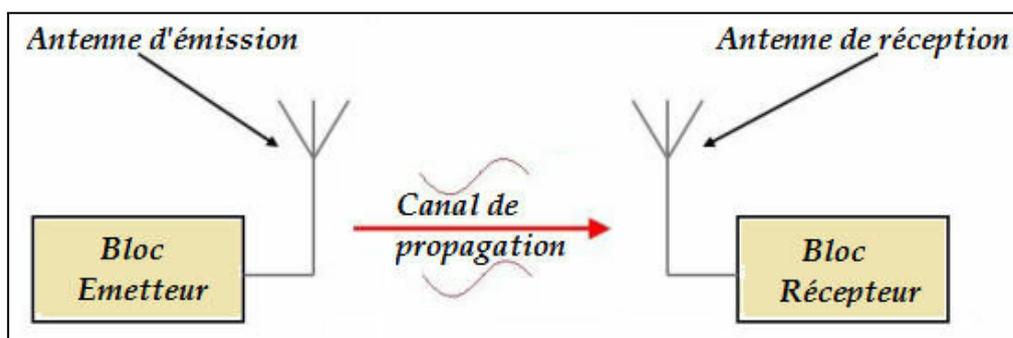
Ce chapitre constitue une introduction aux antennes, qui sont des éléments essentiels des systèmes de communication sans fil. Il débute par une définition des antennes et un survol de leur évolution historique. Ensuite, il explore les diverses applications des antennes dans différents domaines. Les principales caractéristiques des antennes sont ensuite détaillées, incluant les aspects radioélectriques tels que l'impédance et la bande passante, ainsi que les caractéristiques liées au rayonnement comme le diagramme, la directivité et la polarisation. Une attention particulière est portée aux antennes imprimées, notamment les antennes patch. Ce type d'antenne est étudié en détail, couvrant les techniques d'alimentation et les méthodes pour élargir leur bande passante. Cette section pose les bases nécessaires pour comprendre les antennes utilisées dans les systèmes aéronautiques, sujet central du mémoire.

1.2 Antennes : Définition, historique et applications

1.2.1 Définition

La terminologie formelle de l'IEEE relative aux antennes (norme IEEE Std 145-1983) [1] définit l'antenne comme un dispositif passif, linéaire et réciproque. Elle joue un double rôle :

- En tant qu'une **antenne d'émission**, elle assure le transfert d'énergie d'un émetteur vers l'espace environnant où l'énergie peut se propager.
- En tant qu'une **antenne de réception**, elle capte l'énergie d'une onde se propageant dans l'espace et la transmet à un dispositif récepteur, comme illustré sur la figure 1.1



La figure 1.1: Systèmes de repères pour l'étude de l'antenne.

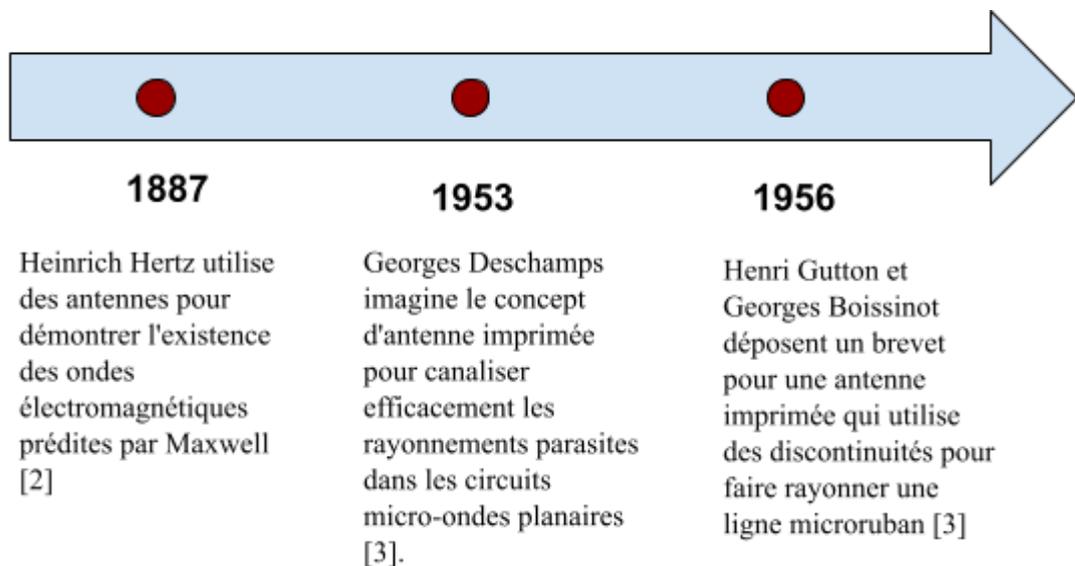
1.2.2 Bref historique

En 1887, Heinrich Rudolf Hertz a vérifié la théorie de Maxwell en démontrant visuellement les lignes de champ électrique émanant d'une antenne dipolaire. Il a utilisé deux bobines d'induction et un condensateur pour créer un circuit résonant, produisant une étincelle. Cette expérience a marqué le

début de l'électromagnétisme et a conduit à des avancées significatives dans les communications radio et la technologie des antennes au 20^{ème} siècle.



La figure 1.2 : Heinrich Rudolf Hertz.

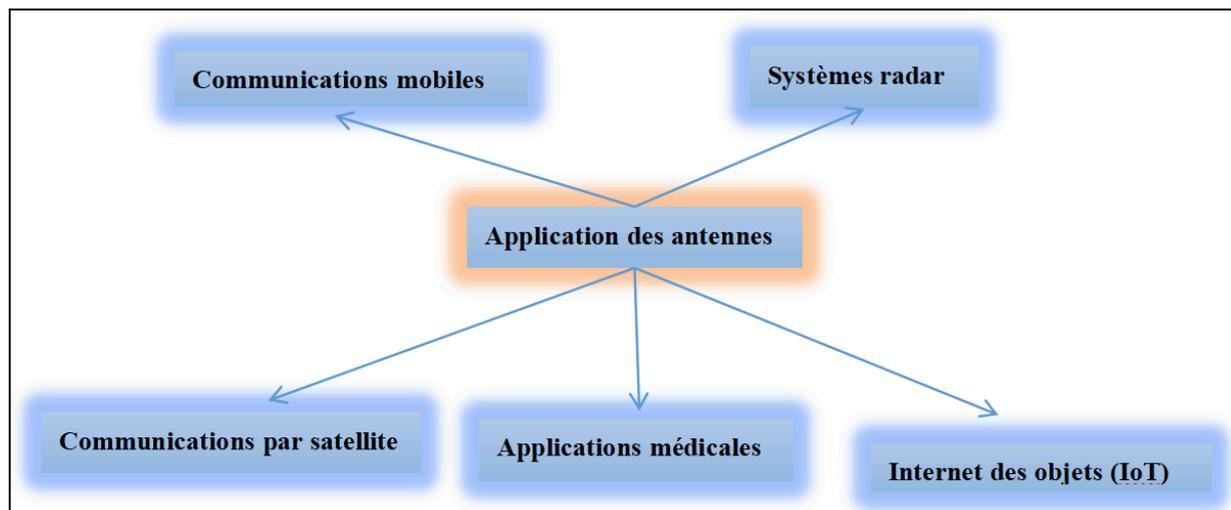


La figure 1.3 : Bref historique sur les antennes.

1.2.3 Applications des antennes

Les antennes ont un large éventail d'applications, en particulier dans la communication sans fil ; elles servent à la transmission et à la réception de signaux. Elles facilitent la transmission des signaux radio et télévisuels, aident les systèmes GPS et de navigation, et font partie intégrante de la communication par satellite. En plus de ces applications, elles sont également utilisées dans la recherche scientifique, la télédétection, les applications biomédicales et l'Internet des objets (IoT) [4].

Le schéma synoptique ci-dessous , nous donne une liste non exhaustive des différentes applications des antennes .



La figure 1.4 : Un schéma synoptique des diverses applications des antennes.
(liste non exhaustive)

L'omniprésence des antennes dans notre vie quotidienne est le reflet de leur importance dans de nombreuses applications modernes. Le tableau ci-dessous met en lumière la diversité des utilisations des antennes.

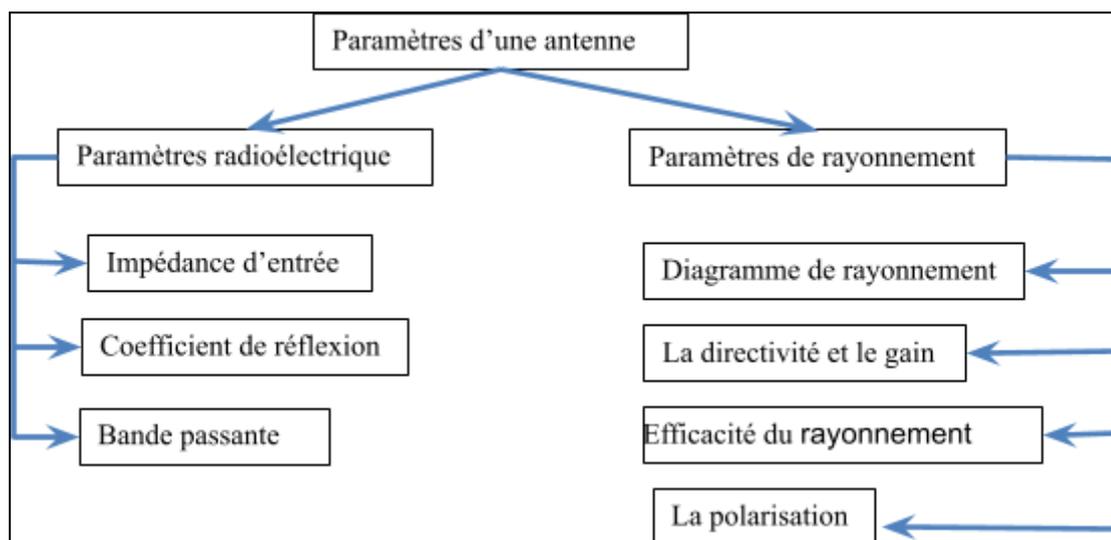
	Principales applications
Communications mobiles	<ul style="list-style-type: none"> • Amélioration de la qualité du signal • Augmentation de la portée et de la couverture • Entrées multiples, sorties multiples (MIMO) • Services de localisation
Systèmes radar	<ul style="list-style-type: none"> • Amélioration de la détection et du suivi • Formation de faisceau adaptative • Suivi multi-cibles • Imagerie radar
Internet des objets (IoT)	<ul style="list-style-type: none"> • Amélioration de la connectivité • Augmentation de la capacité du réseau • Efficacité énergétique • Localisation et suivi • Applications pour la maison intelligente
Applications médicales	<ul style="list-style-type: none"> • Surveillance médicale sans fil • Télémédecine • Assistance chirurgicale à distance

	<ul style="list-style-type: none"> • Services médicaux d'urgence • Rééducation et physiothérapie
Communications par satellite	<ul style="list-style-type: none"> • Amélioration des performances des liaisons par satellite • Communication haut débit par satellite • Observation de la Terre et télédétection • Systèmes de navigation et de positionnement • Diffusion par satellite

Tableau 1.1 : Applications des antennes

1.3 Caractéristiques principales d'une antenne :

Il est essentiel de définir différents paramètres pour évaluer les performances d'une antenne, la plupart de ces paramètres sont définis selon les normes de l'IEEE pour assurer une compréhension commune des termes liés aux antennes. Le schéma synoptique ci-dessous nous donne les deux caractéristiques principales d'une antenne.



La Figure 1.5: Schéma pour les caractéristiques des antennes

1.3.1 Paramètres radioélectrique

a. Impédance d'entrée

L'impédance d'entrée (désignée par Z_e) est la représentation de l'impédance à travers laquelle une antenne se présente à ses bornes. Elle est calculée comme le rapport entre la tension V_e et le courant I_e à l'entrée (voir figure 1.6).

$$Z_e = R + jX \quad (1.1)$$

Où :

R= Résistance de l'antenne

X= Réactance de l'antenne

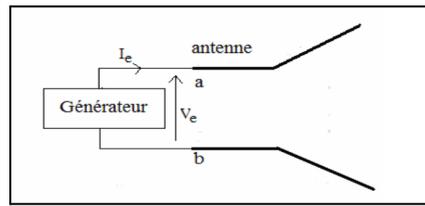


Figure 1.6 : Antenne en mode émetteur [5]

b. Coefficient de réflexion Γ (ou bien S_{11})

Il permet d'évaluer l'adaptation d'impédance à l'entrée et les phénomènes de réflexion, qui ont un impact direct sur les performances du système. Lorsque l'impédance d'entrée (Z_e) d'une antenne est équivalente à l'impédance de la ligne d'alimentation (Z_c), on la considère comme étant parfaitement adaptée. Dans le cas contraire, l'existence d'un coefficient de réflexion Γ (ou S_{11}) est observée [6]

$$\Gamma = \frac{Z_e - Z_c}{Z_e + Z_c} = \frac{\text{Onde réfléchie}}{\text{Onde incidente}} \quad (1.2)$$

c. Bande passante

La bande passante d'une antenne est la plage de fréquences sur laquelle elle peut fonctionner efficacement, elle est déterminée par des facteurs tels que l'impédance de l'antenne, sa conception et son environnement.

Pour optimiser la bande passante, on peut agir directement sur l'antenne afin de modifier son impédance, ou ajouter un élément d'adaptation, on va voir dans le chapitre 3, une analyse d'impact de différents paramètres sur la largeur de bande passante de notre antenne.

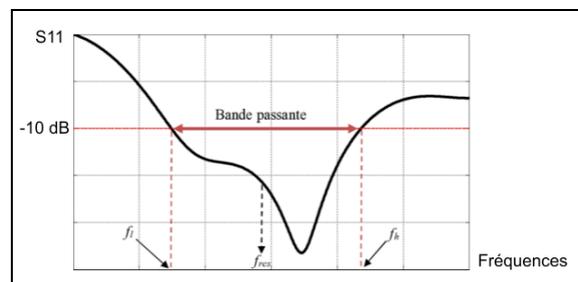


Figure 1.7 : présentation de la bande passante

1.3.2 Paramètres de rayonnement

Le schéma synoptique ci-dessous nous donne les différents paramètres importants de rayonnement d'une antenne .

a. Diagramme de rayonnement

Un diagramme de rayonnement d'antenne est une fonction mathématique qui permet d'une représentation graphique pour les propriétés de rayonnement d'une antenne en fonction des coordonnées directionnelles. Il permet de visualiser la densité du flux de puissance, l'intensité de rayonnement, le champ, la directivité et la polarisation. Ces informations sont essentielles pour comprendre la répartition spatiale de l'énergie rayonnée.

