

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université de Blida 1
Institut d'Aéronautique et des Etudes Spatiales
Département d'études spatiales



Projet de fin d'études
En vue de l'obtention d'un diplôme de Master en Aéronautique
Option : Télécommunications Spatiales

Thème

Conception d'une antenne directive large bande pour des applications aérospatiales

Réalisé par :

Chikhi Rayane

Encadré par :

Dr Lila Mouffok

Année Universitaire : 2019/2020

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Dédicaces

Je voudrais dédier ce travail à mes parents,

A mon père qui m'a encouragé à ne jamais baisser les bras

A ma mère qui m'a appris à être forte

A mon frère et ma sœur

A toute ma famille

*A mes amis qui m'ont toujours soutenu et qui ont été là pour
m'aider*

Et à toutes les personnes qui ont toujours cru en moi

Remerciements

En préambule à ce mémoire je voudrais d'abord remercier ALLAH grâce à qui je suis là aujourd'hui, il nous guide, nous donne la foi et le courage de toujours aller de l'avant et nous aide à atteindre nos objectifs.

Je tiens également à remercier toute personne qui m'a apporté son soutien durant mon cursus universitaire au sein de l'institut d'Aéronautique et des Etudes Spatiales.

Merci aux gens qui ont cru en moi, qui m'ont toujours poussé à donner le meilleur de moi-même, et qui m'ont toujours donné de la force, ainsi qu'à ceux qui ont apporté une quelconque aide pour l'accomplissement de ce travail, spécialement Safia Chenaoui.

Un grand et chaleureux merci à ma promotrice Dr Lila Mouffok que j'admire beaucoup pour son parcours, son travail et son dévouement lors de ses séances de cours, je la remercie pour ses précieux conseils et de m'avoir appris que dans la vie il faut travailler dur pour avoir ce que l'on désire. Sans oublier son aide précieuse pour la réalisation de ce projet.

Mes remerciements aux membres du jury pour l'intérêt porté à ce travail et d'avoir accepté de l'examiner.

Je n'oublie pas de remercier les personnes les plus importantes à mes yeux et sans qui je ne serais pas là où je suis aujourd'hui, mes parents qui m'ont toujours encouragé à ne jamais baisser les bras, ils ont été là pour moi et m'ont donné tout l'amour et les moyens pour réussir à atteindre mes objectifs.

Merci au personnel de la Flight Inspection Unit de l'établissement national de la navigation aérienne ENNA qui m'ont bien accueilli parmi eux et m'ont donné toutes les informations dont j'avais besoin pour la rédaction d'une partie de ce mémoire.

Pour finir je tiens à rajouter cette citation de Ghandi qui m'a toujours inspiré : " Be the change you want to see in the world".

"Happiness can be found even in the darkest of times, if one only remembers to turn on the light". Albus Dumbledore.

Résumé

L'objectif de ce travail est de concevoir une antenne large bande de type bowtie directive à faible épaisseur. Pour ce faire des réflecteurs à conducteurs magnétiques artificiels (AMC) ont été introduit.

Afin de réaliser ce travail, on a utilisé le logiciel de simulation électromagnétique CST Microwave Studio Suite. Les résultats obtenus montrent que la structure antennaire proposée présente un gain réalisé stable dans la direction en broadside de valeur supérieur à $G_{max} -3dB$ dans la bande allant de 3.5 à 5.75 GHz.

Abstract

The objective of this work is to design a broadband antenna bowtie type, directive low thinckness. To do this, reflectors with artificial magnetic conductors (AMC) have been introduced.

In order to carry out this work, we used the electromagnetic simulation software CST Microwave Studio Suite. The results obtained show that the proposed antenna structure has a stable gain achieved in the broadside direction of a value greater than $G_{max} -3dB$ in the band going from 3.5 to 5.75 GHz.

ملخص

الهدف من هذا العمل هو تصميم هوائي واسع النطاق على شكل فراشة، يكون ذات توجيه و رقيق للقيام بذلك، تم إدخال عاكسات ذات موصلات مغناطيسية اصطناعية (AMC).

لتنفيذ هذا العمل، استخدمنا برنامج المحاكاة الكهرومغناطيسية CST Microwave Studio Suite. أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها أن هيكل الهوائي المقترح له كسب مستقر تم تحقيقه في الاتجاه العريض لقيمة أكبر من $G_{max} -3dB$ في النطاق من 3.5 إلى 5.75 جيجاهرتز.

Table des matières

Dédicaces	3
Remerciements.....	4
Résumé.....	5
Liste des figures	8
Liste d'acronymes	10
Introduction générale.....	13
Chapitre I : Les systèmes de navigation et de communication	15
I.1 Introduction	15
I.2 Les Systèmes CNS	15
I.2.1 Navigation	15
I.2.2 Surveillance	17
I.2.3 Communication	20
I.3 Les Systèmes satellitaires	20
I.3.1 La télécommunication	20
I.3.1.1 Transmission satellitaire	21
I.3.1.2 Bandes de fréquences	21
I.3.1.3 Techniques de télécommunication par satellite	22
I.3.2 La navigation	23
I.3.3 L'aérospatial	25
I.4 Conception d'antennes pour satellites	27
I.4.1 Antenne CubeSat	27
I.4.2 Antennes aéronautiques et maritimes	30
I.4.2.1 INMARSAT_A, B et F	31
I.4.2.2 INMARSAT_C	32
I.4.2.3 INMARSAT_M	33
I.4.2.4 INMARSAT_AERO	34
I.4.2.5 Station terrienne mobile terrestre	35

I.5 Conclusion.....	36
Chapitre II : Les EBG et état de l'art sur les antennes large bande avec AMC.....	38
II.1 Introduction	38
II.2 Caractéristiques des antennes	38
II.2.1 Paramètres S.....	38
II.2.2 Rayonnement	39
II.3 EBG	40
II.3.1 Définition	40
II.3.2 Application des EBG en ingénierie d'antennes.....	41
II.3.3 AMC.....	42
II.4 Etat de l'art sur les antennes larges bande avec AMC	46
II.5 Conclusion.....	51
Chapitre III : Conception d'une antenne large bande à conducteur magnétique artificiel.....	53
III.1 Introduction	53
III.2 CST Microwave Studio Suite	53
III.3 Antenne bowtie à balun intégré	53
III.4 Conception des cellules AMC	56
III.5 Antennes bowtie sur AMC	58
III.6 Etude paramétrique	59
III.6.1 Influence du paramètre L_p	59
III.6.2 Influence du paramètre W_p	60
III.6.3 Influence du paramètre L_{cps}	61
III.6.4 Influence du paramètre W_{cps}	62
III.6.5 Influence du paramètre gap	63
III.7 Structure optimisée.....	64
III.8 Conclusion.....	67
Conclusion générale et perspectives.....	68
Références.....	69

Liste des figures

Figure 1 : Système de l'ADS-B in et ADS-B out	19
Figure 2 : Communication satellitaire	21
Figure 3 : Schéma synoptique d'une transmission VSAT	22
Figure 4 : Schéma d'une communication satellitaire avec l'avion.....	26
Figure 5 : Vue des satellites MarCO à proximité de Mars	29
Figure 6 : InSight à la surface de Mars	29
Figure 7 : Vue de la sonde MRO	29
Figure 8 : Les réflecteurs déployables	30
Figure 9 : L'antenne UHF	30
Figure 10 : RainCube en orbite.....	30
Figure 11 : Photographie de l'équipement au-dessus du pont (ADE) installé sur un navire. L'antenne est recouverte d'un radôme.....	31
Figure 12 : Une antenne à l'intérieur d'un radôme.....	31
Figure 13 : Photographie de l'équipement sous le pont (BDE) installé dans une cabine de navire	32
Figure 14 : Le terminal INMARSAT-C pour un petit navire	33
Figure 15 : Une antenne SBF (Short Backfire) améliorée	34
Figure 16 : Photographie d'une antenne à faible gain avec un HPA de classe C et un DIP / LNA.	35
Figure 17 : Photographie d'une antenne à gain élevé avec un HPA et un DIP / LNA	35
Figure 18 : Tensions et courants appliqués à un quadripôle.....	38
Figure 19: Structures EBG périodiques.....	41
Figure 20: Conception d'une antenne résonante à gain élevé utilisant une structure EBG [15]..	42
Figure 21: Cellules AMC	43
Figure 22: Structure de Sievenpiper.....	44
Figure 23: (a) Section de la surface champignon, (b) circuit équivalent	44
Figure 24: Exemple de diagramme de la phase du coefficient	45
Figure 25: Types de CMA [18].....	46
Figure 26: Géométrie de l'antenne bowtie et de l'antenne composite.....	46
Figure 27: Photographie du plan AMC.....	47
Figure 28: Cellule unitaire de la structure AMC proposée	47
Figure 29: L'antenne Bowtie [22].....	48
Figure 30: Élément du prototype fabriqué, (a) double antenne Bowtie, (b) disposition des cellules unitaires AMC, (c) prototype Bowtie AMC	49

Figure 31: Antenne dipôle diamant	49
Figure 32: Antenne finale avec un réflecteur hybride.....	50
Figure 33: Géométrie des trois types d'antennes à fente. (a) Antenne à fente 1, (b) Antenne à fente 2 et (c) la structure proposée	50
Figure 34: Vues de dessus et de côté de l'antenne composite	51
Figure 35 : design d'une antenne bowtie	54
Figure 36: Configuration de la ligne de transmission, du balun et de l'antenne	54
Figure 37: Dimension de la structure de l'antenne bowtie et du balun (b) [27].....	55
Figure 38: Gain réalisé maximum de l'antenne avec balun [26].....	55
Figure 39: Diagrammes de rayonnement de l'antenne	56
Figure 40: Conditions aux limites de la structure AMC.....	56
Figure 41: Conditions aux limites d'une structure	57
Figure 42: Distance de champ lointain dans le port du guide d'ondes	57
Figure 43: Cellule AMC.....	58
Figure 44: Phase du coefficient de réflexion	58
Figure 45: Antenne bowtie placée sur 8*5 Cellules AMC	59
Figure 46 : Coefficient de réflexion pour différentes valeurs de L_p	60
Figure 47: Gain en broadside pour différentes valeurs de L_p	60
Figure 48: Coefficient de réflexion pour la variation de W_p.....	61
Figure 49: Gain en broadside pour la variation de W_p	61
Figure 50: Coefficient de réflexion pour les valeurs de L_{cps}	62
Figure 51: Gain maximum pour les valeurs de L_{cps}	62
Figure 52: Coefficient de réflexion pour différentes valeurs de W_{cps}	63
Figure 53: Gain broadside pour différentes valeurs de W_{cps}.....	63
Figure 54: Coefficient de réflexion pour la variation du gap	64
Figure 55: Gain en broadside pour la variation du gap.....	64
Figure 56: Structure optimale de l'antenne bowtie avec AMC, Substrat 1 avant/arrière (a) , Substrat 2 avant arrière (b).....	65
Figure 57: Coefficient de réflexion de la structure optimisée.....	65
Figure 58: Gain en broadside de l'antenne avec et sans AMC.....	66
Figure 59: Les diagrammes de rayonnement directifs de la structure optimisée à 3.25 GHz, 3.5 GHz, 4 GHz, 4.5 GHz, 5 GHz et 5.75 GHz.....	66

Liste d'acronymes

ADSL	Asymmetric Digital Subscriber Line
ADE	Above Deck Equipment
ADF	Automatic Direction Finder
ADS-B	Automatic Dependent Surveillance Broadcast
AES	Aeronautical Earth Station
AMC	Artificial Magnetic Conductor
ATC	Air Traffic Controller
BALUN	BALanced to UNbalanced
BDE	Below Deck Equipment
CAN	Convertisseur Analogique Numérique
CNA	Convertisseur Numérique Analogique
CNS	Communication Navigation Surveillance
CMA	Conducteur Magnétique Artificiel
CPW	CoPlanaire Waveguide
CST	Computer Simulation Technology
DIP	Duplexer
DME	Distance Measuring Equipment
EHF	Extremely High Frequency
ES	Extended Squitter
FAA	Federal Aviation Administration
FDTD	Finite Difference Time Domain
FIT	Finite Integration Technic

GES	Ground Earth Station
GLONASS	Globalnaya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
GSM	Global System for Mobile communications
HF	High Frequency
HPA	High Power Amplifier
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
ILS	Instrument Landing System
INMARSAT	INternational MARitime SATellite Organization
INSIGHT	INterior exploration using Seismic Investigation, Geodesy and Heat Transport
JPL	Jet Propulsion Laboratory
LEO	Low Earth Orbit
LF	Low Frequency
LNA	Low Noise Amplifier
LNB	Low Noise Block
MARCO	MARs Cube One
MES	Mobile Earth Station
MF	Medium Frequency
MRO	Mars Reconnaissance Orbiter
MWS	MicroWave Studio
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NCS	Network Coordination Station
NDB	Non directionnal beacon

OMERA	One Meter Reflectarray
PEC	Perfect Electric Conductor
PMC	Perfect Magnetic Conductor
PSR	Primary Surveillance Radar
RADAR	RADio Detection And Ranging
RAINCUBE	Radar In a CubeSat
SBF	Short BackFire
SHF	Super High Frequency
SMA	SubMiniature version A
SMS	Short Message Service
SSR	Secondary Surveillance Radar
UHF	Ultra High Frequency
ULF	Ultra Low Frequency
VDL	VHF Data Link Mode 4
VHF	Very High Frequency
VLF	Very Low Frequency
VOIP	Voice Over Internet
VOR	VHF Omnidirectional Range
VSAT	Very Small Aperture Terminal

Introduction générale

Dans le domaine aérospatial, l'utilisation d'antennes est primordiale, étant un dispositif indispensable pour la transmission et la réception de données entre l'avion ou le satellite et la station au sol. Les télécommunications sont en évolution continue ce qui permet la conception et l'optimisation de ces antennes, les plus utilisées étant les antennes micro-ruban car elles sont légères, épaisses, simples à fabriquer avec un volume et un coût faibles. En effet, l'un des objectifs principaux dans l'intégration de systèmes large bande dans les avions est de diminuer la taille et le nombre d'antenne car le volume disponible est assez restreint. Ces antennes sont très utiles pour les transmissions haut débit, cependant elles restent limitées côté bande passante, gain et directivité. De plus pour des raisons de compatibilité électromagnétique, les antennes présentes sur un avion ne doivent pas interférer avec les autres systèmes de bord et par conséquent ne rayonner qu'à l'extérieur de l'avion, c'est pour pourquoi il est indispensable que l'antenne soit directive.

Pour répondre à ces exigences, il est nécessaire d'intégrer des méta-matériaux tel que les EBG (Electromagnetic Band Gap) ou les AMC (Artificiel Magnetic Conductor), connus comme étant des surfaces à haute impédance, leur structure permet de rendre l'antenne directive, en éliminant les rayonnements, et en garantissant une faible épaisseur.

L'objectif de ce travail de mémoire est de concevoir une antenne large bande de type bowtie en y intégrant des AMC. Ces méta-matériaux apporteront une amélioration du gain de l'antenne, tout en ayant une faible épaisseur. Cependant, les AMC présentent un fonctionnement bande étroite. Le challenge est de permettre un fonctionnement sur une large bande.

Ce mémoire est organisé en trois chapitres, le premier chapitre définit les différents systèmes de navigation et de communication dans le domaine aérospatial, avec un descriptif des antennes utilisées par ces systèmes. Le deuxième chapitre passe en revue les caractéristiques des antennes et des AMC avec un état de l'art sur les antennes large bande utilisant les AMC.

Le troisième chapitre présente la conception d'une antenne bowtie directive large bande en utilisant des réflecteurs AMC dans une bande de fréquence allant de 3.5 GHz à 5.75GHz en utilisant le logiciel de simulation CST Microwave Studio Suite.

CHAPITRE 1 : Les systèmes de navigation et de communication

Chapitre I : Les systèmes de navigation et de communication

I.1 Introduction

De nos jours, avec l'augmentation du nombre d'avions en vol, les systèmes de communication et de navigation sont essentiels pour un vol sûr et réussi. Ces systèmes sont constamment en progression, ce qui a permis des appareils plus petits, plus légers et plus puissants afin de faciliter le travail du pilote.

Dans ce chapitre, on présentera les systèmes qui permettent de guider un avion que ce soit à l'aide du système CNS ou grâce aux systèmes satellitaires. On s'intéressera également aux antennes et à leurs caractéristiques.

I.2 Les Systèmes CNS

Afin de guider un avion de l'aéroport de départ à l'aéroport d'arrivée de manière sûre rapide et efficace, un système de gestion du trafic aérien est nécessaire. Le service de contrôle de la circulation aérienne ATC assure cette mission grâce aux moyens CNS : Communication, Navigation et Surveillance.

I.2.1 Navigation

Les instruments de radionavigation sont des aides radioélectriques qui utilisent des stations au sol ou des satellites pour fournir des indications fiables sur la position de l'avion en tout point de l'espace et lui permettre de naviguer en sûreté. Ceci est assuré par :

a) Le NDB :

Les balises NDB sont parmi les plus vieux types d'aide à la navigation par onde radio. Une balise NDB est un radiophare non directionnel équivalent à un phare dans la marine.

Ce système utilise, à bord de l'avion, un récepteur radio ADF (radio compas), qui permet de naviguer vers une station NDB et de suivre une route.

Mais ce système n'est plus très utilisé car il présente des inconvénients (1) :

-Sensibilité aux orages : l'ADF s'oriente vers la source des éclairs au lieu de la station. Lors d'orages électriques, l'aiguille aura tendance à se diriger par intermittence vers la source orageuse.

-Effet côtier : en vol au-dessus de la mer, les signaux émis depuis la côte à un angle inférieur à 30° ne sont pas fiables.

-Erreur de roulis : erreur de l'antenne réceptrice pendant les virages.

-Effet de nuit : mauvaise fiabilité des signaux juste avant le coucher et juste avant le lever du soleil.

-Effet de montagne : réflexion et déviation des signaux, peut aussi être produit par la réflexion des signaux contre des falaises.

b) Le VOR :

C'est un système de positionnement radioélectrique à courte et moyenne distance, il permet de déterminer l'information de l'azimut par rapport au nord magnétique.

Les inconvénients du VOR :

-La portée est plus réduite que les stations NDB.

-Le rayonnement est stoppé par les montagnes et les gros obstacles.

-Sa mise en place au sol est plus complexe et nettement plus coûteuse que celle d'un NDB.

Cependant, il présente une précision angulaire de 1° à 5° et une consommation en énergie plus faible que le NDB, ainsi qu'un relèvement magnétique de position par rapport à la balise.

c) Le DME :

Il permet d'afficher dans un avion la distance oblique qui le sépare de l'antenne DME au sol. Il est généralement associé au VOR ce qui permet de connaître la position exacte de l'aéronef.

d) L'ILS :

C'est un système d'aide à l'atterrissage, il permet une approche de précision en offrant un guidage dans les plans vertical et horizontal jusqu'au seuil. Il se compose de :

-Le Localizer : système de guidage horizontal, il permet au pilote de savoir s'il est sur l'axe de piste (trop à droite ou trop à gauche).

-Le Glide path (Glide Slope) : système de guidage vertical, il permet de savoir si l'avion descend avec le bon angle (trop haut ou trop bas).

