

**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 : Avionique**

**Thème**

**Conception et réalisation d'une antenne directive large  
bande dans la bande C**

**Réalisé par :**

**KHERRA Ilham**  
**ABDA Khedidja**

**Encadré par :**

**M<sup>elle</sup> CHENAOUI Safia**  
**Dr. MOUFFOK Lila**

**Année Universitaire : 2020/2021**

# Remerciements

Au terme de ce travail, on tient de remercier en premier lieu ALLAH le miséricordieux qui nous avoir donné la force et la volonté d'achever cette modeste étude.

Je voudrais tout d'abord adresser toute nos sincères remerciements et notre profonde gratitude à notre promotrice Dr. MOUFFOK Lila et Co-promotrice M<sup>elle</sup> CHENAOUI Safia pour leurs patiences, leurs disponibilités et leurs judicieux conseils qui sont attribuées à alimenter notre réflexion. Nous la remercions pour toutes les connaissances qu'elles nous ont apportées.

Je veux aussi remercier le corps professoral et administratif de l'institut d'aéronautique et des études spatiales (IAES) université SAAD DAHLEB Blida qu'ils ont fourni les outils nécessaires à la réussite de nos études universitaires.

Nos vifs remerciements vont également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté en acceptant d'examiner notre travail.

Je remercie en particulier l'ingénieur de l'entreprise ALMITech pour m'avie donner l'occasion de réaliser mon travail sur terrain.

Enfin, je tiens à remercier toutes les personnes qui ont contribué au succès de mes études et qui m'ont aidé lors de la rédaction de ce mémoire.

## *Dédicaces*

*À mes très chers parents qui ont toujours été là pour moi pour leur soutien inconditionnel et leur encouragement qui ont été d'une grande aide.*

*À mon frère et sa petite famille et surtout Adham.*

*À mes sœurs et leurs maris et enfants pour leurs encouragements.*

*Et à tous mes amis qui m'ont apporté leurs soutiens moral et intellectuels.*

*À tous ces intervenants je présente mes remerciements, mon respect et ma gratitude.*

*Ilham*

## *Dédicaces*

*A l'homme dont je suis fière d'être sa fille, mon père 'El hadj Romani', en signe d'amour, de reconnaissance et de gratitude pour tous les soutiens et les sacrifices dont il a fait.*

*A mes parents 'Naguim' et 'Chafia', en témoignage de ma force pour leurs encouragements dans les moments difficiles.*

*A Yamam, la lanterne qui éclaire mon chemin et m'illumine de douceur et d'amour. , sans toi rien n'aurait été possible. Merci pour ton soutien et ton amour.*

*A celui que j'aime beaucoup et qui m'a toujours soutenu, mon cher 'Nanou'.*

*A mes chères sœurs surtout mon bras droit ' Dhikra ', et mes chers frères.*

*A mon oncle et mes chères tantes et spécialement 'Pitousti ' et 'Douja' et toute ma famille.*

*A la mémoire de ma grand-mère ' Zohra ', et ma tante ' Fatima' que DIEU garde leurs âmes dans son vaste paradis.*

*A toutes mes amies particulièrement ' Meriem ', ' Sana' et 'Noor'.*

*Khedidja*

### Résumé

L'objectif de ce travail consiste en la conception, la simulation et la réalisation d'une antenne large bande à conducteur magnétique artificiel (AMC) dans la bande C. D'abord, des éléments de base sur les antennes microstrips ont été introduits, puis un état de l'art sur les antennes larges bandes avec conducteurs magnétiques artificiels a été effectué. Ensuite, une étude sur 3 différentes cellules AMC a été effectuée. Enfin, la structure antennaire a été réalisée et mesurée.

### Abstract

The objective of this work consist is the design, simulation and realization of a broadband antenna with an artificial magnetic conductor (AMC) in the C band. First, basic elements on the microstrip antenna were introduced, then a state art on broadband antennas with artificial magnetic conductors has been done. Then, a study on 3 different AMC cells was performed. Finally, the antenna structure was produced and measured.

### ملخص

يتمثل الهدف من هذا العمل في تصميم، محاكاة ونتاج هوائي عريض النطاق مع موصل مغناطيسي اصطناعي في النطاق C. أولاً، تم ادخال العناصر الأساسية على هوائيات microstrip. ثم تم تنفيذ أحدث ما توصلت اليه هوائيات النطاق العريض مع موصل مغناطيسي اصطناعي. ثم تم اجراء دراسات على 3 خلايا AMC مختلفة. أخيراً، تم انتاج هيكل الهوائي وقياسه.

## Table des matières

<b>Remerciements</b> .....	2
<b>Dédicaces</b> .....	3
<b>Résumé</b> .....	5
<b>Liste des figures</b> .....	9
<b>Liste des abréviations</b> .....	12
<b>Introduction générale</b> .....	14
<b>Chapitre 1 : Généralités sur les antennes imprimées</b> .....	16
<b>1.1 Introduction</b> .....	16
<b>1.2 Définition</b> .....	16
<b>1.3 Caractéristiques des antennes</b> .....	16
<b>1.3.1 Paramètres radioélectriques :</b> .....	16
<b>1.3.1.1 Impédance d'entrée</b> .....	16
<b>1.3.1.2 b. Paramètres S</b> .....	16
<b>1.3.1.3 Bande passante</b> .....	17
<b>1.3.2 Paramètres de rayonnement</b> .....	18
<b>1.3.2.1 Diagramme de rayonnement</b> .....	18
<b>1.3.2.2 Directivité :</b> .....	18
<b>1.3.2.3 Efficacité de l'antenne</b> .....	19
<b>1.3.2.4 Gain :</b> .....	19
<b>1.4 Les antennes imprimées</b> .....	19
<b>1.4.1 Description</b> .....	20
<b>1.4.2 Les techniques d'alimentation</b> .....	20
<b>1.4.2.1 Alimentation par ligne microruban</b> .....	21
<b>1.4.2.2 Alimentation par câble coaxial</b> .....	21

1.4.3	Avantages et les inconvénients des antennes patch .....	22
1.4.4	Applications des antennes microruban : .....	23
1.5	Antennes pour satellites .....	24
1.5.1	Antenne CubeSat .....	24
1.5.2	Antennes de communication par satellite GEO .....	25
1.5.2.1	Système MBA (Multi-Beam Antenna) : .....	26
1.5.2.2	APAA (Active Phased Array Antenna) .....	27
1.6	Antennes aéronautiques et maritime .....	27
1.6.1	INMARSAT_A, B et F .....	28
1.6.2	INMARSAT_C .....	28
1.6.3	INMARSAT_AERO .....	29
1.7	Les types d'antennes utilisées sur les avions .....	30
1.8	Conclusion .....	31
2	CHAPITRE 2 : Etat de l'art sur les AMC .....	33
2.1	Introduction .....	33
2.2	Définition des AMC .....	33
2.3	Principe de fonctionnement .....	35
2.4	Etat de l'art des antennes large bande avec AMC .....	36
2.4.1	Antenne en boucle .....	Error! Bookmark not defined.
2.4.2	Antenne dipôle .....	Error! Bookmark not defined.
2.4.3	Antenne à double polarisation .....	Error! Bookmark not defined.
2.5	Conclusion .....	40
3	Chapitre 3 : Conception d'une antenne large bande à conducteur magnétique artificiel (AMC) .....	42
3.1	Introduction : .....	42
3.2	Présentation du simulateur CST Microwave Studio .....	42

<b>3.3</b>	<b>Résumé des travaux précédents :</b> .....	42
<b>3.4</b>	<b>Conception des cellules AMC :</b> .....	45
<b>3.4.1</b>	<b>Cellule AMC 1</b> .....	46
<b>3.4.2</b>	<b>Cellule AMC 2</b> .....	47
<b>3.4.3</b>	<b>Cellule AMC 3</b> .....	48
<b>3.5</b>	<b>Antenne Bowtie sur AMC</b> .....	48
<b>3.6</b>	<b>Etudes paramétriques :</b> .....	48
<b>3.6.1</b>	<b>L'influence des paramètres :</b> .....	48
<b>3.6.1.1</b>	<b>Cellule AMC 1</b> .....	48
<b>3.6.1.2</b>	<b>Cellule AMC 2</b> .....	49
<b>3.6.1.3</b>	<b>Cellule AMC 3</b> .....	50
<b>3.6.2</b>	<b>L'influence de paramètre ha :</b> .....	53
<b>3.7</b>	<b>Structure optimisée :</b> .....	53
<b>3.8</b>	<b>Réalisation et mesure de l'antenne bowtie + AMC</b> .....	54
<b>3.9</b>	<b>Conclusion</b> .....	56
	<b>Bibliographie</b> .....	58



## Liste des figures

### Chapitre 1: Généralités sur les antennes imprimées

<b>Figure 1.1</b> Représentation en quadripôle .....	17
<b>Figure 1.2</b> Bande passante et coefficient de réflexion .....	18
<b>Figure 1.3</b> Diagramme de rayonnement (a) 2D cartésien (b) 2D polaire. ....	18
<b>Figure 1.4</b> Antenne microruban à plaque. ....	20
<b>Figure 1.5</b> Antenne rectangulaire alimenté par ligne microruban .....	21
<b>Figure 1.6</b> Antenne microruban alimentée par câble coaxial.....	21
<b>Figure 1.7</b> Monopôle planaire rectangulaire .....	23
<b>Figure 1.8</b> (a) Antenne Vivaldi antipodale (b) Sa réalisation. ....	23
<b>Figure 1.9</b> (a) Antenne papillon et ses paramètres (b) Sa réalisation. ....	23
<b>Figure 1.10</b> Satellite MarCo (a)schéma détaillée (b) vue réelle.....	24
<b>Figure 1.11</b> InSight (a)schéma détaillée(b) vue réelle .....	25
<b>Figure 1.12</b> KIZUNA : Satellite de communication de données à haute vitesse WINDS .....	26
<b>Figure 1.13</b> Présentation du système MBA.....	26
<b>Figure 1.14</b> Illustration de la configuration APAA.....	27
<b>Figure 1.15</b> Photographie de l'équipement (ADE) .....	28
<b>Figure 1.16</b> INMARSAT-C pour un petit navire .....	29
<b>Figure 1.17</b> Une antenne avec un HPA et un DIP / LNA : (a) à faible gain (b) à gain élevé .....	29
<b>Figure 1.18</b> Les différentes antennes sur l'aviron.....	30

### Chapitre 2 : Etat de l'art sur les AMC

<b>Figure 2.1</b> Théorie des images et réflexion sur des plans: PMC .....	34
<b>Figure 2.2</b> Surface de Sivenpiper, (a) : Model 2D, (b) : Model 3D .....	35
<b>Figure 2.3</b> Types de CMA.....	35
<b>Figure 2.4</b> (a)Section de la surface champignon (b) circuit équivalent .....	36
<b>Figure 2.5</b> a - antenne en boucle : b- antenne en boucle avec surface AMC	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
<b>Figure 2.6</b> Géométrie de la cellule unitaire AMC.....	37
<b>Figure 2.7</b> Prototype fabriqué de l'antenne en boucle.....	37

<b>Figure 2.8</b> Résultats simulés et mesuré .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
<b>Figure 2.9</b> Antenne dipôle diamant .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
<b>Figure 2.10</b> Antenne finale avec un réflecteur hybride .....	38
<b>Figure 2.11</b> la vue 3D de l'antenne à double polarisation .....	39
<b>Figure 2.12</b> Géométrie des couches d'antenne. (a) Vue de dessus de la couche 1, (b) Vue de dessous de la couche 1, (c) Vue de dessous de la couche 2. ....	39
<b>Figure 2.13</b> Manufactured prototype of the antenna. ....	40

### **Chapitre 3 : Conception d'une antenne large bande à conducteur magnétique artificiel (AMC)**

<b>Figure 3.1</b> Antenne proposée par les étudiants du PFE 2018 (bowtie + balun intégré).....	43
<b>Figure 3.2</b> Antenne proposée par les étudiants du PFE 2019 (bowtie + balun) avec AMC de 5*8 cellules.....	43
<b>Figure 3.3</b> Antenne proposée par les étudiants du PFE 2020 placée sur 8*5 Cellules AMC ...	44
<b>Figure 3.4</b> Coefficient de réflexion des PFE précédents .....	44
<b>Figure 3.5</b> Le gain des PFE précédents.....	44
<b>Figure 3.6</b> Condition aux limites de la cellule AMC .....	45
<b>Figure 3.7</b> Distance de champ lointain dans le port du guide d'ondes.....	46
<b>Figure 3.8</b> Les dimensions de la Cellule AMC 1.....	46
<b>Figure 3.9</b> Phase du coefficient de réflexion de l'AMC 1 .....	47
<b>Figure 3.10</b> Les dimensions de la Cellule AMC 2.....	47
<b>Figure 3.11</b> Phase du coefficient de réflexion de l'AMC 2 .....	47
<b>Figure 3.12</b> Les dimensions de la Cellule AMC 3.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
<b>Figure 3.13</b> Phase du coefficient de réflexion de l'AMC 3 .....	48
<b>Figure 3.14</b> Antenne bowtie placée sur 5*8 Cellules AMC (a) AMC 1 (b) AMC 2 (c) AMC 3 .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
<b>Figure 3.15</b> Changement de paramètre « b » pour la cellule 1 (a) S11 (b) gain .....	49
<b>Figure 3.16</b> Changement de paramètre « a » pour la cellule 1 (a) S11 (b) gain .....	49
<b>Figure 3.17</b> Changement de paramètre « b » pour la cellule 2 (a) S11 (b) gain .....	50
<b>Figure 3.18</b> Changement de paramètre « a » pour la cellule 2 (a) S11 (b) gain .....	50
<b>Figure 3.19</b> Changement de paramètre « b » pour la cellule 3 (a) S11 (b) gain .....	51
<b>Figure 3.20</b> Changement de paramètre « a » pour la cellule 3 (a) S11 (b) gain .....	51

<b>Figure 3.21</b>	Changement de paramètre « d » pour la cellule 3 (a) S11 (b) gain .....	51
<b>Figure 3.22</b>	Changement de paramètre « e » pour la cellule 3 (a) S11 (b) gain .....	52
<b>Figure 3.23</b>	Changement de paramètre « c » pour la cellule 3 (a) S11 (b) gain .....	52
<b>Figure 3.24</b>	Changement de paramètre « f » pour la cellule 3 (a) S11 (b) gain.....	52
<b>Figure 3.25</b>	Comparaison des meilleurs résultats pour chaque cellule (a) S11 (b) gain.....	53
<b>Figure 3.26</b>	Différentes valeurs de ha pour la cellule choisie (a) S11 (b) gain.....	53
<b>Figure 3.27</b>	Coefficient de réflexion de la structure optimale .....	54
<b>Figure 3.28</b>	Le gain de la structure optimale .....	54
<b>Figure 3.29</b>	(a) les éléments nécessaires sélectionnée (b) conversion en fichier Gerber .....	54
<b>Figure 3.30</b>	Fichier Gerber de l'aantenne (a) vue de face (b) vue arrière	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
<b>Figure 3.31</b>	Fichier Gerber de l'AMC (a) vue de face (b) vue arrière	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
<b>Figure 3.32</b>	Le fichier Gerber dans DipTrace.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
<b>Figure 3.33</b>	Résultat finale de l'antenne (a) face arrière (b) face avant .....	55
<b>Figure 3.34</b>	Résultat finale de l'AMC (a) face avant (b) face arrière	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
<b>Figure 3.35</b>	Le prototype de l'antenne réalisé (a) Vue de face (b) Vue arrière. ....	55
<b>Figure 3.36</b>	Le prototype de l'AMC réalisé (a) Vue de face (b) Vue arrière.....	55
<b>Figure 3.37</b>	S11 noir) simulé rouge) mesuré.....	56

## Liste des abréviations

<b>ADE</b>	Above Deck Equipment
<b>ADF</b>	Automatic Direction Finder
<b>AES</b>	Aeronautical Earth Station
<b>AMC</b>	Artificial Magnetic Conductor
<b>APAA</b>	Active Phased Array Antenna.
<b>ATC</b>	Air Traffic Control
<b>BDE</b>	Below Deck Equipment
<b>BSC</b>	Beam Steering Controller
<b>CPW</b>	
<b>CST</b>	Computer Simulation Technology
<b>DME</b>	Distance Measuring Equipment
<b>EBG</b>	Electromagnetic Band Gap
<b>FDTD</b>	Finite Difference Time Domain
<b>FIT</b>	Finite Integration Technique
<b>FM</b>	Frequency Modulation
<b>GES</b>	Ground Earth Station
<b>GLONASS</b>	Globalnaya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema
<b>GPS</b>	Global Positioning System
<b>HCU</b>	Heater Control Unit
<b>HF</b>	High Frequency
<b>HPA</b>	High Power Amplifier
<b>HPBW</b>	Half Power Beam Width
<b>IEEE</b>	Institute of Electrical and Electronics Engineers
<b>ILS</b>	Instrument Landing System
<b>INMARSAT</b>	INternational MARitime SATellite Organization
<b>INSIGHT</b>	INterior exploration using Seismic Investigation, Geodesy and Heat Transport
<b>JAXA</b>	Japanese Space Exploration Agency
<b>JPL</b>	Jet Propulsion Laboratory
<b>LNA</b>	Low Noise Amplifier
<b>MarCO</b>	Mars Cube One
<b>MBA</b>	Multi-Beam Antenna

## Liste des abréviations

---

<b>MLS</b>	Microwave Landing System
<b>MWS</b>	MicroWave Studio
<b>NASA</b>	National Aeronautics and Space Administration
<b>NTIC</b>	Nouvelles Technologies de l'Information et de la Communication
<b>PEC</b>	Perfect Magnetic Conductor
<b>PDU</b>	Power Distribution Unit
<b>PMC</b>	Perfect Electric Conductor
<b>RA</b>	Radar Altimeter
<b>SATCOM</b>	SATellite COMmunications
<b>SHF</b>	Super High Frequency
<b>SS-TDMA</b>	Satellite Switched Time Division Multiple Access
<b>TEM</b>	Transverse Electric and Magnetic
<b>TCAS</b>	Traffic Collision Avoidance System
<b>UHF</b>	Ultra High Frequency
<b>UIT</b>	Union internationale de télécommunication
<b>VHF</b>	Very High Frequency
<b>VOR</b>	VHF Omnidirectionnel radio Range

### Introduction générale

Un avion est une structure complexe qui agit comme un corps diffusant qui réfléchit les ondes électromagnétiques émis par les antennes. L'avion comprend de nombreuses antennes pour de nombreuses fonctionnalités en vol et/ou au sol. De nos jours, Les systèmes de navigation par satellite sont devenus une partie intégrante de toutes les applications où la mobilité joue un rôle important. Sur un avion, engin spatial, satellite ou missile hauts performances, il est aérodynamiquement préférable d'avoir des antennes compactes alors les antennes microstrip ont été largement utilisés ces dernières années en raison de leurs bonnes caractéristiques: légères, simples à fabriquer avec un faible coût. D'autres part, une grande variété de types différents, tels que le radar, la navigation, systèmes atterrissage, les communications par satellite....etc sont nécessaires dans ces engins. L'un des objectifs principaux dans l'intégration de systèmes dans les avions est de diminuer la taille et le nombre d'antenne car le volume disponible est assez restreint. Par conséquent, les antennes microstrip large bande sont recommandées. Cependant elles restent limiter côté bande passante, et directivité. De plus, pour des raisons de compatibilité électromagnétique, ces antennes ne doivent pas interférer avec les autres systèmes de bord et par conséquent ne doivent 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, on propose d'intégrer des méta-matériaux tels que les AMC (Artificiel Magnetic Conductor) car leurs structures permettent de rendre l'antenne directive, en éliminant les rayonnements arrières, tout en garantissant une faible épaisseur. L'objectif de ce travail de mémoire est de concevoir et réaliser une antenne large bande directive en y intégrant des AMC dans la bande C.