La caractéristique de rayonnement la plus importante est la répartition spatiale en deux ou trois dimensions de l'énergie rayonnée en fonction de la position de l'observateur le long d'un chemin ou d'une surface de rayon constant. Cette distribution est représentée dans deux plans :

- le plan E, contenant le vecteur du champ électrique et la direction de rayonnement maximale.
- Le plan H, contenant le vecteur du champ magnétique et la direction de rayonnement la plus élevée [7].

La figure 1.8 présente un système de coordonnées approprié.

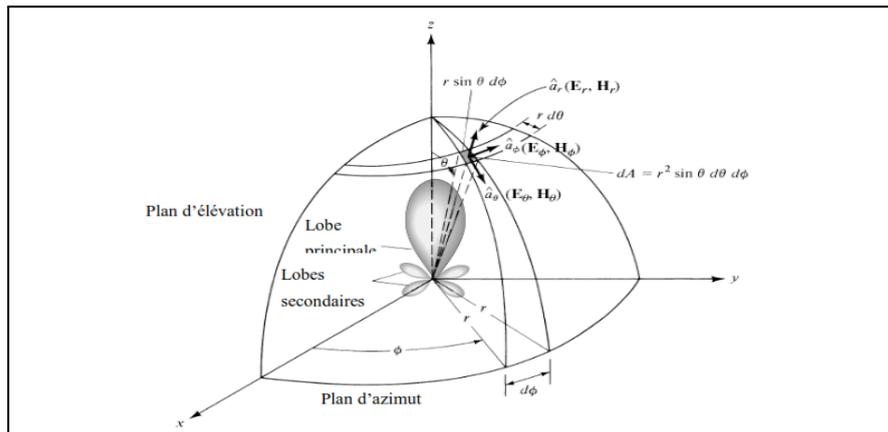


Figure 1.8: Systèmes de repères pour l'étude de l'antenne.

Le tableau ci dessous nous montre les trois types d'antennes les plus importants:

Antenne	Propriété
Antenne isotrope :	Modèle théorique idéal d'antenne, non réalisable en pratique, qui rayonne de manière égale dans toutes les directions de l'espace, avec un diagramme de rayonnement sphérique
Antenne directive:	Diagramme de rayonnement avec des lobes, c'est-à-dire des directions privilégiées où le rayonnement est plus intense. Il s'agit du lobe principal, qui représente la direction de rayonnement maximal, et des lobes secondaires, qui sont généralement indésirables

Antenne omnidirectionnelle :	<p>C'est un cas particulier d'antenne directive, non directive dans un plan, mais directive dans les plans orthogonaux, et sont diagramme de rayonnement en forme de tore.</p> <p>La hauteur de l'antenne par rapport au sol, ainsi que la conductivité du sol, influencent fortement le diagramme de rayonnement de l'antenne [8].</p>
-------------------------------------	---

Tableau 1.2 : Les types d'antennes

c. La directivité et le gain :

Selon l'IEEE, la directivité d'une antenne est définie comme le rapport entre l'intensité rayonnée dans une direction donnée et l'intensité moyenne.

Cette quantité est exprimée en décibels (dB) et est représentée par l'équation (1.3) ci-dessous et constitue un paramètre important pour évaluer la capacité d'une antenne à concentrer l'énergie rayonnée dans une direction spécifique.

$$D = \frac{U}{U_0} = \frac{4\pi U}{P_{rad}} \quad (1.3)$$

Où

U : est l'intensité de rayonnement du radiateur pratique dans une direction donnée.

U_0 : est l'intensité de rayonnement d'une antenne isotrope avec la même puissance d'entrée et la même direction.

Le gain d'une antenne est une mesure de l'efficacité avec laquelle elle concentre l'énergie dans une direction particulière.

Il est exprimé en décibels isotropes (dBi) et compare la puissance de l'antenne à celle d'une antenne de référence isotrope (rayonnant de manière égale dans toutes les directions).

- Facteurs influençant le gain
 - **La directivité de l'antenne** : plus elle est élevée, plus le gain sera important.
 - **L'efficacité de conversion de l'antenne** : plus elle est élevée, plus le gain sera important.
 - **La fréquence de fonctionnement** : le gain varie généralement avec la fréquence.
 - **La taille et la conception de l'antenne** : des antennes plus grandes permettent souvent d'obtenir de meilleurs gains.

d. Efficacité du rayonnement

L'efficacité de rayonnement d'une antenne est une mesure de la capacité de l'antenne à convertir la puissance électrique en puissance rayonnée. Elle est définie comme le rapport entre la puissance rayonnée par l'antenne et la puissance totale fournie à l'antenne. [6]

Mathématiquement, l'efficacité de rayonnement est exprimée par la formule (1.4) :

$$\eta_r = \frac{P_r}{P_t} \quad (1.4)$$

Où :

η_r est l'efficacité de rayonnement

P_r est la puissance rayonnée par l'antenne

P_t est la puissance totale fournie à l'antenne

e. La polarisation

La polarisation d'une antenne fait référence à l'orientation du champ électrique de l'onde qu'elle émet ou reçoit de manière privilégiée.

Il existe trois types de polarisation : linéaire (horizontale ou verticale), circulaire (droite ou gauche) et elliptique.

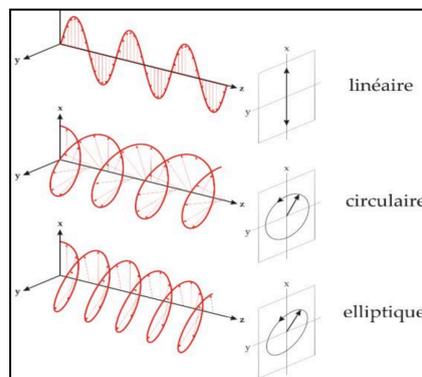


Figure 1.9 : Exemples de polarisation

1.4 Les antennes imprimées :

L'antenne imprimée, également appelée antenne patch, est un type d'antenne récente dont le développement et l'utilisation se généralisent de plus en plus. Elle est constituée d'un matériau diélectrique caractérisé par une permittivité (ϵ_r) et une épaisseur (h), avec un plan de masse métallique d'un côté. De l'autre côté, une gravure métallique permet aux courants de surface de supporter le rayonnement électromagnétique [9]. Les courants sont alimentés de l'émetteur vers l'antenne par une ligne microstrip. Les antennes patch trouvent de nombreuses applications dans divers domaines tels que

les systèmes de communication sans fil, la communication par satellite, les systèmes radar et la télédétection. Un exemple d'antenne patch est illustré par la figure 1.10.

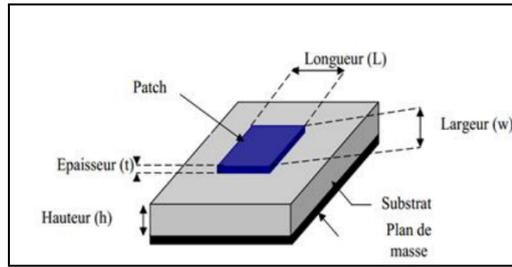


Figure 1.10: Un exemple d'antenne patch

1.4.1 Différentes formes d'une antenne imprimée

Les antennes imprimées peuvent se présenter avec différentes formes, comme l'illustre la Figure 1.11 .

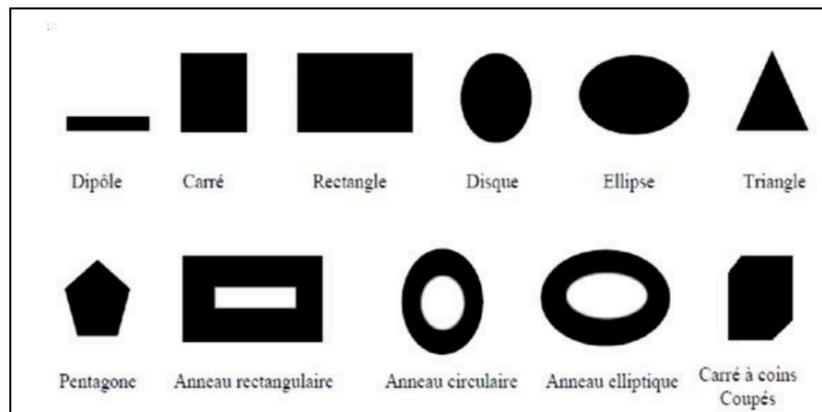
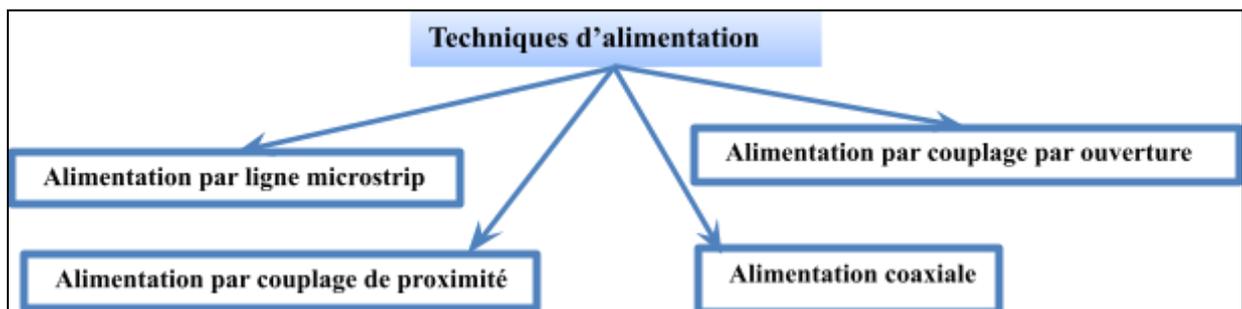


Figure 1.11. Différentes formes de l'élément rayonnant

1.4.2 Techniques de alimentation

Les antennes patch peuvent être alimentées à l'aide de différentes techniques en fonction de l'application spécifique et des exigences de conception. Voici quelques techniques d'alimentation courantes pour les antennes patch [7] :



La Figure 1.12: Schéma pour techniques de alimentation

a. Alimentation par ligne microstrip

C'est la technique d'alimentation la plus courante pour les antennes patch [10]. Une ligne microstrip est utilisée pour alimenter l'antenne patch, qui est située à une distance spécifique de celle-ci. Le point d'alimentation est généralement situé au centre de l'antenne patch, et la ligne d'alimentation est connectée au patch par un petit espace. L'alimentation par ligne microstrip est illustrée à la figure 1.13 .

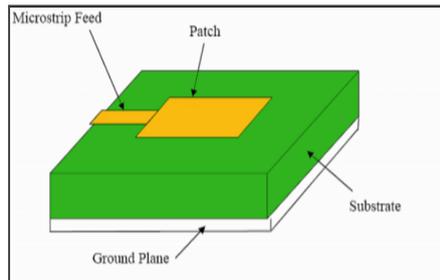


Figure 1.13: Alimentation par ligne microstrip

A. Alimentation par couplage de proximité

Dans cette technique, l'antenne patch est alimentée en plaçant l'élément d'alimentation près du bord de l'antenne patch [7]. L'élément d'alimentation peut être une bande métallique, une boucle ou d'autres formes, et il est placé parallèlement à l'antenne patch. La distance entre l'antenne patch et l'élément d'alimentation détermine le couplage entre eux. L'alimentation par couplage de proximité est illustrée à la figure 1.14 .

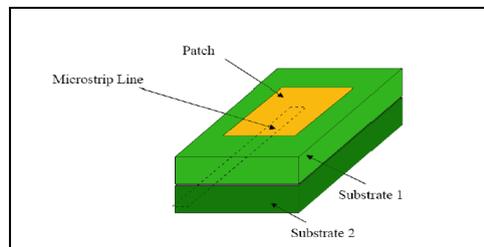
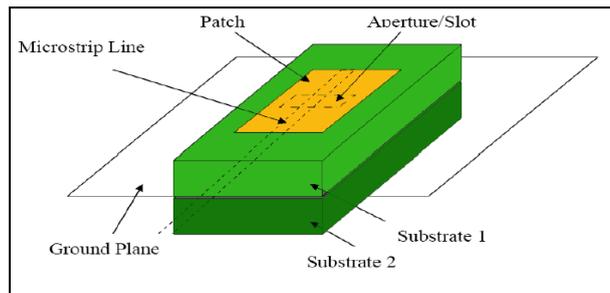


Figure 1.14 Alimentation par couplage de proximité

B. Alimentation par couplage par ouverture

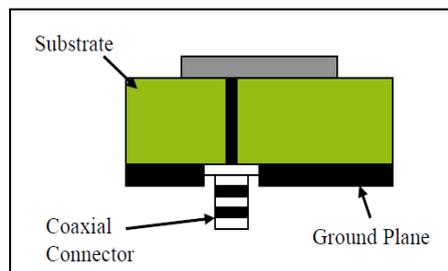
Dans cette technique, une fente est réalisée dans le plan de masse sous l'antenne patch [10]. L'alimentation est couplée au patch par cette fente. La fente agit comme un guide d'ondes qui achemine le signal vers l'antenne patch. Cette technique offre un degré élevé d'isolation entre l'alimentation et le patch, ce qui la rend adaptée aux applications nécessitant un bon isolement. L'alimentation par couplage par ouverture est illustrée à la figure 1.13 (non fournie).



La Figure 1.15: Alimentation par couplage par ouverture

C. Alimentation coaxiale

Une technique d'alimentation possible pour une antenne patch consiste à utiliser un câble coaxial [10]. Le conducteur central du câble est alors connecté au patch de l'antenne, tandis que le plan de masse est connecté à la gaine extérieure. Cette méthode est reconnue pour sa simplicité de mise en œuvre et sa capacité à fournir une bonne adaptation d'impédance. L'alimentation coaxiale est illustrée à la figure 1.16.