-Un système d'identification par code morse attaché au glide. Il permet de savoir si on approche du bon aéroport, et si l'ILS fonctionne correctement.

Depuis les années 2000, un nouveau système de navigation est apparu, basé sur les satellites ; le GNSS. Ce dernier a permis de minimiser les interférences.

Dans les applications aéronautiques, civiles et commerciales, le GPS n'est pas, à ce jour, homologué comme capteur primaire de navigation. Les organismes internationaux de sécurité aérienne considèrent que le manque d'intégrité du système le rend vulnérable et trop dépendant du gouvernement américain. Néanmoins, le GPS trouve place en aéronautique commerciale comme capteur secondaire associé aux moyens classiques : VOR-DME.

I.2.2 Surveillance

La surveillance permet de détecter les avions et de déterminer leur position afin de permettre au contrôleur aérien d'effectuer les séparations minimales entre eux.

En aéronautique, l'ATC utilise principalement les radars afin de repérer, suivre et guider les aéronefs. Il en existe plusieurs types tel que : le radar primaire (PSR) et le radar secondaire (SSR), cependant chacun possède des inconvénients par rapport à l'autre.

a) PSR :

Le PSR est un radar indépendant qui ne nécessite aucun instrument à bord de l'avion, il permet de le repérer avec une bonne précision.

Inconvénients :

- La cible est détectée mais non identifiée.
- Il ne donne aucune information sur l'altitude.
- Mauvaise détection pendant les précipitations.
- Matériel très coûteux.

b) SSR :

C'est un radar coopératif qui nécessite un transpondeur à bord de l'avion, il permet de déterminer l'identification de l'aéronef ainsi que son altitude.

Inconvénients :

- Chevauchement des réponses du transpondeur quand les avions sont proches.
- Réponses asynchrones reçues par une station sol alors que l'avion répondait à un autre radar.
- Moins de précision.

L'arrivée de l'ADS-B a permis de corriger les défauts des radars, cette technologie permettra aux pilotes de bénéficier d'une meilleure visibilité sur le trafic aérien environnant, que ce soit dans les airs ou au sol.

c) ADS-B :

C'est une technologie en cours de déploiement dans le monde, elle est automatique car l'avion envoie automatiquement des données au contrôleur aérien, tel que sa vitesse, son cap, son identification, sa position... etc. L'ADS est dépendant des moyens embarqués, il nécessite une antenne à bord de l'avion et une antenne au sol. De plus il permet d'effectuer la surveillance en aéronautique via des satellites GNSS. Comme le montre la **Figure 1**. Son principe de fonctionnement est que l'avion calcule sa propre position, et l'envoie, ainsi que d'autres informations, régulièrement par radio sans besoin d'établir une connexion c'est ce qui est appelé le mode diffusion. La cadence d'émission de la position dépend de la phase du vol, par exemple toutes les dix secondes en route et toutes les secondes en approche.

L'ADS-B est une évolution directe du Mode S de réponse aux interrogations des radars secondaires. Il en partage ainsi les différentes caractéristiques techniques au niveau de la transmission du signal.

En ce qui concerne la bande de fréquence, c'est celle de 1090 MHz du Mode S qui est utilisée. Elle est nommée Extended Squitter (ES), par opposition au squawk que désigne le "S" du Mode S. On parle d'Extended squitter, car l'ADS-B est capable d'émettre bien plus d'informations que le pouvait le Mode S. (2) .

L'ADS-B utilise aussi le mode de communication VDL-4, qui fonctionne dans la bande VHF pour les équipements de navigation (108-118 MHz). Le VDL-4 permet la surveillance ADS-B ainsi que la communication entre contrôleur et pilote.

Il existe deux types d'ADS-B : l'ADS-B out, l'avion transmet les données reçues par le satellite vers l'ATC. Ainsi que l'ADS-B in, qui permet l'échange d'informations entre les avions, cependant il n'est pas encore très répandu dans le monde car l'administration fédérale de l'aviation (FAA) a mandaté uniquement l'ADS-B out pour être installé à partir du 1^{er} janvier 2020 sur tous les avions qui nécessitent un transpondeur, tandis que l'ADS-B in n'est pas mandaté par la règle finale ADS-B.

Avantages de l'ADS-B :

- Minimiser les charges du trafic aérien en réduisant les distances entre les aéronefs.
- Plus d'informations sur l'avion (position, altitude, cap...).
- Moins coûteux que les radars.
- Données envoyées automatiquement, nul besoin d'interrogations.
- Structure de l'ADS-B moins complexe que celle du radar.
- Il est plus précis que les radars.
- Couverture dans les zones océaniques et désertiques non équipées de radar.
- Réduire la charge du contrôleur aérien.
- Sécurité renforcée.

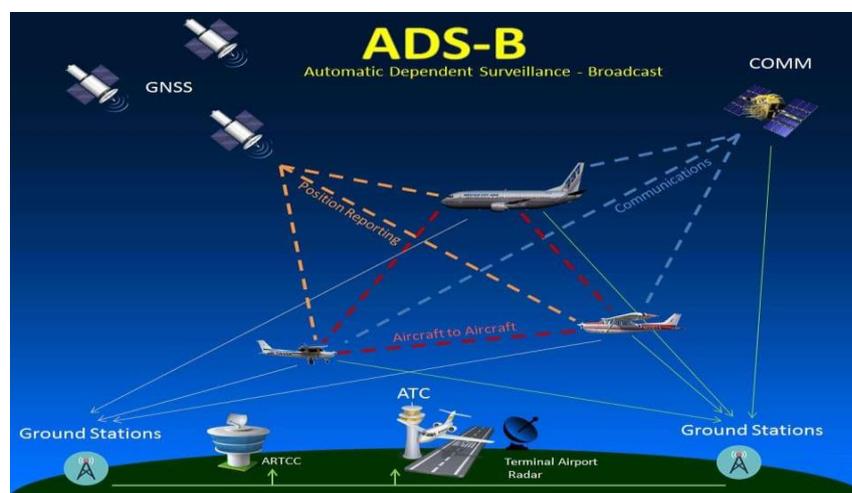


Figure 1 :Système de l'ADS-B in et ADS-B out

I.2.3 Communication

En aéronautique, le contrôleur aérien communique avec l'avion via des liaisons VHF (fréquence entre 30 et 300 MHz), et parfois des liaisons HF pour les zones océaniques. L'aéronautique utilise une combinaison d'infrastructures terrestres et satellitaires, la technologie VSAT est utilisée pour assurer la connectivité des systèmes de communication, navigation et de surveillance (CNS) des services de la circulation aérienne, parce que l'infrastructure actuelle des télécommunications terrestres n'y existe pas ou n'est pas fiable. La technologie VSAT basée sur la bande C a fourni une plate-forme qui a permis d'éliminer les carences des communications avec les États voisins. Elle est utilisée aussi pour assurer des liaisons VHF, radar, DME et VOR entre sites et centres de contrôle isolés, il est envisagé d'utiliser l'infrastructure VSAT existante pour assurer des services de renforcement du GNSS par liaison de données.(3).

Les VSAT vont permettre d'offrir une qualité de service tout en optimisant les installations existantes pour réduire le coût de certaines charges externes.

I.3 Les Systèmes satellitaires

Un satellite artificiel est un engin construit par l'homme et mis en orbite dans l'espace afin de graviter autour d'un astre, en particulier la terre. Il existe plusieurs types de satellites selon le domaine de leur application, pour la météorologie, les télécommunications, la surveillance, l'observation de la terre, la télédétection, la navigation...etc.

I.3.1 La télécommunication

Un satellite de télécommunication est un satellite artificiel placé en orbite géostationnaire, orbite basse ou orbite de Molnia. Il reçoit les données envoyées depuis un endroit de la terre via une liaison montante (Uplink) et les retransmet vers un autre endroit sur terre via une liaison descendante (Downlink) après traitement, comme le montre la **Figure 2**.

Il est utilisé pour la transmission de données, les communications téléphoniques, pour la diffusion de chaînes télévisées ou chaînes radio, ainsi que pour fournir un accès à internet.

Un satellite de télécommunication est constitué de dispositifs d'émission réception radioélectriques associés à des antennes et d'amplificateurs à gain élevé. Il constitue le "segment spatial" de la liaison bilatérale établie à la demande des utilisateurs.

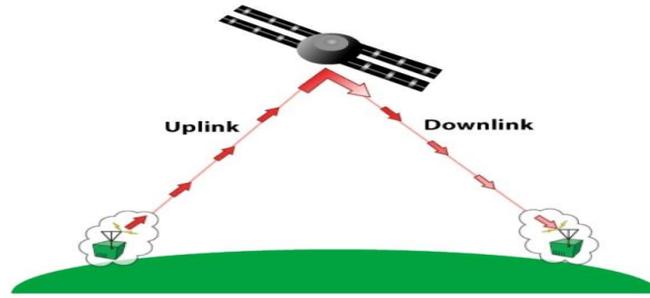


Figure 2 : Communication satellitaire

I.3.1.1 Transmission satellitaire

De nos jours, la nécessité de communication à travers le monde a augmenté, c'est pour cette raison que les moyens de transmission ont connu une grande amélioration.

En télécommunication, il est essentiel de moduler le signal source avant de le transmettre grâce à une porteuse haute fréquence afin d'adapter ses propriétés électriques et spectrales à celles du canal de transmission. Le signal émis va donc subir une série de transformations avant d'arriver jusqu'au satellite, d'abord il sera converti de signal analogique à numérique, puis codé, compressé et enfin modulé. Une fois reçu par le satellite, il sera traité et renvoyé vers le destinataire qui fera le processus inverse pour reconstituer le signal.

I.3.1.2 Bandes de fréquences

Les canaux de transmission sont classifiés en fonction de la bande de fréquence dans laquelle ils sont exploitables. (4).

Bande	Fréquence (Hz)	Application
L	1-2	GPS, téléphonie mobile par satellite (Iridium, Inmarsat...), transmission de données
S	2-4	Radar météo, radar maritime, broadcasting, transmission de données sur terminaux mobiles
C	4-8	Diffusion des signaux TV dans les zones tropicales
X	8-12	Radars civils et militaires
Ku	12-18	Télécommunications par satellites En Europe, diffusion TV

K	18-27	Télécommunication par satellite haut débit, radar de courte distance
Ka	27-40	

Tableau 1 : Classification des bandes de fréquence et leurs applications

I.3.1.3 Techniques de télécommunication par satellite

Parmi les techniques de télécommunication par satellite, on distingue :

a-VSAT (Very Small Aperture Terminal)

VSAT ou terminal à très petite ouverture, désigne une technique de communication bidirectionnelle par satellite qui utilise au sol des antennes paraboliques directives dont le diamètre est inférieur à 3 mètres et qui visent un satellite géostationnaire.

Le VSAT permet d'interconnecter un réseau grâce à une petite antenne parabolique en émission et en réception, et a la capacité de couvrir les zones les plus isolées. Il est constitué de trois parties principales représentées dans la **Figure 3**:

-Le hub : il s'agit du cœur du réseau. Le hub, installé au sol, dispose d'une antenne ayant un diamètre compris entre 5 m et 7 m.

-Le satellite : c'est un relais hertzien.

-Les stations distantes : elles constituent le réseau des infrastructures à interconnecter, c'est-à-dire les terminaux qui vont communiquer via le satellite selon des liaisons point à point ou multipoints.

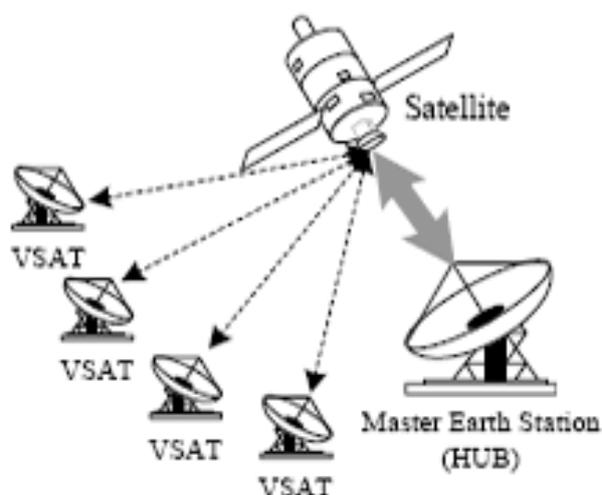


Figure 3 : Schéma synoptique d'une transmission VSAT

b-Internet par satellite

Dans les zones mal desservies par l'ADSL et les technologies permettant d'accéder au très haut débit, l'internet par satellite peut constituer une alternative très intéressante. C'est une connexion internet haut débit qui ne s'effectue pas par une ligne téléphonique ni un autre moyen de communication terrestre, mais par le biais de satellites de communication. Cette connexion bidirectionnelle permet l'émission et le téléchargement des données entre internet et un ordinateur, le satellite fait partie des solutions d'accès total au même titre que l'ADSL, les solutions câblées ou d'autres technologies.

c-Visioconférence par satellite

La vidéo conférence permet à deux ou plusieurs personnes de se voir face à face et de se parler en temps réel à partir de sites différents, c'est une technologie incontournable pour la formation, la recherche ou toutes réunions distantes. La téléconférence audiovisuelle en mode dialogue assure le transfert bidirectionnel, en temps réel, du son et de l'image animée en couleur entre des groupes d'utilisateurs situés en deux ou plusieurs emplacements distincts.

Les satellites de télécommunication ont permis l'accès à de multiples services à travers le monde, tel que la téléphonie, l'internet, la visioconférence, la diffusion télévisée et radio. Parmi ces satellites on distingue : Intelsat, Iridium, Eutelsat, Inmarsat, Thuraya, ainsi que le satellite Algérien Alcomsat-1 qui a été lancé en 2017 et est destiné à la diffusion de 300 chaînes de télévision et radio ainsi qu'à fournir l'internet et la visioconférence.

1.3.2 La navigation

Afin de déterminer la position 3D et la vitesse d'un récepteur à tout moment, et en n'importe quel point de la planète, un système de positionnement par satellite est nécessaire. Ce système est appelé GNSS. Le système global de navigation par satellite comprend de nos jours les systèmes de positionnement par satellites tels que le GPS (États Unis), Galileo (Union Européenne), Glonass (Russie), Compass ou Beidou (Chine).

La couverture du globe terrestre exige un nombre suffisant de satellites pour garantir la couverture ; donc il est nécessaire de connaître les satellites en vision pour l'utilisateur ce qui exige une acquisition de ces signaux avec une vitesse rapide pour assurer un bon service en temps très réduit et permettre au récepteur de travailler en temps réel.

En 1959 est lancé le premier satellite de radio navigation TRANSIT. Les différentes technologies utilisées pour ce programme ont été utiles pour le futur système GPS et ont démontré leurs fiabilités. Depuis la mise en place du système GPS au cours des années 1980-1990, les applications de navigation par satellite se développent et s'étendent dans de multiples domaines. Conçus principalement pour des applications militaires, les signaux GPS sont maintenant couramment utilisés dans des applications civiles telles que les transports maritimes, aériens et terrestres, la géologie, les travaux publics, la prospection pétrolière, l'agriculture, et de nouvelles applications utilisées dans les douanes et la justice, et sont associés au téléphone mobile.

L'objectif d'un système global de positionnement par satellite est de fournir à un récepteur sa position, sa vitesse de déplacement et l'heure. Pour déterminer la position d'un utilisateur situé dans le voisinage de la terre, les systèmes de radionavigation par satellite utilisent le principe dans lequel la distance géométrique entre un récepteur au sol et un émetteur à bord d'un satellite s'obtient par mesure du temps de propagation d'un signal particulier émis par le satellite.

Les quatre systèmes de positionnement par satellites (GPS, Glonass, Galileo et Beidou) utilisent le même principe de fonctionnement : chaque satellite émet en permanence un signal transportant une information sur la position du satellite et l'heure précise de l'émission (déterminée par une horloge atomique ultra-précise embarquée dans le satellite) ; l'utilisateur est équipé d'un récepteur, qui mesure les instants de réception des signaux provenant des satellites dans son champ de visibilité.

La détermination de la position du récepteur consiste en la résolution d'une équation à quatre inconnues : la position géographique du récepteur (latitude, longitude), son altitude et le biais de l'horloge de mesure du récepteur. Il faut donc quatre satellites « visibles » pour déterminer une position

Pour que le récepteur fonctionne sur toute la surface du globe, il faut qu'il puisse voir en permanence au minimum 4 satellites. C'est ce qui explique le nombre important des satellites à placer sur orbite : 24 satellites représentent le minimum requis pour le GPS et pour le GLONASS. (5).

Les systèmes de navigation par satellite sont composés de trois segments : le segment spatial, le segment de contrôle et le segment utilisateur.

Prenons par exemple le GPS :

-Le segment spatial : est constitué de 24 satellites opérationnels, lesquels donnent le positionnement et l'heure du réseau GPS. Ses caractéristiques sont résumées dans le **Tableau 2**

Caractéristique	GPS	GLONASS	GALILEO	Beidou/Compass
Altitude	20200 km	19100km	23222km	21528km
Inclinaison	55°	64.8°	56°	55°
Période orbitale	11h58	11h15	14h7	12h53
Nombre de plans orbitaux	6	3	3	3
Nombre de satellites opérationnels	31	24	22	20

Tableau 2: Comparaison des caractéristiques du segment spatial (2017)

-Le segment de contrôle : se compose de stations réparties à travers le monde, qui sont chargées de piloter et de surveiller le système ; elles veillent au maintien des satellites en orbite, procédant le cas échéant à des manipulations et à l'ajustement. Ces stations poursuivent les satellites GPS, téléchargent les données de navigation mises à jour et enregistrent l'état de santé des satellites.

-Le segment utilisateur : comprend les récepteurs GPS, qui reçoivent les signaux des satellites et qui calculent, sur la base des informations transmises, la position tridimensionnelle et la référence temporelle de l'utilisateur.

I.3.3 L'aérospatial

Les communications par satellite offrent une connectivité ultime pour une expérience mondiale cohérente pour l'ensemble des avions, allant de communications sécurisées haute vitesse à la télévision en direct dans la cabine. La sécurité aérienne est rendue possible grâce aux communications de données avec les centres de contrôle au sol à l'aide de la bande C. Les communications avec l'avion lui-même sont possibles à l'aide de la bande L. Ils permettent un large éventail d'utilisations dans le cockpit et la cabine. Il s'agit notamment des communications de sécurité, des mises à jour de la météo et des plans de vol, ainsi que de la

connectivité des passagers pour le courrier électronique, l'accès à internet, les appels téléphoniques VoIP, la messagerie GSM et SMS.

La communication par satellite permet un passage sûr et efficace de l'avion vers sa destination grâce à des informations à jour, y compris l'itinéraire, le trafic aérien et les informations opérationnelles des compagnies aériennes, prenant en charge toutes les applications clés du poste de pilotage.

Lorsqu'un avion est hors de portée de la radio VHF / UHF, comme dans l'espace aérien océanique, les services par satellite permettent le contrôle de la circulation aérienne assisté par satellite (ATC). La capacité d'avoir des communications fiables avec les contrôleurs au sol à tout moment, sur toutes les routes océaniques principales, est une caractéristique de sécurité importante. (6).