Ce mémoire est organisé en trois chapitres, le premier chapitre définit les antennes et leurs caractéristiques puis il présente les systèmes qui permettent de guider un avion que ce soit à l'aide du système CNS ou grâce aux systèmes satellitaires. Le deuxième chapitre explique le principe de fonctionnement et les caractéristiques des AMC avec un état de l'art sur les antennes larges bandes utilisant les AMC.

Le troisième chapitre présente la conception, la simulation et la réalisation d'une antenne large bande directive avec un gain stable dans une bande de fréquence allant de 4 GHz à 6.56 GHz. Une étude sur le motif de la cellule AMC choisie a été détaillée.

# Chapitre 1 : Généralités sur les antennes imprimées

## Chapitre 1 : Généralités sur les antennes imprimées

### 1.1 Introduction

Dans les application d'avion, d'engins spatiaux, de satellites et de missiles hauts performances, où la taille, le poids, le cout, les performances, la facilité d'installation et le profil aérodynamique sont des contraintes, les antennes compactes sont nécessaires.

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

### 1.2 Définition

La définition standard IEEE définit l'antenne comme "un moyen pour émettre ou recevoir des ondes radio. En d'autres termes, l'antenne est la transition entre l'espace libre et un dispositif de guidage [1].

Les antennes microrubans possèdent plusieurs caractéristiques. Ces dernières varient selon l'application dans laquelle l'antenne est utilisée .On distingue les caractéristiques suivantes : Une antenne est caractérisée par des paramètres communs. Ces paramètres sont classés en deux catégories. La première catégorie définit l'antenne comme élément du circuit dans lequel elle est connectée. La seconde s'intéresse aux propriétés de rayonnement de l'antenne.

### 1.3 Caractéristiques des antennes

#### 1.3.1 Paramètres radioélectriques :

##### 1.3.1.1 Impédance d'entrée

L'impédance d'entrée ( $Z_e$ ) est définie comme étant l'impédance présentée par une antenne à ses bornes. Elle est égale au rapport de la tension  $V_e$  sur le courant  $I_e$  présent à l'entrée de l'antenne et peut s'écrire comme suit:

$$Z_e = V_e / I_e = R + jX \quad (\Omega) \quad (1)$$

Où : R= Résistance de l'antenne [ $\Omega$ ].

X= Réactance de l'antenne [ $\Omega$ ].

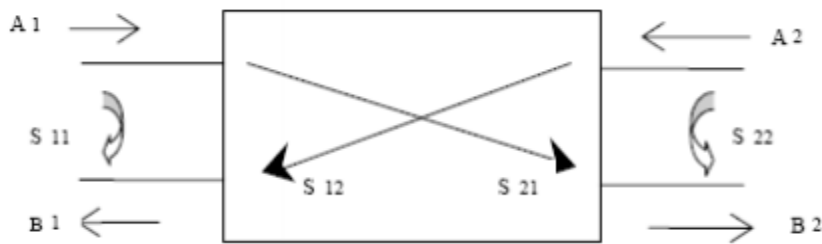
##### 1.3.1.2 b. Paramètres S

Les paramètres S (Scattering : dispersion) sont les éléments d'une matrice permettant de caractériser un quadripôle en hyperfréquence tel que les antennes comme montre la **figure**

**1.1**. Les coefficients de cette matrice lient les tensions d'entrée dans un quadripôle aux



tensions de sorties [2].



**Figure 1.1** Représentation en quadripôle

$A_1, A_2$  : Tensions incidentes aux ports 1, 2 respectivement.

$B_1, B_2$  : Tensions réfléchies des ports 1, 2 respectivement.

On définit alors la matrice S par :

$$[B]=[S] [A] \rightarrow B_1=S_{11}A_1+S_{12}A_2 \quad (2)$$

$$B_2=S_{21}A_1+S_{22}A_2$$

$S_{ii}$  : 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  $i$ ,  $j=1,2$ .

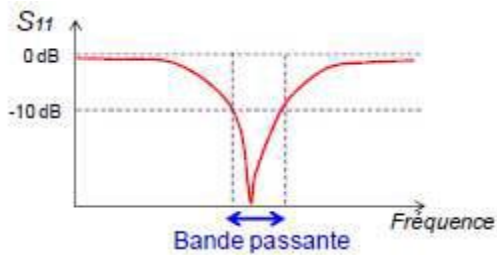
Le coefficient de réflexion  $S_{11}$  met en évidence l'absorption de l'énergie par l'antenne. C'est sur ce paramètre que l'on se base lors de la conception. Il doit être le plus faible possible (au moins inférieur à -10dB) pour avoir le moins de pertes de désadaptation possible.

### 1.3.1.3 Bande passante

La bande passante d'une antenne correspond à la bande de fréquence où le transfert d'énergie de l'alimentation vers l'antenne (ou de l'antenne vers le récepteur) est maximal. La bande passante peut être définie en fonction du coefficient de réflexion, à condition que le diagramme de rayonnement ne change pas sur cette bande [3].

Un critère typique d'avoir un coefficient de réflexion inférieure à -10 dB sur la bande passante, comme le montre la **figure 1.2**.

Pour optimiser la bande passante, on peut agir directement sur l'antenne afin de modifier son impédance, ou ajouter un élément d'adaptation.



**Figure 1.2** Bande passante et coefficient de réflexion

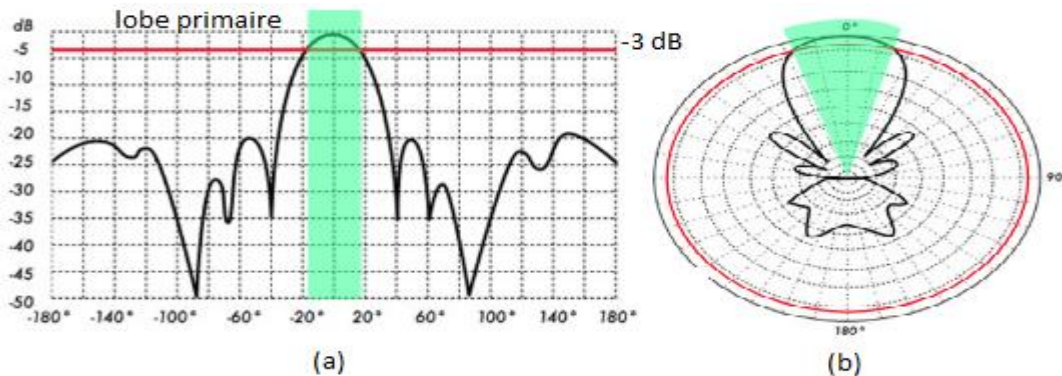
### 1.3.2 Paramètres de rayonnement

#### 1.3.2.1 Diagramme de rayonnement

Le diagramme de rayonnement d'une antenne est une représentation graphique de la répartition de la puissance rayonnée ou reçue par l'antenne. Ceci est présenté comme une fonction des angles de direction axés sur l'antenne [3].

Les diagrammes de rayonnement utilisent habituellement un format polaire, voir la **figure 1.3**.

- **Ouverture angulaire:** est la largeur entre les 2 directions où la puissance perd 50% de son maximum la Largeur à -3dB (HPBW: Half Power Beam Width  $\theta_{HPBW}$ ).



**Figure 1.3** Diagramme de rayonnement (a) 2D cartésien (b) 2D polaire.

#### 1.3.2.2 Directivité :

La directivité d'une antenne est définie comme le rapport de l'intensité du rayonnement dans la direction maximale à l'intensité de rayonnement moyenne (rayonnement isotrope). L'intensité moyenne du rayonnement est égale à la puissance totale rayonnée par l'antenne divisée par  $4\pi$  [4]. Sous forme mathématique, il peut être écrit comme:

$$D = \frac{U_{max}}{U_{moy}} = \frac{4\pi U}{Prad} \quad (3)$$

Où : D : la directivité (adimensionnelle).

U : intensité de rayonnement (W/unité d'angle solide).

$U_0$  : intensité de rayonnement de la source isotrope (W/unité d'angle solide).

$Prad$  : puissance totale rayonnée (W).

### 1.3.2.3 Efficacité de l'antenne

Le rendement total de l'antenne  $e_0$  est utilisé pour prendre en compte les pertes aux bornes d'entrée et dans la structure de l'antenne [1]. En général, l'efficacité globale peut être écrite comme :

$$e_0 = e_r e_{cd} \quad (4)$$

Où :  $e_0$  : efficacité totale (sans dimension)

$e_r$  : efficacité de réflexion (désadaptation) (sans dimension)

$e_{cd}$  : efficacité de conduction et diélectrique (sans dimension)

### 1.3.2.4 Gain :

La directivité et le gain de l'antenne sont fondamentalement le même concept, sauf que le gain prend en compte l'efficacité de l'antenne alors que la directivité ne le fait pas [1].

On distingue deux gains un, appelé gain ( $G$ ) qui est défini (dans une direction donnée) comme « le rapport de l'intensité dans une direction donnée, à l'intensité de rayonnement qui serait obtenue si la puissance acceptée par l'antenne ont été rayonnés de manière isotrope. L'intensité de rayonnement correspondant à la puissance isotrope rayonnée est égale à la puissance acceptée (entrée) par l'antenne divisée par  $4\pi$ . Forme d'inéquation cela peut être exprimé comme :

$$G(\phi, \theta) = e_{cd} \frac{4\pi U}{Prad} \quad (5)$$

Et l'autre, appelé gain absolu ( $G_{abs}$ ), qui prend également en compte les pertes de réflexion/ désadaptation exprimé par l'équation :

$$G_{abs}(\phi, \theta) = e_r G(\phi, \theta) \quad (6)$$

## 1.4 Les antennes imprimées

Le concept des antennes microrubans est apparu dans les années 1950, mais il faudra attendre les années 1970 pour voir apparaître les premières réalisations qui seront essentiellement réservées à des applications militaires, et les années 1990 pour un véritable passage au stade industriel. [5] [6]

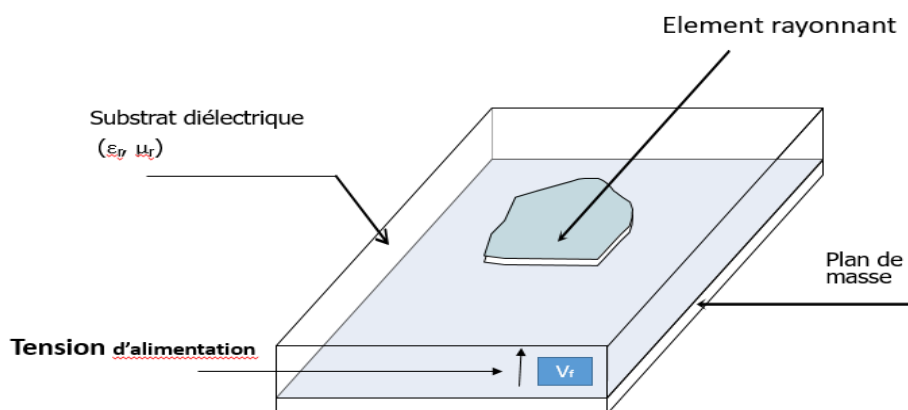
Deux atouts majeurs vont entraîner un développement très important de ce type d'antenne : leur faible coût de réalisation, et leur capacité d'intégration. Elles sont

aujourd'hui implantées dans de nombreux dispositifs électroniques et constituent le type d'antenne privilégié aux fréquences micro-ondes dans les systèmes de communication modernes.

### 1.4.1 Description

L'antenne microruban est constituée d'une mince couche métallique d'épaisseur  $e$  très petite par rapport à la longueur d'onde dans l'espace libre. Une plaque métallique placée sur la face supérieure d'un matériau non conducteur appelé substrat diélectrique avec des dimensions comparables à une demi-longueur d'onde, caractérisé par sa permittivité relative ( $\epsilon_r$ ) et alimentée par une tension  $V_f$  appliquée entre le conducteur et le plan de masse du microruban, voir la **figure 1.4** [7][8].

Très souvent, cet élément rayonnant (appelé aussi patch) prend une forme géométrique simple comme un carré, un rectangle, un cercle, encore un triangle ou une combinaison de deux formes simples. [9]



**Figure 1.4** Antenne microruban à plaque.

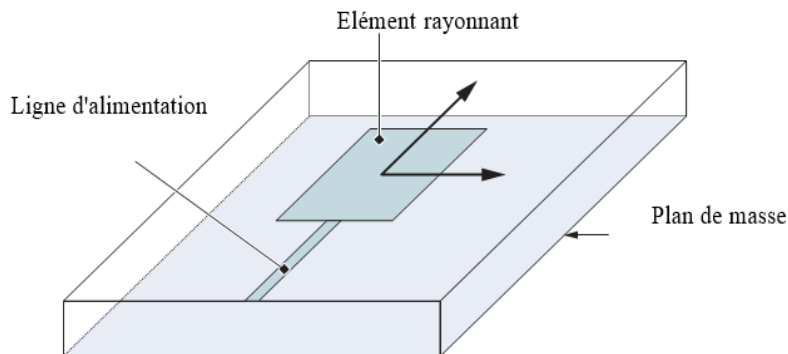
### 1.4.2 Les techniques d'alimentation

L'étude d'une antenne microruban prend en compte non seulement la forme des éléments rayonnants mais aussi son alimentation. En effet, la manière dont l'énergie est fournie à l'élément rayonnant peut influencer directement sur son rayonnement et modifier ses performances. [10]

Il existe plusieurs techniques pour l'alimentation des antennes micro rubans, ces techniques peuvent être soit par contact direct soit par couplage, les plus communément utilisées sont l'alimentation par ligne micro ruban, par sonde coaxiale, par couplage de proximité ou par ouverture [4].

### 1.4.2.1 Alimentation par ligne microruban

Ce type d'alimentation est sûrement le moins coûteux et le plus aisé voir la **figure 1.5**. En effet, l'élément rayonnant ainsi que la ligne qui l'alimente sont réalisés par procédé photolithographique sur le même substrat diélectrique, dont le point de jonction est sur l'axe symétrie de l'élément ou décalé par rapport à cet axe, si cela permet une meilleure adaptation d'impédance [11].

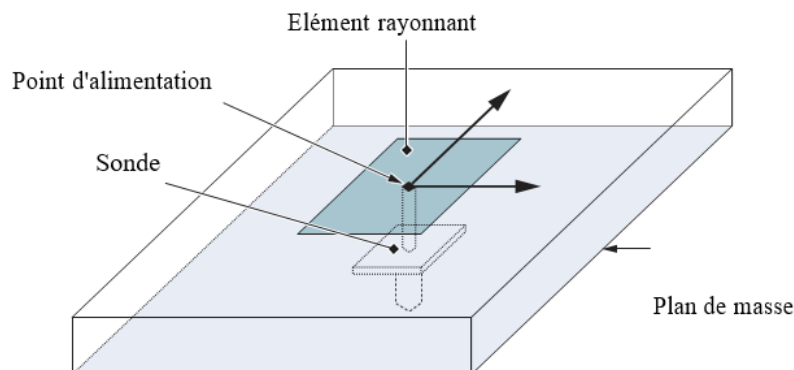


**Figure 1.5** Antenne rectangulaire alimentée par ligne microruban

### 1.4.2.2 Alimentation par câble coaxial

Cette technique est très employée pour l'alimentation des antennes microruban. L'élément rayonnant est connecté à l'âme centrale d'un connecteur coaxial traversant le plan de masse et le substrat diélectrique. L'embase du connecteur (conducteur extérieur) est directement soudée au plan de masse voir la **figure 1.6**. [11]

L'avantage de cette méthode d'excitation d'avoir un rayonnement parasite moins important qu'avec une alimentation par ligne microruban est dû à l'absence de contact entre le résonateur et la ligne d'excitation [7].