La Figure 1.16 Alimentation coaxiale

1.4.3 Avantages et inconvénients des antennes imprimées

Les antennes imprimées, également appelées antennes microstrip, présentent plusieurs avantages et inconvénients par rapport aux antennes filaires traditionnelles. Découvrons-les [11] :

Avantage	Inconvénients
<p>+ Faible encombrement : Les antennes microstrip ont un faible profil et sont plates, ce qui les rend faciles à intégrer dans divers types d'appareils et de systèmes sans ajouter de poids ou de volume significatif.</p>	<p>- Faible rendement : Les antennes microstrip ont un rendement inférieur à celui d'autres types d'antennes, telles que les antennes à cornet et les antennes paraboliques à réflecteur, en raison des pertes de puissance importantes dans le substrat et le plan de masse.</p>

<p>+ Légèreté : Grâce à leur faible profil et à l'utilisation de matériaux légers, les antennes microstrip sont idéales pour les applications qui nécessitent une conception légère.</p>	<p>- Bande passante étroite : Cela limite leur utilisation dans les applications qui nécessitent une large bande passante.</p>
<p>+ Faible coût : Les antennes microstrip peuvent être fabriquées à partir de matériaux et de techniques de fabrication peu coûteux, ce qui en fait une option rentable pour de nombreuses applications.</p>	<p>- Sensibilité à l'environnement : Les performances des antennes microstrip peuvent être affectées par les variations de l'environnement, telles que la température et l'humidité.</p>
<p>+ Fonctionnement à large bande : Les antennes microstrip peuvent fonctionner sur une large plage de fréquences, ce qui les rend adaptées aux applications nécessitant une large bande passante.</p>	<p>- Génération d'ondes de surface : Les antennes microstrip peuvent générer des ondes de surface, ce qui peut entraîner un rayonnement indésirable et une réduction du rendement de l'antenne.</p>
<p>+ Directivité : Les antennes microstrip peuvent être conçues pour avoir un diagramme de rayonnement directionnel, ce qui les rend idéales pour les applications de communication point à point.</p>	<p>- Limitation de la puissance admissible : Les antennes microstrip ont une capacité de traitement de la puissance limitée, ce qui peut être un problème dans les applications nécessitant une transmission à haute puissance.</p>
<p>+ Compatibilité avec les circuits planaires : Les antennes microstrip peuvent être intégrées à d'autres circuits planaires, tels que des filtres et des amplificateurs, pour former des systèmes hautement intégrés.</p>	<p>- Conception complexe : La conception des antennes microstrip peut être complexe et nécessiter des outils de conception assistée par ordinateur (CAO) et des techniques de simulation avancés.</p>
	<p>- Faible efficacité de rayonnement : Les antennes microstrip ont un faible rendement de rayonnement dans la direction perpendiculaire au substrat, ce qui peut conduire à un gain faible dans cette direction.</p>

Tableau 1.3 : Avantages et inconvénients des antennes imprimées

1.4.4 Technique d'élargissement de la bande passante d'une antenne patch

Bien que les antennes patch présentent de nombreux avantages, elles sont également sujettes à des limitations telles qu'une bande passante étroite. Pour accroître de manière significative la bande passante d'un élément patch, il est nécessaire d'utiliser des techniques spécifiques.

Le schéma ci-dessous nous montre les principales techniques pour élargir la bande passante d'une antenne patch.

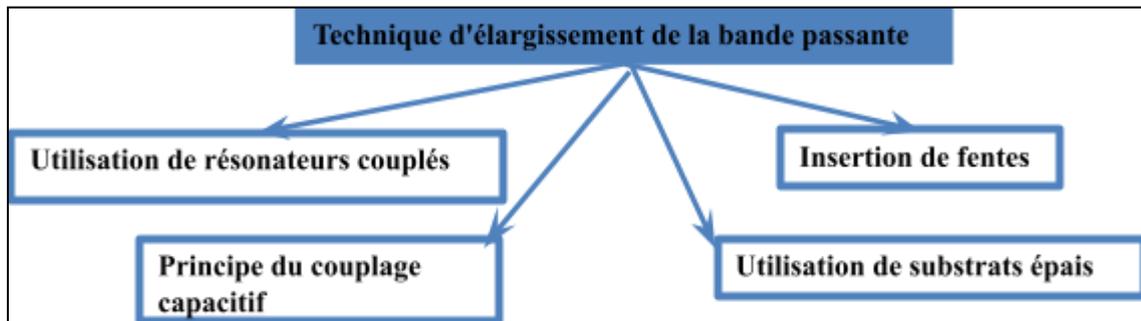


Figure 1.17 : Schéma pour les techniques d'élargissement de la bande passante d'une antenne patch

A. Utilisation de résonateurs couplés

L'association de plusieurs résonateurs couplés permet d'obtenir une large bande passante, jusqu'à 10-40% selon la fréquence de travail [12]. Plusieurs configurations sont possibles:

- Résonateurs demi-onde juxtaposés, couplés par proximité ou par contact [12]- Résonateurs demi-onde superposés, avec un élément alimenté par câble coaxial ou ligne microruban [12]

La bande passante dépend principalement des coefficients de qualité de chaque élément rayonnant, ajustables par la hauteur du substrat [12].

B. Insertion de fentes

L'insertion de fentes dans le patch permet d'élargir la bande passante [13]. Par exemple, une antenne patch avec encoche sur 6 couches de substrat a une bande passante plus large.

C. Utilisation de substrats épais

L'épaisseur du substrat diélectrique influe sur la bande passante. Plus le substrat est épais, plus la bande passante est large [14]. Cependant, cela augmente aussi les dimensions du dispositif [14].

D. Principe du couplage capacitif

Dans cette méthode d'alimentation, le patch rayonnant n'est pas directement alimenté. Au lieu de cela, il est couplé de manière capacitive à une ligne d'alimentation séparée, généralement une ligne microruban.

Ce couplage capacitif entre la ligne d'alimentation et le patch permet de transférer l'énergie électromagnétique de la ligne vers le patch de manière efficace [15].

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons abordé les généralités sur les antennes en explorant leur définition, leur historique, leurs applications, ainsi que leurs caractéristiques principales. Nous avons également étudié les techniques d'antennes imprimées, avec un focus sur les avantages et inconvénients associés.

En outre, nous avons abordé la technique d'élargissement de la bande passante des antennes patch comme un moyen d'améliorer leurs performances et leur polyvalence dans divers contextes d'application.

Ce chapitre souligne l'importance des antennes dans les domaines des communications et de la transmission de signaux, jetant ainsi les bases pour une compréhension plus approfondie de leur conception et de leurs applications avec un accent particulier sur les antennes patch, essentielles dans les communications modernes et les systèmes aéronautiques.

CHAPITRE 2 : NOTIONS SUR LES SYSTÈMES AÉRONAUTIQUES

2.1 Introduction

Les systèmes de communication, de radionavigation et de surveillance jouent un rôle essentiel dans l'aviation moderne. Ils permettent d'assurer la sécurité et l'efficacité des vols, en fournissant aux pilotes et aux contrôleurs aériens les informations nécessaires pour naviguer, communiquer et surveiller le trafic aérien, il s'agit de :

- Les systèmes de communication VHF et HF permettant le dialogue entre les pilotes et les contrôleurs au sol
- Les systèmes de radionavigation comme le VOR, l'ILS et le GPS pour guider les avions en vol et lors des phases d'approche et d'atterrissage
- Les systèmes de surveillance comme le transpondeur Mode S et l'ADS-B pour suivre la position et l'identité des aéronefs

Ce chapitre se concentre sur les systèmes DME, TCAS et ADS-B, en explorant en profondeur ces différents systèmes embarqués sur les avions. Il examine les principes de fonctionnement, les fréquences utilisées, ainsi qu'une illustration significative des antennes installées sur le fuselage des avions et de leur emplacement.

2.2 Définitions des système aéronautique en bande L

La bande L, dans le contexte des systèmes aéronautiques, est une bande de fréquences définie généralement entre environ 960 MHz et 1215 MHz. Cette plage de fréquences est utilisée pour plusieurs systèmes critiques à bord des aéronefs, offrant des fonctionnalités essentielles pour la navigation, la communication et la surveillance. Cette bande de fréquences est attribuée par l'Organisation de l'aviation civile internationale (OACI) à un usage aéronautique exclusif.

Voici plus de détails sur les principaux systèmes aéronautiques opérant dans la bande L comme le montre la figure ci dessous

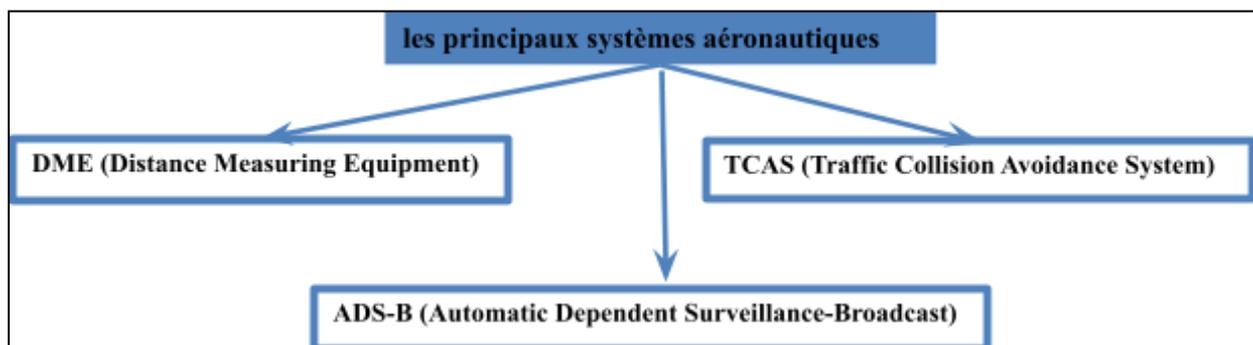


Figure 2.1 : Schéma des système aéronautique en bande L

➤ **DME (Distance Measuring Equipment)**

Le DME est un système de navigation qui mesure la distance entre un aéronef et une station terrestre équipée. Voici quelques détails spécifiques :

- **Fréquence** : Le DME fonctionne typiquement dans la bande L, avec une paire de fréquences allouées : 962-1213 MHz pour les canaux en terre (ou au sol) et 1025-1150 MHz pour les canaux aéroportés.

Fonctionnement : Le système utilise des impulsions radio entre l'avion et le sol pour calculer la distance par rapport à une station DME. Il est souvent couplé avec un VOR (VHF Omnidirectional Range) pour la navigation

Cette radio transpondeur fonctionne en émettant des signaux radioélectriques UHF (des paires d'impulsions de largeur de 3.5 microseconde espacée de 3.6 ou de 12 microsecondes [16]) vers la station au sol, qui répond en retour avec des signaux codés. (Cette dernière transmet les impulsions de retour vers l'avion, avec le même intervalle de temps mais à une fréquence différente. Elle ajoute aussi un délai supplémentaire de 50 microsecondes).

Un récepteur embarqué mesure le temps d'aller-retour de ce signal et en déduit la distance par rapport à la station au sol.

L'antenne est située dans la partie inférieure du fuselage (avant). Il y a en fait deux antennes utilisées pour assurer la redondance.

Les antennes pour ce système sont des monopoles ou des fentes verticales. Puisque la longueur d'onde de 1 GHz est de 30 cm, un monopôle quart d'onde mesure 7,5 cm de haut. Les antennes de cette taille sont blade également appelé aileron.

Il utilise une portion de bande UHF entre 962 MHz et 1213 MHz.

➤ **TCAS (Traffic Collision Avoidance System)**

Le TCAS (Traffic alert and Collision Avoidance System) également appelé ACAS (Airborne alert and Collision Avoidance System), est un instrument de bord d'avion pour assurer l'évitement des collisions en vol entre aéronefs.

Le TCAS est crucial pour éviter les collisions entre avions en vol. Voici les détails spécifiques :

- **Fréquence** : Le TCAS utilise principalement la bande L, avec une transmission à 1030-1090 MHz.
- **Fonctionnement** : Il surveille activement l'espace aérien environnant pour détecter d'autres avions équipés de transpondeurs et émet des instructions de manœuvre pour éviter les collisions.

Il existe deux types de TCAS qui sont : TCAS I et TCAS II, la différence entre les deux, est que le TCAS II est plus avancé en manière des informations fournies, ce qui le distingue du TCAS I qui se limite aux alertes de trafic.

❖ **Le TCAS I :** est capable de générer uniquement des **Traffic Advisories (TA)**, qui sont des alertes de trafic pour informer les pilotes de la présence d'aéronefs à proximité. En revanche, le TCAS II peut générer à la fois des TA et des **Resolution Advisories (RA)**, qui sont des instructions de manœuvre verticale recommandées aux pilotes pour éviter une collision imminente.

❖ **Le système TCAS II** est obligatoire pour tous les avions dont la masse maximale certifiée au décollage dépasse 5700 kg ou autorisée à transporter plus de 19 passagers.

Le système peut surveiller jusqu'à trente aéronefs simultanément, avec une portée de 14 NM pour les cibles Mode A/C et 30 NM pour les cibles Mode S.

Son principe de fonctionnement repose sur la communication entre les transpondeurs. Il interroge les transpondeurs des aéronefs voisins sur la fréquence de 1030 Mhz, et ces derniers, le "répondent" sur la fréquence de 1090 Mhz.

En mesurant le temps des signaux aller-retour entre eux, il sera capable de calculer sa distance par rapport aux autres avions, l'information sur l'altitude est fournie par les autres appareils et le relèvement est donné par l'antenne directionnelle installée sur l'avion [17].

Une installation TCAS II est composée de :

- une unité informatique chargée d'élaborer les informations de trafic et d'alerte.
- un panneau de commande couplé au transpondeur.
- d'un ensemble d'au moins deux antennes directionnelles (une située au-dessus, l'autre au-dessous de l'avion) fonctionnant en UHF (Émission :1030-Réception :1090Mhz)
- d'un générateur de message audio et visuel (affichage).

➤ **ADS-B (Automatic Dependent Surveillance-Broadcast)**

Le (Automatic Dependent Surveillance-Broadcast) est un système de surveillance coopératif dépendant, il s'agit de l'envoi de la position calculée à bord vers le sol via une liaison de donnée, pour le contrôle du trafic aérien.

L'ADS-B permet aux avions de diffuser automatiquement des données de position, de vitesse et d'autres informations à d'autres aéronefs et aux stations au sol. Voici plus de détails :

- **Fréquence :** L'ADS-B utilise également la bande L, principalement à 1090 MHz pour les avions civils et à 978 MHz pour les petits avions.
- **Fonctionnement :** Les avions équipés d'ADS-B émettent périodiquement leurs données, permettant une surveillance plus précise du trafic aérien et améliorant la sécurité grâce à une meilleure conscience de la situation.

Cela se fait chaque seconde, grâce au transpondeur qui envoie les données de l'avion tout autour de lui.

La collecte des messages émis à 1 090 MHz peut se faire par une réception au sol, avec une visibilité directe inférieure à 463 Km, ou par les satellites de la constellation IridiumNext.

La diffusion périodique peut se faire aussi sur la fréquence 978 Mhz, notamment aux Etats-Unis, pour désencombrer la fréquence 1 090 MHz des radars secondaires.