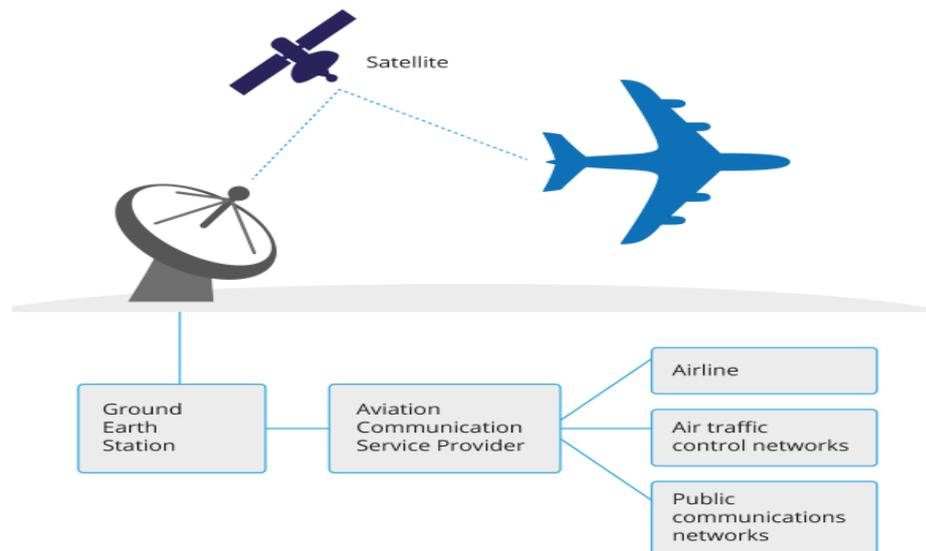


Figure 4 : Schéma d'une communication satellitaire avec l'avion

Les systèmes de navigation classiques ne peuvent plus être perfectionnés, de sorte que le développement futur des procédures de vol passe par l'application de nouvelles techniques, comme la navigation assistée par satellite, qui est plus polyvalente que les systèmes actuels et constitue la base de procédures d'approche et de décollage novatrices.

Ces prochaines années, la navigation par satellite marquera de son empreinte la définition des procédures de vol. C'est en particulier dans l'amélioration de la précision de positionnement que réside le potentiel des nouvelles techniques de navigation.

A partir de l'année 2019, 66 satellites d'Iridium seront opérationnels. Les dix derniers satellites viennent en effet d'être placés en orbite basse (à 780 km d'altitude) par SpaceX. Ce réseau satellitaire va ainsi permettre de localiser avec une grande précision et en temps-réel les avions de ligne où qu'ils se trouvent y compris dans ces zones non couvertes par les systèmes terrestres de contrôle aérien (radars-sol).

Concrètement, les avions émettront de manière automatique et à intervalle régulier des signaux aux satellites qui transmettront leur localisation aux stations-sol, et en cas de situation de détresse, les avions enverront leur position toutes les minutes. Ce système de suivi permettra ainsi une réponse rapide des secours.

I.4 Conception d'antennes pour satellites

L'antenne est l'un des éléments indispensables dans les systèmes de communications sans fil. Elle est définie par le dictionnaire Webster comme un appareil généralement métallique (comme une tige ou un fil) pour émettre ou recevoir des ondes radio. (7).

La définition standard des termes IEEE pour les antennes définit l'antenne comme étant un moyen de rayonner ou de recevoir des ondes radio. En d'autres termes, l'antenne est la structure de transition entre l'espace libre et un dispositif de guidage.

Le dispositif de guidage ou la ligne de transmission peut prendre la forme d'une ligne coaxiale ou d'un guide d'onde, et il est utilisé pour transporter l'énergie électromagnétique de la source d'émission à l'antenne, ou de l'antenne au récepteur. Dans le premier cas, nous avons une antenne d'émission et dans le second une antenne de réception

Différents types d'antennes sont utilisées pour les applications satellitaires. On présentera dans cette partie quelques antennes pratiques relativement récentes.

I.4.1 Antenne CubeSat

Mars Cube One ou MarCO (A et B) sont deux nano-satellites de type CubeSat d'une taille de 36.6cm par 24.3cm par 11.8cm, (8), construits par le JPL de la NASA (voir **Figure 5**) et conçus pour surveiller la sonde spatiale InSight (voir **Figure 6**) qui se trouve sur la planète Mars. MarCO-A et MarCO-B ont réussi à survoler Mars, relayant des données entre la terre et InSight.

Insight est une sonde spatiale conçue par la Nasa pour atterrir sur Mars afin de donner à la planète rouge son premier examen approfondi depuis sa formation il y a 4,5 milliards d'années. C'est le premier explorateur robotique de l'espace extra-atmosphérique à étudier en profondeur « l'espace intérieur » de Mars : sa croûte, son manteau et son noyau. (9).

CubeSats est une technologie viable pour les missions interplanétaires et réalisable sur une courte période de développement, cette démonstration technologique pourrait conduire à de nombreuses autres applications pour explorer et étudier notre système solaire.

La NASA a lancé un vaisseau spatial polyvalent nommé Mars Reconnaissance Orbiter le 12 août 2005 pour faire progresser notre compréhension de Mars grâce à une observation détaillée, pour examiner les sites d'atterrissage potentiels pour les futures missions de surface et pour fournir un relais de communication à haut débit pour ces missions. (10), voir **Figure 7**.

MRO n'est pas proprement aligné, donc InSight va transmettre les données à MRO mais ce dernier ne sera pas en ligne directe (No Line Of Sight) par conséquent, il ne pourra pas envoyer les informations à la terre avant plusieurs heures. Les chercheurs du centre de recherche spatiale de la NASA, JPL, ont eu pour challenge de trouver une solution afin de relayer les informations directement. Cette solution nommée : "bend pipe", signifie que dès la réception des données, elles seront transmises directement à la terre. Sachant qu'InSight communique dans la bande UHF avec MRO, puis MRO transmet à la terre dans la bande X ou K. Cependant recevoir le signal d'un aussi petit équipement fut un challenge. La puissance est limitée (engin très petit, le CubeSat fait $30 * 10 * 20$ cm³). Le CubeSat doit contenir l'alimentation, panneaux solaires, des antennes et aussi une radio qui doit être petite. JPL a développé une radio nommée IRIS. Les CubeSat sont limités en termes de puissance et il n'y a aucun moyen de l'augmenter, donc tout va dépendre de l'antenne. Les chercheurs ont constaté qu'il fallait une antenne qui fasse 3 fois la taille du CubeSat afin d'avoir le gain désiré, mais comme il n'y a pas assez de stockage, ils ont pensé à faire des réflecteurs déployables qui agissent comme les réflecteurs d'une antenne parabolique. Ils ont donc fabriqué trois panneaux pliables les uns sur les autres et disposés d'un côté du satellite, comme illustré dans la **Figure 8**.

Donc d'un côté il y aura l'antenne UHF qui reçoit les données d'InSight et d'un autre côté l'antenne à gain élevé (qui contient les réflecteurs), opérant dans la bande X et relie les données vers la terre. Les petits satellites sont une opportunité pour faire des missions pas chères et dans un temps réduit.



Figure 5 : Vue des satellites MarCO à proximité de Mars



Figure 6 : InSight à la surface de Mars



Figure 7 : Vue de la sonde MRO

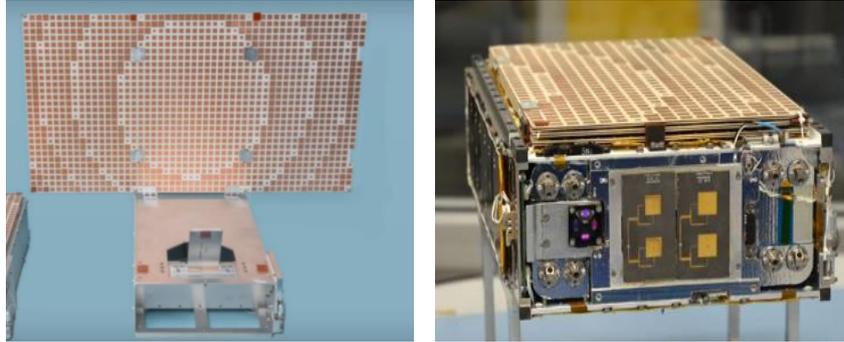


Figure 8 : Les réflecteurs déployables

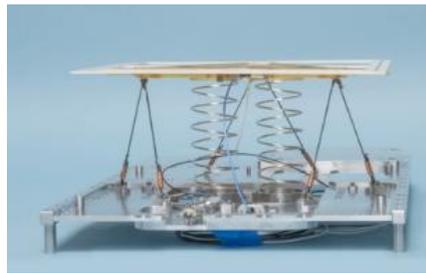


Figure 9 : L'antenne UHF

RainCube est le 1^{er} radar dans un CubeSat développé par la NASA, c'est une mission de démonstration technologique visant à activer les technologies de radar de précipitation en bande Ka sur une plate-forme à faible coût et à rotation rapide, c'est dimensions sont de : 30 x 20 x 10 cm. (11).

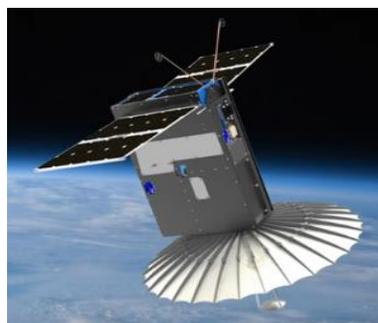


Figure 10 : RainCube en orbite

I.4.2 Antennes aéronautiques et maritimes

INMARSAT est une organisation internationale qui fournit des services de satellites de communication pour les utilisateurs maritimes, terrestres et aéronautiques. Elle a introduit les communications satellitaires aéronautiques pour les passagers à bord et les communications pour les compagnies aériennes. (12).

Les antennes INMARSAT sont généralement des antennes paraboliques en raison de leurs caractéristiques électriques et mécaniques (avec un gain de 20-23 dBi).

I.4.2.1 INMARSAT_A, B et F

Ce système est généralement installé sur un navire, il est composé de deux parties :

L'ADE est un équipement qui consiste en une antenne, un support, un LNA, un HPA (amplificateur de puissance), un duplexeur (DIP), un stabilisateur et un contrôleur d'antenne.

Voir **Figure 11**.

Le BDE est un équipement qui consiste en un combiné téléphonique, un terminal d'affichage, une imprimante, un ordinateur ainsi qu'une unité principale qui est composée d'un duplexeur, un modulateur, un processeur bande de base et une source de courant. Voir **Figure 13**.

Les antennes INMARSAT-A, -B et -F sont des antennes paraboliques avec des gains de 20 à 23 dBi. Ces antennes sont utilisées pour une structure simple et une efficacité d'ouverture élevée. Le suivi par satellite est une exigence essentielle en raison des mouvements du navire et de la faible largeur du faisceau à mi-puissance.



Figure 11 : Photographie de l'équipement au-dessus du pont (ADE) installé sur un navire. L'antenne est recouverte d'un radôme



Figure 12 : Une antenne à l'intérieur d'un radôme



Figure 13 : Photographie de l'équipement sous le pont (BDE) installé dans une cabine de navire

I.4.2.2 INMARSAT_C

Le système est utilisé pour fournir des communications de données/messages par des terminaux suffisamment petits pour être transportés à la main ou installés sur n'importe quel navire, avion ou véhicule.

La station terrienne mobile (MES) INMARSAT-C possède une petite antenne omnidirectionnelle qui en raison de son poids léger et de sa simplicité, peut être facilement montée sur un véhicule ou un navire ou un terminal portable. Voir **Figure 14**.

La vitesse de transmission entre un satellite et une station mobile est de 600 bps, et le signal est codé par un codage convolutif avec un rendement de 1/2. Un entrelaceur de bits a été adopté pour disperser l'erreur causée par le fading.

Les antennes utilisées pour INMARSAT-C sont généralement omnidirectionnelles, comme une hélice quadrifileuse, un dipôle croisé et un patch microruban. Une antenne quadrifileuse a été le type le plus populaire pour une installation sur des navires en raison de ses bonnes performances de couverture à large faisceau dans les conditions de mouvement du navire. Une antenne microruban est la meilleure à utiliser dans les terminaux portables ou porte-documents en raison de sa caractéristique de profil très bas.

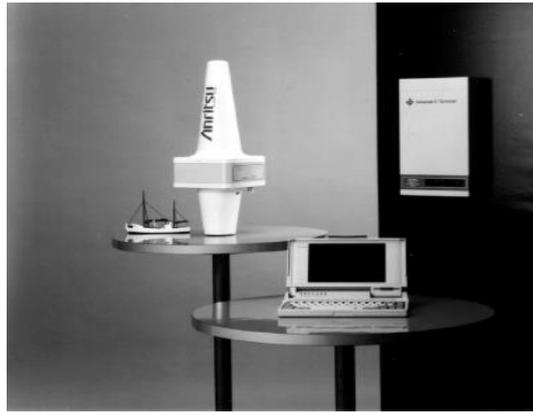


Figure 14 : Le terminal INMARSAT-C pour un petit navire

I.4.2.3 INMARSAT_M

Ce système est utilisé pour fournir des communications de haute qualité avec de petits terminaux en utilisant les technologies de communication numérique. Bien que le système INMARSAT-C ne puisse pas fournir de services téléphoniques, le système INMARSAT-M peut fournir des communications vocales avec des terminaux très petits et légers similaires à ceux utilisés pour le système INMARSAT-C. Les terminaux M peuvent être installés dans des voitures privées ou peuvent être transportés dans une mallette. Ces terminaux peuvent également être utilisés comme téléphones d'urgence à énergie solaire le long des autoroutes ainsi que comme téléphones portables dans les zones reculées.

Les types d'antennes utilisés pour le système M varient selon l'usage des terminaux que ce soit pour des applications maritimes, mobiles terrestres ou portables. Dans le cas d'applications maritimes, la configuration des équipements montés à l'extérieur pour les navires est fondamentalement la même que celle du système INMARSAT-B.

Une antenne SBF (Short Backfire) est l'une des antennes de terminal M préférées pour une utilisation maritime avec un gain d'antenne typique d'environ 15 dBi. Bien que l'antenne SBF soit une antenne embarquée compacte avec une configuration simple et un rendement élevé, elle a une largeur de bande de fréquences étroite d'environ 3%, qui est trop étroite pour couvrir la largeur de bande de fréquences requise d'environ 8%. Les caractéristiques électriques des antennes SBF conventionnelles sont améliorées en changeant le réflecteur principal d'un disque plat en une plaque conique ou à gradins et en ajoutant un deuxième petit réflecteur. L'antenne SBF améliorée a une efficacité d'ouverture d'environ 80% et une largeur de bande de fréquence de 20% pour un rapport d'onde stationnaire de tension inférieur à 1,5. Comme illustré dans la **Figure 15**.

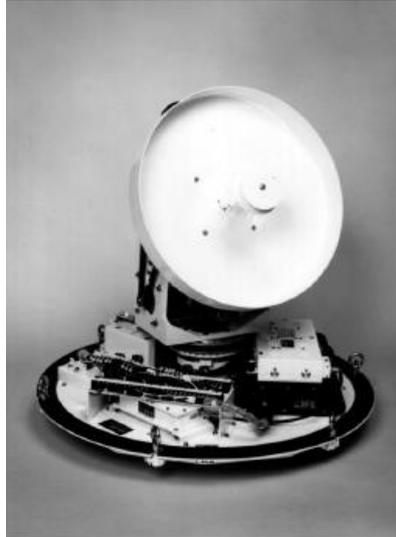


Figure 15 : Une antenne SBF (Short Backfire) améliorée

I.4.2.4 INMARSAT_AERO

Des services commerciaux mondiaux de communication par satellite aéronautique ont été fournis par l'INMARSAT. Le système se compose d'un segment spatial, d'une station terrienne au sol (GES), d'une station de coordination de réseau (NCS) et d'une station terrienne aéronautique (AES).

Comme mentionné dans la section précédente, il existe deux types d'antennes aéroportées pour les communications par satellite : une antenne à faible gain et une antenne à gain élevé avec des gains nominaux de 0 et 12 dBi, respectivement.

Un système d'antenne à faible gain se compose d'un élément d'antenne, d'un Duplexeur, d'un LNA et d'un HPA (High Power Amplifier) de classe C. Comme le montre la **Figure 16**. Son gain est d'environ 0 dBi et son diagramme de rayonnement est omnidirectionnel pour couvrir plus de 85% de l'hémisphère supérieur au-dessus d'un angle d'élévation de 5 °.

En ce qui concerne le système d'antenne à gain élevé, il existe deux types d'antennes à réseau phasé. Le premier est un type à montage supérieur, qui est installé sur le dessus d'un fuselage. Le second est un type à montage latéral, qui est installé sur les deux côtés (bâbord et tribord) du fuselage. Le type à montage supérieur a l'avantage d'éliminer les zones de trou de serrure où le faisceau ne peut pas être balayé, mais il a l'inconvénient d'augmenter la traînée d'air. Le type conforme, en revanche, présente l'avantage d'une faible traînée d'air, mais présente l'inconvénient des trous de serrure. Voir **Figure 17**.

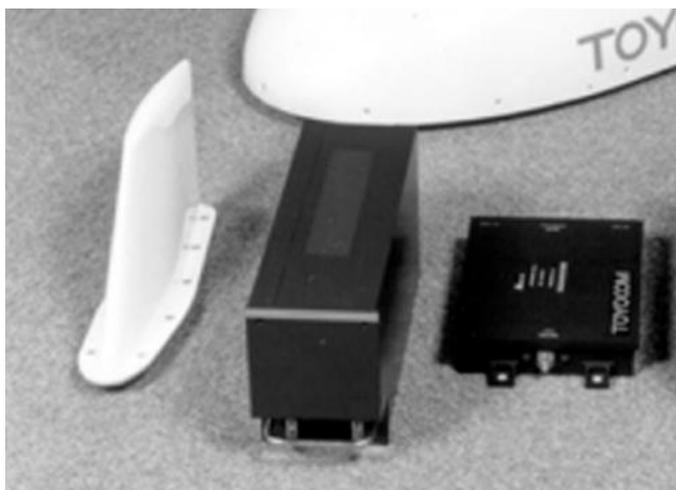


Figure 16 : Photographie d'une antenne à faible gain avec un HPA de classe C et un DIP / LNA.

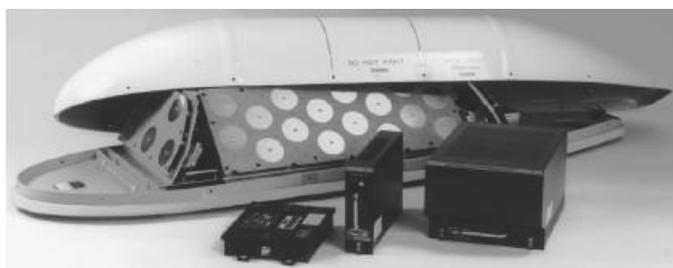


Figure 17 : Photographie d'une antenne à gain élevé avec un HPA et un DIP / LNA

I.4.2.5 Station terrienne mobile terrestre

Dans le système INMARSAT, les stations terriennes INMARSAT-M et -C ont été utilisées non seulement par les utilisateurs maritimes mais aussi par les utilisateurs mobiles terrestres tels que les camions et les trains. La station terrienne INMARSAT-C pour les utilisateurs mobiles terrestres est exactement la même que pour les utilisateurs à bord car son antenne est omnidirectionnelle sans fonction de poursuite.