**Figure 1.6** Antenne microruban alimentée par câble coaxial

### 1.4.3 Avantages et les inconvénients des antennes patch

La technologie de ces antennes microrubans est issue de celle des circuits imprimés ce qui leur confère certains avantages, tels que : le faible poids, leur volume réduit, la conformabilité et la possibilité d'intégrer les circuits micro-ondes au niveau des antennes [12]. Ajoutons que la simplicité de leurs structures fait que ce type d'antenne est adapté au faible coût de fabrication. Ceci est une propriété clé qui explique l'introduction des antennes microrubans dans les applications de la communication mobile. Et avec succès dans la communication par satellite (le GPS est un exemple).

D'une façon générale, les avantages des antennes microrubans résident dans le fait qu'elles soient: [13]

- Un faible poids.
- Faible coût de fabrication et de production en série
- Une épaisseur et un encombrement minimes
- La possibilité de réalisation en grande série et à faible coût.
- La compatibilité avec la conception de modulation (amplificateurs, modulateurs, atténuateur variables, interrupteurs, mixeurs, changeur de phase).
- La facilité de montages sur missile, rockets et satellite sans altération majeure.
- Une polarisation linéaire et circulaire obtenue avec un simple changement de la position de l'alimentation.
- La fabrication simultanée avec les lignes d'alimentations et les réseaux d'assemblages.
- Une section transversale de faible dispersion.
- Antenne multi bandes, multi polarisations possibles.

Elles présentent cependant quelques inconvénients tels que [14]:

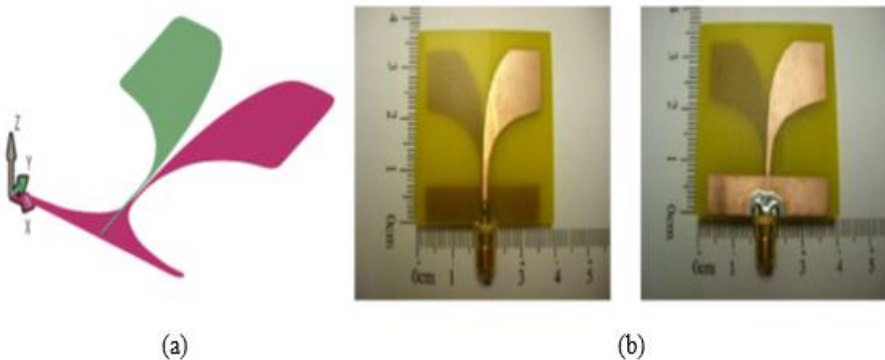
- faible gain
- Une faible isolation entre la source d'alimentation et celle des éléments radiatifs.
- Un couplage mutuel entre les éléments voisins dans le cas d'un réseau d'antennes.
- Une forte influence de la qualité du substrat diélectrique sur les performances de l'antenne.
- Une bande passante étroite et un faible rendement.

La bande passante des antennes microstrip présente l'inconvénient d'être étroite, avec des valeurs de bandes relatives de 2 à 5 % de la fréquence de fonctionnement. Afin de palier à cette problématique, on utilise des antennes microstrip sans plan de masse telle que

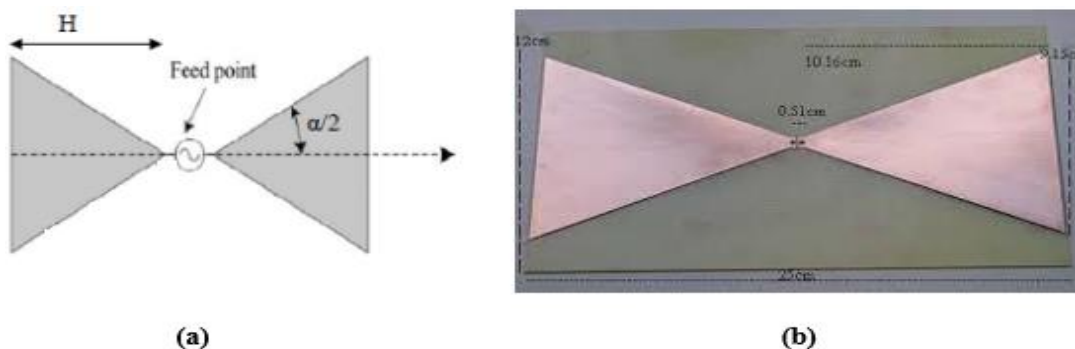
l'antenne bowtie (qu'utilisera pour notre conception la **figure 1.9** ou avec un plan de masse partielle telles que: le monopôle planaire, l'antenne Vivaldi présentées dans la **figure 1.7** et **figure 1.8**.



**Figure 1.7** Monopôle planaire rectangulaire



**Figure 1.8** (a) Antenne Vivaldi antipodale (b) Sa réalisation.



**Figure 1.9** (a) Antenne papillon et ses paramètres (b) Sa réalisation.

#### 1.4.4 Applications des antennes microruban :

On retrouve principalement les antennes microstrip dans les systèmes de haute technologie tels que [15]:

- ✓ Les résonateurs spatiaux et radar embarqué.
- ✓ La liaison avec des mobiles (avions, fusées, missiles, navires, véhicules routiers...).
- ✓ Les systèmes portables de radio localisation par satellite (GPS).
- ✓ Les résonateurs pour la téléphonie mobile (stations de base);

- ✓ Les badges et étiquettes électroniques;
- ✓ Les applicateurs biomédicaux (hyperthermie) et capteurs pour contrôle non destructif.
- ✓ Les satellites de communication.
- ✓ Les radiocommunications avec les mobiles terrestres et aériens, les télécommunications, les radars, les capteurs miniaturisés et les applicateurs médicaux.

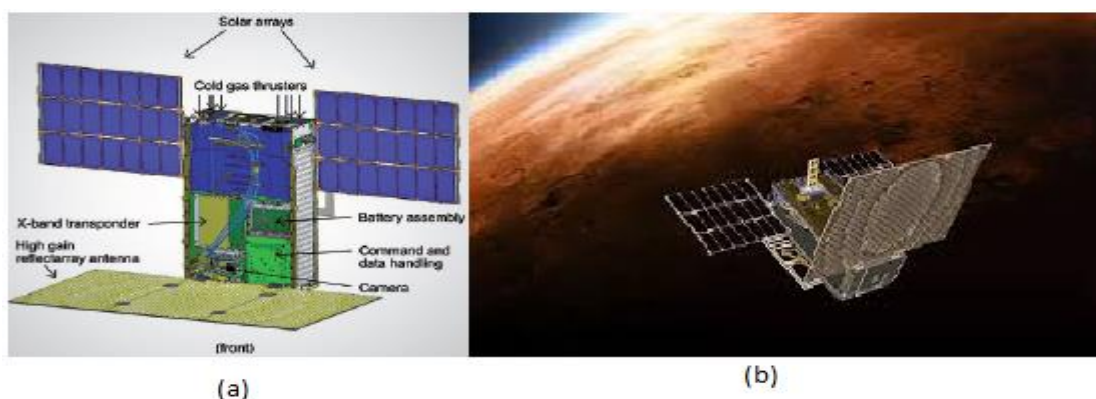
## 1.5 Antennes pour satellites

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

### 1.5.1 Antenne CubeSat

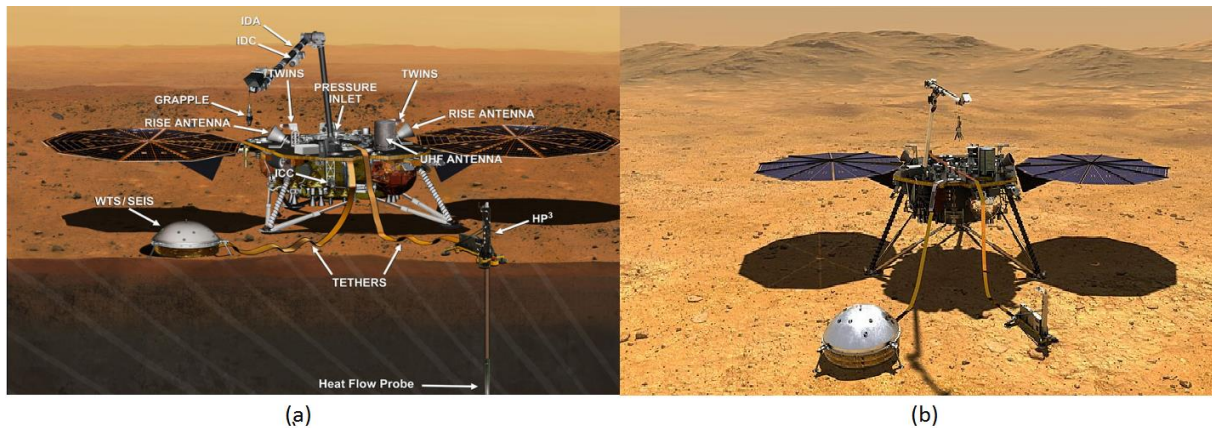
Mars Cube One ou MarCO (A et B) sont deux nano-satellites de type CubeSat d'une taille de 36.6cm par 24.3cm par 11.8cm, construits par le JPL de la NASA voir la **Figure 1.10**, et conçus pour surveiller la sonde spatiale InSight (*Interior Exploration using Seismic Investigations, Geodesy and Heat Transport*) voir la **Figure 1.11** qui a lancé vers Mars le 5 mai 2018 et a atterri avec succès sur Mars le 26 novembre 2018, après un voyage de presque 7 mois. Elle a donnée à la planète Mars son premier examen approfondi de l'espace intérieur : sa croûte, son manteau et son noyau. MarCO-A et MarCO-B ont réussi à survoler Mars, relayant des données entre la terre et Insight [16].

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.



**Figure 1.10** Satellite MarCo (a) schéma détaillée (b) vue réelle





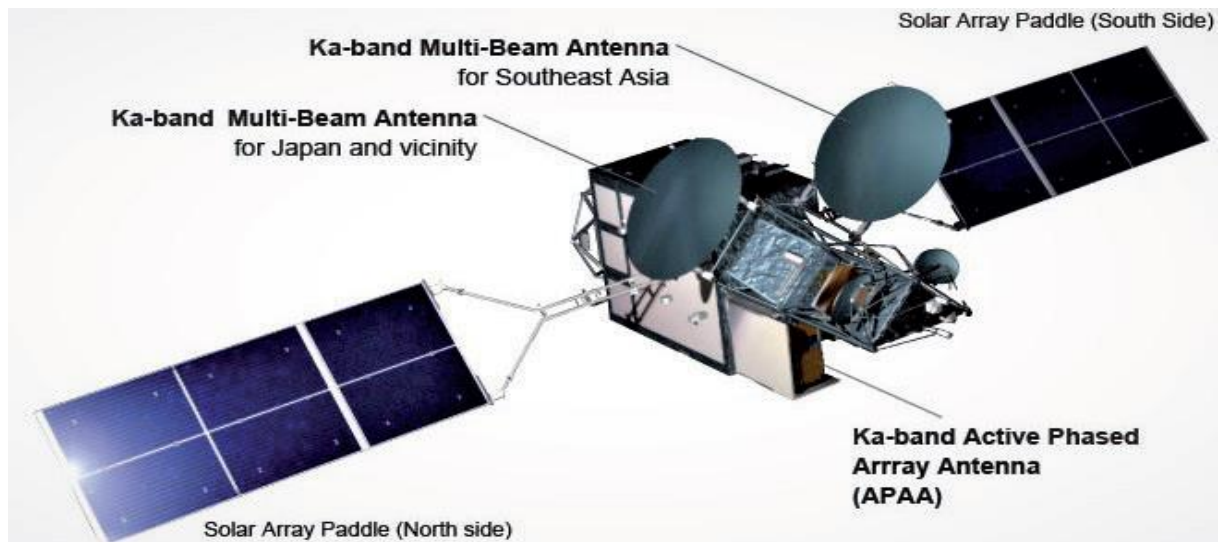
**Figure 1.11** InSight (a) schéma détaillée (b) vue réelle

### 1.5.2 Antennes de communication par satellite GEO

Dans le passé, la mission principale des satellites GEO n'était que la diffusion télévisuelle et transmission de données vocales. Par conséquent, il existe de nombreux satellites de communication comme géosynchrone. Au cours de la dernière décennie, ils ont commencé à évoluer et la mission de communication Internet a commencé à avoir lieu à la place de la diffusion télévisée. La raison principal en est que l'Internet entre dans tous les domaines de la vie comme les affaires, l'éducation, divertissement, etc. [16].

Étant donné que les satellites GEO sont à environ 36 000 km de la Terre, ils ont besoin d'un haut niveau effectif de puissance rayonnée isotrope (PIRE). Donc généralement, des antennes à réflecteur de grande ouverture sont utilisées. Sur la base des règlements de l'UIT (union internationale de télécommunication), ces antennes forment généralement leurs faisceaux selon les régions géographiques afin de réutiliser les fréquences réparties sur les régions.

Comme le montre la **figure 1.12** il y a trois structures d'antenne de charge utile sur le satellite. Deux d'entre elles sont des antennes à réflecteur multifaisceaux (MBA) en bande Ka et l'autre est une antenne APAA (Active Phased Array Antenna) en bande Ka. Les antennes multifaisceaux ont des diamètres de 2,4 m et sont de type 2 Cassegrain à alimentation décalée.

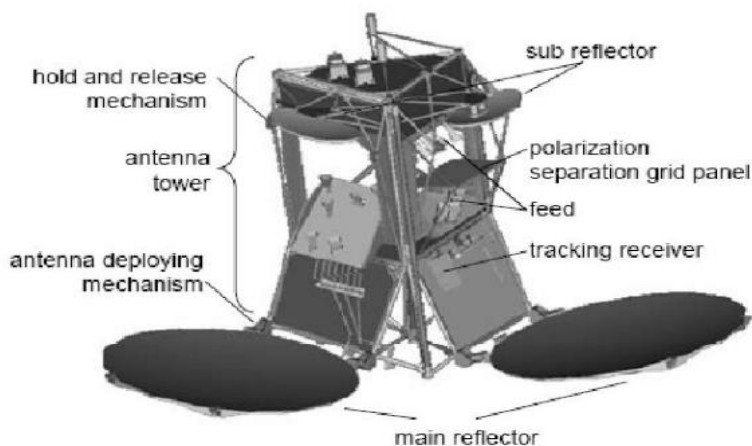


**Figure 1.12** KIZUNA : Satellite de communication de données à haute vitesse WINDS

### 1.5.2.1 Système MBA (Multi-Beam Antenna) :

L'objectif est de fournir des communications à faisceau fixe à 1,2 Gbit/s (max) vers les antennes des stations terriennes. La couverture du système d'antennes englobe le Japon et les régions Asie/Pacifique avec 12 faisceaux dirigés vers le Japon et 7 vers l'Asie/Pacifique, utilisant un total de 19 faisceaux.

Le MBA est équipé de deux réflecteurs principaux, de deux sous-réflecteurs, d'un panneau de grille de séparation de polarisation et d'alimentations. Les deux groupes d'alimentations sont disposés face à face avec le panneau de grille entre eux. Un groupe d'alimentations est horizontal en polarisation et l'autre est vertical. Le panneau de grille laisse passer les faisceaux de polarisation horizontale et réfléchit les verticales de telle sorte que 19 alimentations soient configurées efficacement dans l'espace limité du système d'antenne voir la **figure 1.13**.

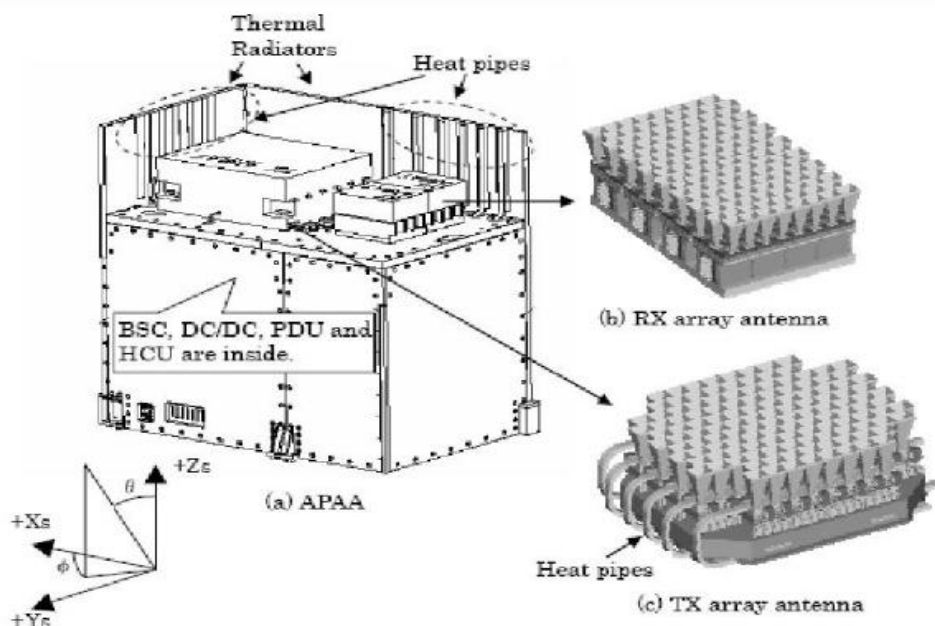


**Figure 1.13** Présentation du système MBA

### 1.5.2.2 APAA (Active Phased Array Antenna)

APAA a été développé par JAXA et NTIC. L'APAA est composé d'une antenne d'émission et d'une antenne de réception, chacune fournissant deux faisceaux ponctuels à sauts. La direction de chaque faisceau peut être contrôlée indépendamment, de manière flexible et rapide. Les deux faisceaux multiples réalisent également la fonction de communication SS-TDMA (Satellite Switched Time Division Multiple Access). L'objectif global du faisceau ponctuel à sauts et du système de communication SS-TDMA est d'utiliser ces caractéristiques pour des expériences de communication à large bande couvrant la région Asie/Pacifique.