2.3 Importance et Applications

La bande L est choisie pour ces systèmes en raison de ses caractéristiques de propagation appropriées pour les communications à moyenne distance et pour sa disponibilité réglementée pour l'aviation. Ces systèmes jouent un rôle crucial dans la sécurité aérienne, la gestion du trafic et la navigation précise des aéronefs, contribuant ainsi à réduire les risques de collisions et à améliorer l'efficacité des opérations aériennes.

La bande L est un spectre de fréquences vital pour les systèmes avioniques comme le DME, le TCAS et l'ADS-B, fournissant les bases technologiques essentielles pour la navigation sécurisée et la surveillance du trafic aérien à l'échelle mondiale

2.4 Emplacement d'antennes à applications aéronautique :

Le positionnement des antennes sur les aéronefs est essentiel pour garantir le bon fonctionnement des systèmes de communication, de navigation et de surveillance aéronautiques. L'emplacement et l'orientation stratégique des antennes influent directement sur la qualité de la couverture, la fiabilité des communications et la minimisation des interférences. Les schémas ci-dessous illustrent la répartition des antennes des divers systèmes à bord de l'avion.

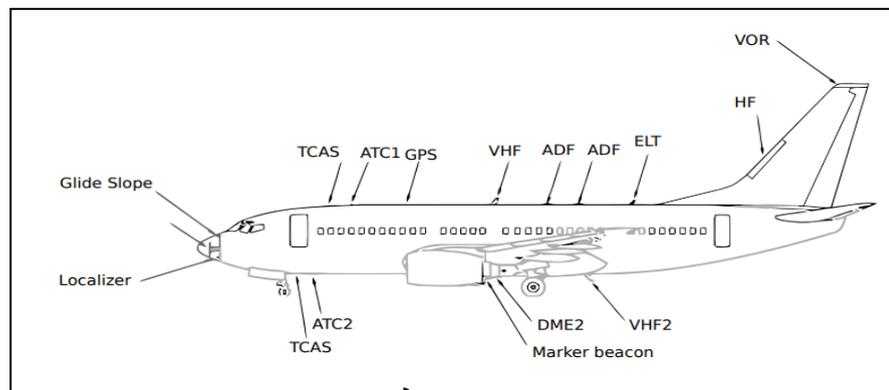


Figure 2.2 : Placement des antennes - Boeing 73

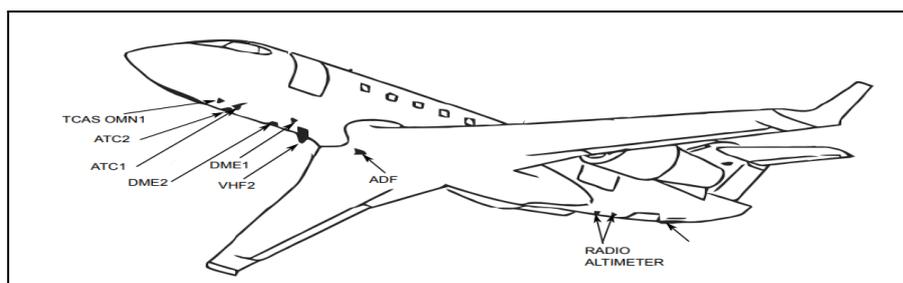


Figure 2.3 Placement des antennes - Bombardier Global

Les principaux emplacements d'antennes à bord d'un avion sont les suivant :

1. Sur le Fuselage :

- **Antennes TCAS (Traffic Collision Avoidance System)** : Positionnées généralement sur le dessus et le dessous de l'avion pour une couverture omnidirectionnelle, afin de détecter les avions environnants.
- **Antennes ADS-B (Automatic Dependent Surveillance-Broadcast)** : Souvent montées sur le dessus de l'avion pour maximiser la visibilité et la diffusion des données de position.
- **Antennes DME (Distance Measuring Equipment)** : Placées à divers emplacements pour permettre une mesure précise des distances par rapport aux stations au sol équipées de DME.

2. Sur les Ailes :

- **Antennes de communication** : Parfois intégrées aux extrémités des ailes pour une couverture efficace et minimiser les interférences.
- **Antennes GPS** : Souvent montées sur le dessus de l'aile pour une vue dégagée du ciel et une réception GPS optimale.

3. À l'arrière de l'avion :

- **Antennes HF (Haute Fréquence)** : Positionnées à l'arrière de l'avion pour les communications longue distance, souvent utilisées pour les communications avec les stations au sol lors de vols transocéaniques.

4. À l'intérieur de la cabine :

- **Antennes WiFi et Satcom** : Installées à l'intérieur de l'avion pour fournir une connectivité Internet et des services de communication à bord.

5. Antennes de réception météorologique :

- **Radar météo** : monté sur le nez ou sous le fuselage pour détecter les précipitations et autres phénomènes météorologiques.

6. Antennes de réception des systèmes de divertissement à bord :

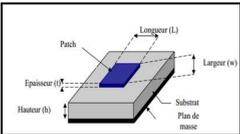
- **Télévision en direct** : montée sur le fuselage pour capturer des signaux de télévision directement à partir des satellites.

Chaque emplacement est soigneusement choisi pour maximiser la performance du système auquel l'antenne est dédiée, tout en tenant compte des contraintes aérodynamiques, de poids et

d'interférences électromagnétiques. L'objectif est de garantir une communication fiable, une navigation précise et une sécurité accrue pour les opérations aériennes.

2.5 Les types d'antennes sur un avion

Sur un avion, différents types d'antennes sont utilisés en fonction des besoins spécifiques des systèmes avioniques et des communications. Le tableau ci dessous nous montre quelques types d'antennes couramment utilisés sur un avion :

Les types d'antennes	Description	Applications
<p data-bbox="140 327 384 461">Antennes Blade (ou antennes ailerons)</p>  <p data-bbox="140 759 373 837">Figure 2.4 : une antenne lame DME</p>	<ul data-bbox="501 327 890 965" style="list-style-type: none"> • Emplacement : Les antennes Blade sont typiquement montées à l'extrémité des ailes d'un avion, souvent intégrées discrètement pour minimiser la traînée aérodynamique. • Structure : Elles sont généralement constituées d'une structure mince et plate, ce qui leur donne une apparence discrète et profilée. 	<ul data-bbox="965 327 1514 1211" style="list-style-type: none"> • Communications : Les antennes Blade sont utilisées pour les communications radio dans des bandes de fréquences spécifiques, comme la VHF (Very High Frequency) et la UHF (Ultra High Frequency). • Systèmes avioniques : Elles sont intégrées dans les systèmes avioniques pour assurer la transmission et la réception de signaux critiques, tels que ceux utilisés par les systèmes de communication air-sol (A/G) ou air-air (A/A). • Technologie satellite : Certaines versions d'antennes Blade sont également utilisées pour les communications par satellite à bord des avions, permettant une connectivité mondiale.
<p data-bbox="189 1426 389 1458">Antennes Patch</p>  <p data-bbox="140 1630 421 1709">Figure 2.5: Un exemple d'antenne patch</p>	<ul data-bbox="501 1426 890 1760" style="list-style-type: none"> • Antennes plates et compactes, généralement imprimées sur un substrat, souvent utilisées pour leur faible profil et leur capacité à être intégrées discrètement à la surface de l'avion. 	<ul data-bbox="965 1426 1514 1912" style="list-style-type: none"> • Navigation GPS : Utilisées pour recevoir les signaux GPS et améliorer la précision de la navigation. • Communications sans fil : Employées dans les systèmes de communication sans fil à courte et moyenne portée. • Radar : Utilisées comme éléments d'antenne dans les systèmes radar à bord d'aéronefs pour détecter les obstacles et les conditions météorologiques.

<p>Antennes Whip (ou antennes fouet)</p>  <p>Figure 2.6 : le placement des antennes whip</p>	<p>Les antennes whip, également connues sous le nom d'antennes fouet, sont des types d'antennes utilisées couramment sur les avions et d'autres véhicules mobiles en raison de leur simplicité, leur robustesse et leur efficacité dans diverses applications de communication.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Communications : Les antennes whip sont largement utilisées pour les communications radio à haute fréquence (HF), très haute fréquence (VHF) et ultra haute fréquence (UHF) à bord des avions. • Radio : Elles sont également utilisées pour la réception et la transmission de signaux radio, notamment pour la radio aviation et les communications air-terre. • Réception GPS : Certaines versions d'antennes whip peuvent être utilisées pour la réception des signaux GPS, bien que d'autres types d'antennes soient plus couramment utilisés à cette fin sur les avions modernes.
<p>Antennes de Radôme</p>  <p>Figure 2.6 : le placement d'un radôme</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Structure : Un radôme est une enveloppe protectrice transparente ou semi-transparente, souvent en matériau composite léger et résistant aux intempéries, qui recouvre une antenne. • Fonction : Il permet aux signaux radioélectriques de passer à travers tout en protégeant l'antenne des dommages causés par le vent, la pluie, la glace et d'autres éléments environnementaux. 	<p>Radar Météo : Les radômes protègent les antennes utilisées pour les radars météo à bord des avions, facilitant la détection des précipitations et des conditions météorologiques.</p> <p>Communications Satellite (Satcom) : Pour les antennes paraboliques ou plates utilisées pour les communications par satellite, les radômes assurent la transmission et la réception de signaux clairs et non perturbés.</p> <p>Radars de surveillance : Les antennes de radôme sont également utilisées pour les radars de surveillance à bord des avions, essentiels pour la détection d'objets en vol et la sécurité aérienne.</p>

<p>Antennes Satcom (Communications Satellite)</p>  <p>Figure 2.7 : le placement d'un SATCOM</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Antennes paraboliques ou plates montées sur le fuselage et l'empennage. 	<ul style="list-style-type: none"> • Pour les communications via satellites, fournissant des services de voix, de données et Internet à bord.
---	---	--

Tableau 2.1 : Quelques types d'antennes couramment utilisés sur un avion
(liste non exhaustive)

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exploré les systèmes de communication, de radionavigation et de surveillance essentiels à l'aviation moderne. Nous avons examiné en détail les systèmes DME, TCAS et ADS-B, en mettant en lumière leurs principes de fonctionnement, les fréquences utilisées, et l'importance de chaque système pour la sécurité et l'efficacité des vols.

Nous avons également décrit divers types d'antennes utilisées dans les applications aéronautiques, telles que les antennes Blade, Patch, Whip, et de Radôme. Chaque type d'antenne joue un rôle crucial dans l'optimisation des performances des systèmes avioniques, assurant une communication fiable, une navigation précise et une surveillance efficace du trafic aérien.

Les systèmes abordés dans ce chapitre démontrent l'importance des technologies avancées dans la gestion du trafic aérien et la prévention des collisions, contribuant ainsi à la sécurité globale de l'aviation. En comprenant les caractéristiques et les applications de ces systèmes, nous pouvons mieux apprécier les défis et les solutions techniques mises en œuvre pour maintenir et améliorer les standards de sécurité et d'efficacité dans l'aviation moderne.

CHAPITRE 3: CONCEPTION ET SIMULATION DE L'ANTENNE PATCH MULTI STANDARDS POUR LA BANDE L

3.1 Introduction

Dans cette section, une nouvelle antenne patch multistandards a été conçue et présentée pour les applications aéronautiques en bande L, la structure de la figure 3.13 a été conçue et simulée en utilisant le logiciel commercial CST MICROWAVE STUDIO.

Cette antenne proposée se compose d'un patch elliptique alimenté par une ligne de transmission. L'utilisation de la technique de la DGS (Defected Ground Structure), ou structure de sol défectueuse, permet d'améliorer la bande passante et ainsi d'améliorer significativement les caractéristiques de l'antenne proposée.

3.2 Spécifications techniques

Dans ce projet, l'antenne imprimée conçue doit répondre aux spécifications techniques résumées dans le tableau 3.1.

Bandes de fonctionnement	DME de 960 à 1215 MHz TCAS 1090 Mhz ADS-B 1090 Mhz et 978 MHz
La bande de fréquence	Bande L
Polarisation	linéaire
Diagramme de Rayonnement	Omnidirectionnel
La taille	le plus compacte possible
Le gain	Positif
Coefficient de réflexion	$ S_{11} < -10$ dB
Simplicité du design	simple et réalisable

Tableau 3.1 : spécifications techniques à atteindre

3.3 Configuration de l'antenne et conception

3.3.1 Les étapes de conception de patch

Comme expliqué précédemment dans le premier chapitre, une antenne patch est une candidate idéale pour répondre aux exigences techniques de notre cahier des charges. Ainsi, notre

conception débutera par une antenne patch conçue principalement pour fonctionner dans la bande L. La figure 3.1 suivante illustre l'organigramme de simulation.