Les antennes à usage mobile terrestre doivent avoir un profil bas et être très compactes, en tant qu'antennes à gain moyen avec des gains de 12 à 15 dBi, les antennes à réseau phasé sont considérées comme la meilleure utilisation sur les petites voitures privées en raison de leur profil bas et de leur suivi électrique à grande vitesse.

Les antennes directionnelles devraient fournir des liaisons pour les signaux vocaux et les signaux de données à grande vitesse, non seulement pour les camions long-courriers, mais aussi pour les petites voitures particulières. Le coût est un facteur très important à prendre en considération lors de la conception de telles antennes. Les antennes à réseau phasé sont

considérées comme le meilleur type d'antennes pour les véhicules en raison de leur profil bas, de leur suivi à grande vitesse et de leur coût potentiellement faible. Les antennes à réseau phasé avec fonctions de poursuite n'ont pas encore été utilisées dans les systèmes de communication par satellite mobiles terrestres commerciaux.

I.5 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons vu les systèmes CNS utilisés en aéronautique, ainsi que les applications des satellites, notamment dans le domaine des télécommunications, de la navigation et de l'aérospatial. Les appareils CNS sont moins performants, moins précis, et peuvent avoir un temps de latence. Tandis que les systèmes satellitaires sont plus efficaces, permettent de revoir l'information en temps réel et sont indépendants des conditions environnementales. C'est pour cela que nous allons nous intéresser à ces systèmes.

De plus, la conception d'antennes CubeSat a été abordée ; passant par quelques modèles conçus par le centre de recherche JPL de la NASA, tel que : MarCO, MRO, InSight et RaInCube.

Et pour finir nous avons parlé des antennes satellitaires utilisées par INMARSAT. Cette étude nous a permis de connaître les caractéristiques des antennes pour satellite, à savoir un gain élevé, une faible épaisseur et une taille réduite. Pour répondre à cet objectif on va utiliser les AMC, dont l'explication est détaillée dans le chapitre suivant.

Chapitre 2 : Les EBG et état de l'art sur les antennes large bande avec AMC

Chapitre II : Les EBG et état de l'art sur les antennes large bande avec AMC

II.1 Introduction

Afin de concevoir des antennes pour des applications aérospatiales, les ingénieurs doivent faire une étude minutieuse en prenant en compte plusieurs paramètres pour que l'antenne soit compacte, directive et assure une transmission large bande.

Dans ce chapitre nous allons définir les différents paramètres à prendre en compte pour la conception d'une telle antenne, ainsi que les techniques qu'on utilise pour atteindre ces objectifs, notamment l'utilisation des conducteurs magnétiques artificiels.

Enfin un état de l'art sur les antennes large bande à faible épaisseur sera présenté.

II.2 Caractéristiques des antennes

Les antennes sont caractérisées par leur impédance d'entrée ou leur coefficient de réflexion représenté par le paramètre S11, leur bande de fréquence de fonctionnement et de leur rayonnement. Dans cette partie nous allons définir ces différentes caractéristiques.

II.2.1 Paramètres S

Les paramètres S (Scattering : dispersion) sont les éléments d'une matrice permettant de caractériser un quadripôle ou des multipôles linéaires en hyperfréquence tel que les antennes. Les coefficients de cette matrice lient les puissances entrantes dans un quadripôle aux puissances sortantes. (13).

Dans ce qui suit nous considérerons un quadripôle tel que celui montré dans **Figure 18**.



Figure 18 : Tensions et courants appliqués à un quadripôle

On définit alors la matrice S par :

$$[b] = [S][a] \rightarrow \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{cases} b_1 = S_{11}a_1 + S_{12}a_2 \\ b_2 = S_{21}a_1 + S_{22}a_2 \end{cases}$$

Avec : a_1, a_2 : ondes entrantes et b_1, b_2 : ondes sortantes

s_{ii} : coefficient de réflexion au port i , $i = 1, 2$ lorsque l'autre port est adapté.

s_{ij} : coefficient de transmission du port j vers le port i , $j = 1, 2$

Le S_{11} est un paramètre essentiel pour décrire la propriété de réflexion d'une antenne. Il doit être le plus faible possible (au moins inférieur à -10dB) pour avoir le moins de pertes de désadaptation possible.

II.2.2 Rayonnement

L'onde électromagnétique rayonnée à distance suffisante de l'antenne se comporte comme une onde plane i.e. le champ électrique et le champ magnétique sont orthogonaux entre eux et orthogonaux à la direction de propagation de l'onde.

Une antenne peut être constituée par un seul élément rayonnant ou par un réseau d'éléments rayonnants. La répartition spatiale du rayonnement d'une antenne, ou diagramme d'antenne, peut être représentée en trois dimensions. La propriété de rayonnement la plus préoccupante est la distribution spatiale à deux ou à trois dimensions (2D ou 3D) de l'énergie rayonnée en fonction de la position de l'observateur le long d'un chemin ou d'une surface de rayon constant. (14).

La directivité d'une antenne désigne la façon de concentrer son rayonnement dans certaines directions de l'espace. Afin de définir les propriétés directionnelles du diagramme de rayonnement de l'antenne, on fait appel à la notion de directivité D .

La directivité est définie comme étant le rapport entre l'intensité de rayonnement dans une direction donnée de l'antenne et l'intensité de rayonnement moyenne dans toutes les directions. L'intensité de rayonnement moyenne est égale à la puissance totale rayonnée par l'antenne divisée par 4π . Si la direction n'est pas spécifiée, la direction de l'intensité maximale de rayonnement est implicite. Sous forme mathématique, elle peut s'écrire comme suit :

$$D = \frac{U}{U_0} = \frac{4\pi U}{Prad}$$

U : directivité

U₀ : directivité maximum

Prad : puissance rayonnée totale (w)

Une autre mesure utile décrivant les performances d'une antenne est le gain. Bien que le gain de l'antenne soit étroitement lié à la directivité, c'est une mesure qui prend en compte l'efficacité de l'antenne ainsi que ses capacités directionnelles

Le gain d'une antenne est le rapport entre la densité de puissance moyenne rayonnée par l'antenne dans la direction (θ,φ) et la densité de puissance à rayonnement isotrope, les deux antennes étant alimentées par la même puissance.

On notera :

P(θ,φ) : la densité de puissance moyenne rayonnée par l'antenne directive (W/m²).

P₀ : la densité de puissance moyenne rayonnée par l'antenne isotrope (W/m²).

P_t : la puissance totale rayonnée par les deux antennes (W).

Le gain est donné par : $G(\theta, \varphi) = \frac{p(\theta, \varphi)}{P_0} = \frac{P(\theta, \varphi)}{p_t / 4\pi R^2}$

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

La valeur maximale du gain est liée à la directivité maximale.

On désigne le gain maximum de l'antenne exprimé en dB : $G_{dB} = 10 \log_{10}(G)$.

II.3 EBG

II.3.1 Définition

De manière générale, les structures de bande interdite électromagnétique (EBG) sont définies comme des objets artificiels périodiques (ou parfois non périodiques) qui empêchent ou assistent la propagation des ondes électromagnétiques dans une bande de fréquence spécifiée pour tous les angles d'incidence et tous les états de polarisation. (15).

Ces structures EBG ont suscité l'intérêt de nombreux chercheurs grâce à leurs propriétés intéressantes en termes de miniaturisation et de suppression des ondes de surfaces.

Elles sont généralement réalisées par arrangement périodique de matériaux diélectriques et de conducteurs métalliques. En général, ils peuvent être classés en trois groupes en fonction de leur configuration géométrique : structures volumétriques tridimensionnelles, surfaces planes bidimensionnelles comme le montre la **Figure 19**.

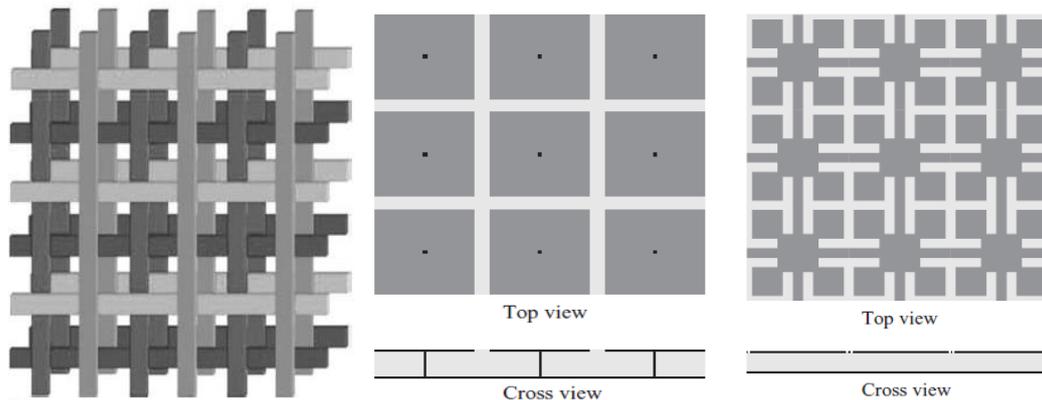


Figure 19: Structures EBG périodiques

II.3.2 Application des EBG en ingénierie d'antennes

En dirigeant la propagation des ondes électromagnétiques le long du plan de masse au lieu du rayonnement dans l'espace libre, les ondes de surface réduisent l'efficacité et le gain de l'antenne. La diffraction des ondes de surface augmente les radiations du lobe arrière, ce qui peut détériorer le rapport signal / bruit dans les systèmes de communication sans fil tels que les récepteurs GPS.

Une structure EBG peut être utilisée pour entourer une antenne microruban afin d'augmenter le gain d'antenne et réduire le lobe arrière. De nombreuses antennes réseau intègrent également des structures EBG pour réduire le niveau de couplage mutuel.

Une autre application favorable des EBG est de concevoir des antennes filaires à faible épaisseur avec une bonne efficacité de rayonnement, ce qui est souhaité dans les systèmes de communication sans fil modernes.

Les structures EBG sont également utilisées dans la conception d'antennes avec un gain élevé supérieur à 20 dBi. Traditionnellement, les antennes à gain élevé sont réalisées à l'aide d'antennes paraboliques ou de réseaux d'antennes de grande taille. Cependant, la surface incurvée des antennes paraboliques rend difficile leur conformité avec les plates-formes

mobiles, tandis que les grands réseaux d'antennes souffrent toujours d'une perte dans les réseaux d'alimentation. Les surfaces planes EBG offrent une solution alternative à ce problème. Par exemple, elles sont utilisées pour concevoir une antenne résonante à gain élevé comme le montre la **Figure 20**.

Outre les applications d'antenne, les structures EBG ont également trouvé de nombreuses applications dans la conception de circuits hyperfréquences. Un exemple représentatif est la conception du filtre micro-ondes qui rejette avec succès les harmoniques supérieures dans les circuits.

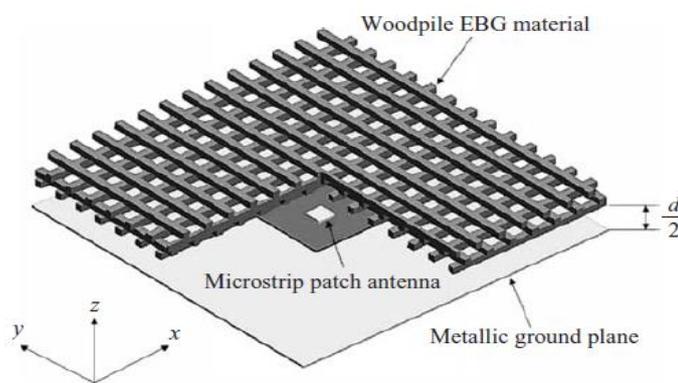


Figure 20: Conception d'une antenne résonante à gain élevé utilisant une structure EBG [15]

II.3.3 AMC

L'une des applications des EBG est les Conducteurs Magnétiques Artificiels CMA qui ont été introduites par D. Sievenpiper en 1999. Ce sont des structures à motifs métalliques périodiques imprimés sur un substrat diélectrique et connectées au plan de masse via des trous métallisés comme le montre la **Figure 21**. Généralement utilisés comme plan réflecteur, ils possèdent la propriété très intéressante d'avoir une phase du coefficient de réflexion variant de -180° à 180° en passant par 0° , contrairement à un plan de masse classique qui admet une réflexion de 180° . Cette propriété de phase est très importante car elle permet de réduire la taille de l'antenne comparée à un plan de masse classique pour chercher à minimiser le rayonnement arrière d'une antenne. Dans ce cas la présence du plan réflecteur redirige une partie du rayonnement dans la direction opposée ce qui permet d'augmenter le gain de l'antenne. (16).

L'intérêt des structures AMC, connue aussi comme surface à haute impédance, est de concevoir des antennes efficaces à faible épaisseur. Dans ce cas, ces structures artificielles

servent de plan de masse pour l'antenne. En effet, les plans de masse sont nécessaires dans de nombreux systèmes de communication pour protéger les appareils électroniques, situés sous l'antenne et aussi pour augmenter le gain de l'antenne. Une structure d'antenne à faible épaisseur se réfère généralement à une structure dont la hauteur totale est inférieure à un dixième de la longueur d'onde.

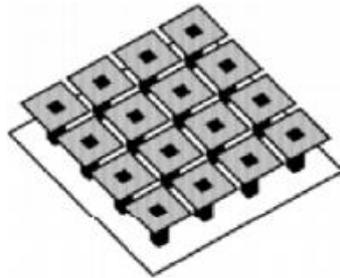


Figure 21: Cellules AMC

Un PEC (Perfect Electric Conductor) introduit un déphasage de 180° entre le champ électrique incident et réfléchi, tandis qu'un PMC (Perfect Magnetic Conductor), qui n'existe pas dans la nature, présente un coefficient de réflexion ayant une phase nulle. La réflexion en phase permet l'utilisation de la surface AMC comme un réflecteur pour la conception d'antenne de faible épaisseur.

D'autre part, elles présentent la propriété de suppression d'onde de surface ou d'avoir une bande interdite électromagnétique (EBG). Ces structures empêchent la propagation des ondes électromagnétiques dans une bande spécifiée de fréquences. En d'autres termes, il existe une bande interdite pour les ondes de surface, d'où le nom Electromagnetic Band Gap. Les structures EBG peuvent être utilisées pour améliorer l'efficacité de rayonnement de l'antenne. Puisque ces structures suppriment des ondes de surface, elles peuvent être utilisées également dans le but de réduire le couplage mutuel entre deux antennes microruban. (17).

Depuis l'apparition des structures AMC, de nombreux chercheurs les ont utilisées pour concevoir des nouveaux dispositifs électromagnétiques ou pour améliorer les performances des antennes existantes. Plusieurs structures ont été proposées pour des applications à bande étroite et rares sont celles multi-bande ou large bande.

a) Principe de fonctionnement

Pour mieux comprendre le fonctionnement des structures EBG, certains modèles de circuits ont été proposés. Une structure à bande interdite électromagnétique planaire

bidimensionnelle (EBG) simple se compose de quatre parties : un plan de masse métallique, un diélectrique, un substrat, des patches métalliques périodiques sur le dessus du substrat et des vias verticaux reliant les patches au plan de masse. La géométrie est similaire à la forme d'un champignon.

Les surfaces à haute impédance introduites par D. Sievenpiper dans le but de supprimer les ondes de surface d'antennes de type "patch", et ainsi augmenter leur rendement. En effet un "patch" est une antenne plaquée sur un plan de masse, cette antenne émet des pertes. La **Figure 22** montre la géométrie de la structure.

Une autre propriété tout à fait intéressante, découlant de la haute impédance, est qu'une onde incidente arrivant sur une telle surface se verrait totalement réfléchi (coefficient de transmission nul : $t = 0$) avec un coefficient de réflexion $r = 1$. Ainsi, contrairement à un plan de masse classique (pour lequel $r = -1$), l'onde électromagnétique réfléchi ne serait plus déphasée de 180° par rapport à l'onde incidente mais serait en phase avec cette dernière.

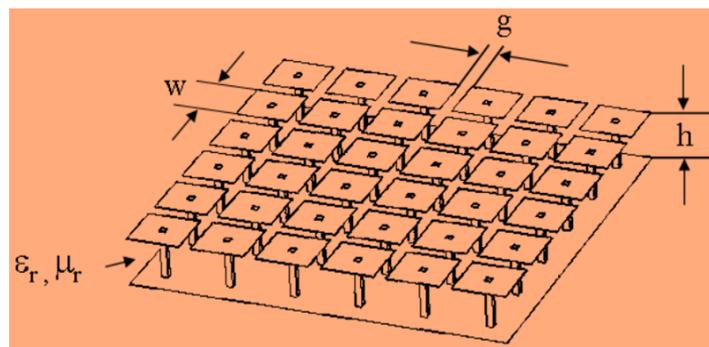


Figure 22: Structure de Sievenpiper

Sievenpiper propose d'empiler différentes couches métalliques pour augmenter la valeur de la capacité équivalente de surface. Les propriétés électromagnétiques de ce réseau peuvent être modélisées par un circuit résonant de type LC parallèle. La vue en coupe de la structure nous aide à comprendre son fonctionnement comme le montre **Figure 23**. L'élément capacitif est lié à l'écartement entre les patches métalliques alors que l'effet inductif est introduit par la présence des vias reliant les patches au plan de masse.

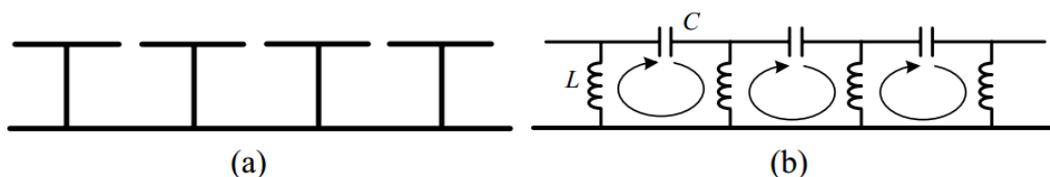


Figure 23: (a) Section de la surface champignon, (b) circuit équivalent

En adoptant cette représentation simplifiée, l'impédance de la surface est équivalente à celle du circuit résonant :

$$Z = \frac{z_L z_c}{z_L + z_c} = \frac{jL\omega}{1 - LC\omega^2}$$

Sievenpiper décrit le calcul de L et C et indique que les valeurs sont d'autant plus importantes que la longueur du via est grande et que l'écart entre les patches est faible. Cependant, le gap ne peut atteindre des dimensions très petites. La capacité équivalente est donnée par :

$$C = \frac{w(\epsilon_1 + \epsilon_2)}{\pi} \cosh^{-1}(2w/g) \quad \text{En F/unité de surface}$$

ϵ_1 et ϵ_2 permittivité du milieu de part et d'autre du réseau.

Dans l'analyse du paragraphe suivant $\epsilon_1 = 1$, et $\epsilon_2 = \epsilon_r$

L'inductance équivalente de surface est donnée par : $L = \mu_0 \mu_r h$ En H/unité de surface

La fréquence de résonance de la structure est définie par :

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

La surface est haute impédance pour cette fréquence f_0 . Cette fréquence de résonance se situe au milieu de la première bande interdite et conduit à un déphasage nul des ondes réfléchies. Pour cette fréquence, la surface est vue comme un matériau parfaitement magnétique interdisant la propagation d'ondes de surface. La bande interdite est définie lorsque la phase du coefficient de réflexion au niveau de la surface varie entre $+90^\circ$ et -90° , zone blanche sur la **Figure 24**. La zone blanche correspond à une réflexion en phase des ondes, alors que les zones orangées correspondent à des réflexions en opposition de phase. (18).