À côté de l'antenne d'émission (Tx) et de réception (Rx), l'APAA comprend les composants suivants : un BSC (Beam Steering Controller), des convertisseurs DC/DC, des radiateurs, un HCU (Heater Control Unit) et des PDU (Power Distribution Units). Tous les composants sont installés dans l'unité de structure d'antenne, comme montre la **figure 1.14**.



**Figure 1.14** Illustration de la configuration APAA

## 1.6 Antennes aéronautiques et maritime

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. [17]

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

### 1.6.1 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 la **figure 1.15**.

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.

Ces antennes sont utilisées pour une structure simple et une efficacité d'ouverture élevée.



**Figure 1.15** Photographie de l'équipement (ADE)

### 1.6.2 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 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 la **figure 1.16**.

Les antennes utilisées pour INMARSAT-C sont généralement omnidirectionnelles, comme une hélice quadri fileuse, un dipôle croisé et un patch microruban.

Une antenne microruban est la meilleure à utiliser dans les terminaux portables ou porte-documents en raison de sa caractéristique de profil très bas.

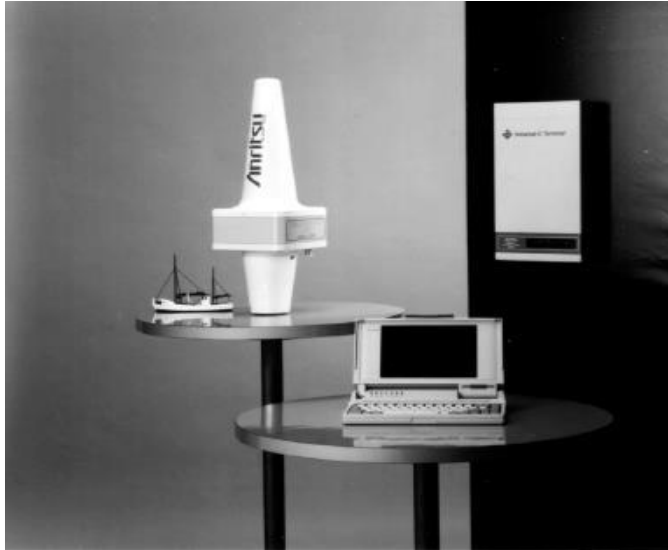


Figure 1.16 INMARSAT-C pour un petit navire

### 1.6.3 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).

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. Voir la **figure 1.17 (a) et (b)**.

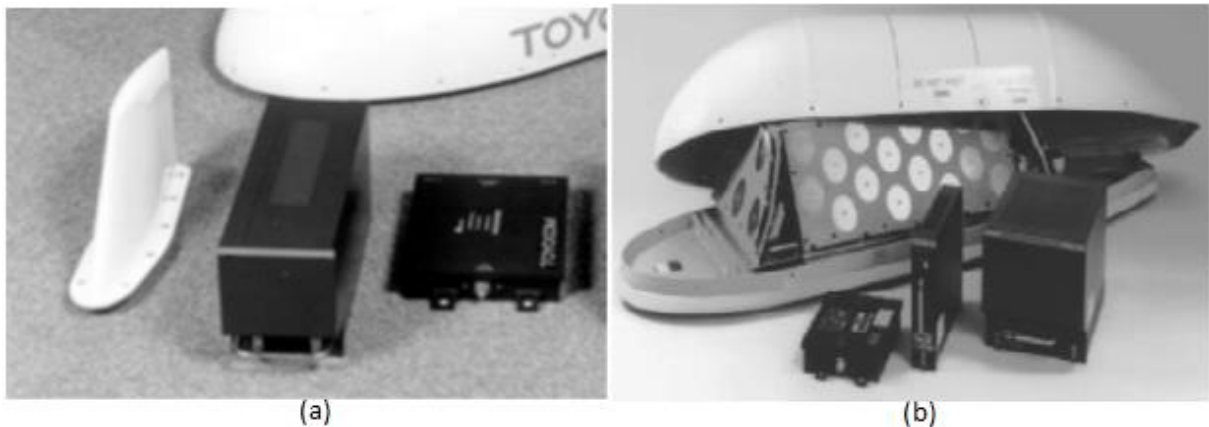
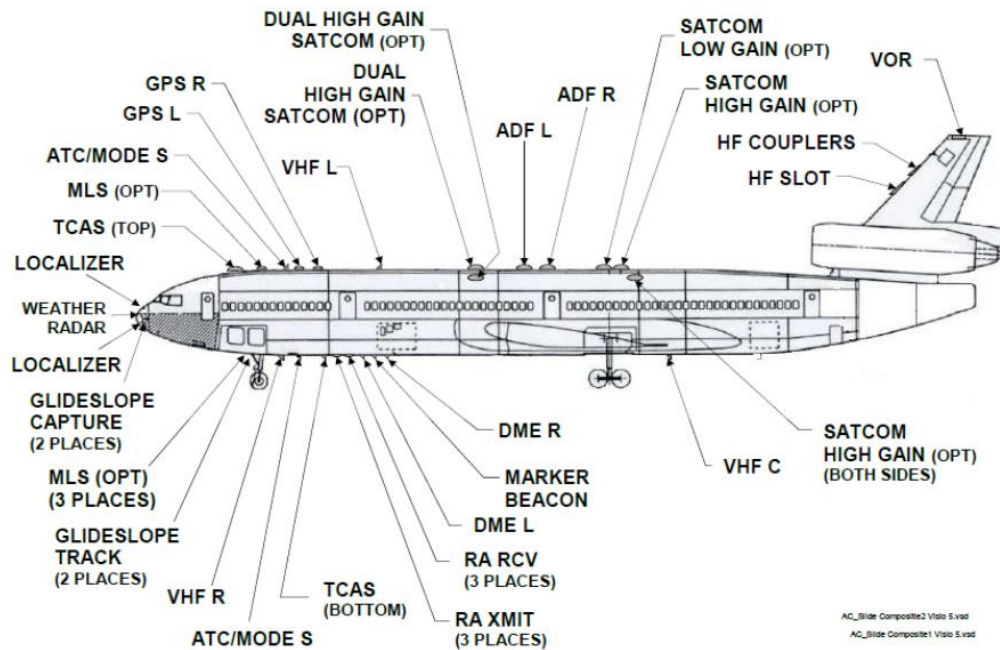


Figure 1.17 Une antenne avec un HPA et un DIP / LNA : (a) à faible gain (b) à gain élevé

## 1.7 Les types d'antennes utilisées sur les avions

Les antennes les plus couramment utilisées pour les différents systèmes sont les dipôles, les cornets, les boucles, les monopôles, les encoches, les patches, les spirales et les réflecteurs (figure 1.18).



**Figure 1.18** Les différentes antennes sur l'avion

Les types d'éléments rayonnants d'antenne sont répertoriés dans le Tableau 1.2. Les antennes d'avion devant être adaptées aérodynamiquement [18].

**Table 1.1** les types d'antennes utilisées par les systèmes d'avion.

Système	Gamme de fréquence en MHz		Polarisation	Type d'antenne
	Plus bas	Plus haut		
ADF	0.19	1.8	Verticale	Boucle
DME	960	1215	Verticale	Monopole
GPS L1/L2	1565	1586	RHCP	Patches
GLONASS (Russian GPS)	1602	1615.5	RHCP	Patches et réseaux de patches
HF	2	30	Horiz et vert	Monopoles, boucles
ILS – Glideslope	329	335	Horiz	Dipôles repliés/boucles
ILS – Localizer	108	112	Horiz	Monopoles, dipôles
ILS – Marker	74.75	75.25	Horiz	Boucles
MLS	5031	5091	Vert	Monopole et Yagi
RA	4200	4400	Horiz	Rect. cornes de guide

				d'ondes, patchs
Radar S-band	2000	4000	Vert	Guide d'ondes à fentes
Radar X-band	8200	12 000	Tout	Réfecteurs et Guide d'ondes à fentes
Radio Broadcast FM	88	108	Vert	Monopole
SatCom Military UHF	240	310	Vert et circulaire	Monopole and dipoles croisés
SatCom Military SHF	7200	8400	Circulaire	Reflecteur, reseaux helicoidaux
TCAS Tx 1030 Rx 1090	1030	1090	Vert	Monopole and reseaux monopole
UHF	225	400	Vert	Monopole
VHF	108	174	Vert	Monopole
VOR en-route nav/terminal	108	118	Horiz	Monopoles, dipoles
Weather Radar C/X	5500	9354	Tout	Réfecteurs et Guide d'ondes à fentes

## 1.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présentés les différentes caractéristiques des antennes et plus particulièrement les antennes microstrip ainsi que leurs applications dans le domaine aérospatial. Pour notre conception, nous utiliserons l'antenne microstrip bowtie pour sa largeur de bande de fonctionnement et sa compacité. Cependant, ce type d'antenne présente un faible gain. Pour répondre à cette exigence, on va associer à cette antenne les méta-matériaux tels que les EBG (Electromagnetic Band Gap) ou les AMC (Artificiel Magnetic Conductor), qui seront présentés dans le chapitre suivant.

# Chapitre 2 :

## Etat de l'art sur les AMC



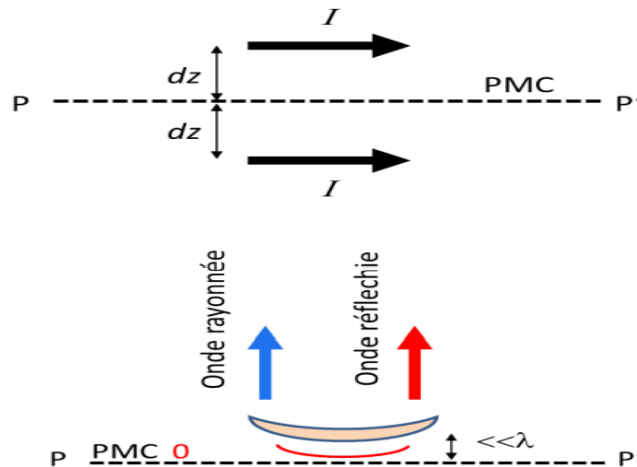
## 2 CHAPITRE 2 : Etat de l'art sur les AMC

### 2.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons un aperçu sur les structures AMC (Artificial Magnetic Conducators), leur principe de fonctionnement ainsi que leurs caractéristiques. Ensuite, nous dresserons un état de l'art sur les antennes large bande avec AMC.

### 2.2 Définition des AMC

Dans les antennes conventionnelles microstrip, les conducteurs électriques parfaits (PEC - Perfect Electric Conductor) sont souvent utilisés sous l'antenne pour diriger son rayonnement vers une seule direction. Le fait de mettre un plan de masse à conducteur électrique parfait permet d'éliminer le rayonnement arrière et de garder le rayonnement avant. Une des façons de rediriger le rayonnement arrière vers l'avant est d'espacer l'antenne de son réflecteur métallique d'une hauteur de  $\lambda/4$ . Cependant, les conducteurs PMC réagissent d'une manière complètement différente par rapport aux conducteurs PEC quand ils sont utilisés comme plan de masse. Si les conducteurs PEC produisent une image de courant en opposition de phase au courant original, les conducteurs PMC quant à eux produisent une image de courant en phase avec le courant original comme nous pouvons le voir sur la **Figure 2.1**. De ce fait, les deux courants s'additionnent l'un à l'autre au lieu de s'annuler comme c'est le cas dans les plans de masse PEC. Pour cette raison, il est inutile de laisser un espace entre l'antenne et le plan de masse PMC, voir **Figure 2.1**. Cet aspect représente un avantage très important de l'utilisation des conducteur PMC dans le développement des antennes notamment dans le but de réduire l'écartement entre les antennes et leur plan de masse.



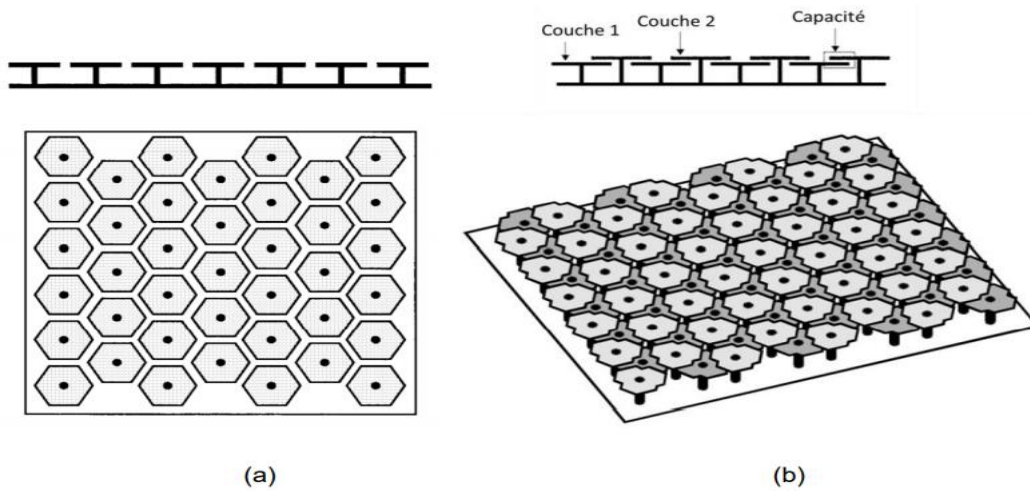
**Figure 2.19** Théorie des images et réflexion sur des plans: PMC

On peut également expliquer ce phénomène en termes de réflectivité ou d'impédance de surface. En fait, le coefficient de réflexion d'une onde plane incidente sur un plan PEC est de  $\Gamma = -1$ , ceci veut dire que la phase de l'onde réfléchie est de  $\pi$  par rapport à l'onde incidente. La même onde plane aura un coefficient de réflexion de  $\Gamma = 1$  si elle se réfléchit sur un plan PMC, dans ce cas l'onde réfléchie a un déphasage de  $0^\circ$  par rapport à l'onde incidente. En termes d'impédance, les conducteurs PEC ressemblent à un court-circuit, donc leur impédance est nulle, tandis que les conducteurs PMC ressemblent à un circuit-ouvert avec une impédance infini. Cette explication nous mène à déduire que remplacer un plan PEC par un plan PMC veut dire changer son impédance nulle en une impédance très élevée. Les surfaces qui sont une réalisation physique des PMC sont également appelées conducteur magnétique artificiel (AMC – Artificial Magnetic Conductors).

Les AMC présentent la caractéristique tout de réfléchir une onde plane incidente avec une phase de réflexion égale à  $0^\circ$ . Cette caractéristique unique permet aux AMC de ressembler aux conducteurs magnétiques parfaits (PMC : Perfect Magnetic Conductor) qui n'existent d'ailleurs pas dans la nature dans une certaine bande de fréquences. Pour réaliser physiquement un plan PMC dans une certaine bande de fréquence, les conducteurs magnétiques artificiels (AMC) ont été mis en place.

L'une des premières surfaces AMC était la surface à bande interdite électromagnétique (EBG), qui a été introduit par D.F. Sievenpiper en 1999 [19]. 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 2.2.**



**Figure 2.20** Surface de Sivenpiper, (a) : Model 2D, (b) : Model 3D

En pratique, la phase de réflexion d'une surface AMC varie continuellement de  $+180^\circ$  à  $-180^\circ$  par rapport à la fréquence, et passe par zéro à une seule fréquence (pour un seul mode de résonance). La bande passante utile d'un AMC est généralement défini comme  $+90^\circ$  à  $-90^\circ$  de part et d'autre de la fréquence centrale. Ainsi, en raison de cette condition aux limites inhabituelle, contrairement au cas d'un plan métallique classique, une surface AMC peut fonctionner comme un nouveau type de plan de masse pour les antennes microstrip, ce qui est souhaitable dans de nombreux systèmes de communication sans fil.

Dans la littérature, on trouve de nombreuses géométries selon le fonctionnement souhaité du CMA (mono-bande ou bi-bande) comme illustré dans **la figure 2.3.**[20]



AMC mono-bande



AMC bi-bande



AMC bi-bande hexagonal

**Figure 2.21** Types de CMA

### 2.3 Principe de fonctionnement

Pour mieux comprendre le fonctionnement des structures AMC, certains modèles de circuit sont été proposés. On s'intéressera au modèle de circuit résonant de type LC parallèle. [21].