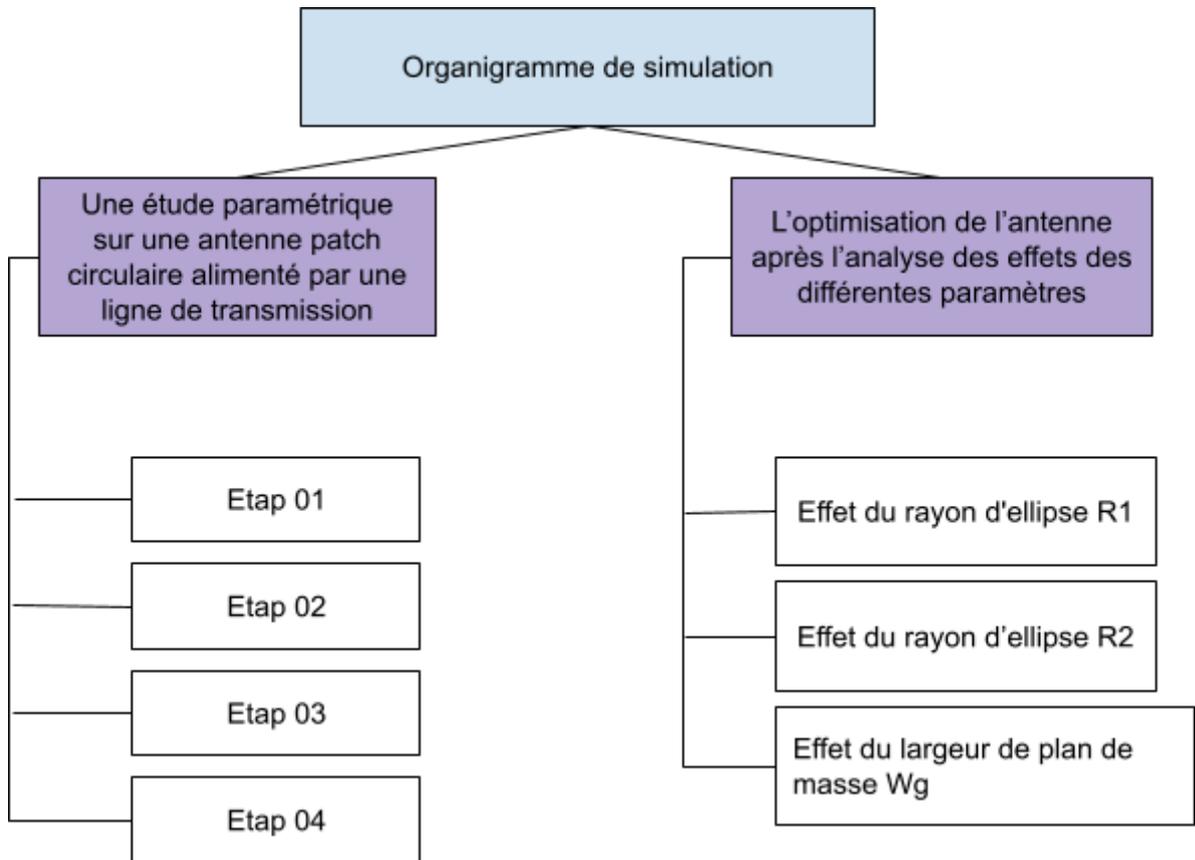


Figure 3.1 : Organigramme de simulation

- **Une étude paramétrique sur une antenne patch circulaire alimenté par une ligne de transmission**

ETAPE 1

A partir d'un design de base, une antenne patch circulaire, représentée sur la figure 3.2, est alimentée par une ligne de transmission avec une largeur de $W_f = 5.67$ mm. L'antenne d'origine se compose principalement d'un patch PEC (perfect electric conductor) circulaire centré en (0,0) avec un rayon de 59,5 mm. Elle est fabriquée sur un substrat de permittivité relative de $\epsilon_r = 2.5$ et d'une épaisseur de 2 mm, puis étalée sur un plan de masse rectangulaire de mêmes dimensions, avec une épaisseur de 0,33 mm.

Paramètre	Dimension en mm
Largeur sub	238
Longueur sub	238
Epaisseur sub	2
Rayon du patch	59.5
Epaisseur de PEC	0.33
Largeur du ligne de transmission	5.67

Tableau 3.2 : Les paramètres de l'antenne initiale

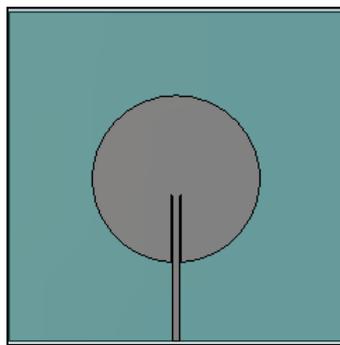


Figure 3.2 : Une antenne patch circulaire alimenté par une ligne de transmission

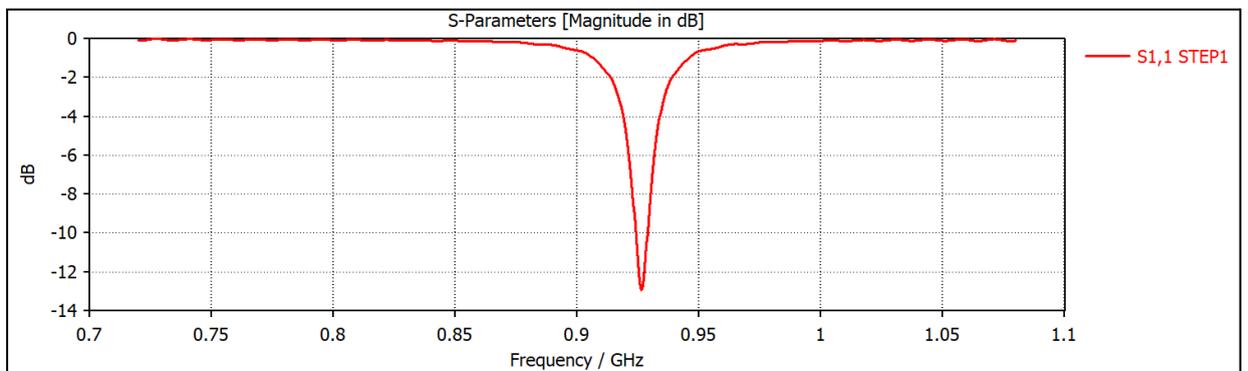


Figure 3.3 : Coefficient de réflexion en fonction de la fréquence de l'antenne

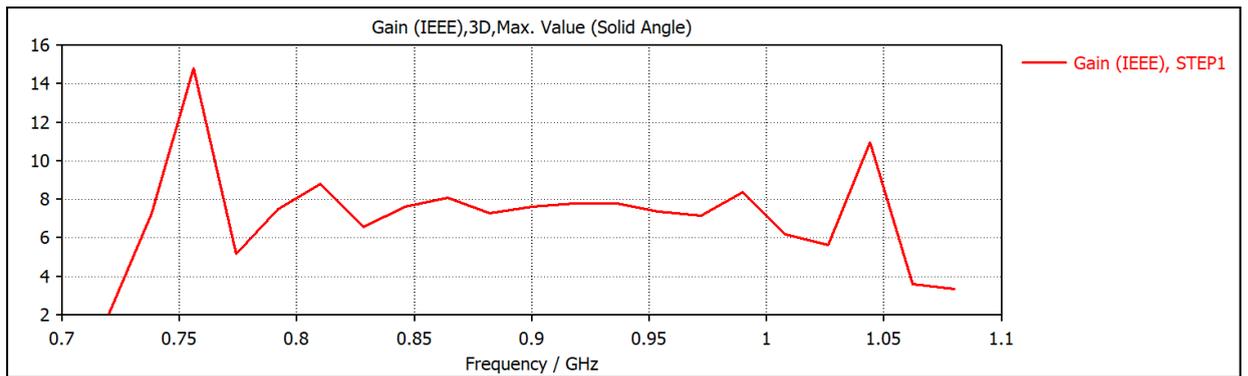


Figure 3.4 :Le gain en fonction de la fréquence de l’antenne

- Le graphique montrant le coefficient de réflexion en fonction de la fréquence pour l'antenne présentée dans la figure 3.3 indique que l'antenne opère efficacement dans la bande L, cependant, sa largeur de bande est assez étroite, ce qui nécessite un élargissement de bande pour une meilleure performance.

ETAPE 2

Afin d'augmenter la largeur de bande passante, nous allons réduire la taille de l'antenne et changer le matériau pour un autre ayant une permittivité plus grande. C'est pourquoi, pour cette deuxième phase, des ajustements ont été apportés à la taille et au matériau du substrat, en passant à un FR-4 (Lossy) avec une permittivité relative de $\epsilon_r = 4.3$, mesurant 150x150 mm et conservant une épaisseur de 2 mm.

L'épaisseur du plan de masse et du patch a été réduite à $mt = 0.035$ mm sans altérer leurs dimensions, tandis que la largeur de la ligne de transmission W_f a été augmentée à 6,5 mm. Les résultats de la simulation sont présentés dans les figures suivantes : figure 3.6 et figure 3.7.

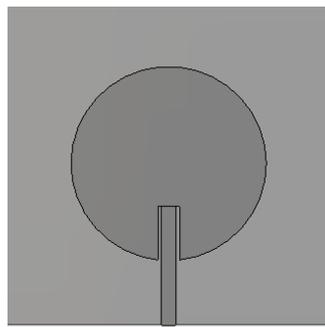


Figure 3.5 : La deuxième étape de l’antenne patch

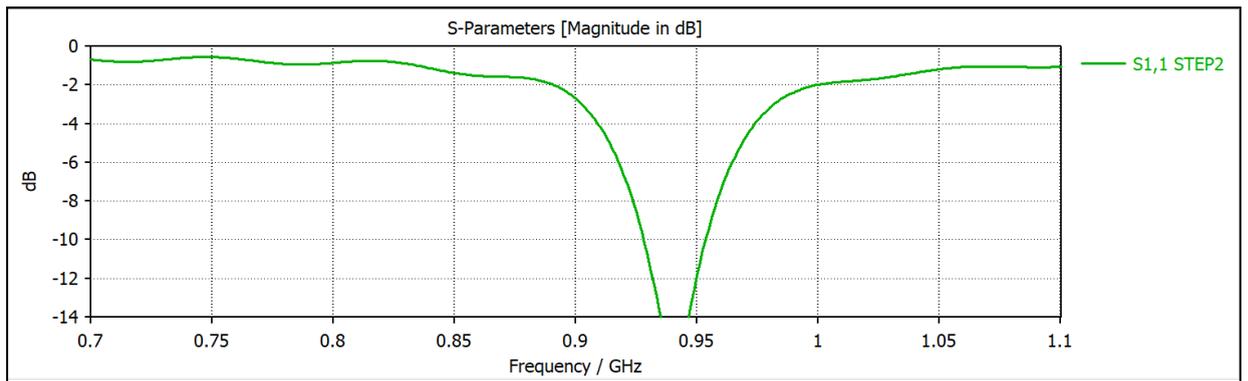


Figure 3.6 :Coefficient de réflexion en fonction de la fréquence de l'antenne

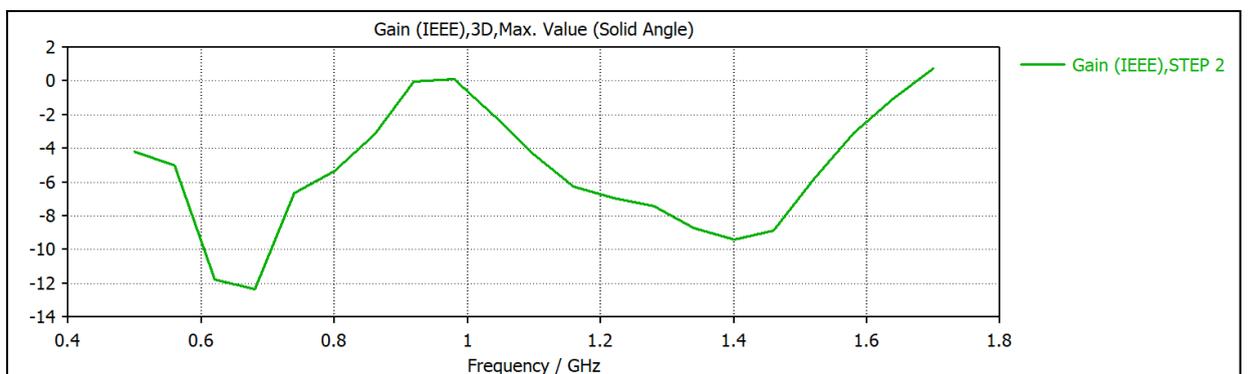


Figure 3.7 : Le gain en fonction de la fréquence de l'antenne

- Il est observé que la bande a été légèrement élargie, mais que le gain est négatif dans la plage souhaitée. Pour résoudre ce problème de gain négatif, il est possible de réduire la taille du patch ou celle du plan de masse.

ETAPE 3

La modification apportée à cette section concerne le plan de masse, où une structure de sol déféctueuse de 150x35 mm avec une épaisseur de 0,18 mm a été utilisée. Le rayon du patch a été réduit à $R=18$ mm, et la largeur de la ligne de transmission à $W_f=5,67$ mm. Les résultats de la simulation sont illustrés dans les figures suivantes : figure 3.9 et figure 3.10.

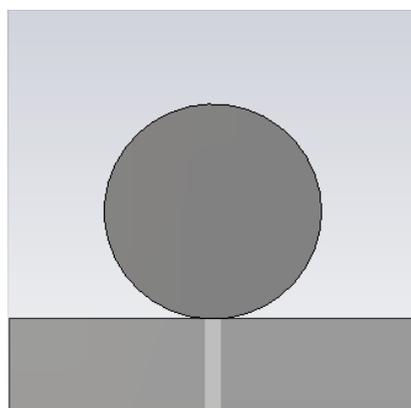


Figure 3.8 : La troisième étape de l'antenne patch

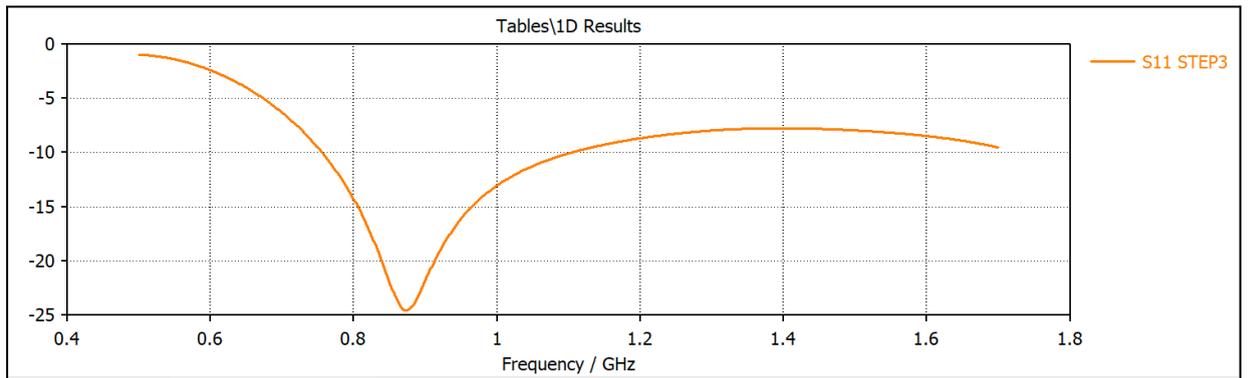


Figure 3.9 : Coefficient de réflexion en fonction de la fréquence de l'antenne

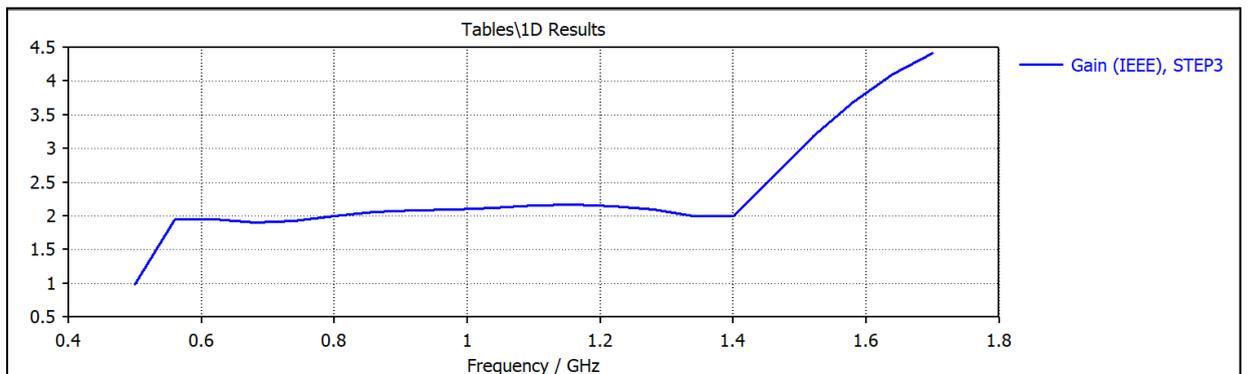


Figure 3.10 : Le gain en fonction de la fréquence de l'antenne

- Il est clairement observé que réduire la taille du patch et du plan de masse a un impact direct sur l'élargissement de la bande et l'amélioration du gain. Cette approche est connue sous le nom d'élargissement de bande par la technique DGS (Defected Ground Structure).