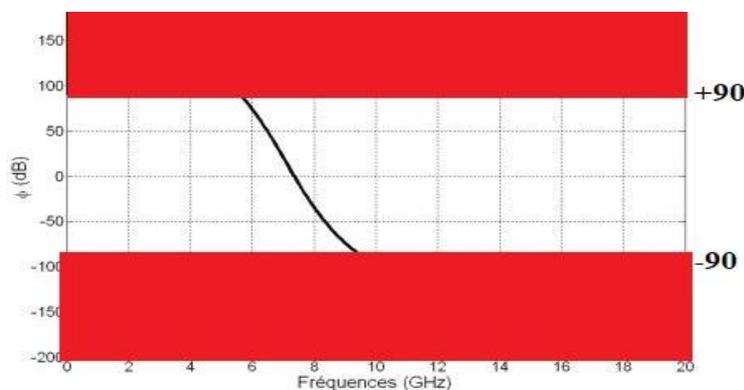


Figure 24: Exemple de diagramme de la phase du coefficient

b) Types d'AMC

Un AMC est composé de motifs périodiques, dont la périodicité est inférieure à la longueur d'onde λ , répliqués sur un substrat diélectrique avec plan de masse. Historiquement, ces structures ont été réalisées avec des patches associés à des vias mais les efforts récents se concentrent sur le développement de motifs planaires sans via, monocouches ou multicouches. (19).

Dans la littérature, on trouve de nombreuses géométries selon le fonctionnement souhaité du CMA (mono-bande ou bi-bande) comme illustré dans la **Figure 25**.

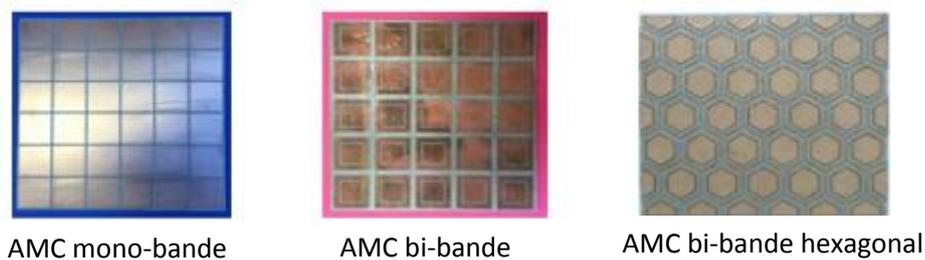


Figure 25: Types de CMA [18]

II.4 Etat de l'art sur les antennes larges bande avec AMC

Les antennes doivent être unidirectionnelles pour une variété d'applications, comme le montre la **Figure 26**. Par exemple, une antenne embarquée sur avion ou satellite à l'extérieur de l'avion, tout en évitant la contamination électromagnétique de son environnement interne. Pour concevoir ces antennes à profil bas, l'utilisation de conducteurs magnétiques artificiels comme réflecteurs. (20).

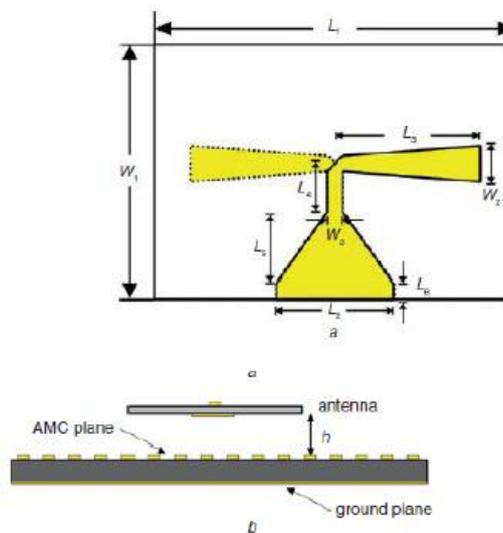


Figure 26: Géométrie de l'antenne bowtie et de l'antenne composite

Une nouvelle structure de conducteur magnétique artificiel (AMC) à large bande est conçue comme le plan de masse d'une antenne bowtie imprimée pour améliorer et réduire le profil. L'antenne bowtie imprimée d'origine fonctionne dans une plage de 1,67 à 2,06 GHz avec un symétriseur trapézoïdal connecté au SMA. La structure AMC se compose de 6×9 cellules qui sont constituées de quatre cercles et de quatre cercles plus petits comme le montre la **Figure 27**. La distance entre l'antenne et l'AMC est réduite à un huitième de la longueur d'onde dans l'espace libre à 1,7 GHz. L'antenne composite a une large bande passante de 1,64 à 1,94 GHz, avec une largeur de bande de fréquence relative de 16,7%. (21).

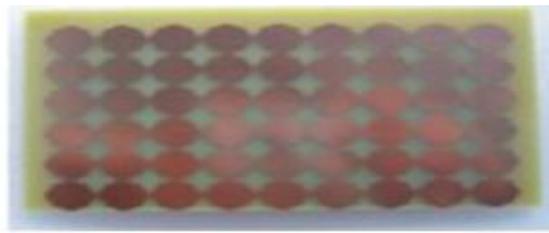


Figure 27: Photographie du plan AMC

Le gain est augmenté, le gain maximal est de 6,5 dBi et les diagrammes de rayonnement sont stables dans toute la plage de fréquences de fonctionnement, ce qui le rend approprié pour les applications de communication sans fil.

Il y a aussi une antenne à profil bas et à gain élevé qui adopte un plan de masse de conducteur magnétique artificiel (AMC) comme surface réfléchissante. Ici, l'antenne dipôle imprimée est orientée horizontalement sur la surface AMC qui est constituée de 5 patches carrés en forme de prune $5 * 7$ sans traversée verticale vers le sol. L'antenne optimisée a une hauteur d'environ 9,5 mm et son gain de crête est fermé à 9,7 dB à 2,58 GHz. De plus, la plage de fréquence de fonctionnement est de 2,47 GHz à 2,77 GHz et sa bande passante relative atteint environ 11,63%. (22). La structure AMC avait un substrat diélectrique de 3 mm avec une constante diélectrique égale à 10,2 et le motif en forme de prune est combiné de quatre patches circulaires symétriques et ils sont conçus pour être entièrement symétriques avec $r = 2,3$ mm et une bande passante de 3,18 GHz à 4,21 GHz, comme dans la **Figure 28**.

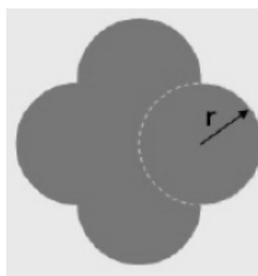


Figure 28: Cellule unitaire de la structure AMC proposée

L'antenne Bowtie présentée dans la **Figure 29** est gravée sur un substrat qui a une constante diélectrique de 4,5 et une épaisseur de 0,5 mm. Les deux bras du bowtie sont de chaque côté du substrat. La taille du substrat est de 94,15 mm (D_x) et 56,625 mm (D_y). La longueur de chaque bras du bowtie est de 17,8 mm et le côté long du patch du bowtie est de 11 mm, le court, de 4 mm.

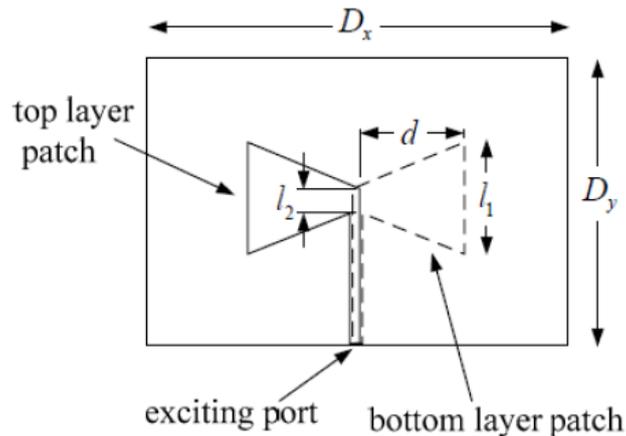


Figure 29: L'antenne Bowtie [22]

La distance entre l'antenne et le plan AMC est de 6 mm, ce qui couvre une bande passante plus large, et la hauteur totale de l'antenne composite est de 9,5 m. La gamme de fréquences de S_{11} en dessous de -10 dB est de 2,47 GHz à 2,77 GHz et le gain est de 9,67 dB à 2,58 GHz. (23).

Une nouvelle combinaison d'antenne à fente à double bowtie coplanaire (CPW) et de conducteur magnétique artificiel (AMC), qui répond aux exigences de 5,8 GHz utilisable.

L'antenne Double Bowtie est utilisée avec un substrat et une permittivité diélectrique relative $\epsilon_r = 3,38$ et une épaisseur de $h = 1524 \text{ mm}$. Il n'y a pas de terre en dessous du substrat diélectrique. La structure AMC est un substrat d'épaisseur $h = 0,762 \text{ mmet}$ et de permittivité $\epsilon = 3,38$. Comme l'antenne à double bowtie à fente alimentée par CPW n'a pas de plan de masse sous le substrat diélectrique, les cellules unitaires de l'AMC sous l'antenne ont été supprimé. La combinaison bowtie-AMC permet à l'antenne de fonctionner correctement dans toute la bande passante de l'antenne. Comme le montre la **Figure 30**.

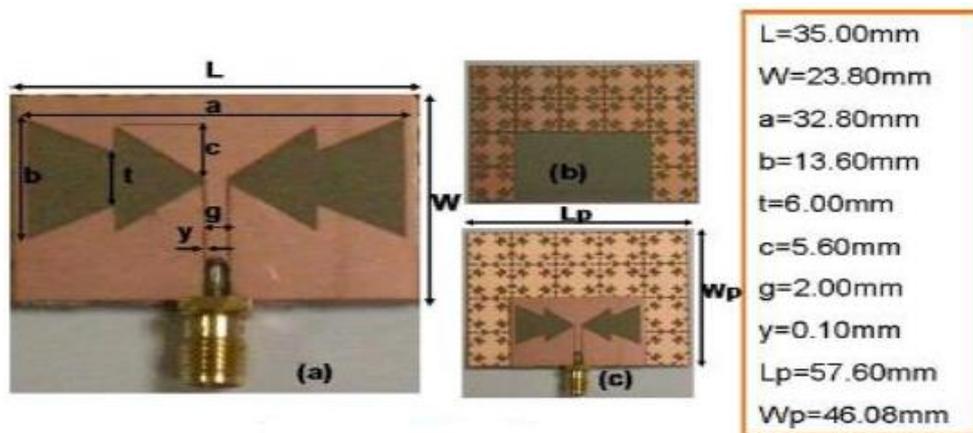


Figure 30: Élément du prototype fabriqué, (a) double antenne Bowtie, (b) disposition des cellules unitaires AMC, (c) prototype Bowtie AMC

La structure combinée bowtie –AMC est placée sur une plaque métallique, la répartition du courant sur le bowtie n'est pas affectée, il est donc possible d'affirmer que l'AMC isole électromagnétiquement l'antenne bowtie de la plaque métallique.

L'antenne dipôle diamant est imprimée sur un substrat d'épaisseur $h = 1,58$ mm, de permittivité relative $\epsilon = 2,5$ avec une bande passante de 53% (4,56-7,84 GHz) alimentée par un port discret. Comme le montre la **Figure 31**. (24).

En raison de la nature empilée de l'antenne avec réflecteur AMC, il est proposé d'alimenter l'antenne avec un connecteur SMA de 50Ω placé au bord du substrat de l'antenne, c'est pourquoi le balun est utilisé.

L'AMC est un ensemble de patches carrés en cuivre imprimés sur un substrat avec $\epsilon = 4,0$ et une épaisseur de $h = 3,2$ mm soutenu par un plan de masse métallique et les dimensions de l'AMC sont $W_{AMC} = 7,4$ mm, $g_{AMC} = 1$ mm. L'intervalle de phase du coefficient de réflexion conduisant à des interférences constructives dans le plan de l'antenne ($-90^\circ, +90^\circ$) est de 4,2 à 5,8 GHz (32%).

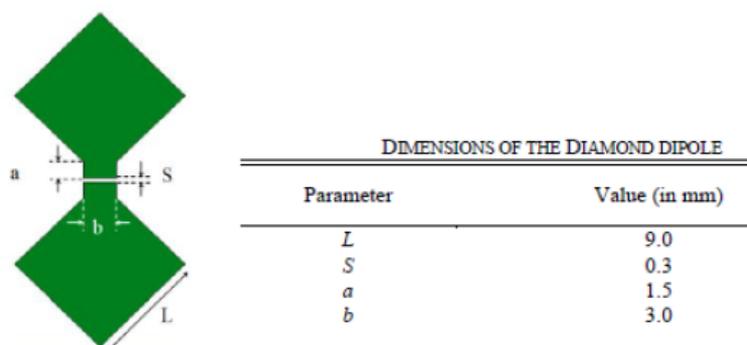


Figure 31: Antenne dipôle diamant

Un diagramme de rayonnement divisé dans la direction latérale apparaissant lors de l'utilisation d'un AMC. La raison de ce comportement est perçue comme étant la présence de courants de surface sur l'AMC qui provoquent des interférences destructrices et conduisent à une perte de gain dans le diagramme de rayonnement large à 5,8 GHz. Un réflecteur hybride (comme le montre la **Figure 32**) est ensuite proposé pour atténuer ce problème en utilisant des conducteurs électriques et magnétiques. Cette solution améliore le gain. L'antenne a une largeur de bande utilisable d'environ 46% (4,2 - 6,7 GHz) et une variation de gain dans toute la bande entre 4,9 et 7,9 dBi.

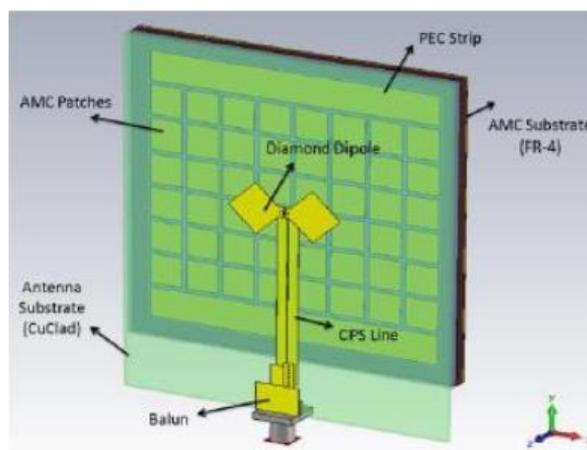


Figure 32: Antenne finale avec un réflecteur hybride

Une antenne à fente à profil bas et à large bande avec une surface de conducteur magnétique artificiel (AMC) est conçue pour la communication X et Ku, alimentée avec le guide d'ondes coplanaire (CPW), l'antenne à fente conçue se compose de deux fentes rayonnantes avec branches évoluées en forme de C. La structure proposée est conçue à partir de l'antenne à fente en L chargée de branches à fente en forme de C et en ajoutant deux branches en forme de L aux extrémités de chaque branche en forme de C. Figure 33. (25).

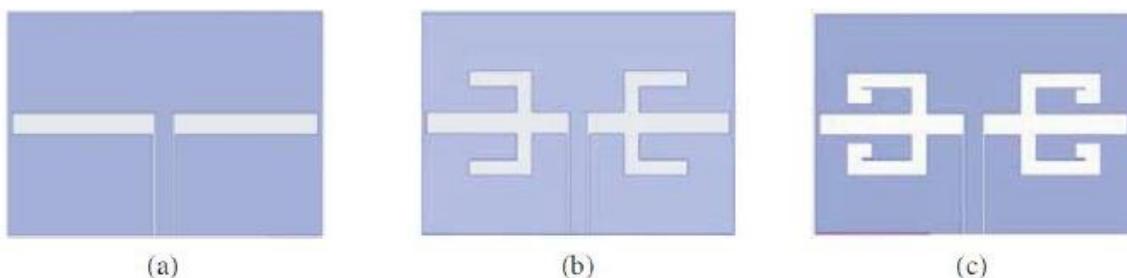


Figure 33: Géométrie des trois types d'antennes à fente. (a) Antenne à fente 1, (b) Antenne à fente 2 et (c) la structure proposée

La cellule unitaire AMC est composée de deux hexagones centraux avec six branches rectangulaires et fonctionne dans une large bande de fréquence de réflexion en phase allant de 6 à 13,94 GHz au plan de référence à 4 mm au-dessus de la surface AMC qui est composée de 8×10 AMC, unir les cellules situées sous l'antenne à fente à une distance d'environ $0,107\lambda$ (Figure 34).

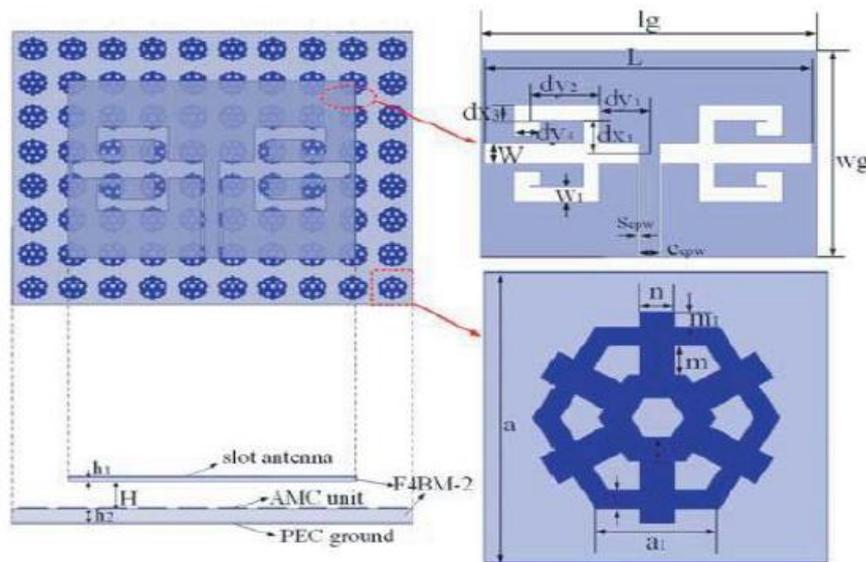


Figure 34: Vues de dessus et de côté de l'antenne composite

L'antenne composite atteint une large bande passante d'impédance de 7,64 GHz à 14,58 GHz (62,47%) et présente un gain maximal pouvant atteindre 10,26 dBi, et un faible niveau de polarisation croisée, qui permettent d'utiliser l'antenne proposée dans les communications X et Ku.

II.5 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons vu les différentes caractéristiques d'une antenne, ainsi que des AMC et les avantages de leur utilisation. Enfin, un état de l'art des antennes large bande avec AMC a été établi.

Nous avons conclu que l'utilisation de ces métamatériaux offre la possibilité de la miniaturisation des circuits et l'amélioration des performances des antennes en termes de gain et de compacité.