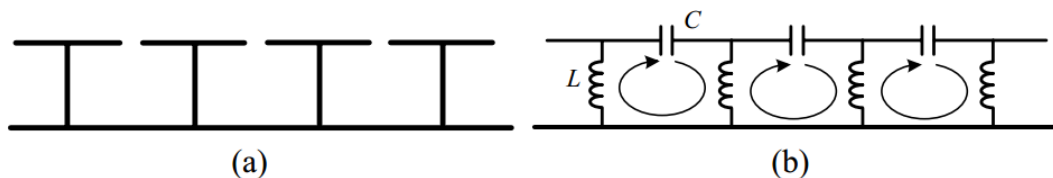
Ce modèle a été introduit par Sievenpiper [21]. L'impédance d'une surface (formes métalliques imprimé sur un substrat) est remplacée par celle d'un circuit LC résonant parallèle comme montre la **figure 2.3** dont l'expression est présentée dans l'équation (1). Le modèle d'impédance de surface est utilisé pour prédire les propriétés de réflexion et peut être calculé par :

$$Z = \frac{j\omega L}{1 - \omega^2 LC} \quad (1)$$

Cette équation montre que la surface est inductive à faible fréquences et capacitive à haute fréquences. A la fréquence de résonance  $\omega_0$ , l'impédance est très élevée. La valeur de la fréquence de résonance est présentée dans l'équation (2). Cette fréquence de résonance conduit à un déphasage nul des ondes réfléchies.

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (2)$$

Sievenpiper, explique que l'impédance élevée est associée à une bande de fréquences où la propagation des courants électriques de surfaces est bloquée. Cette bande de fréquences est appelée bande interdite et elle est centrée à la fréquence de résonance. C'est ce qui confère le nom de Matériaux à Bande Interdite électromagnétique (BIE) ou Electromagnetic Band Gap (EBG) en anglais, aux surfaces à hautes impédance.

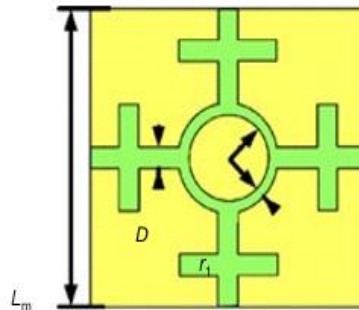


**Figure 2.22** (a)Section de la surface champignon (b) circuit équivalent

## 2.4 Etat de l'art des antennes large bande avec AMC

**En [22]-, les auteurs proposent une** Antenne en boucle fendue à large bande avec AMC: l'antenne est à profil bas de  $0,05\lambda_L$  est réalisé ( $\lambda_L$  est la longueur d'onde à la fréquence de fonctionnement la plus basse) illustrer à la **Figure2.5.a**. L'antenne imprimée sur un substrat FR4. L'épaisseur du substrat est de 1 mm avec une constante diélectrique relative  $\epsilon_r = 4,4$ . L'antenne se compose de plusieurs fentes et bandes, aux dimensions 23,8 mm  $\times$  11,9 mm. La surface AMC est périodiquement formée par l'unité AMC (4\*6), qui est directement attachée à l'antenne à l'aide d'une ligne d'alimentation CPW 50 $\Omega$ . Les dimensions de l'antenne proposée sont de 42  $\times$  28  $\times$  3 mm<sup>3</sup> (0,67 $\lambda_L$   $\times$  0,45 $\lambda_L$   $\times$  0,05 $\lambda_L$ ). La structure spécifique de l'antenne à surface AMC est présentée sur la **Figure2.5.b**.

Comme il est représenté sur la **Figure 2.6**, l'unité de conducteur magnétique artificiel se



**Figure 2.23** Géométrie de la cellule unitaire AMC

compose de quatre fentes en forme de croix et une fente annulaire.

Un prototype d'antenne est fabriqué comme indiqué sur la **Figure 2.7**. Les résultats simulés et mesurés illustrés sur la **Figure 2.8** montrent que les bandes passantes d'impédance à -10 dB sont respectivement de 37,9 % (5,01-7,35 GHz) et 39,1 % (4,85-7,21 GHz). La largeur de bande de gain de 3 dB mesurée de l'antenne proposée est de 37,5 % (5,0 à 7,31 GHz), tandis que celle simulée est de 36,7 % (5,02 à 7,28 GHz).

Les auteurs de la référence [23] propose une antenne dipôle diamant imprimée sur un substrat d'épaisseur  $h = 1,58$  mm, de permittivité relative  $\varepsilon = 2,5$  avec une bande passante de 53% (4,56-7,84 GHz) alimentée par un port discret. Comme le montre la **Figure 2.9**.

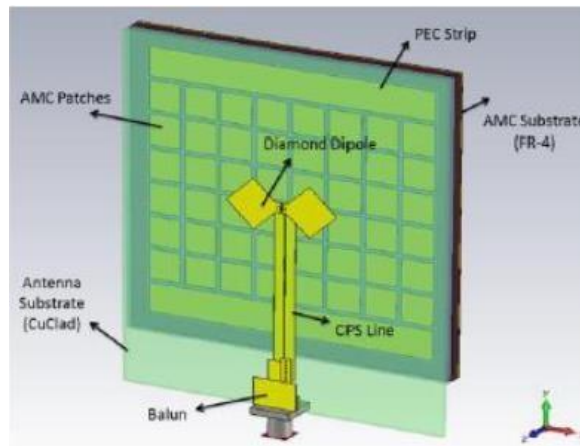
L'AMC est un ensemble de patches carrés en cuivre imprimés sur un substrat avec  $\varepsilon = 4,0$  et une épaisseur de  $h = 3,2$  mm soutenu par un plan de masse métallique et les dimensions de l'AMC sont  $W_{AMC} = 7,4$  mm,  $g_{AMC} = 1$  mm. L'intervalle de phase du coefficient de réflexion conduisant à des interférences



**Figure 2.24** Prototype fabriqué de l'antenne en boucle

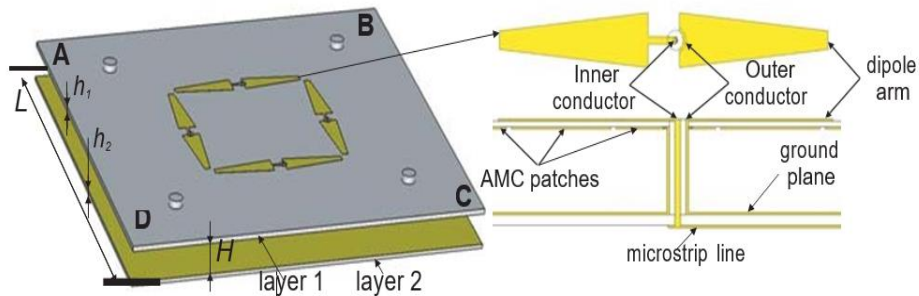
constructives dans le plan de l'antenne ( $-90^\circ$ ,  $+90^\circ$ ) est de 4,2 à 5,8 GHz (32%).

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 2.10**) 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 2.25** Antenne finale avec un réflecteur hybride

En [24] une antenne à double polarisation large bande à profil bas basée sur l'utilisation d'un réflecteur à conducteur magnétique artificiel (AMC) est proposée. La vue 3D de l'antenne est représentée la **Figure 2.11**. L'antenne est constituée de deux couches

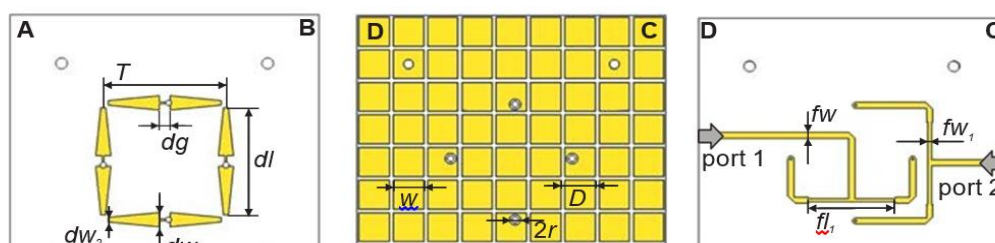


**Figure 2.26** la vue 3D de l'antenne à double polarisation

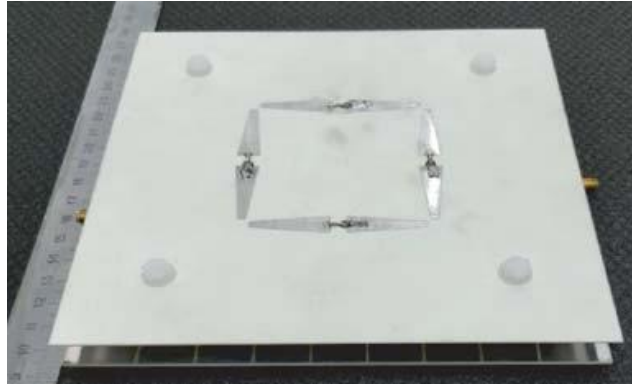
diélectriques. Les couches sont séparées par quatre boulons en plastique Le réflecteur.

AMC se compose de  $9 \times 9$  patchs carrés. Afin d'obtenir de larges bandes passantes d'impédance, l'antenne est constituée de quatre dipôles imprimés sont utilisés comme éléments rayonnants Les topologies radiateurs (**Figure 2.12(a)**) et AMC (**Figure 2.12(b)**) sont gravées sur différentes faces de la couche 1 (RO4350B, l'épaisseur de  $h_1 = 0,762$  mm). Deux dipôles sont utilisés comme radiateur de polarisation horizontale, et deux dipôles sont utilisés comme radiateur de polarisation verticale. Chaque dipôle est alimenté par un câble coaxial. Ces câbles sont isolés électriquement avec les patchs AMC. La topologie du réseau d'alimentation de l'antenne (**Figure 2.12 (c)**) est gravée sur la face inférieure de la couche 2 (RO4350B, l'épaisseur de  $h_2 = 1,524$  mm). Un autre côté de la couche 2 est utilisé comme plan de masse de l'antenne. Des diviseurs de puissance de 3 dB sont utilisés pour l'alimentation des dipôles.

Les résultats de simulation et de mesure montrent que l'antenne proposée en Figure 2.13 a une bande passante d'impédance de 40 % ( $1,6-2,4$  GHz) pour  $S_{11}$  inférieur à  $-10$  dB, une bande passante de gain de 40 % de 3 dB et une isolation de port inférieure à  $-30$  dB.



**Figure 2.27** Géométrie des couches d'antenne. (a) Vue de dessus de la couche 1, (b) Vue de dessous de la couche 1, (c) Vue de dessous de la couche 2.



**Figure 2.28** Manufactured prototype of the antenna.

## 2.5 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons vu les différentes caractéristiques d'une surface AMC, ainsi que 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 metamatériaux 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 (AMC)

### 3 Chapitre 3 : Conception d'une antenne large bande à conducteur magnétique artificiel (AMC)

#### 3.1 Introduction :

Dans ce chapitre, nous présentons dans un premier temps un résumé des travaux réalisés précédemment dans ce projet. Il consiste en la conception d'une antenne bowtie large bande associée à un conducteur magnétique artificiel, afin d'avoir une antenne compacte directive dans la bande C avec un gain stable sur toute la bande. Ensuite, une étude sur la géométrie de la cellule AMC sera effectuée. Enfin, l'ensemble de la structure (antenne + AMC) sera étudiée, simulée, réalisée puis mesurée.

#### 3.2 Présentation du simulateur CST Microwave Studio

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). Le logiciel permet de mailler 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).

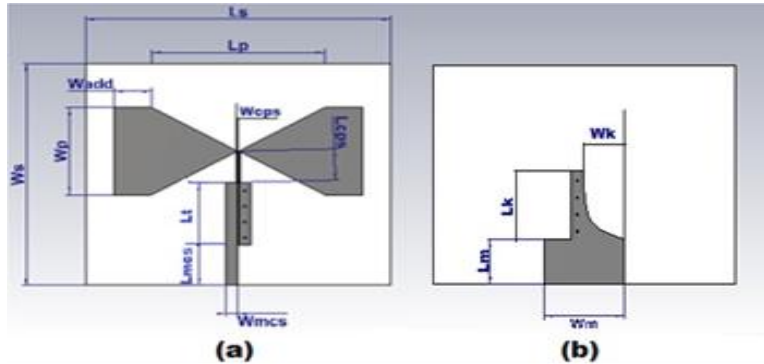
#### 3.3 Résumé des travaux précédents :

Ce travail a été initié en 2018 et l'objectif c'était de réaliser une antenne large bande, de forme bowtie compacte à balun intégré comme montre la **figure 3.1**. L'antenne est imprimée sur du substrat FR-4 de permittivité de  $\epsilon_r=4.3$  et d'épaisseur de 1.6 mm.

Ce type d'antenne présente une impédance d'entrée supérieur à 50  $\Omega$ . Par conséquent, et afin de pouvoir réaliser cette structure, il était nécessaire de l'adapter à 50  $\Omega$  sur une très large bande.

La solution proposée est d'introduire un balun compact imprimé sur le plan de l'antenne.

L'antenne réalisée a un diagramme de rayonnement omnidirectionnel dans la bande [2.54-14 GHz], comme le montre la **figure 3.4**. [25]



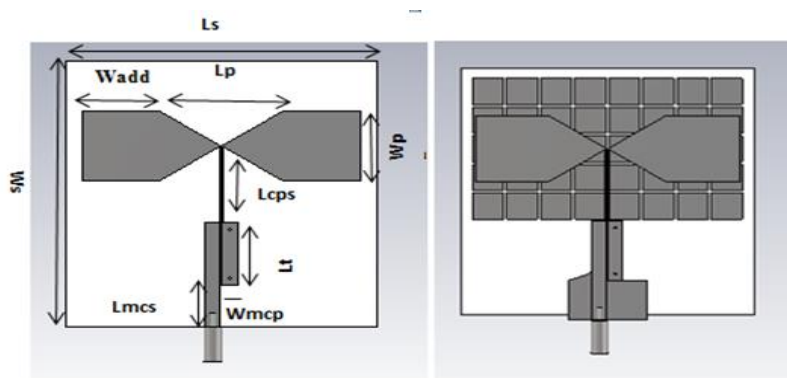
**Figure 3.29** Antenne proposée par les étudiants du PFE 2018 (bowtie + balun intégré)

(a) Vue du dessus (b) Vue du dessous.

La suite de ce travail était de concevoir une antenne compacte directive, fonctionnant dans la bande C dédiées aux communications satellitaires.

Pour atteindre cet objectif, les étudiants des PFE 2019 ont introduit des réflecteurs à Conducteurs Magnétiques Artificiels (AMC) comme le montre la **figure 3.2**. Les cellules AMC sont imprimées sur du substrat FR-4 de permittivité de  $\epsilon_r=4.3$  et d'épaisseur de 3.2 mm.

Les résultats obtenus montrent que l'antenne proposée fonctionne dans la bande [4,08 - 6,4 GHz] et présente dans la direction du broadside une amélioration maximale du gain réalisé atteignant 8,8 dBi par rapport à une antenne sans AMC comme montre la **figure 3.5** [26]. Cependant, le gain n'était pas stable sur la bande de fonctionnement variant de 4.5 à 9 dBi.



**Figure 3.30** Antenne proposée par les étudiants du PFE 2019 (bowtie + balun) avec AMC de 5\*8 cellules

(a) vue de dessus (b) vue de dessous.

Pour remédier à cette problématique, une étude sur la géométrie de l'antenne a été faite [27]. Les résultats obtenus montrent des diagrammes de rayonnement directifs présentant un gain plus stable variant de 5 à 8.2 dBi dans la bande 3.5-6.5 GHz, comme le montre la figure 3.4 et 3.5.