ETAPE 4

Dans le but d'améliorer à la fois le coefficient de réflexion et le gain, les paramètres ont été maintenus dans cette section, mais une modification a été apportée à la géométrie du patch, qui est passé d'un cercle à une ellipse.

Les résultats de la simulation sont présentés dans les figures suivantes : figure 3.12 et figure 3.13

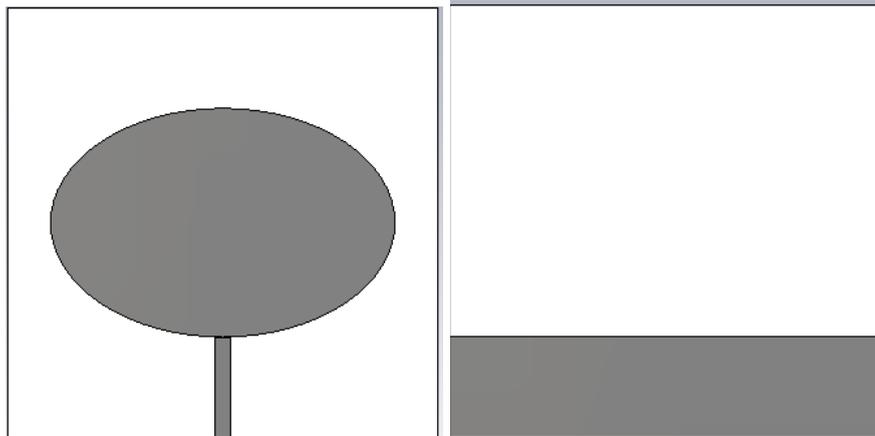


Figure 3.11 : La quatrième étape de l'antenne patch

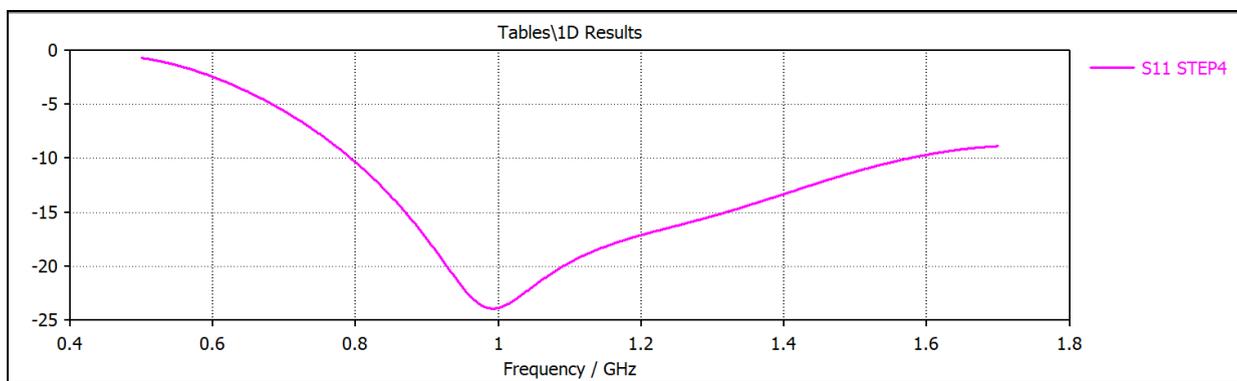


Figure 3.12 : Coefficient de réflexion en fonction de la fréquence de l'antenne

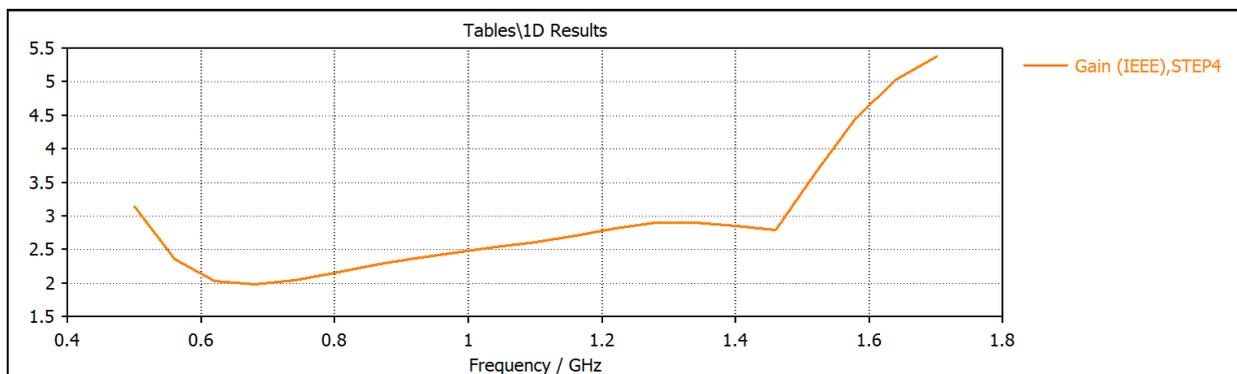


Figure 3.13 : Le gain en fonction de la fréquence de l'antenne

- Les objectifs visant à atteindre les valeurs souhaitées de coefficient de réflexion et du gain après cette étape doivent être atteints. L'optimisation de cette antenne a été réalisée après avoir analysé les effets des différents paramètres, comme indiqué dans le prochain titre.

3.4 Etude paramétrique

Ce paragraphe est consacré à l'étude de l'influence de différents paramètres de l'antenne patch de la quatrième étape, illustrée dans la figure 3.17

Une étude paramétrique a été menée pour comprendre les effets des divers paramètres sur le coefficient de réflexion S11 afin d'aboutir à une structure finale efficace et optimisée. Nous allons adopter le matériau FR-4 (lossy) comme substrat, ayant généralement une permittivité relative égale à 4.3, alors les paramètres que nous allons changer sont le rayon du patch selon l'axe x R1, le rayon du patch selon l'axe y R2, et la largeur de plan de masse Wg.

- **Effet de rayon du patch selon l'axe x R1**

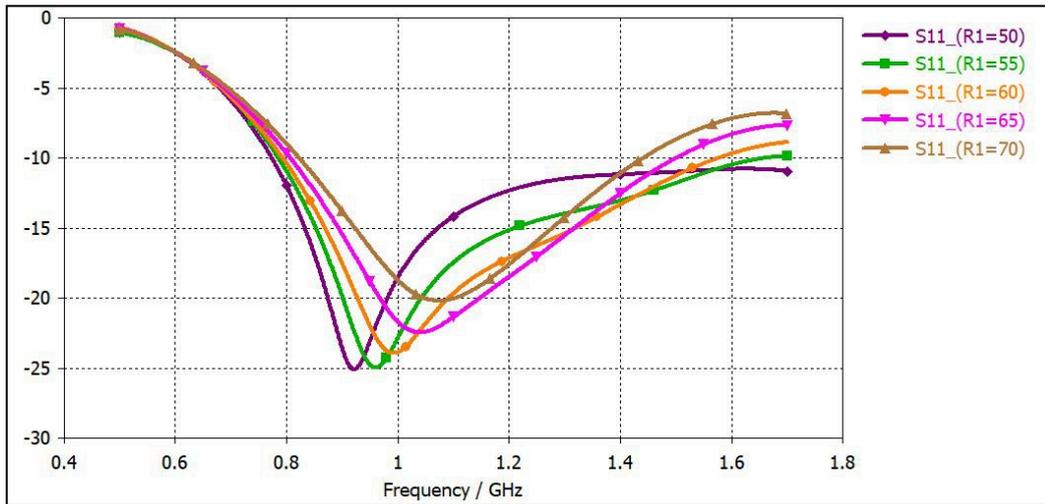


Figure 3.13 : L'effet de rayon du patch selon l'axe x R1 sur le coefficient de réflexion en fonction de la fréquence de l'antenne

Le graphique montre que la fréquence de résonance augmente lorsque le rayon du patch (R1) augmente. En effet, la capacité est inversement proportionnelle à la fréquence de résonance.

- **Effet de rayon du patch selon l'axe y R2**

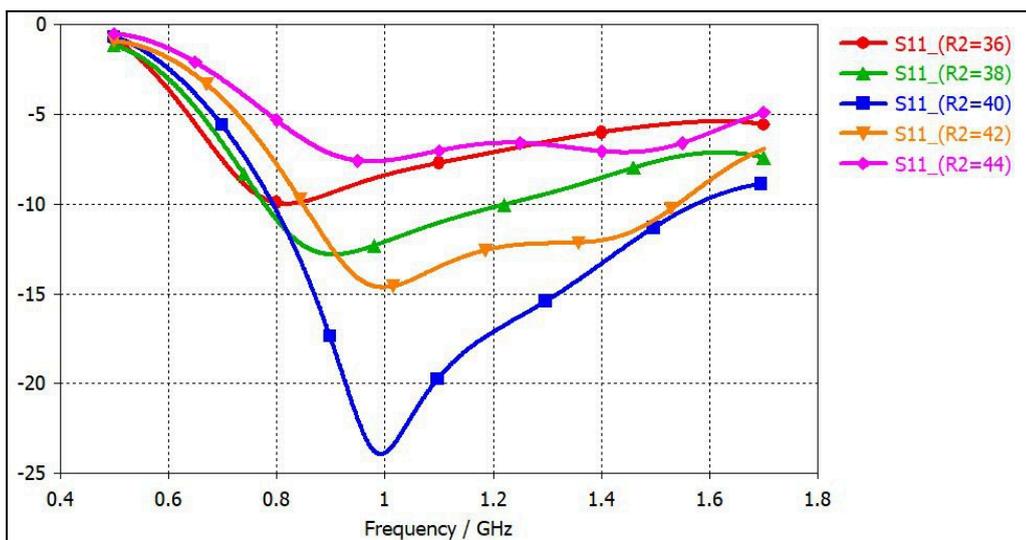


Figure 3.14 : Effet de rayon du patch selon l'axe y R2 sur le coefficient de réflexion en fonction de la fréquence de l'antenne

Le graphique montre que la fréquence de résonance augmente lorsque le rayon du patch selon l'axe y (R_2) augmente. En effet, la capacité est inversement proportionnelle à la fréquence de résonance.

- **Effet de la largeur de plan de masse W_g**

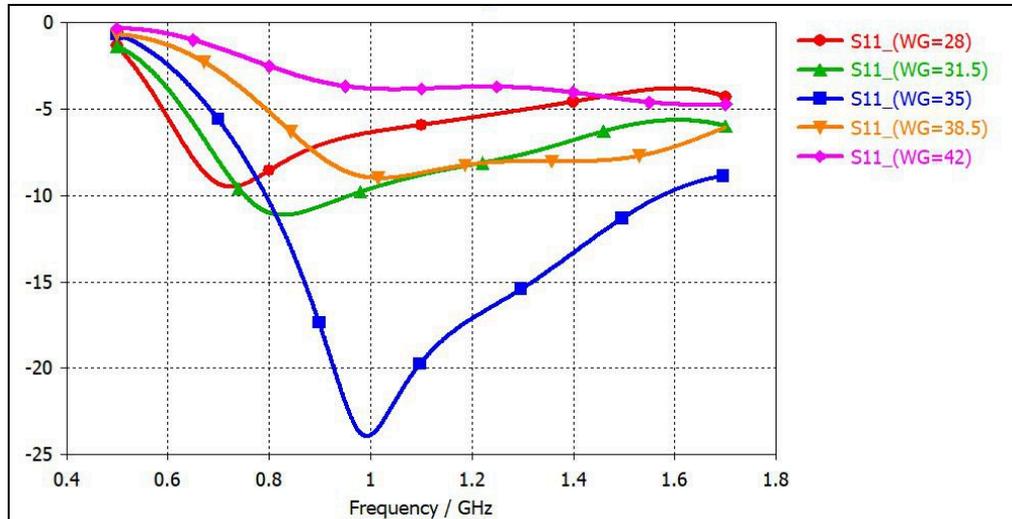


Figure 3.15 : Effet de la largeur de plan de masse W_g sur le coefficient de réflexion en fonction de la fréquence de l'antenne

Le graphique montre que la fréquence de résonance diminue lorsque la largeur du plan de masse (W_g) augmente.

3.5 Résultats de simulation

La géométrie et la configuration de l'antenne patch elliptique alimenté par une ligne de transmission proposée est illustrée sur la figure 3.13.

Elle est imprimée sur un substrat de type Rogers FR-4 (Lossy) d'une épaisseur de 1.6 mm avec une permittivité relative ϵ_r de 4.3. L'antenne proposée est constituée essentiellement d'un patch PEC (perfect electric conductor) de forme elliptique au centre (0,0), le grand rayon

$R_1 = 60$ mm, le petit rayon $R_2 = 40$ mm.

Cette antenne est gravée sur un plan de masse rectangulaire ayant la largeur $W_g = 35$ mm, et alimenté par une ligne de transmission de 50Ω avec une largeur $W_f = 4$ mm.

La configuration finale de l'antenne proposée est présentée dans la figure 3.16.