Chapitre 3 : Conception d'une antenne large bande à Conducteur Magnétique Artificiel

Chapitre III : Conception d'une antenne large bande à conducteur magnétique artificiel

III.1 Introduction

Dans ce chapitre, on présente, dans un premier temps, l'antenne choisie pour notre étude qui est une antenne large bande de type bowtie alimentée par un balun symétriseur. Ensuite, la conception d'une cellule AMC est présentée. Enfin, l'ensemble de la structure (Antenne + AMC) sera étudié afin d'avoir une adaptation de la structure antennaire à faible épaisseur meilleur que -10 dB et un gain en broadside stable sur la bande 3.5-5.75 GHz en utilisant le logiciel CST Microwave Studio.

III.2 CST Microwave Studio Suite

Le logiciel Microwave Studio (MWS) de Computer Science Technology (CST) est un logiciel de simulation électromagnétique de structures en 3-Dimensions. Nous utilisons la méthode temporelle (Transient solver) du logiciel Microwave Studio. Elle est basée sur la technique des intégrales finies (FIT : Finite Integration Technique), pour déterminer les solutions aux problèmes électromagnétiques régis par les équations de Maxwell sous formes intégrales. En ce qui concerne la technique FIT, cette méthode numérique offre une discrétisation de l'espace, identique à celle de la méthode FDTD (Finite Difference Time Domain). Ce logiciel maille la structure en utilisant des éléments volumiques parallélépipèdes, permettant la description en 3-D de tous les composants des systèmes décrits, ce qui lui permet d'être appliqué à de nombreux problèmes électromagnétiques allant de la statique aux hyperfréquences en analyses temporelle et fréquentielle. Il permet aussi de décrire les dispositifs hyperfréquences, tels qu'ils ont été réalisés en pratique, par un empilement des couches de matériaux avec ses propres caractéristiques (permittivité et tangente de pertes dans le cas d'un semi-conducteur et conductivité électrique dans le cas d'un métal à pertes). (26).

III.3 Antenne bowtie à balun intégré

L'antenne bowtie est également appelée antenne papillon car elle ressemble à un papillon avec ses ailes ouvertes, elle se compose de deux morceaux triangulaires de fil rigide ou de deux plaques métalliques triangulaires plates, disposées en configuration de nœud

papillon, avec le point d'alimentation à l'écart entre les sommets des triangles. Elle fait partie des antennes large bande. Par définition une antenne est considérée comme étant large bande à partir de 5% de bande relative.

L'antenne bowtie a une structure symétrique, ainsi que l'avantage d'être légère, peu couteuse, d'une géométrie simple et facile à concevoir. Cette antenne est représentée dans la **Figure 35**.

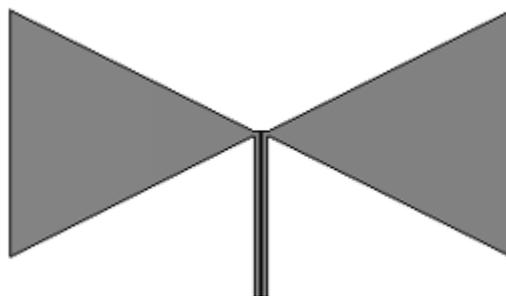


Figure 35 : design d'une antenne bowtie

L'antenne bowtie requière une alimentation équilibrée. Les câbles coaxiaux sont généralement utilisés pour alimenter différents systèmes, cependant il ne s'agit pas d'une alimentation équilibrée, c'est pourquoi il est nécessaire d'utiliser un symétriseur, également appelé balun (BALAnced to UNbalanced).

Le balun est un dispositif d'adaptation s'insérant entre l'antenne et son dispositif d'alimentation, il permet de passer d'une alimentation déséquilibrée (câble, ligne microstrip) à une alimentation équilibrée (lignes à fentes, lignes parallèles).

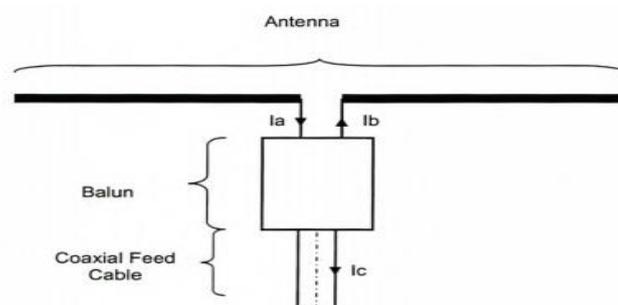


Figure 36: Configuration de la ligne de transmission, du balun et de l'antenne

La conception de l'antenne bowtie à balun intégré a été réalisée lors d'un projet de fin d'étude (27) ; illustré dans la **Figure 37**.

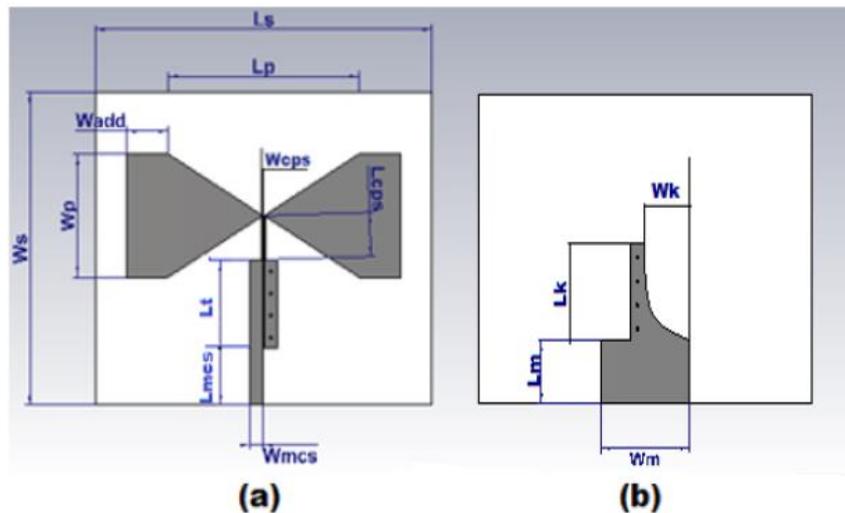


Figure 37: Dimension de la structure de l'antenne bowtie et du balun (b) [27]

L'antenne est imprimée sur du substrat FR4 d'une taille de $75 \times 58 \text{ mm}^2$. Les dimensions de l'antenne bowtie et du balun sont comme suit : $L_s = 75 \text{ mm}$, $W_s = 58 \text{ mm}$, $L_p = 46 \text{ mm}$, $W_p = 28 \text{ mm}$, $\text{gap} = 0.3 \text{ mm}$, $W_{add} = 10 \text{ mm}$, $L_{mcp} = 12 \text{ mm}$, $W_{mcp} = 3.7 \text{ mm}$, $W_m = 20 \text{ mm}$, $L_{cps} = 8.25 \text{ mm}$, $W_{cps} = 0.3 \text{ mm}$, $L_t = L_k = 18 \text{ mm}$, $W_k = 10.15 \text{ mm}$, $h = 1.6 \text{ mm}$.

Le coefficient de réflexion de cette antenne est représenté dans la **Figure 38** et ses diagrammes de rayonnement à différentes fréquences dans la **Figure 39**.

Les résultats de cette antenne montrent un rayonnement omnidirectionnel pour des fréquences inférieures à 5GHz. Au-delà, ce rayonnement se dégrade. Pour la suite de cette étude, l'objectif est de rendre cette antenne directive et à faible épaisseur en utilisant un AMC, avec un gain de rayonnement en broadside stable dans la bande 3.25-5.75GHz, pour répondre aux applications aérospatiales.

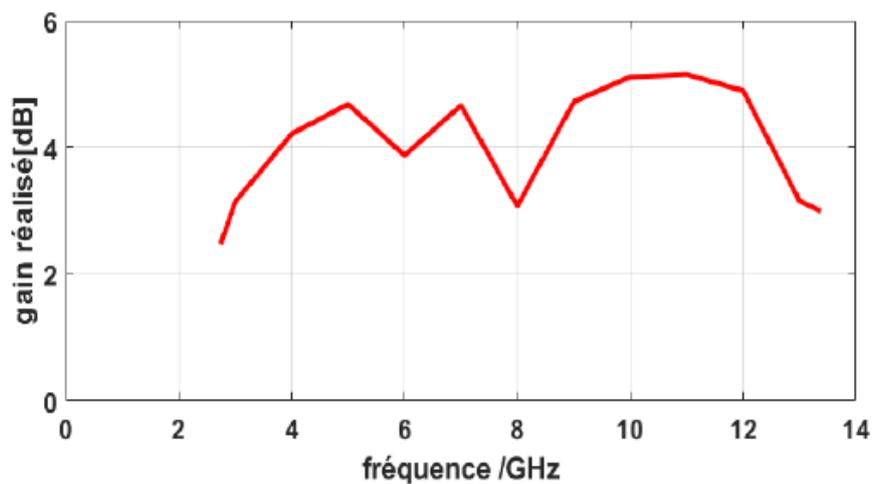


Figure 38: Gain réalisé maximum de l'antenne avec balun [26]

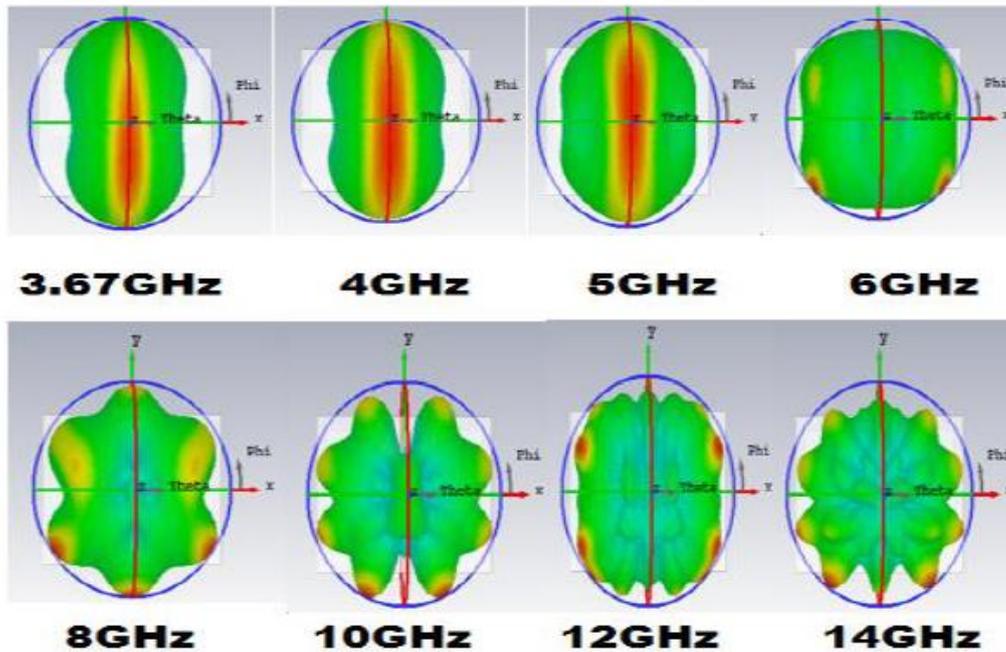


Figure 39: Diagrammes de rayonnement de l'antenne

III.4 Conception des cellules AMC

Pour dimensionner l'AMC, il faut définir les conditions aux limites appropriées pour introduire un mode TEM (onde plane) dont le trièdre direct est formé par les champs E et H. Un seul élément de la structure infinie est considéré. L'orthogonalité des champs est obtenue des conditions aux limites électriques selon un axe de part et d'autre de la cellule et des conditions aux limites magnétiques selon l'axe perpendiculaire. La phase du coefficient de réflexion de la structure est alors déterminée uniquement pour une incidence normale. Le logiciel CST permet de préciser ces conditions aux limites comme le montre la **Figure 40**.

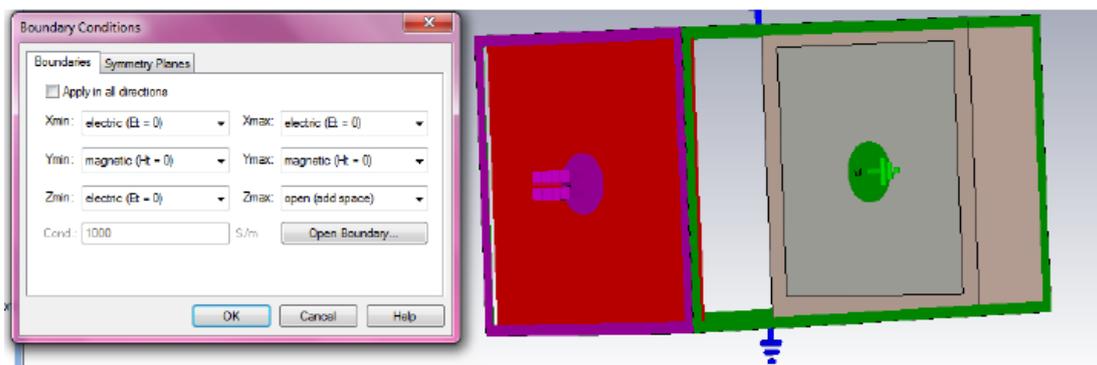


Figure 40: Conditions aux limites de la structure AMC

On prendra pour Xmin et Xmax : $E_t = 0$ pour avoir le champ électrique horizontal comme le montre la **Figure 41** (a).

Pour Y_{min} et Y_{max} : $H_t = 0$ pour avoir la cage magnétique verticale comme le montre la **Figure 41** (b).

Une fois les conditions aux limites établies, la structure est placée à distance : $D \geq \frac{2 \cdot a^2}{\lambda}$ de la source pour être dans la zone de champ lointain, comme le montre la **Figure 42**.

- D : distance à la cellule (m).

- a : la plus grande dimension de l'antenne (m).

- λ : longueur d'onde (m).

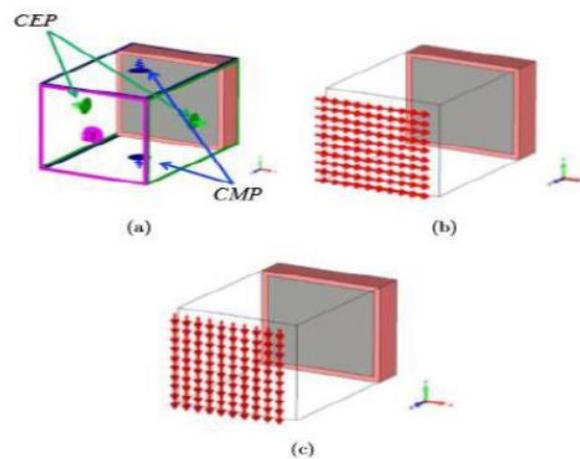


Figure 41: Conditions aux limites d'une structure

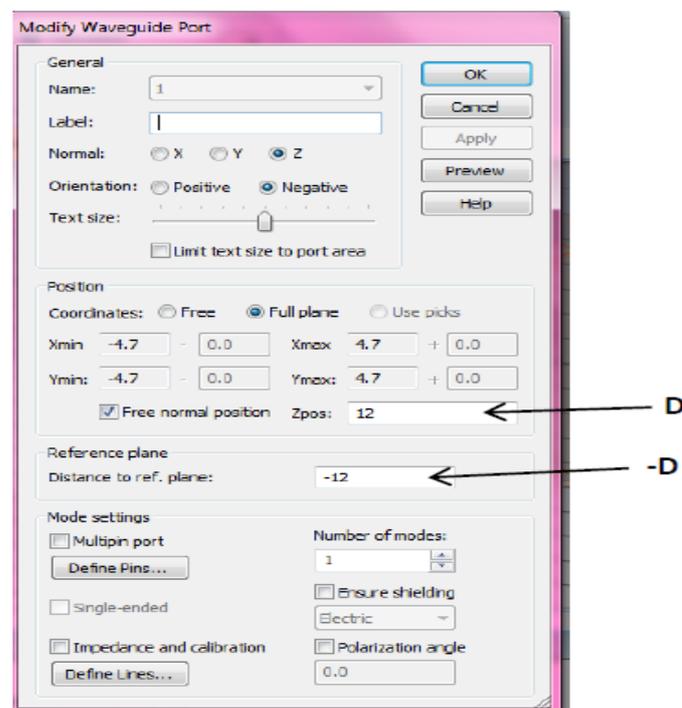


Figure 42: Distance de champ lointain dans le port du guide d'ondes

Cette cellule est composée d'un pavé carré comme la montre la **Figure 43**. Afin de concevoir un AMC dont la bande de fréquence est incluse dans la bande opérationnelle du bowtie, les dimensions de la cellule AMC sont $L_{amc} = 9,4\text{mm}$, $W_{amc} = 8\text{mm}$, $g_{amc} = 0,7\text{mm}$. On utilise comme substrat le FR4 de permittivité = 4.3 avec une épaisseur de 1.6mm. Après simulation de la cellule AMC, le diagramme de phase (**Figure 44**) montre que la structure a une phase comprise entre -90° et 90° dans la bande de fréquence 4,23-5,89 GHz avec une bande passante relative de 32,8%. (20).

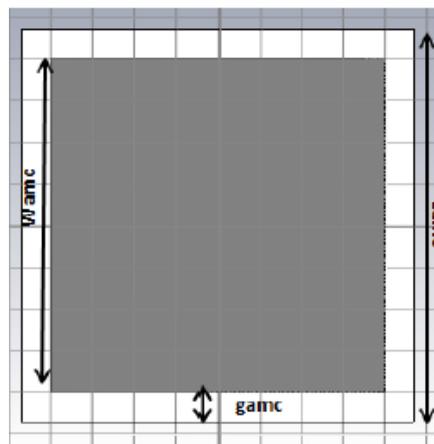


Figure 43: Cellule AMC

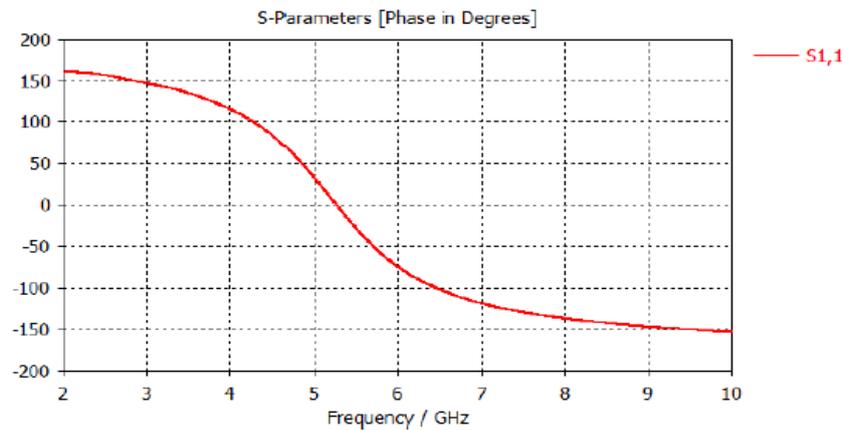


Figure 44: Phase du coefficient de réflexion

III.5 Antennes bowtie sur AMC

A présent, l'antenne bowtie a été placée sur 8*5 cellules AMC présentée sur la **Figure 45**. La distance entre l'antenne et l'AMC est de 2mm. Cette couche d'air va permettre de garder une bonne adaptation de l'antenne tout en maintenant des interférences constructives

dans la direction en broadside. L'épaisseur totale de la structure antennaire est de 6.8 mm. La simulation de la structure totale (antenne +AMC) avec CST a dégradé les performances de cette dernière en termes d'adaptation. Pour cette raison, une étude paramétrique de la structure a été faite afin d'atteindre les objectifs fixés

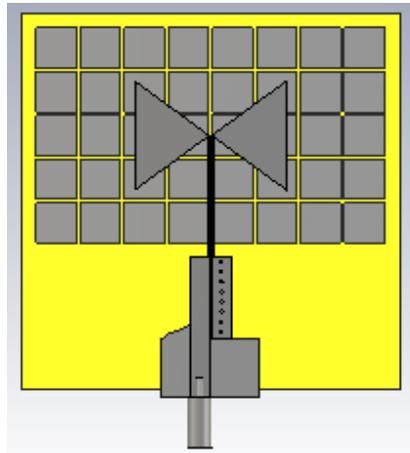


Figure 45: Antenne bowtie placée sur 8*5 Cellules AMC

III.6 Etude paramétrique

Dans cette partie nous allons faire une étude paramétrique sur différentes dimensions de l'antenne en s'intéressant au coefficient de réflexion afin d'avoir une adaptation inférieure à -10 dB ainsi qu'un gain en broadside le plus stable possible.