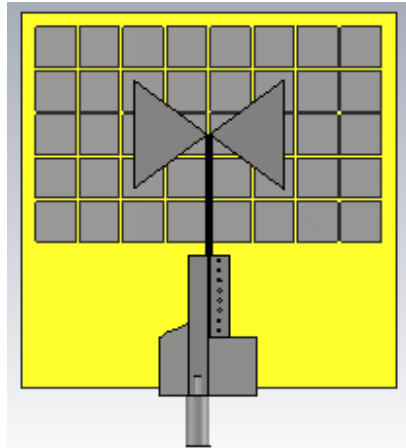


Figure 3.31 Antenne proposée par les étudiants du PFE 2020 placée sur 8\*5 Cellules AMC

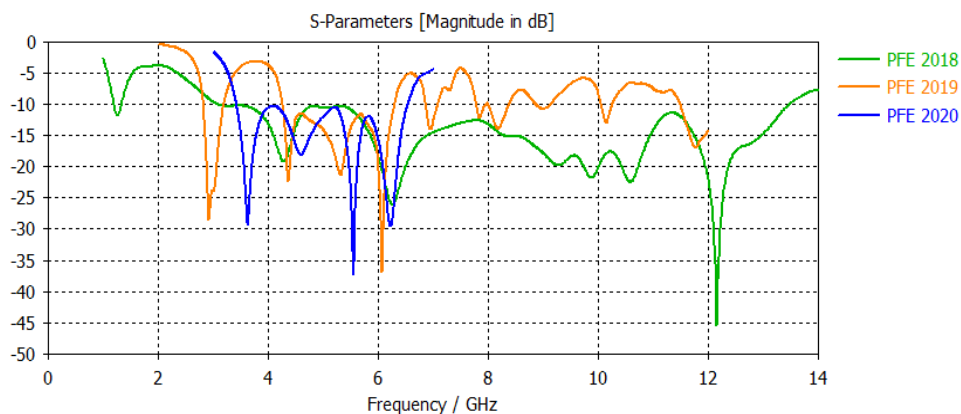


Figure 3.32 Coefficient de réflexion des PFE précédents

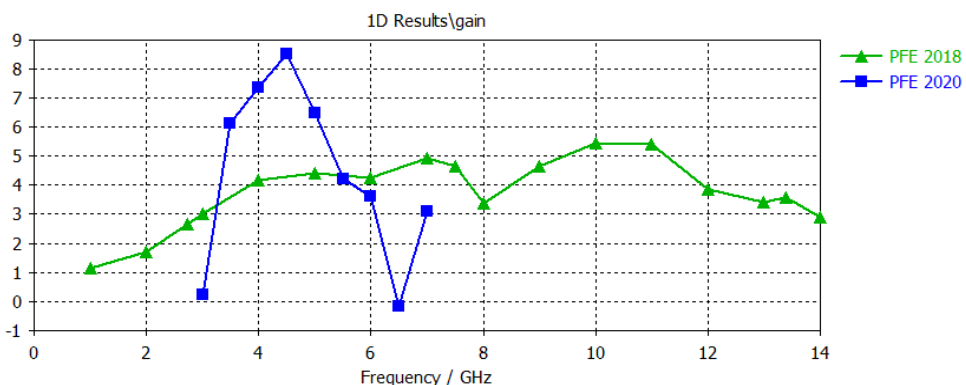


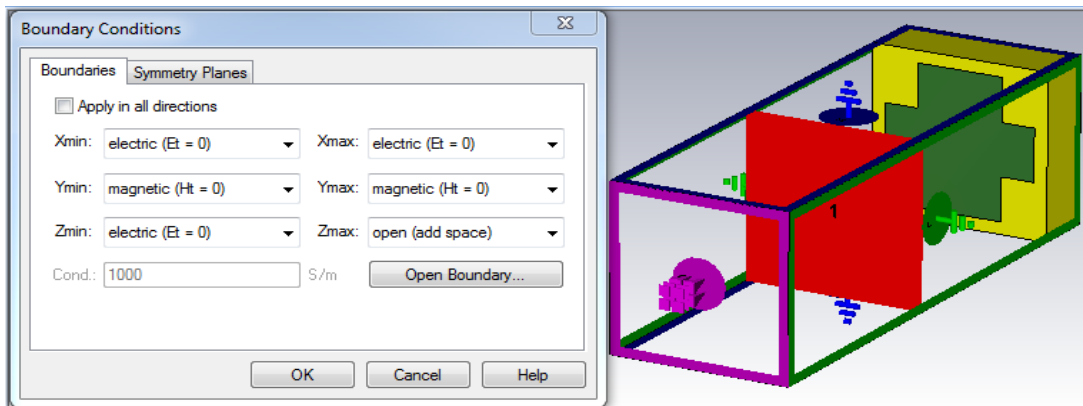
Figure 3.33 Le gain des PFE précédents

Maintenant, on va étudier les motifs des cellules AMC qui permettront d'avoir un système

antennaire présentant quasi le même gain sur toute la bande de fonctionnement.

### 3.4 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 3.6**.



**Figure 3.34** Condition aux limites de la cellule AMC

On prendra pour Xmin et Xmax :  $E_t = 0$  pour avoir le champ électrique horizontal.

Pour Ymin et Ymax :  $H_t = 0$  pour avoir la cage magnétique verticale.

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.

- D : distance à la cellule (m).
- a : la plus grande dimension de l'antenne (m).
- $\lambda$  : longueur d'onde (m).

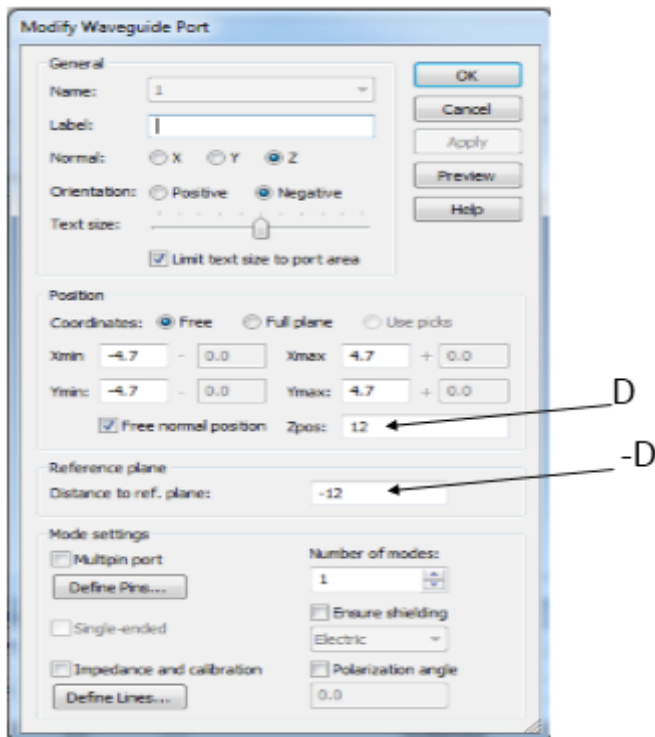


Figure 3.35 Distance de champ lointain dans le port du guide d'ondes

### 3.4.1 Cellule AMC 1

C'est une cellule carrée où nous avons supprimé un petit quadrilatère dans chaque coin de celle-ci comme montre la **figure 3.8**. Les dimensions de la cellule AMC sont :  $\lambda_{mc} = 9.4\text{mm}$ ,  $w_{amc} = 8\text{mm}$ ,  $gap = 0.7\text{mm}$ . On utilise comme substrat le FR4 lossy de permittivité  $\epsilon_r = 4.3$  avec une épaisseur de  $3.2\text{mm}$ . Le diagramme de phase de la **figure 3.9** montre que la structure a une phase comprise entre  $-90^\circ$  et  $90^\circ$  dans la bande de fréquence  $[5.01-7.19\text{GHz}]$  avec une bande passante relative de  $35,73\%$ .

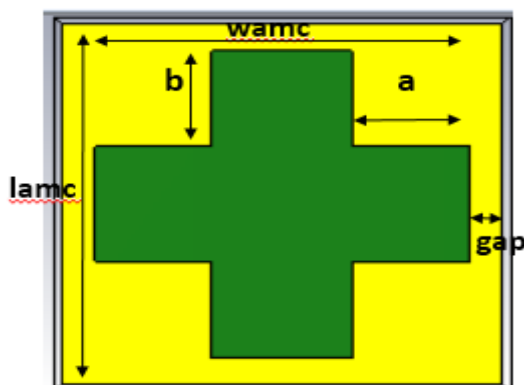


Figure 3.36 Les dimensions de la Cellule AMC 1

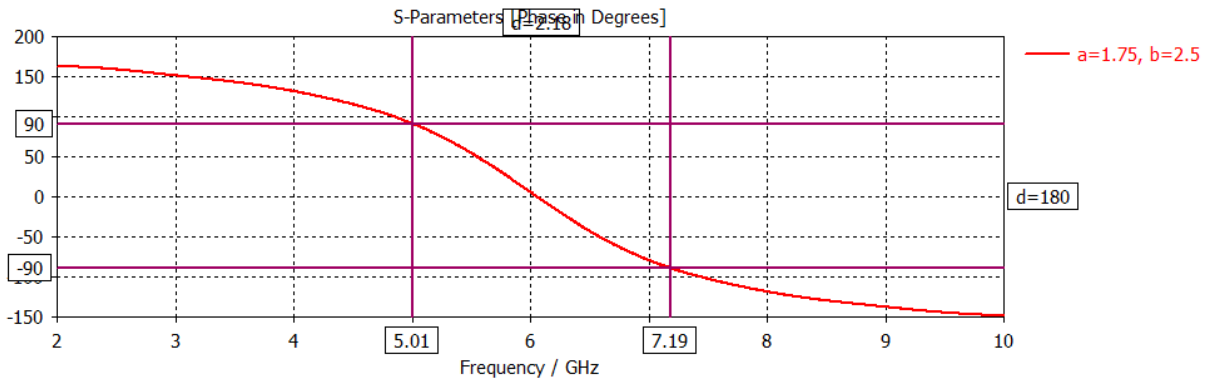


Figure 3.37 Phase du coefficient de réflexion de l'AMC 1

### 3.4.2 Cellule AMC 2

C'est une cellule octogone comme le montre la **figure 3.10**. Le diagramme de phase en **figure 3.11** montre que la structure a une phase comprise entre  $-90^\circ$  et  $90^\circ$  dans la bande de fréquence [4.98-7.196 GHz] avec une bande passante relative de 36.39%.

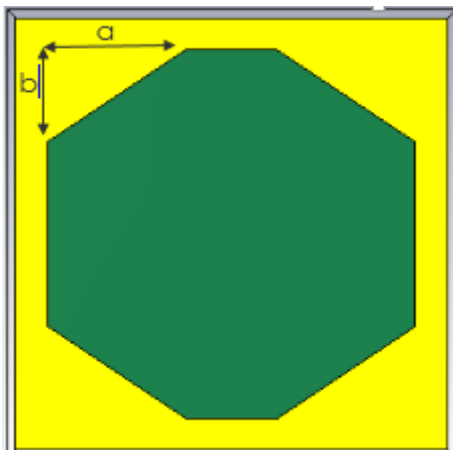


Figure 3.38 Les dimensions de la Cellule AMC 2

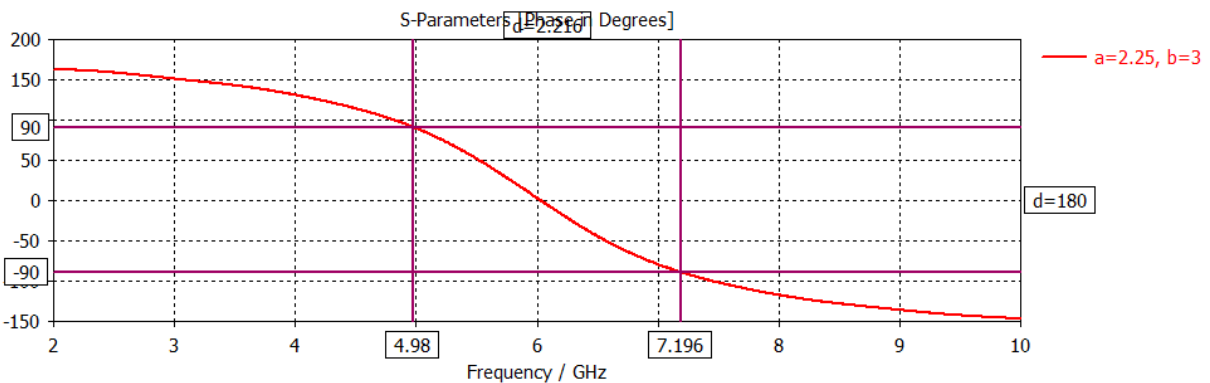
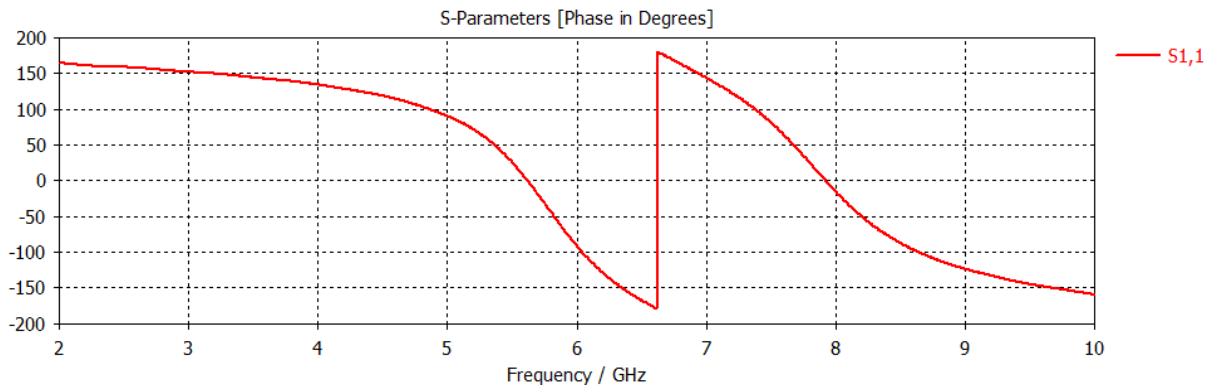


Figure 3.39 Phase du coefficient de réflexion de l'AMC 2

### 3.4.3 Cellule AMC 3

C'est une forme plus complexe, qui a plusieurs paramètres (de **a** jusqu'à **f**) comme montre la **figure 3.12**. Le diagramme de phase en **figure 3.13** montre que la structure a une phase comprise entre  $-90^\circ$  et  $90^\circ$  dans la bande de fréquence [5.01-7.19 GHz] avec une bande passante relative de 35,73%.



**Figure 3.40** Phase du coefficient de réflexion de l'AMC 3

La caractérisation des 3 cellules AMC montre que les trois cellules AMC présentées donnent la même bande de fonctionnement relative (entre 35% et 36 %).

### 3.5 Antenne Bowtie sur AMC

L'antenne bowtie a été placée sur 5\*8 cellules AMC présentée sur la **Figure 3.14**. La distance entre l'antenne et l'AMC est de  $h_a=2\text{mm}$ . 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 6.77 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.

### 3.6 Etudes paramétriques :

Dans cette partie nous allons faire varier une dimension de la structure AMC tout en gardant les autres fixes afin de voir l'influence de chaque paramètre sur les performances de l'antenne: coefficient de réflexion et gain réalisé.

#### 3.6.1 L'influence des paramètres :

##### 3.6.1.1 Cellule AMC 1

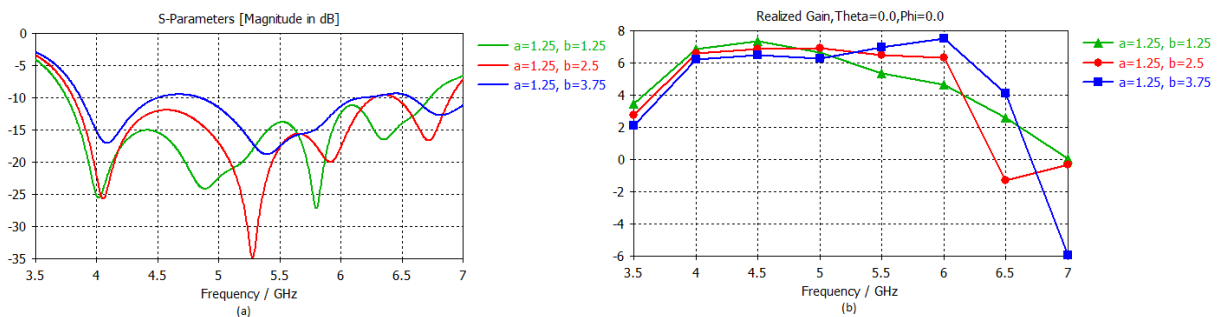
Dans la cellule 1, les paramètres **a** et **b** vont être étudiés à tour de rôle, en les faisant



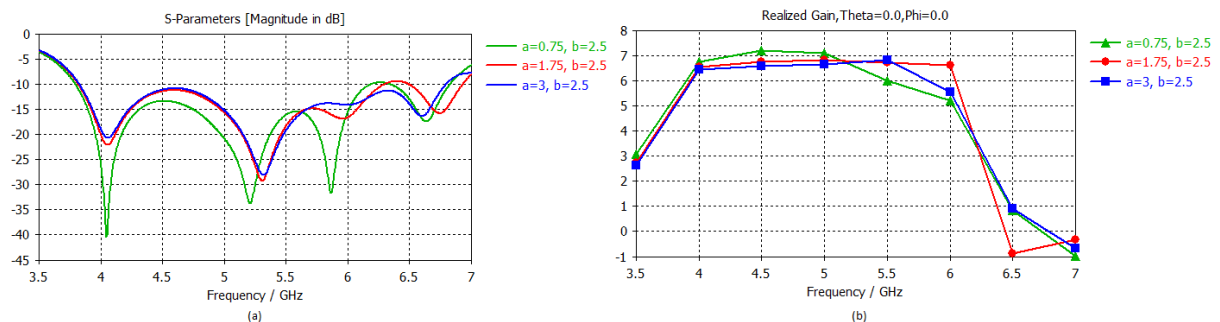
varier dans la plage [0.5-3.75mm] Les résultats obtenus sont montrés dans la **figure 3.15** et **3.16**.

On remarque que plus la valeur de 'b' est élevée, l'adaptation se dégrade. Le gain est stable de 4 à 5 GHz pour les différentes valeurs de 'b' mais se dégrade significativement après la fréquence de 6 GHz. Pour la variation de 'a', on a une meilleure adaptation en fréquences basses pour des petites valeurs de 'a' mais qui se dégrade pour les fréquences hautes (entre 6 et 6.5 GHz). Le gain est relativement stable dans la bande mais 4-5 GHz mais commence à diminuer après la fréquence 5.5 GHz.

La valeur choisie est celle de  $a=1.75$  mm et  $b=2.5$  mm car elle permet d'avoir la meilleure adaptation avec un gain stable dans la plus large bande de fonctionnement.



**Figure 3.41** Changement de paramètre « b » pour la cellule 1 (a) S11 (b) gain



**Figure 3.42** Changement de paramètre « a » pour la cellule 1 (a) S11 (b) gain

### 3.6.1.2 Cellule AMC 2

La même étude a été effectuée pour la cellule 2. Les résultats sont présentés dans la **figure 3.17** et **3.18**.