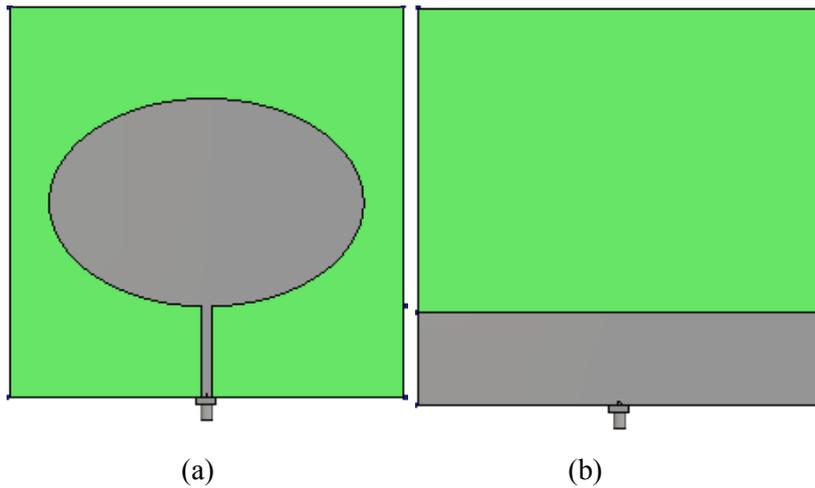


Figure 3.16 : La configuration finale de l'antenne proposée (a et b : devant et derrière)

Les dimensions détaillées de l'antenne elliptique proposée alimentée par une ligne de transmission sont indiquées dans le Tableau 3.2.

Paramètre	Dimension en mm
Lsub	150
Wsub	150
Wg	35
R1	60
R2	40
Wf	4

Tableau 3.2 : Les paramètres de l'antenne simulée

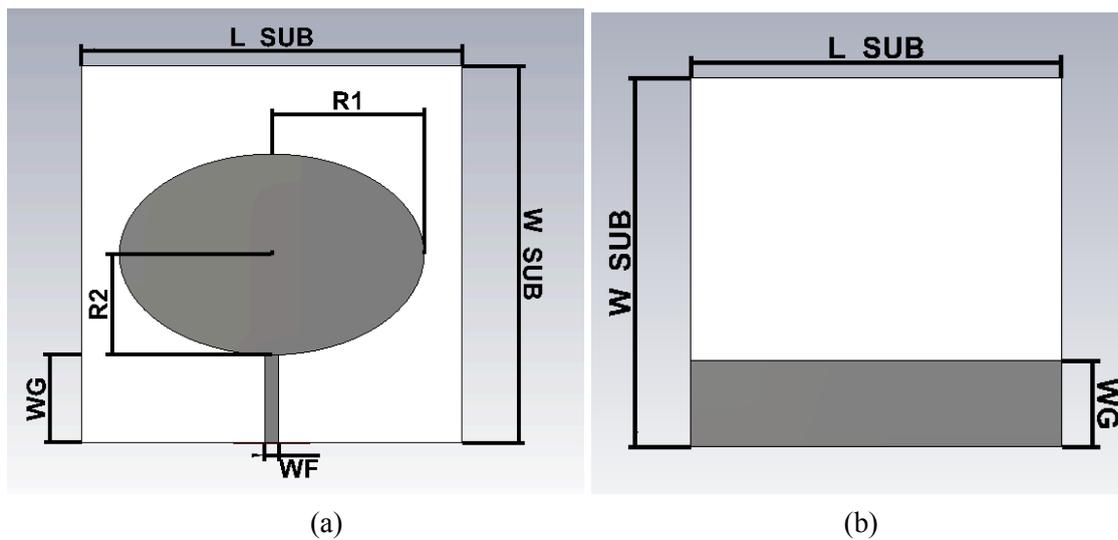


Figure 3.17 : Les paramètres de l'antenne finale proposée (a et b : devant et derrière)

- **Coefficient de réflexion**

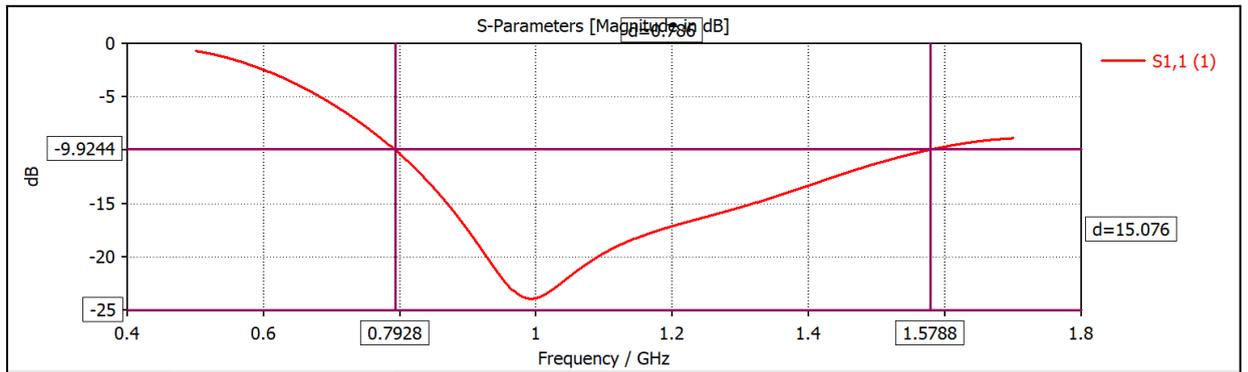


Figure 3.18 : Coefficient de réflexion en fonction de la fréquence de l'antenne

Selon le graphique montrant le coefficient de réflexion en fonction de la fréquence, on a réussi à couvrir la plage souhaitée de **960 à 1215 MHz** avec succès. De plus, l'antenne est adaptée pour une plage de **0,786 MHz**.

- **Le gain**

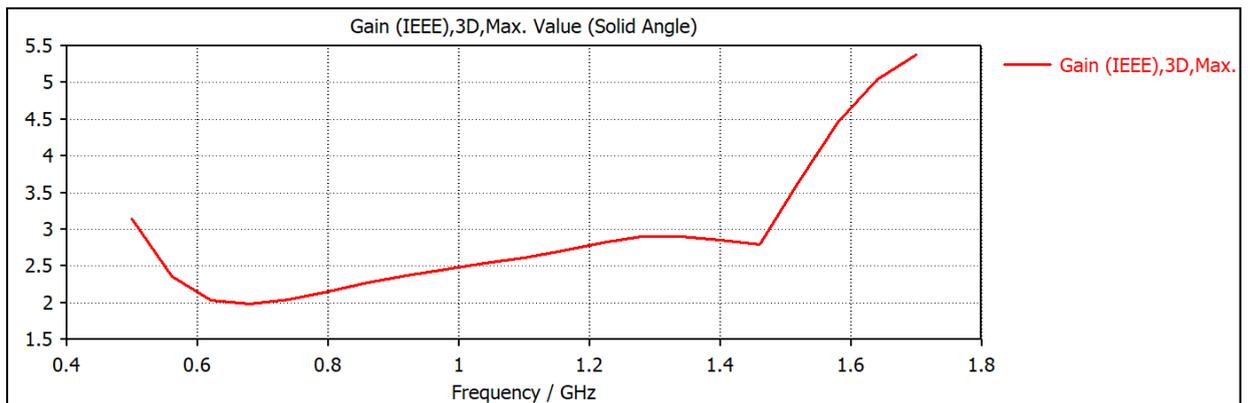


Figure 3.19 : Le gain en fonction de la fréquence de l'antenne

Le graphique clairement démontré que le gain de notre antenne est positif dans la plage de fréquences désirée.

- **Le rapport d'ondes stationnaires de tension (ROS) en fonction de la fréquence**

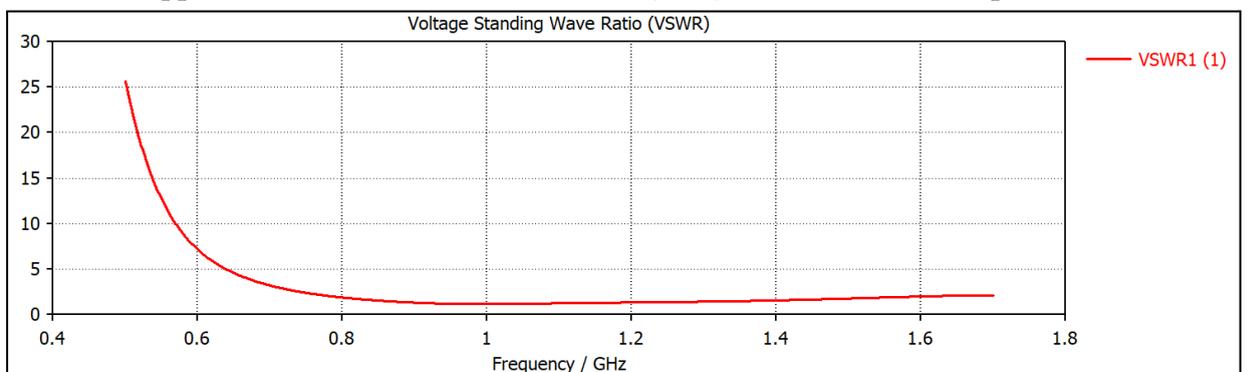


Figure 3.20 : Le rapport d'ondes stationnaires de tension (ROS) en fonction de la fréquence

Le graphique montre le rapport d'ondes stationnaires de tension (ROS) en fonction de la fréquence. On observe que le ROS est très élevé à basse fréquence, puis diminue rapidement jusqu'à atteindre un plateau autour de 1 GHz. Ce plateau indique une bonne adaptation d'impédance dans cette plage de fréquence.