III.6.1 Influence du paramètre L_p

Nous allons faire varier le paramètre L_p de 20mm et 40mm et étudier son influence sur le coefficient de réflexion et le gain réalisé comme le montre la **Figure 46** et la **Figure 47**.

Les résultats montrent que plus la valeur de L_p est faible, l'adaptation se dégrade entre les fréquences 4.5 et 5.5 GHz alors qu'elle s'améliore entre 3.5 et 4.5 GHz. Concernant le gain réalisé en broadside, il augmente avec l'augmentation de L_p . La valeur choisie est celle de $L_p=35$ mm car elle permet d'avoir la meilleure adaptation pour le meilleur gain.

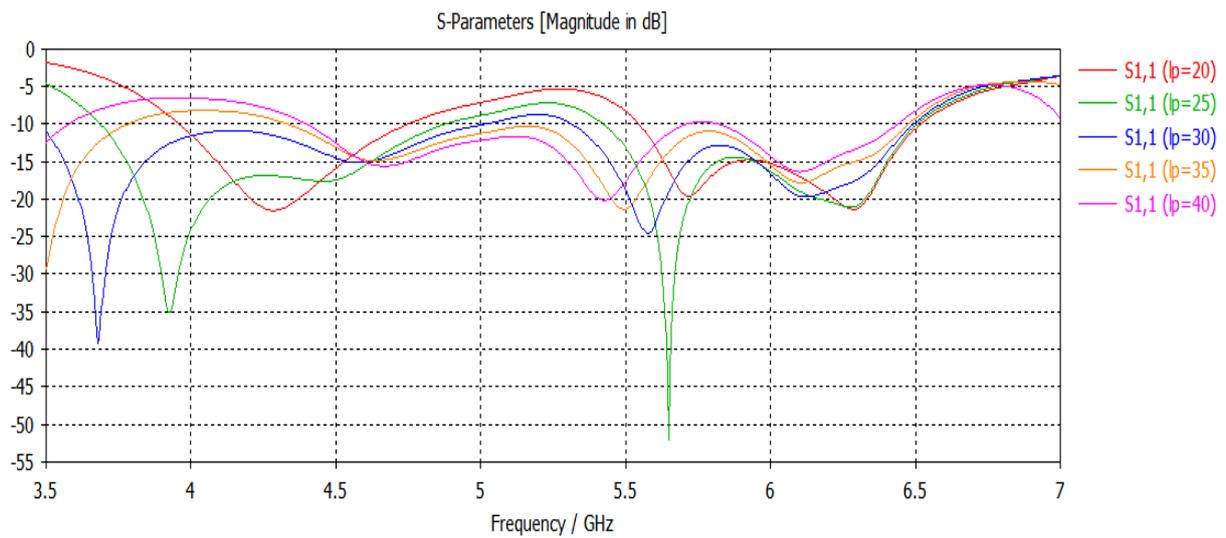


Figure 46 : Coefficient de réflexion pour différentes valeurs de L_p

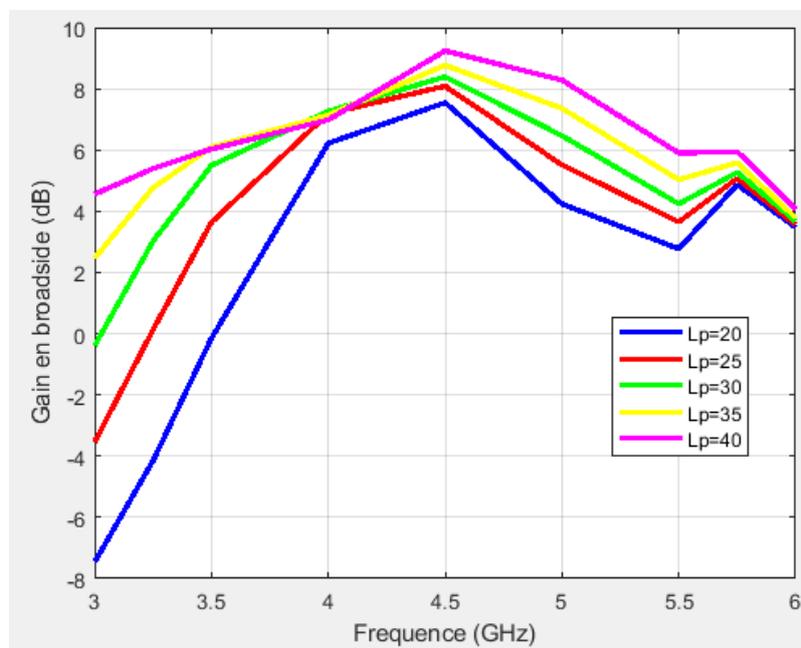


Figure 47: Gain en broadside pour différentes valeurs de L_p

III.6.2 Influence du paramètre W_p

On fera varier W_p entre 11mm et 31mm, on obtient les résultats de la **Figure 48** et la **Figure 49**. La variation de w_p n'influence pas significativement les performances de l'antenne. On opte pour la valeur $W_p = 21$ mm.

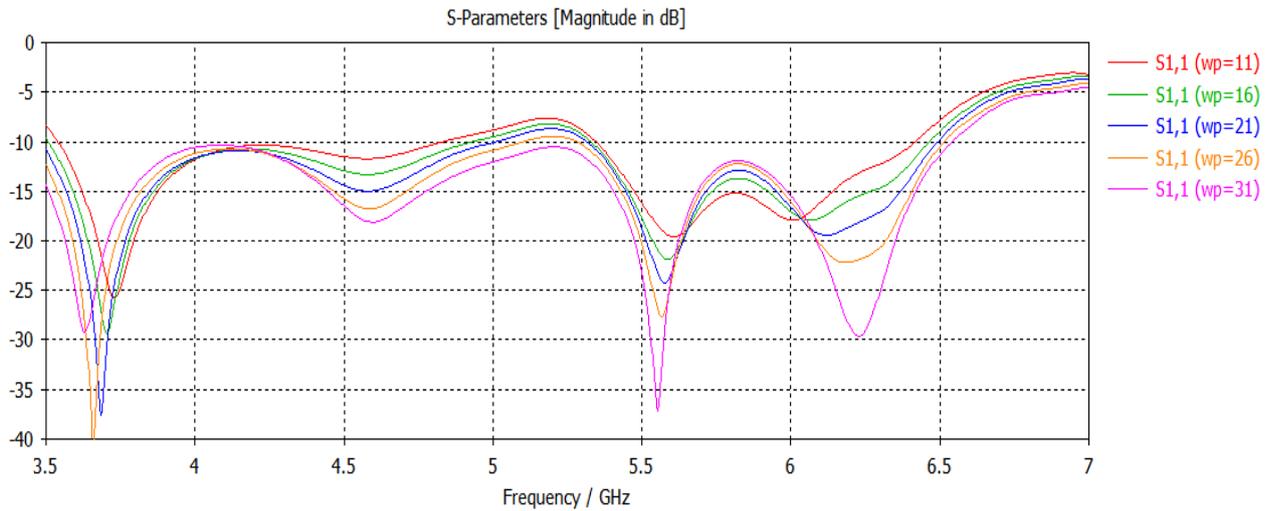


Figure 48: Coefficient de réflexion pour la variation de Wp

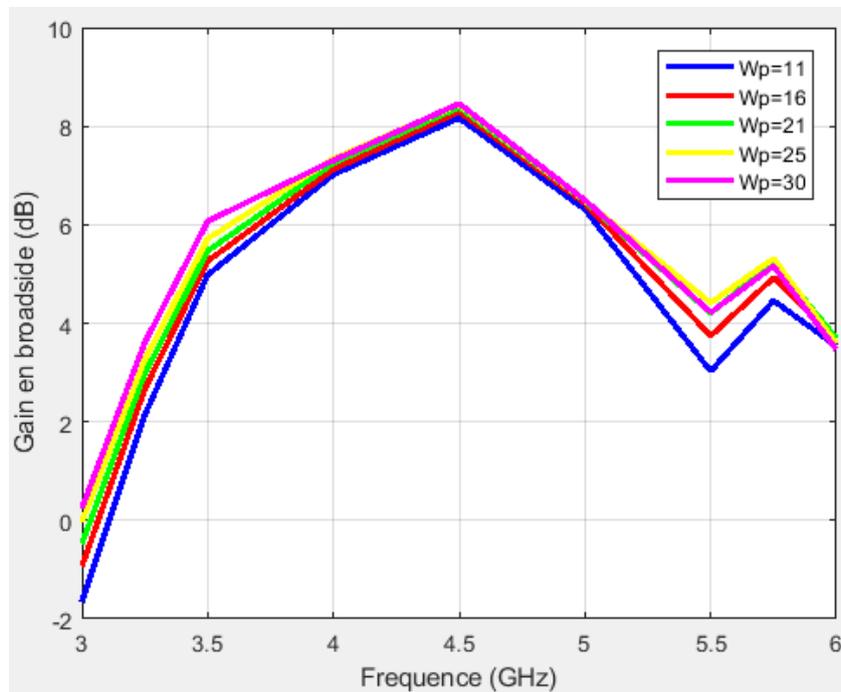


Figure 49: Gain en broadside pour la variation de Wp

III.6.3 Influence du paramètre Lcps

Pour étudier l'influence du paramètre Lcps nous allons le faire varier entre 15mm et 29mm puis en faisant la simulation nous obtenons les résultats de la **Figure 50** et la **Figure 51**.

La variation de Lcps influence significativement l'adaptation de l'antenne. On prendra la valeur de Lcps = 24mm. Car elle permet un $S_{11} < -10$ dB dans la bande 3.5 -5.75 GHz.

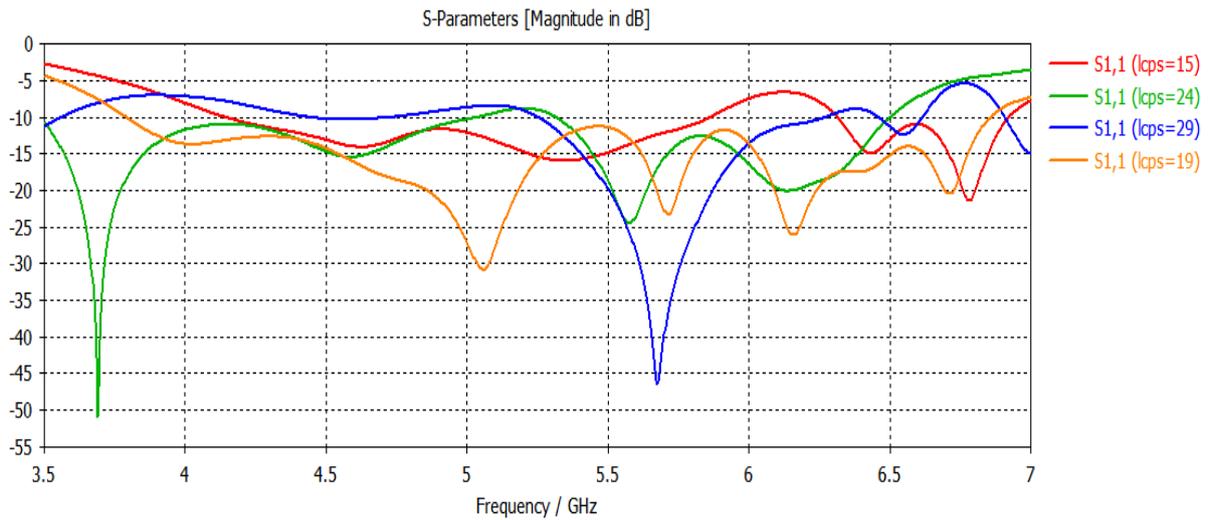


Figure 50: Coefficient de réflexion pour les valeurs de Lcps

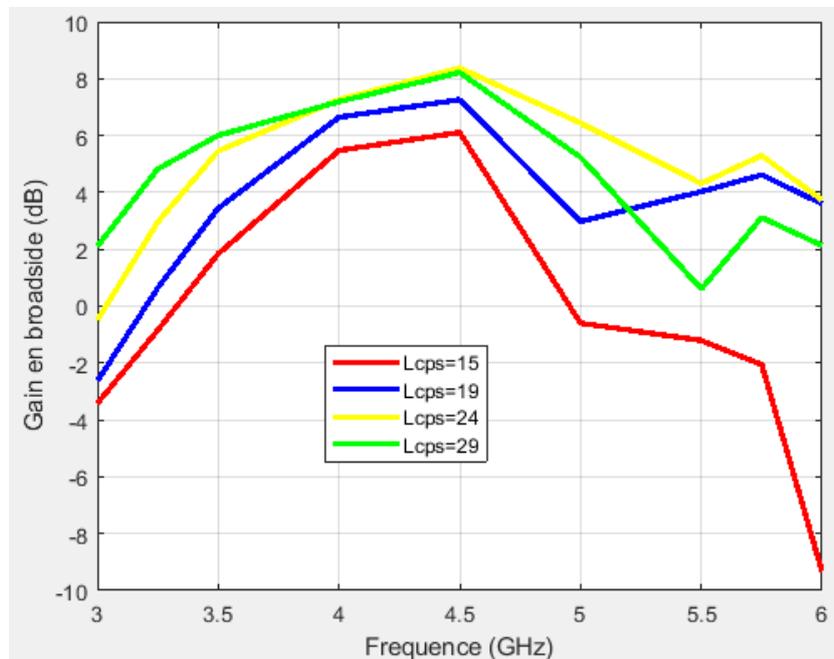


Figure 51: Gain maximum pour les valeurs de Lcps

III.6.4 Influence du paramètre Wcps

Cette fois ci, nous ferons varier Wcps entre les valeurs 0.1mm et 0.5mm, ce qui est présenté dans la **Figure 52** et la **Figure 53**. Les résultats obtenus montrent que la variation de Wcps n'influence que peu les performances de l'antenne.

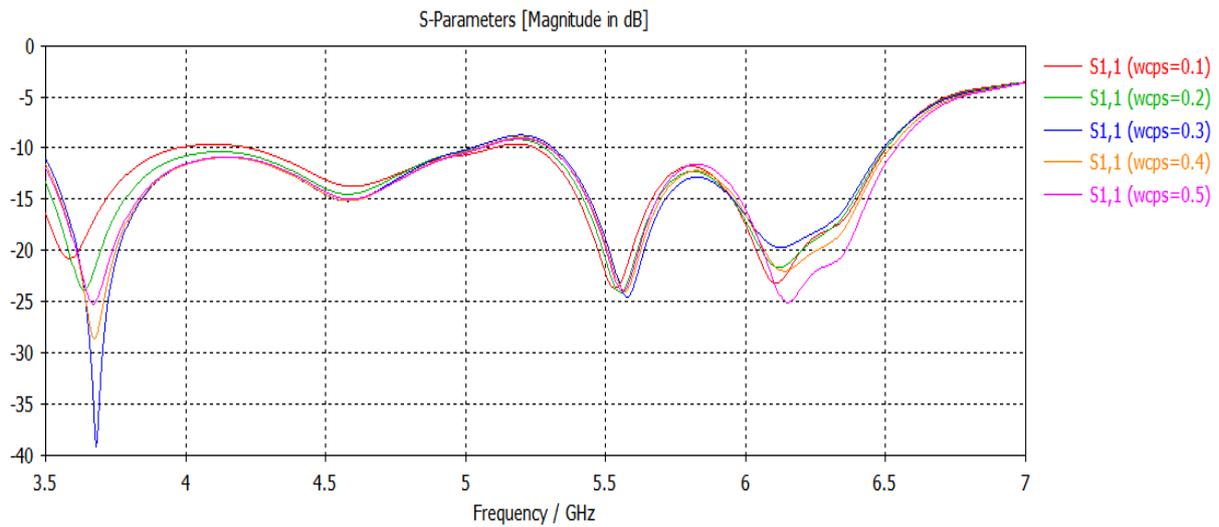


Figure 52: Coefficient de réflexion pour différentes valeurs de W_{cps}

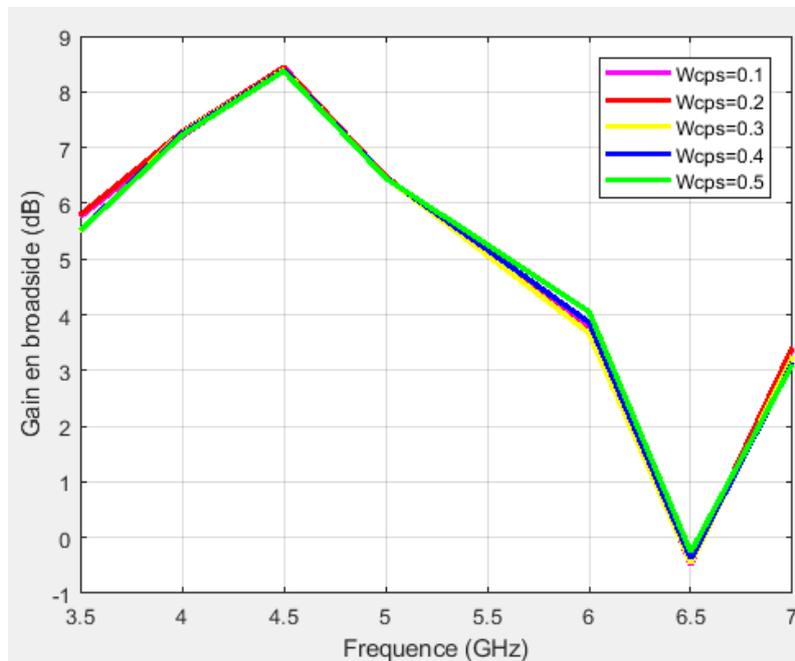


Figure 53: Gain broadside pour différentes valeurs de W_{cps}

III.6.5 Influence du paramètre gap

Pour finir cette étude paramétrique nous effectuerons des variations sur le paramètre gap de 0.3mm à 0.7mm, nous aurons les résultats de la **Figure 54** et la **Figure 55**. Comme on peut le constater, la valeur du gap la plus adaptée est $gap = 0.5mm$.