On remarque que plus la valeur de 'b' est élevée, l'adaptation se dégrade. Le gain est stable de 4 à 5 GHz pour les différentes valeurs de 'b' mais se dégrade significativement après la fréquence de 6 GHz. Pour la variation de 'a', on a une meilleure adaptation en fréquences basses pour des petites valeurs de 'a' mais qui se dégrade pour les fréquences

hautes (entre 6 et 6.5 GHz). Le gain est relativement stable dans la bande mais 4-5 GHz mais commence à diminuer après la fréquence 5 GHz. Les valeurs choisies sont celles de  $a=2.25$  mm et  $b=3$  mm car elles permettent d'avoir la meilleure adaptation et meilleur gain stable dans la plus large bande de fonctionnement.

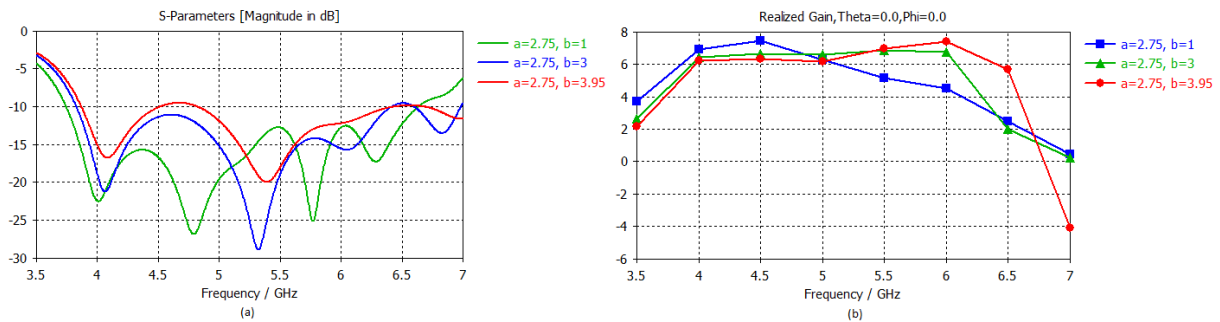


Figure 3.43 Changement de paramètre « b » pour la cellule 2 (a) S11 (b) gain

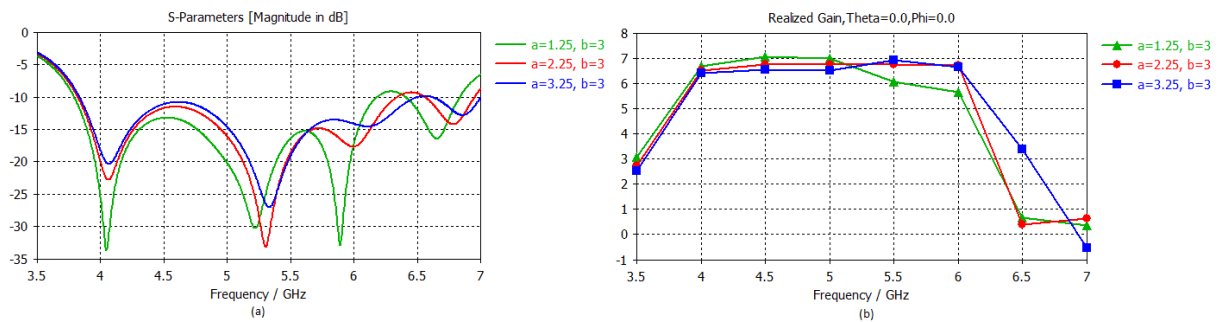


Figure 3.44 Changement de paramètre « a » pour la cellule 2 (a) S11 (b) gain

### 3.6.1.3 Cellule AMC 3

La cellule AMC 3 dispose de plusieurs degrés de liberté. Pour chaque étude, on fait varier un seul paramètre et on fixe les autres, et on recalculera la bande passante pour chaque résultat et puis nous sélectionnons et garderons la valeur qui nous donne la plus large bande avec le plus stable gain. Les différents résultats sont présentés dans les figures de 3.19 à 3.24.

On remarque que plus la valeur de 'b' est élevée, l'adaptation est meilleure. Le gain est stable sur la bande 4-6.5 GHz de 4 à 5.5 GHz pour  $b=3$ mm, avec une variation inférieure à 1dB comme montre la figure 3.19.

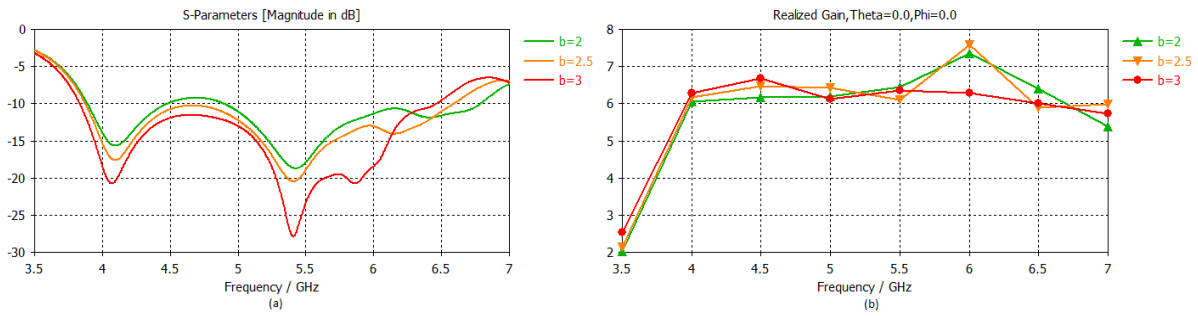


Figure 3.45 Changement de paramètre « b » pour la cellule 3 (a) S11 (b) gain

Pour la variation de 'a', on distingue une petite variation de gain dans toute la bande de fonctionnement (entre 4-6 GHz), comme montre la figure 3.20.

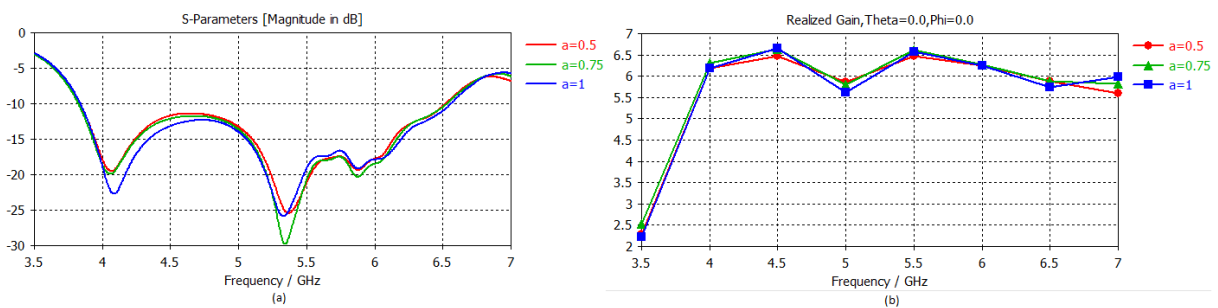


Figure 3.46 Changement de paramètre « a » pour la cellule 3 (a) S11 (b) gain

On remarque que plus la valeur de 'd' est faible, l'adaptation se dégrade. Le gain est stable pour la petite valeur de 'd' et lorsqu'on l'augmente il se déforme, comme montre la figure 3.21.

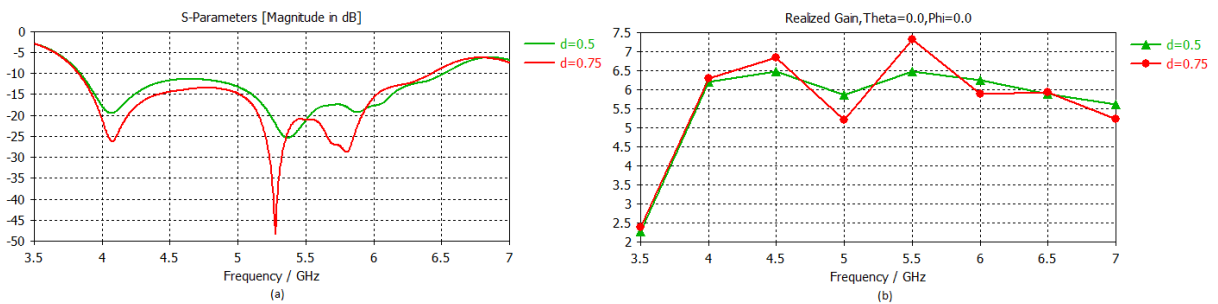


Figure 3.47 Changement de paramètre « d » pour la cellule 3 (a) S11 (b) gain

Après avoir modifié la valeur de 'e', on voit que le gain au début est déformé pour des petites valeurs de 'e' puis se stabilise lorsqu'on augmente la valeur de 'e' puis revient en distorsion lorsque la valeur de 'e' est supérieure à une certaine valeur (e=2), comme montre la figure 3.22.

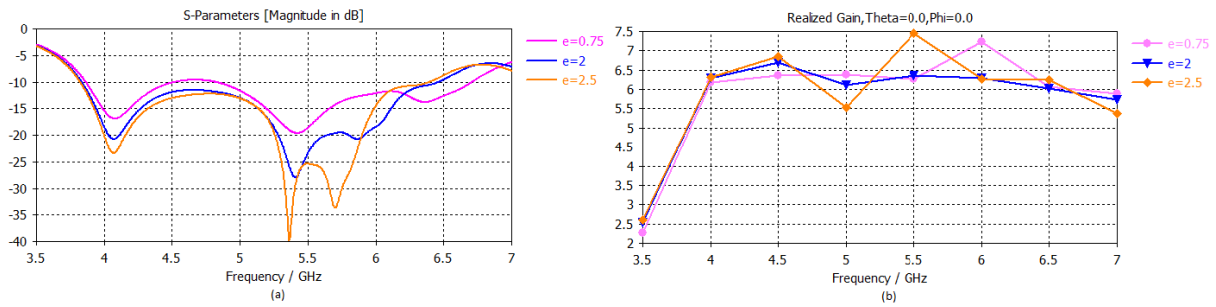


Figure 3.48 Changement de paramètre « e » pour la cellule 3 (a) S11 (b) gain

Pour le changement de 'c', y'a pas un grand changement du gain dans la bande de fréquence 4-5.5 GHz, mais on distingue une petite variation au-delà de 5.5 GHz pour les grandes valeurs de 'c'. Comme montre la figure 3.23.

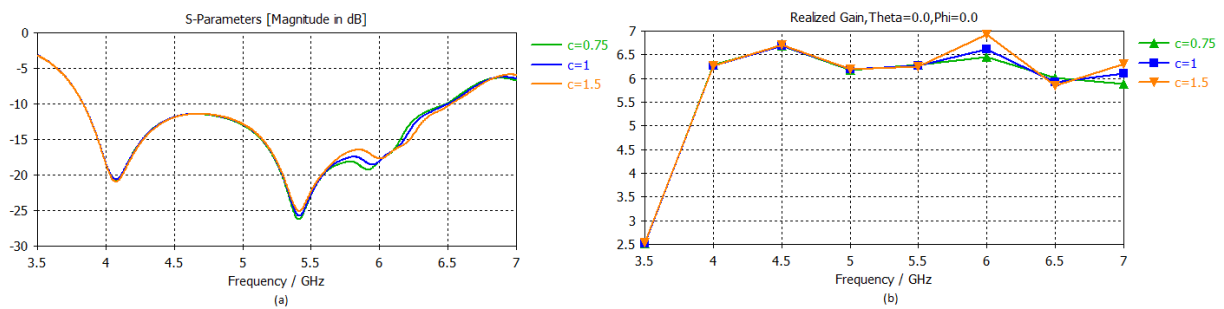


Figure 3.49 Changement de paramètre « c » pour la cellule 3 (a) S11 (b) gain

Pas de changement significatif sur l'adaptation lors de la variation de 'f'. Le gain est stable de 4 à 5.5 GHz pour les différentes valeurs de 'f' mais se dégrade significativement après la fréquence de 5.5 GHz, comme montre la figure 3.24.

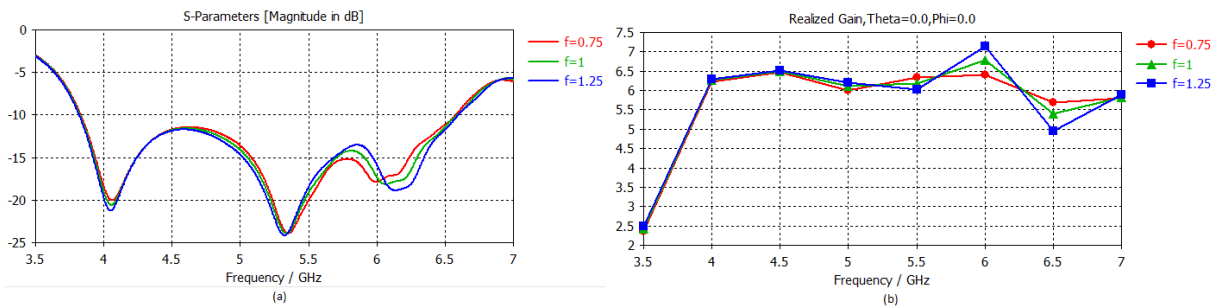


Figure 3.50 Changement de paramètre « f » pour la cellule 3 (a) S11 (b) gain

Après l'étude paramétrique des 3 cellules, on a choisi la troisième cellule AMC car elle donne une large bande passante avec un gain plus stable par rapport aux autres.

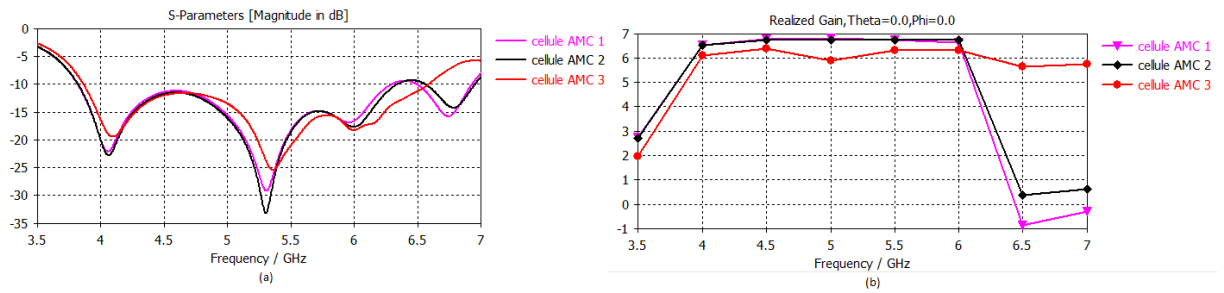


Figure 3.51 Comparaison des meilleurs résultats pour chaque cellule (a) S11 (b) gain

### 3.6.2 L'influence de paramètre ha :

Cette fois ci, nous faisons varier ha (la couche d'air) entre les valeurs 1.5 mm et 2.5 mm, ce qui est présenté dans la **figure 3.26**. Les meilleurs résultats sont pour ha=2 mm, car elle présente la plus faible marge entre Gmax et Gmin comme le montre le **tableau 3.1**.

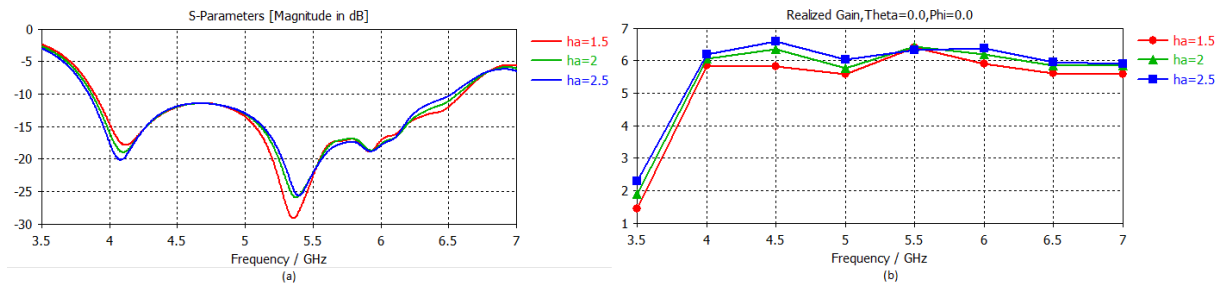


Figure 3.52 Différentes valeurs de ha pour la cellule choisie (a) S11 (b) gain

La couche d'air	La marge entre G <sub>max</sub> et G <sub>min</sub>
ha=1.5	6.37-5.78=0.59
ha=2	6.47-6.01=0.46
ha=2.5	6.70-6.22=0.48

Tableau 3.1 Les différentes marges entre G<sub>max</sub> et G<sub>min</sub>

### 3.7 Structure optimisée :

Les dimensions de la structure optimale sont :

a=0.5 mm, b=3 mm, c=0.75 mm, d=0.5 mm, e=2 mm, f=0.75 mm, ha=2 mm. Lorsqu'on a simulé cette structure avec ces paramètres, nous avons obtenus le coefficient de réflexion et le gain montré dans la **figure 3.27** et la **figure 3.28**.