- **Diagramme de rayonnement**

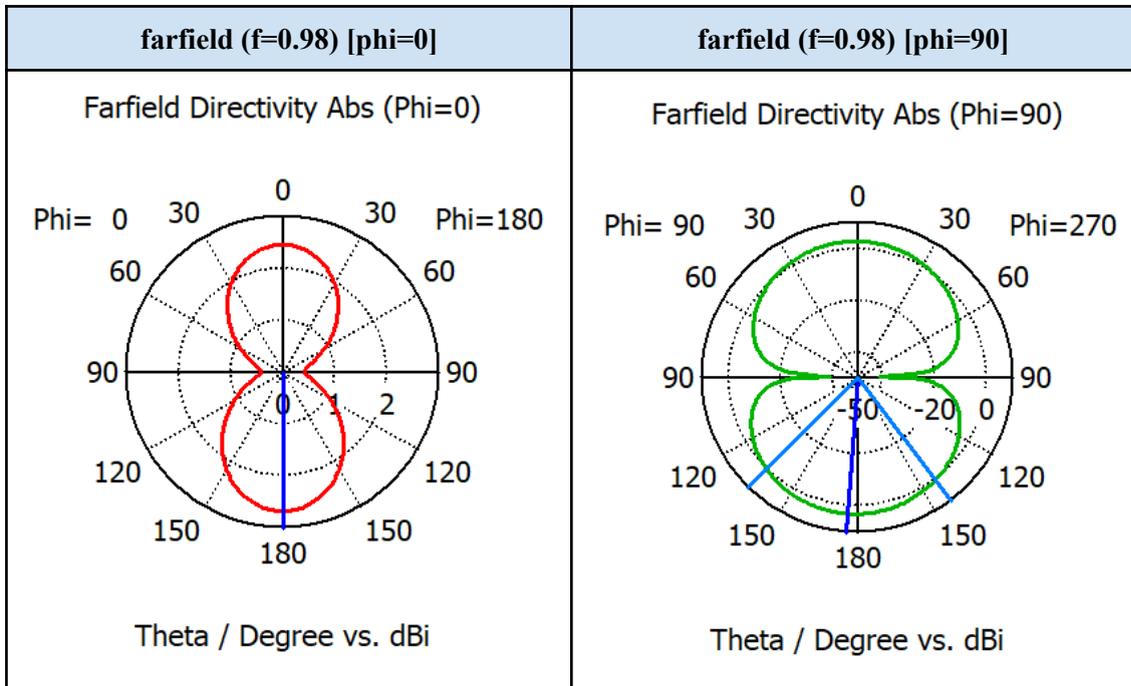


Figure 3.21 : Diagramme de rayonnement pour f=0.98

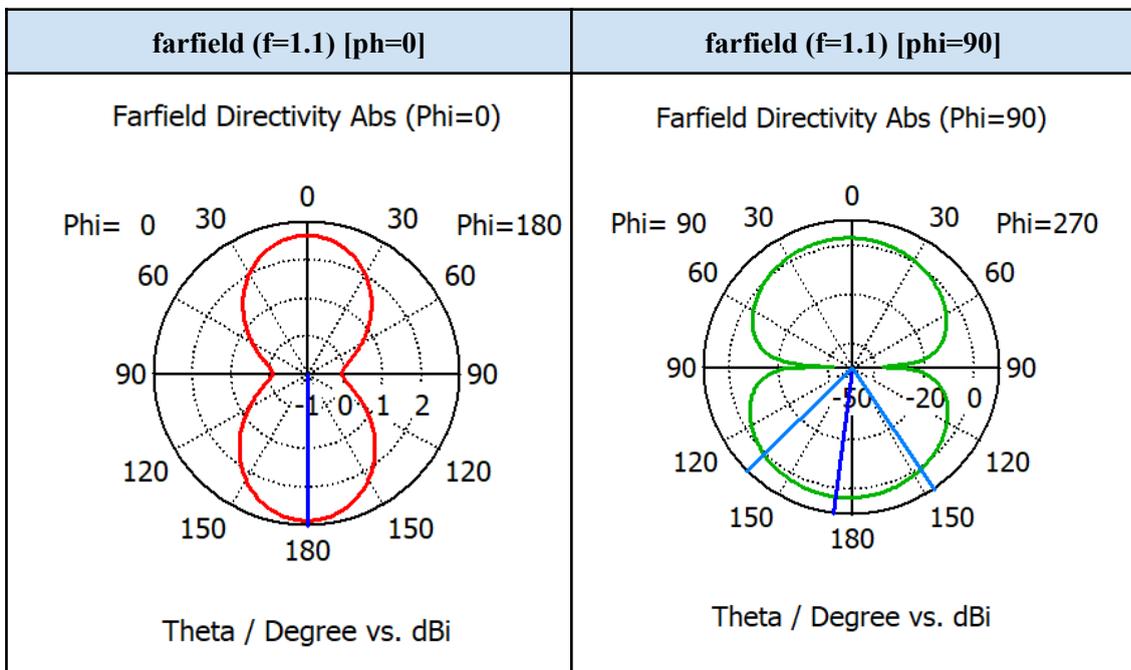


Figure 3.22 : Diagramme de rayonnement pour f=1.1

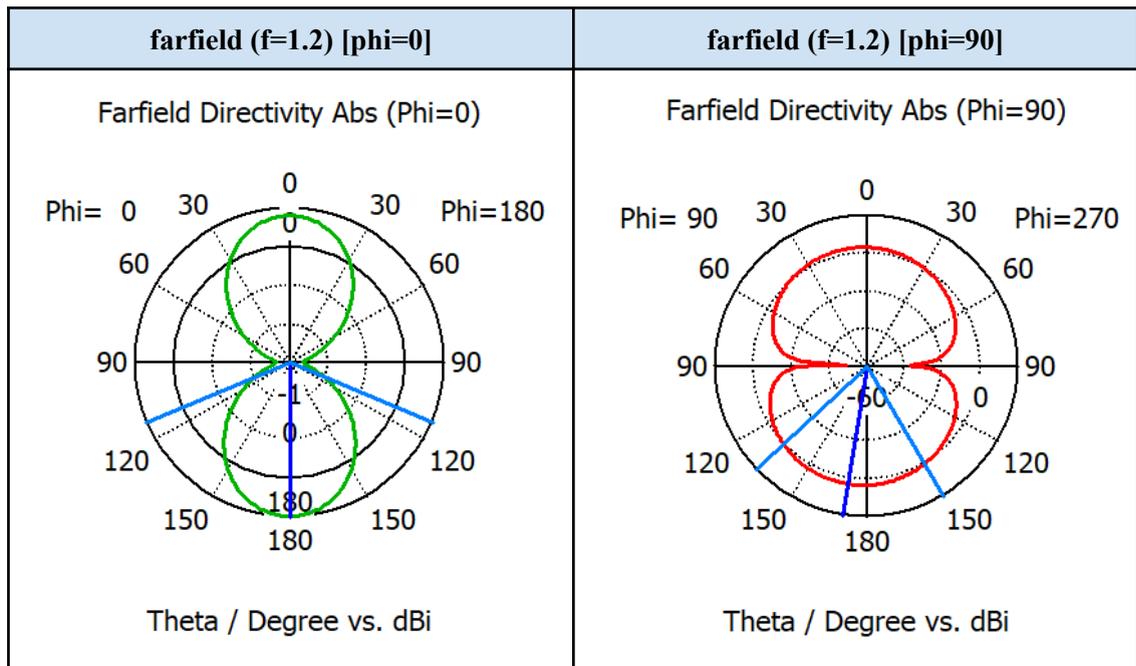


Figure 3.23 : Diagramme de rayonnement pour f=1.2

La forme des diagrammes de rayonnement est restée pratiquement inchangée sur trois fréquences dans notre plage souhaitée, suggérant ainsi que notre diagramme est stable et qu'il rayonne dans la direction voulue de manière constante.

3.6 Implémentation de l'Antenne à travers la Technologie SDR (software defined radio) : Révolutionnant l'Avionique Moderne

3.6.1 Définition et Importance des SDR (Software Defined Radios) :

Un SDR est un système de communication radio où certains ou tous les composants traditionnellement implémentés dans du matériel analogique (mélangeurs, filtres, amplificateurs, modulateurs/démodulateurs, détecteurs, etc.) sont plutôt implémentés au moyen de logiciels sur un ordinateur ou un système embarqué. Cela permet de recevoir et transmettre différents protocoles radio simplement en changeant le logiciel, offrant une grande flexibilité.

Grâce à leur architecture numérique, les SDR peuvent fonctionner sur une très large gamme de fréquences, de la radio FM aux communications 5G, simplement en modifiant le logiciel. Cela permet aux SDR d'être utilisés dans de nombreuses applications.

Les SDR offrent une bien plus grande flexibilité, adaptabilité et efficacité que les radios analogiques traditionnelles, grâce à leur architecture numérique programmable. Cela en fait une technologie clé pour de nombreuses applications de radiocommunications modernes. La figure ci-dessous présente les éléments nécessaires à la création d'un système de communication complet, comprenant un SDR, un câble et notre logiciel de programmation.



Figure 3.24 : Présentation simplifiée d'une configuration SDR

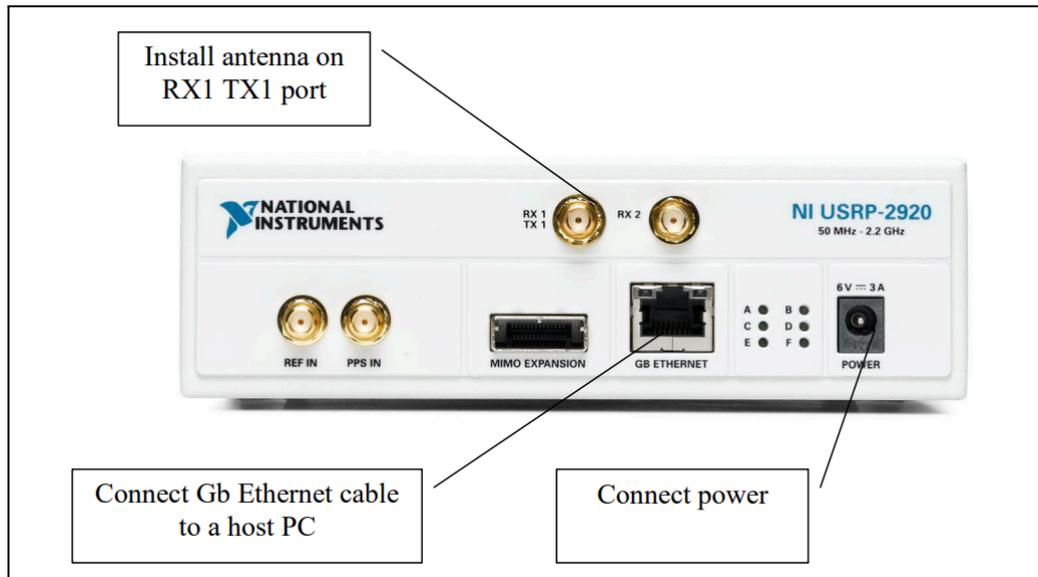


Figure 3.25 : Panneau avant USRP

3.6.2 Motivation en Radiofréquence pour les systèmes de communication, navigation et surveillance (CNS) et l'avionique Moderne :

L'utilisation conjointe de SDR (Software Defined Radio) et d'antennes multi-systèmes à profil bas en aviation représente une évolution majeure dans le domaine de l'avionique moderne, en particulier en ce qui concerne les systèmes de communication, navigation et surveillance (CNS). La motivation en radiofréquence pour l'utilisation conjointe de SDR en aviation réside dans les avantages qu'elle offre en termes d'efficacité et de performances des systèmes CNS en aéronautique:

- **Flexibilité et adaptabilité :** Les SDR offrent une grande flexibilité en matière de programmation et de configuration des signaux radio, permettant une adaptation rapide aux diverses normes et bandes de fréquences utilisées en aviation. Associées à des antennes multi-systèmes à profil bas, cette approche permet une adaptabilité optimale aux besoins changeants de communication, de navigation et de surveillance dans l'espace aérien, offrant ainsi une solution plus agile et efficace que les systèmes traditionnels.

- **Optimisation de l'espace et de la traînée :** Les antennes multi-systèmes à profil bas sont conçues pour être compactes et discrètes, réduisant ainsi l'impact sur la traînée de l'avion et libérant de l'espace pour d'autres équipements. En combinant ces antennes avec des SDR, qui peuvent traiter efficacement un large éventail de signaux radio, les avioniques peuvent bénéficier d'une conception plus aérodynamique et d'une utilisation optimale de l'espace à bord de l'aéronef.
- **Meilleure Performance et Fiabilité :** L'association de SDR et d'antennes multi-systèmes à profil bas contribue à améliorer la performance globale des systèmes CNS en aéronautique. Cette approche permet une réception et une transmission plus efficaces des signaux radio, réduisant les interférences et améliorant la clarté des communications. En outre, elle renforce la fiabilité des opérations aériennes en assurant une connectivité robuste et continue, essentielle pour la sécurité et l'efficacité du trafic aérien.

Conclusion

Ce chapitre décrit la modélisation d'une antenne patch elliptique large bande multi-standards pour des applications aéronautiques en bande L, alimentée par une ligne de transmission. Les résultats des simulations montrent un diagramme de rayonnement omnidirectionnel conforme aux attentes et en adéquation avec les objectifs fixés. En outre, l'utilisation conjointe de SDR et d'antennes multi-systèmes à profil bas en aviation est soulignée comme une avancée technologique majeure offrant des avantages notables en efficacité opérationnelle, performances des systèmes CNS et sécurité aérienne. Cette approche contribue à la modernisation et à l'optimisation des avions, répondant aux besoins croissants de l'aviation moderne en matière de connectivité, navigation et communication.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Le mémoire offre une vue d'ensemble approfondie des antennes, en couvrant des aspects allant des concepts de base à des réalisations pratiques complexes.

Dans le premier chapitre, j'ai exploré les fondamentaux des antennes, depuis leur définition et leur évolution historique jusqu'à leurs différentes applications. J'ai abordé en détail les caractéristiques essentielles des antennes, telles que le coefficient de réflexion, la bande passante, les paramètres de rayonnement et la polarisation. De plus, j'ai examiné les antennes imprimées et les techniques d'alimentation associées, mettant en lumière les avantages et inconvénients de ces configurations, et proposant des méthodes pour élargir la bande passante des antennes patch.

Le deuxième chapitre s'est concentré sur les notions essentielles des systèmes aéronautiques, il s'agit d'une description détaillée pour les systèmes concernés, DME, TCAS, et ADS-B, en mettant en avant l'importance et les applications des différents types d'antennes utilisés dans l'aviation. J'ai analysé des antennes spécifiques telles que les antennes Blade, Patch, Whip, de Radôme, Satcom et de navigation, soulignant leur rôle crucial dans les systèmes aéronautiques modernes.

Enfin, le troisième chapitre a plongé dans la conception et la simulation d'une antenne patch elliptique large bande multi standards pour les applications aéronautique en bande L. En détaillant les spécifications techniques, les étapes de conception, les résultats de simulation et une étude paramétrique approfondie, j'ai illustré de manière concrète les défis et les opportunités liés à la création d'antennes complexes et polyvalentes pour des applications spécifiques.

En conclusion, mon mémoire témoigne d'une expertise approfondie dans le domaine des antennes et des systèmes aéronautiques, combinant une compréhension théorique solide avec des applications pratiques.

Mes recherches offrent des perspectives précieuses pour l'amélioration continue des technologies d'antennes et leur intégration efficace dans des environnements complexes tels que l'aviation.

Il semble que je sois intéressée par la conception et la réalisation d'antennes avancées pour diverses applications, en particulier dans le domaine aéronautique. Les techniques telles que les metasurfaces et le couplage capacitif peuvent en effet améliorer significativement les performances des antennes en termes de directivité, de bande passante et de polarisation.

Pour concrétiser mon projet, je peux suivre les étapes que j'ai décrites : concevoir l'antenne en utilisant des techniques avancées, réaliser des tests expérimentaux pour valider ses performances (par exemple

en utilisant un Analyseur de Réseau Vectoriel), et enfin implémenter l'antenne sur un Software Defined Radio (SDR) pour des expérimentations pratiques.

Le domaine de l'aéronautique offre en effet de nombreuses opportunités pour l'application de nouvelles technologies en communication, navigation, surveillance et gestion du trafic aérien. En combinant mes intérêts pour les antennes avancées et le domaine aéronautique, je pourrais contribuer de manière significative au développement de solutions innovantes dans ce secteur. Je vais continuer à explorer davantage ces domaines et à approfondir mes connaissances et expertises dans ce domaine passionnant.

Références

- [1] IEEE. (1990). IEEE Standard Test Procedures for Antennas (ANSI) (IEEE Std 149-1979).
- [2] *Histoire d'antenne systems*. (2018, 15 septembre). CenRF Communications Limited.
<http://fr.cenrf.org/news/history-of-antenna-systems-18718670.html>
- [3] LUXEY, C., STARAJ, R., KOSSIAVAS, G., & PAPIERNIK, A. (2007). Antennes imprimées. *Techniquesdel'Ingénieur*.
<https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/electronique-photonique-th13/antennes-42280210/antennes-imprimees-e3310/contexte-e3310niv10001.html>
- [4] *Antenna Basics : working principle, types, and applications*. (2020, 28 février). Maker Rro.
<https://maker.pro/blog/antenna-basics-working-principle-types-and-applications>
- [5] Bitchikh, M. (2014). *Les antennes ultra large bande dans le domaine des communications mobiles* [Thèse de doctorat en électronique].
- [6] Balanis, C. A. (2016). *Antenna Theory Analysis and Design*. John Wiley & Sons, Inc.
- [7] BTS UBA. (s.d.). Paramètres et comportement d'une antenne. Récupéré de
https://www.bts.uba.be/articles_pour_site_web/parametres_et_comportement_d_un_antenne_1.pdf
- [8] Smolders, A. B., Visser, H. J., & Johannsen, U. (2019, November). *Modern Antennas and Microwave Circuits -- A complete master-level course*. Publication. ResearchGate.
- [9] Abdullahi, S. B., & Kabir, A. M. (2019, juin). Revue des techniques d'alimentation pour l'antenne patch micro-ruban. *International Journal of Computer Applications*, 178(27).
- [10] Melad, O. (2010, août). *Conception et Analyse des Antennes Patch Microstrip Triangulaires pour les Systèmes de Communication sans Fil* (Thèse de master, Université de Waterloo, Canada).
- [11] *Élargissement de la bande passante*. (s. d.). *Techniques de L'Ingénieur*.
<https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/electronique-photonique-th13/antennes-42280210/antennes-imprimees-e3311/elargissement-de-la-bande-passante-e3311niv10001.html>
- [12] *Miniaturisation de l'antenne PATCH sous CST*. (2018). [Mémoire de maîtrise, Université Mouloud MAMMARI de Tizi-Ouzou].
<https://dspace.ummo.dz/server/api/core/bitstreams/c28dcd7-c245-4c49-b5f4-d044a43fce39/content>
- [13] *MODÉLISATION D'UNE ANTENNE PATCH RÉALISÉE SUR UN SUBSTRAT à TENSEURS DE PERMITTIVITÉ ET DE PERMÉABILITÉ DIAGONAUX*. (2009). [Mémoire de maîtrise, Université de Batna]. <http://eprints.univ-batna2.dz/1189/1/inj%20HASSAD%20MOURAD.pdf>
- [14] Wittevrongel, S. (2020). *Nouvelles antennes à profil bas multi-standards pour application aéronautique* [Mémoire de maîtrise, Polytechnique Montréal]. PolyPublie.
<https://publications.polymtl.ca/5356/>
- [15] Rufail, L. M. (2012). *Antenne Bande L, multifonctionnelle et à profil bas pour*

application en aérospatiale [Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal]. PolyPublie.

<https://publications.polymtl.ca/907/>

[16] *Transpondeur/TCAS II*. (s. d.). <https://www.lavionnaire.fr/TCASDescription.php>