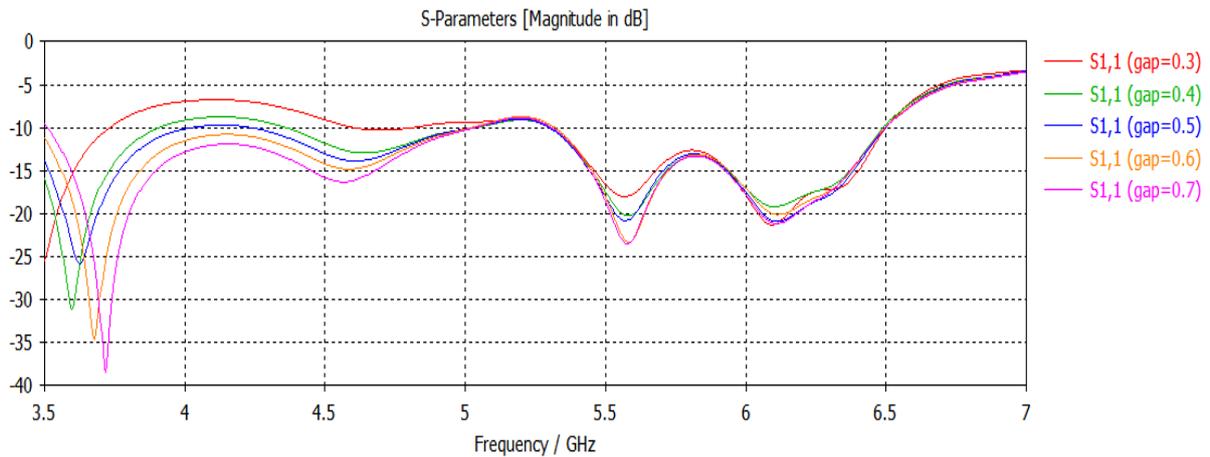


Figure 54: Coefficient de réflexion pour la variation du gap

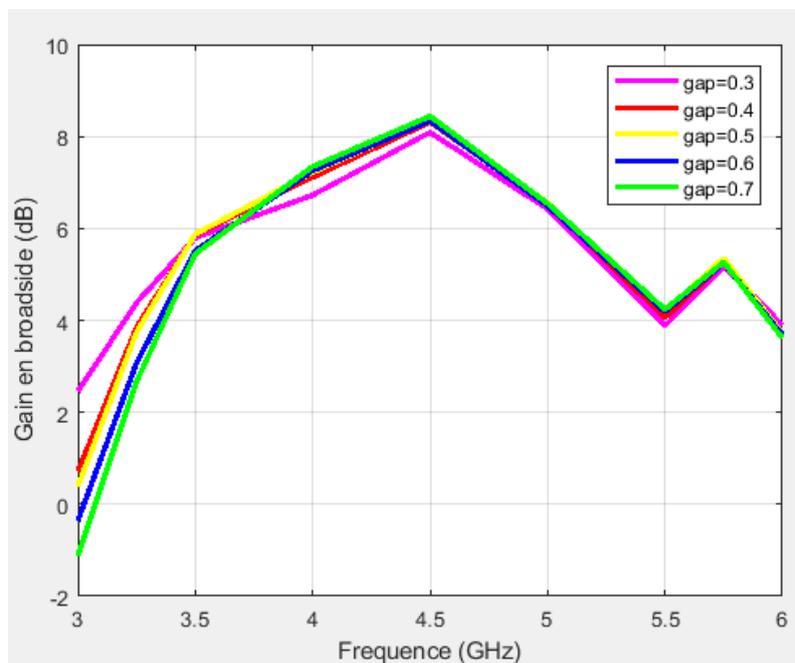


Figure 55: Gain en broadside pour la variation du gap

III.7 Structure optimisée

Après l'étude paramétrique, la structure optimale obtenue est présentée dans la **Figure 56** avec les dimensions suivantes : $W_{add} = 0\text{mm}$, $L_s = 75\text{mm}$, $W_s = 58\text{mm}$, $L_p = 35\text{mm}$, $W_p = 21\text{mm}$, $L_{cps} = 24\text{mm}$, $W_{cps} = 0.3\text{mm}$, $\text{gap} = 0.5\text{mm}$, $L_{mcp} = 28\text{mm}$, $W_{mcp} = 3.7\text{mm}$, $W_m = 20\text{mm}$, $L_t = L_k = 18\text{mm}$, $W_k = 10.15\text{mm}$, $h = 1.6\text{mm}$. Après avoir effectué une simulation avec cette nouvelle structure, nous avons obtenu le coefficient de réflexion (**Figure 57**).

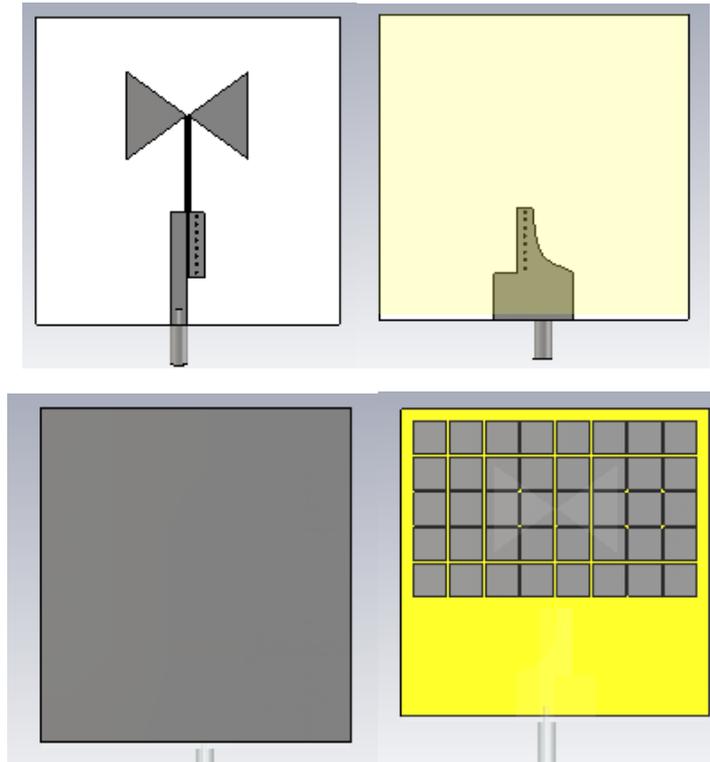


Figure 56: Structure optimale de l'antenne bowtie avec AMC, Substrat 1 avant/arrière (a) , Substrat 2 avant/arrière (b)

On observe un coefficient de réflexion inférieur à -10 dB dans la bande de fréquence 3.5-6.5 GHz, avec une petite remontée à -9 dB à la fréquence 5.25 GHz. Concernant le rayonnement de l'antenne, en comparant les résultats obtenus pour l'antenne bowtie avec et sans AMC, on remarque une amélioration significative du gain réalisé en broadside sur la bande 3.5-5.75 GHz, comme le montre la **Figure 58**. De plus, une stabilité du gain est observée dans la bande de fonctionnement et qui reste supérieur à $G_{max}-3dB$ avec un gain maximum de 8.2 dBi. Cependant, à la fréquence 5.5 GHz, aucune amélioration n'est observée. Une analyse de la distribution des courants doit être effectuée afin de repérer les courants destructifs au niveau de l'AMC pour les supprimer.

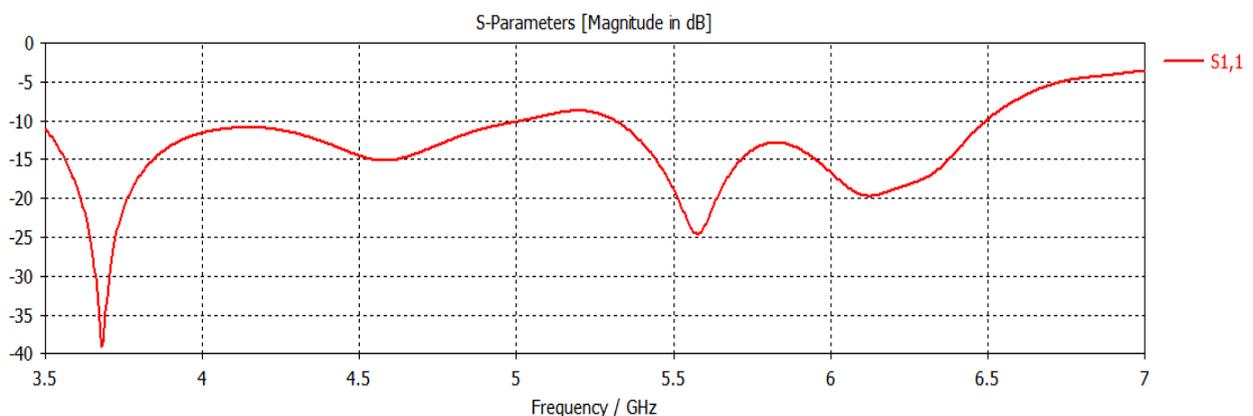


Figure 57: Coefficient de réflexion de la structure optimisée

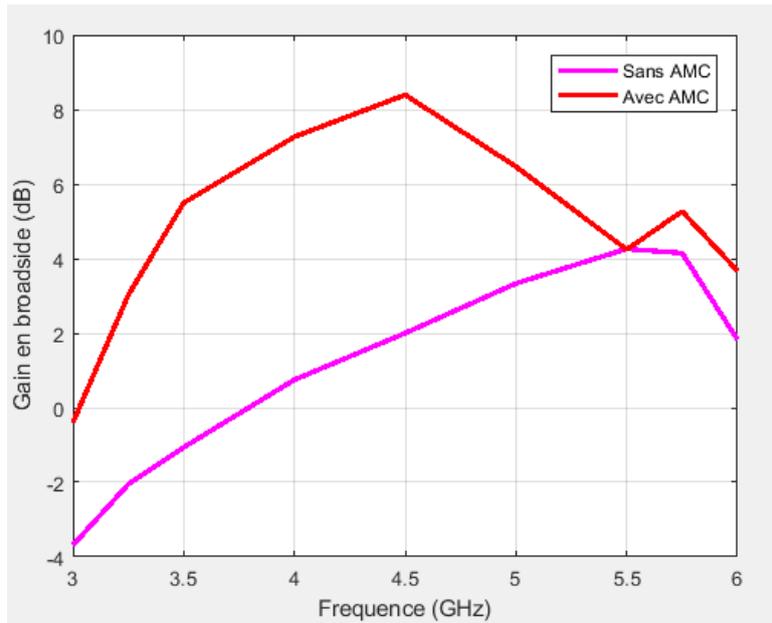


Figure 58: Gain en broadside de l'antenne avec et sans AMC

La **Figure 59** présente le diagramme de rayonnement 3D de l'antenne aux fréquences 3.25, 3.5, 4, 4.5, 5 et 5.75GHz. On remarque qu'il y a un rayonnement directif pour toutes les fréquences avec un gain maximum de 8.2 dBi.

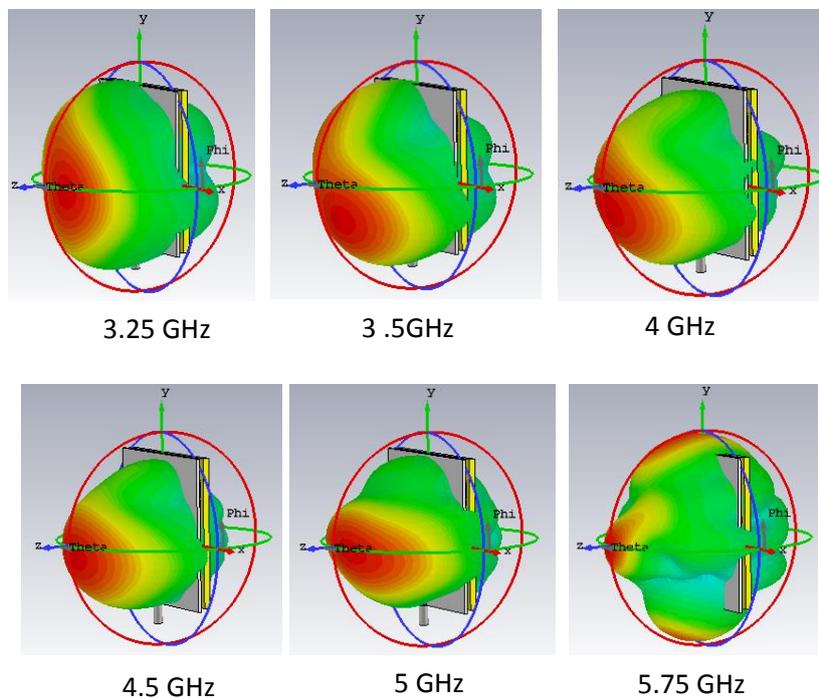


Figure 59: Les diagrammes de rayonnement directifs de la structure optimisée à 3.25 GHz, 3.5 GHz, 4 GHz, 4.5 GHz, 5 GHz et 5.75 GHz

III.8 Conclusion

Dans ce mémoire, un réflecteur à conducteur magnétique artificiel (AMC) a été utilisé pour améliorer les performances d'une antenne bowtie large bande avec une faible épaisseur de $(\lambda / 10)$ à la fréquence centrale de fonctionnement, soit 4,5 GHz). Cette structure est simple, peu coûteuse et fonctionne sur la bande de 3.5 à 5.75 GHz (une partie de la bande C) qui convient aux applications spatiales. Ses diagrammes de rayonnement sont directifs et elle permet un gain stable variant de 5 à 8.2 dBi.

Conclusion générale et perspectives

Les antennes à large bande représentent une solution prometteuse pour les systèmes de communication sans fil, la taille, le coût, la bande passante et l'efficacité sont des exigences essentielles pour ces systèmes

Ce projet de fin d'étude englobe l'étude pour la conception d'une antenne bowtie large bande avec AMC, elle présente un gain élevé applicable pour les avions et les satellites. Au cours des chapitres nous avons détaillé les systèmes de communication et de navigation aérospatial ainsi que les différents types d'antennes utilisées pour les avions et les satellites. On a aussi défini quelques-uns de leurs caractéristiques, ce qui nous a montré que le gain et le rayonnement étaient des paramètres primordiaux lors de la conception d'une antenne compacte, sans oublier le coefficient de réflexion qui détermine son adaptation.

L'antenne conçue lors de cette étude présente de nombreux avantages, sa large bande passante qui s'étale de 3.5 à 5.75 GHz permet de minimiser le nombre d'antennes utilisées sur un avion pour les communications, sa directivité et son rayonnement directif et stable est primordial dans le domaine aéronautique et spatial afin d'éviter des interférences ou d'endommager les autres équipements à bord.

Comme perspective à ce travail, la réalisation du prototype, la mesure de ses caractéristiques en paramètres S et diagrammes de rayonnement permettra de valider la conception.

Références

1. **Corbier, J P.** Les balises de radionavigation, les ailes virtuelles, . *Aéroclub de Montpellier*. [En ligne] [Citation : 02 Février 2020.] https://www.aeroclub-montpellier.org/wp-content/uploads/Doc_Formation/fiche_Radionavigation1.pdf.
2. **Berthier, p.** *SAT : Sécurisation de l'ADS-B grâce à Tesla* . s.l. : Université de Montréal, Département de génie informatique et génie logiciel, école polytechnique de Montréal.
3. *Disponibilité et protection à long terme du spectre VSAT. OACI, DOUZIÈME CONFÉRENCE DE NAVIGATION AÉRIENNE.* Montréal : s.n., 19-30 Novembre 2012.
4. **Lepage, A C.** *Introduction aux télécommunications par satellites* . Paris : Département Communications et Electronique, université Télécom ParisTech.
5. **N Benhaddad, R Ourloum.** *Technologie de positionnement pour les systèmes de navigation GNSS.* s.l. : Projet de fin d'étude, Université de Bejaia, 2015.
6. **Satellite services, Aviation.** *ESOA Emea Satellite Operators Association*. [En ligne] <https://www.esoa.net/services/aviation.asp>.
7. **Balanis, Constantine A.** *Antenna Theory, analysis and design, second edition*.
8. **Mars Cube One (MarCO) JPL** . [En ligne] [Citation : 12 Février 2020.] <https://www.jpl.nasa.gov/cubesat/missions/marco.php>.
9. **Mars InSight Mission NASA** . [En ligne] [Citation : 12 Février 2020.] <https://mars.nasa.gov/insight/mission/overview/>.
10. **NASA JPL Mars Reconnaissance Orbiter.** [En ligne] [Citation : 12 Février 2020.] <https://mars.nasa.gov/files/mro/MRO-060303.pdf>.
11. **NASA JPL RainCube** . [En ligne] [Citation : 12 Février 2020.] <https://www.jpl.nasa.gov/cubesat/missions/raincube.php>.
12. **Ohmori, Shingo.** *Aeronautical and Maritime Antennas for Satellite Communications* . s.l. : Communication Research Laboratory.
13. **Chusseau, L.** *Paramètres S - Antennes*. . France : DEA. De 2001 à 2005 à l'Université Montpellier 2.
14. **Balanis, Constantine A.** *Theory, Analysis and Design, Third Edition* .
15. **F Yang, Y R Samii.** *Electromagnetic Band Gap Structure in Antenna Engineering*. England : Cambridge University Press, 2009.
16. **Pimenta, M S.** *Antennes souples à base de métamatériaux de type conducteurs magnétiques artificiels pour les standards de systèmes de géolocalisation*. s.l. : Université Nice Sophia Antipolis, 2013.
17. **Damaj, L.** *Thèse doctorat, Antenne Versatile Intriquée*. s.l. : Télécom ParisTech, 2013.
18. **A Zahzah, O Hablal.** *Conception et simulation d'une antenne à surface haute impédance pour le système GPS*. Blida : Institut d'Aéronautique et d'Etude Spatial IAES, 2017.

- 19. Presse, A.** *Conception d'antennes souples et de conducteurs magnétiques artificiels en bande UHF.* s.l. : Université Rennes 1, 2015.
- 20. A Ziane, F Kamari.** *Antenne large bande à conducteur magnétique artificiel.* Blida : Institut d'Aéronautique et des études spatiales , 2019.
- 21. Y W Zhong, G M Yang, L Zhong.** *Gain enhancement of bowtie antenna using fractal wideband artificial magnetic conductor ground.* 2015.
- 22. F Yang, W Tang.** Fujian, China : A novel Low-Profile High-Gain Antenna Based on artificial magnetic conductor for LTE applications, 2012.
- 23. Hadarig, M Elena de Cos Gomez, Y. Álvarez, F Las-Heras.** *Novel Bowtie–AMC combination for 5.8-GHz RFID tags usable with metallic objects.* s.l. : IEEE Antennas and wireless propagation letters, 2010.
- 24. C Joshi, A C Lepage, J Sarrazin, X Begaud.** *Enhanced broadside gain of an ultra-wide band diamond dipole antenna using a hybrid reflector.* s.l. : 2016.
- 25. X Y Song, T L Zhang, Z H Yan.** *Broadband and low profile slot antenna with AMC surface for X/Ku application.* China : s.n., August 2018.
- 26. Z A Bediabdallah, Y I Boudjelal.** *Nouvelle topologie des filtres passe bande à base de la technologie SIW operant en bandes KU, C et S pour des applications satellitaires.* s.l. : Université de Tlemcen, Juin 2015.
- 27. Hadj Youce F, Selloum O.** *Conception et réalisation d'une antenne large bande à balun intégré .* Blida : Institut d'Aéronautique et des Etudes Spatiales, 2018.