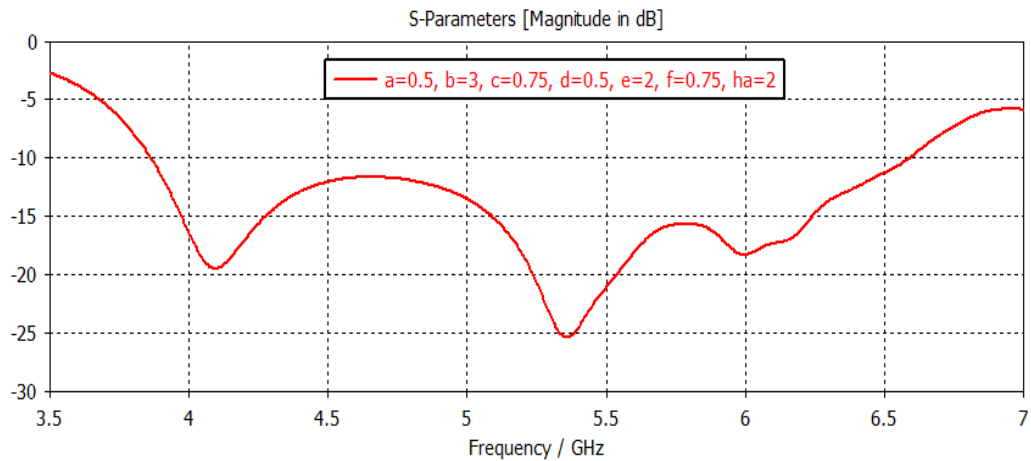


Figure 3.53 Coefficient de réflexion de la structure optimale

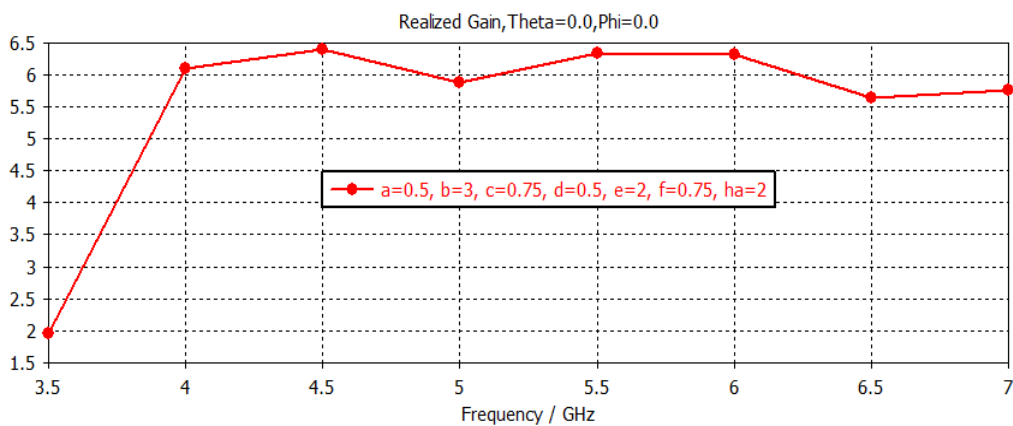


Figure 3.54 Le gain de la structure optimale

On observe un coefficient de réflexion inférieur à -10 dB dans la bande [3.87-6.58 GHz] (50.19%). Dans cette bande le gain est stable variant de 3.94 à 6.58 GHz.

### 3.8 Réalisation et mesure de l'antenne bowtie + AMC

Pour la réalisation de l'antenne et l'AMC il faut d'abord le convertir en fichier Gerber après sélectionnée les éléments nécessaires.

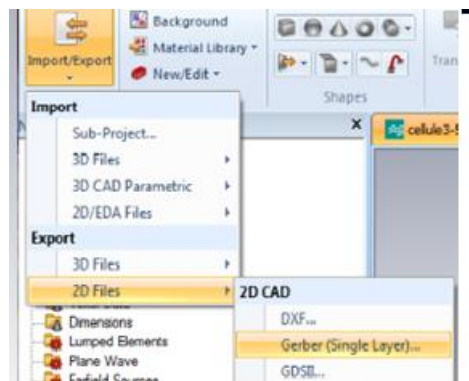
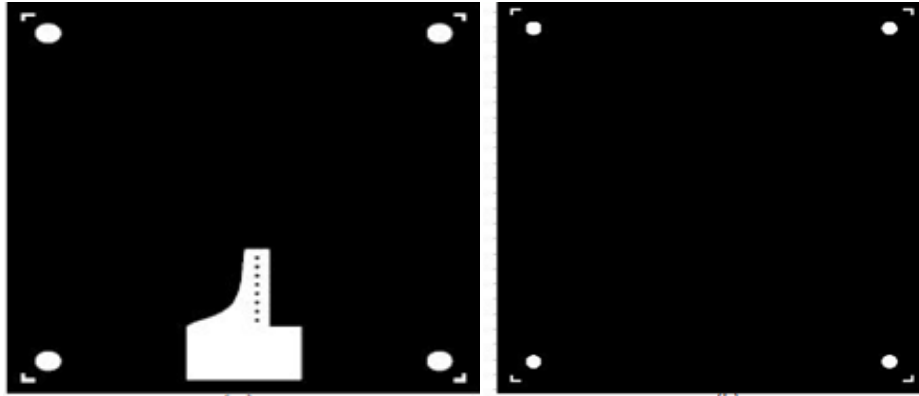


Figure 3.55 (a) les éléments nécessaires sélectionnée (b) conversion en fichier Gerber

Ensuite on importe un fichier Gerber de l'antenne et l'AMC dans le logiciel DipTrace qui est une application logicielle EDA (Exploratory Data Analysis) / CAD pour la création de diagrammes schématiques et de circuits imprimés avec une interface multilingue et des tutoriels.

Après avoir fait les modifications nécessaires, on obtient les figures suivantes :

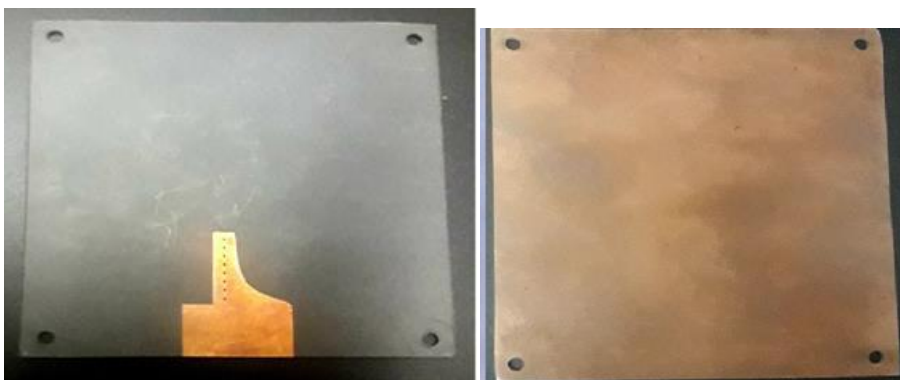


**Figure 3.56** Résultat finale de l'antenne (a) face arrière (b) face avant

Lorsqu'on obtient ces documents-là, on passe à l'étape suivante qui est la réalisation.

A partir des considérations énoncées précédemment, on aboutit à la géométrie présentée dans la **figure 3.35** et **3.36**. L'AMC est réalisé sur un substrat FR-4 de permittivité  $\epsilon_r = 4.3$  et d'épaisseur de 3.2 mm.

L'AMC a été réalisée au niveau de l'entreprise ALMiTech, et la mesure du coefficient de réflexion a été faite au Centre de Développement des Technologies Avancées CDTA.

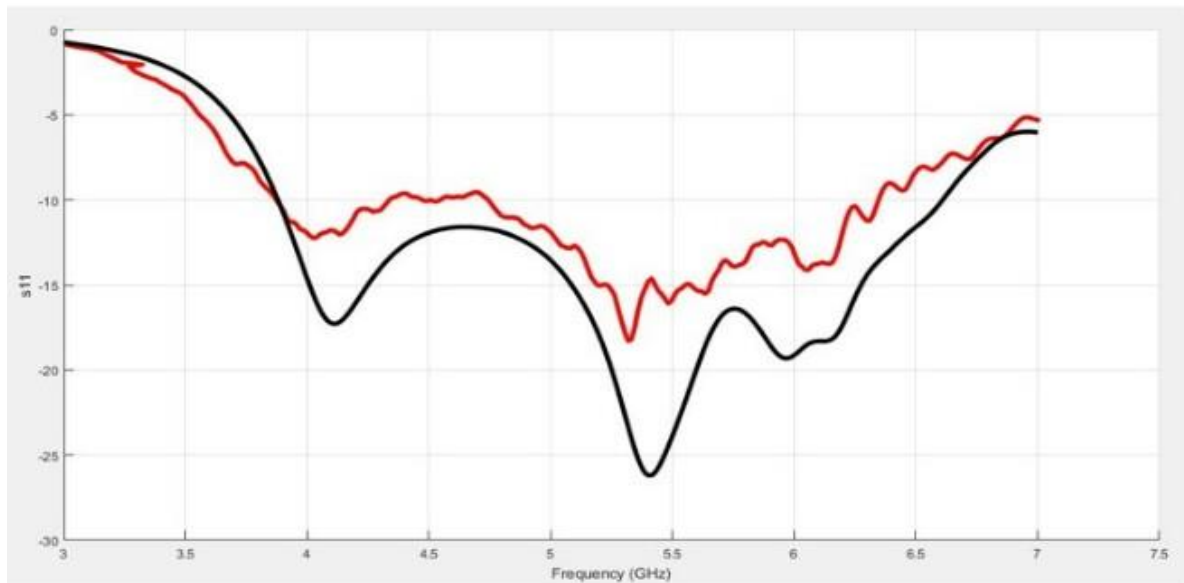


**Figure 3.57** Le prototype de l'antenne réalisé (a) Vue de face (b) Vue arrière.

**Figure 3.58** Le prototype de l'AMC réalisé (a) Vue de face (b) Vue arrière.

La **figure 3.37** présente le paramètre S11 simulé et mesuré du système réalisé. Une concordance entre la simulation et la mesure est observée. Le module du coefficient de

réflexion simulé de l'antenne conçue est inférieur à -10 dB pour la bande [3.87-6.58 GHz] et celui mesuré couvre la bande [3.87-6.39 GHz].



### 3.9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons fait en premier lieu un résumé des PFE précédents. Ensuite une antenne bowtie large bande avec AMC destiné aux applications aéronautiques et spatiales est conçue. Après une étude paramétrique sur 3s différentes cellules AMC, on a trouvé que la cellule de l'AMC 3 permet un fonctionnement dans la bande [3.94-6.58 GHz] (une partie de la bande C) avec un gain stable (ou la variation du gain est inférieur à 1dBi).



### Conclusion générale

De nos jours, avec la vitesse à laquelle se développe le domaine des systèmes de communication, les antennes sont devenues des composants d'une très grande importance. Parmi celles-ci, les antennes à gain élevé représentent un outil de transmission sans fil incontournable permettant la transmission de données avec un débit très élevé pour des longues et moyennes distances. . Souvent ces antennes sont réalisées à partir d'un réseau linéaire d'antennes classiques (patches, dipôles, fentes). Ces réseaux d'antennes présentent plusieurs avantages tels que : faiblesse de coût, facilité de fabrication même pour des fréquences millimétriques et facilité d'intégration dans des systèmes de communication La technologie AMC (Artificial Magnetic Conductor) semble une solution très prometteuse à cause de sa faible coût de fabrication.

C'est dans ce cadre que s'inscrit notre travail de mémoire. Il s'agit de concevoir et d'étudier des différentes cellules AMC.

Au cours des chapitres, nous avons présenté les éléments de base des antennes microstrip et leurs caractéristiques. On a aussi défini qu'est-ce qu'un AMC et comment fonctionne-t-il, Enfin, dans une troisième partie, nous avons effectué une étude d'optimisation de différentes cellules d'AMC. En effet, nous avons essayé d'apporter des modifications sur la structure de l'AMC pour obtenir une large bande de fréquence avec un gain stable dans cette bande de fonctionnement, en se basant sur l'étude paramétrique qui consiste à fixer tous les paramètres et faire changer un seul paramètre pour voir leur influence sur les caractéristiques de l'AMC.

Les résultats obtenus montrent bien que la structure antennaire proposée est bien adaptée dans la large bande de fréquence qui s'étale de 3.94 GHz à 6.58 GHz avec une variation de gain inférieure à 1 dB. Les paramètres de l'AMC tels que le coefficient de réflexion, le gain ont été présentés et commentés.

Pour conclure ce travail, nous avons fait la réalisation et la mesure du coefficient de réflexion de l'antenne large bande avec conducteur magnétique artificiel (AMC), une bonne concordance entre la simulation et la réalisation a été observée. Comme perspective, il serait nécessaire de mesurer les diagrammes de rayonnement de cette antenne pour valider la simulation.

## Bibliographie

- [1] **Balanis, Constantine A.** *Antennas Theory, Analysis and Design, Third Edition.*
- [2] **Mansour R et HADJI M. K.** *Étude d'une antenne micro-ruban à Bande interdite Électromagnétique(BIE) 1D à défauts.* M'SILA : UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF, 2019.
- [3] *Un guide pratique pour la planification et la construction des infrastructures de télécommunication à bas prix .Réseaux sans fils dans les pays en développement, deuxième édition,2009.*
- [4] **RICHARD A. POISEL.** *Antenna Systems and Electronic Warfare Applications.* London, 2012.
- [5] **DESCHAMPS G. A.** *Microstrip microwave antennas, third USAF.* Symposium on Antennas, 1953.
- [6] **D.G.Fang .**Antenna theory and Microstrip Antennas.
- [7] **Keith R. CARVER, JAMES W. MMINK.** *Microstrip Antenna Technology.* IEEE Trans. Antennas Propagation vol AP-29, n1, pp. 2-24, Jan 1981.
- [8] **R. S. G. K. A. P. C.LUXEY.** *Antennes imprimées- Bases et principes.* E3310. Technique de l'Ingénieur, Mai 2007.
- [9] **Harrabi A.** *Thèse doctorat, Conception et réalisation d'une antenne plate pour la réception satellite.* Sciences de l'ingénieur [physics]. UNIVERSITE DE NANTES/UNIVERSITE DE TUNIS EL MANAR, 2015.
- [10] **BESANCON R.** *Thèse de Doctorat, Contribution de réseaux d'antennes imprimées à pointage électronique. Conception et réalisation de maquettes en bande C et Ka.* Université de LIMOGES, Décembre 1997.
- [11] **R. S. G. K. A. P. C.LUXEY.** *Antennes imprimées- Bases et principes E3310.* Technique de l'Ingénieur, Mai 2007.
- [12] **KUCHAR A.** *Rapport de Thèse, Aperture-Coupled Microstrip Patch Antenna Array.* Technic University of Wien, Mars 1996.
- [13] I.J. BAHL - P. BHARTIA<<Microstrip Antennas>> Artech House – 1980.
- [14] **Balanis Constantine A.** *Antenna Theory, Analysis and Design.* John Wiley & Sons, Second Edition 2005.
- [15] **Bellazoug F.** *Etude D'une Antenne Micro-ruban Triangulaire A Bande Interdite Photonique (BIP) 2D.* M'SILA : UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF, Juin 2016.

- [16] **Volkan A, & Erdem Y.** (2020, August 18). Antennas for Space Applications : A Review. In A. Sabban, *Advanced Radio Frequency Antennas for Modern Communication and Medical Systems* (pp. 714-747).
- [17] **Ohmori, Shingo.** *Aeronautical and Maritime Antennas for Satellite Communication*. s.l: Communication Research Laboratory.
- [18] **Thereza Macnamara.** *Introduction to antenna placement and installation, first edition*.
- [19] **Alexandros P. Feresidis, George Goussetis, Shenhong Wang, and John (Yiannis) C. Vardaxoglou.** *Artificial Magnetic Conductor Surfaces and Their Application to Low-Profile High-Gain Planar Antenna*. IEEE TRANSACTIONS ON ANTENNAS AND PROPAGATION, VOL. 53, NO. 1, JANUARY 2005.
- [20] **Zahzah A, Hablal O.** *Conception et simulation d'une antenne à surface haute impédance pour le système GPS*. Blida : Institut d'Aéronautique et d'Etude Spatial IAES, 2017.
- [21] **D. Sievenpiper, Z. Lijun, R. F. J. Broas, N. G. Alexopolous, and E. Yablonovitch.** *High-impedance electromagnetic surfaces with a forbidden frequency band*. IEEE Trans Microwave Theory and Techniques. vol. 47, pp. 2059-2074, 1999.
- [22] **Li, X., Y.-C. Jiao, and L. Zhang .** "Wideband low-profile CPW-fed slot-loop antenna using an artificial magnetic conductor," *IET Electronics Letters*, Vol. 54, No. 11, 673–674, 2018.
- [23] **Joshi, C., Lepage, A. C., Sarrazin, J., & Begaud, X.** *Enhanced Broadside Gain of an Ultrawideband Diamond Dipole Antenna Using a Hybrid Reflector*. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 64(7), 3269–3274, (2016).
- [24] **A. P. Volkov, V. V. Kakshin, I. Y. Ryzhov, K. V. Kozlov, and A. Y. Grinev.** "Wideband low-profile dual-polarized antenna with AMC reflector," *Prog. Electromagn. Res. Lett.* Vol. 88, no. November 2019, pp. 15–20, 2020.
- [25] **Hadj Y, Selloum O.** *Conception et réalisation d'une antenne large bande à balun intégré*. Blida : Institut d'Aéronautique et des Etudes Spatiales, 2018.
- [26] **Ziane A, Kamari F.** *Antenne large bande à conducteur magnétique artificiel*. Blida : Institut d'Aéronautique et des études spatiales, 2019.
- [27] **Chikhi R.** *Conception d'une antenne directive large bande pour des applications aérospatiales*. Blida : Institut d'Aéronautique et des études spatiales, 2020