

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République algérienne démocratique et populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
جامعة عين تموشنت بلحاج بوشعيب
Université -Ain-Temouchent- Belhadj Bouchaib
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département d'électronique et de Télécommunications



Projet de Fin d'études
Pour l'obtention du diplôme de Master en : Télécommunications
Domaine : Sciences et Technologie
Filière : Télécommunications
Spécialité : Réseau et Télécommunication
Thème

Conception et simulation d'une antenne cornet SIW dans le domaine spatial

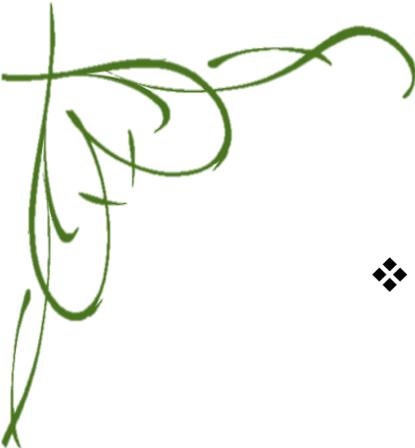
Présenté Par :

- 1) Melle. BOULEFDAOUI AMINA
- 2) Melle. JAMAI SAFIA

Devant le jury composé de :

Dr Badir benkrelifa Lahouaria	MCB	UAT.B.B (Ain Temouchent)	Président
Dr Bencherif Kaddour	MCA	UAT.B.B (Ain Temouchent)	Examineur
Dr Debbal Mohammed	MCA	UAT.B.B (Ain Temouchent)	Encadrant
Mr Abderrezague Abdelhak	Ingénieur en chef	Centre de développement des Satellites CDS/ASAL	Co-Encadrant

Année universitaire 2022/2023



Dédicaces



❖ *Je dédie ce modeste travail à :*

❖ *Mes très chers parents, pour votre éducation, vos encouragements, votre disponibilité et affection, durant tous mes études ; Qu'ALLAH vous protège.*

❖ *A ma sœur Asmaa pour son soutien moral et disponibilité.*

❖ *A mon petit frère Abdelaziz pour son encouragement.*

❖ *Ils ont toujours été là pour moi, Qu'ALLAH les gardes.*

❖ *A mon binôme et ma meilleure amie JAMAI Safia pour sa compréhension et sa gentillesse.*

❖ *A tous ceux qui ont été à mes côtés de près ou de loin.*



Boulefdaoui Amina





Dédicaces

❖ *Je dédie ce travail particulièrement à :*

❖ *Ma Mère*

Cher ce que j'ai, la profondeur des sentiments que j'ai pour toi ne peut pas être exprimée, aujourd'hui je réalise mon souhait pour moi et mes frères, je me souviens encore de tes paroles pour moi, étudie ma fille et réalise tes rêves, tu me soutiens toujours même après ta mort, qu'ALLAH te bénisse, Maman, je t'aime.

❖ *Et aussi Mon Père*

❖ *Mes chères sœurs Farah, Iman, Zahra*

❖ *Mon frère Sidi Mohammed*

❖ *Un merci spécial à ma chérie Amina*

❖ *A mes amies chacune son nom pour leurs aides précieuses.*

❖ *A tout ceux que je n'ai pas cité leurs noms mais je n'oublie jamais leurs présences dans ma vie.*

JAMAI Safia



Remerciements

"Remerciez ALLAH pour les bénédictions qui sont faites par Sa grâce"

Remerciez ALLAH et remerciez ALLAH toujours et jamais, nous ne serions pas arrivés là où nous en sommes s'il n'y avait pas eu sa conciliation et son aide à nous, qui nous a donné de la patience à chaque instant où nous nous sentions désespérés et frustrés. Et n'oubliez pas de prier et que la paix soit sur notre Messager et l'anneau des prophètes et messagers Muhammad ibn Abdullah Que la meilleure Prière et la paix soient sur lui.

Après cela, nous remercions tous nos parents, pères, mères, frères et sœurs qui nous ont encouragés dans la poursuite de nos études et qui ont été à nos côtés tout au long de notre cursus.

"Une main n'applaudit pas"

*Il nous a été difficile d'accomplir cette thèse sans recevoir aucune aide pour cela, nous tenons à remercier tous ceux qui nous ont aidés dans notre cheminement. Tout d'abord, nous tenons à remercier en particulier le professeur Mr **DEBBAL Mohammed** de l'Université Ain Témouchent, qui a supervisé notre projet de fin d'année et nous a fourni les informations nécessaires et Mr **ABDERREZAGUE Abdelhak** Ingénieur en Chef du Centre de développement des Satellites CDS/ASAL d'Oran pour nous aider du côté théorique et expérimental et nous fournir tout ce qui concerne le programme de simulation. Et n'oubliez pas l'enseignante Mme **MOULESSHOU Wassila**, une façon pour elle de nous soutenir et de répondre à toutes les questions que nous lui avons posées. Nous tenons également à remercier tous les enseignants et le personnel de l'Université Belhadj Bouchaïb, qui nous ont fourni les outils nécessaires à la réussite de nos études universitaires.*

*Nous offrons tous nos remerciements et notre gratitude aux membres du jury pour leur supervision dans l'évaluation de notre travail, Mr **BENCHERIF Kadour** et Mme **BADIR Lahouaria**. Nous sommes honorés et appréciés d'avoir accepté d'examiner notre thèse.*

*Et je n'oublie surtout **GHLOUCI Ismahène**, **GACI Rayhana** et **MAHI Wafaa** pour nous avoir soutenus lorsque nous avons besoin d'aide.*

Et au final on se remercie, c'est nous qui avons lutté et sommes restés des nuits debout, une fatigue inoubliable et une santé qui ne reviendra pas, et pourtant il y a eu de beaux moments où nous avons poursuivi nos rêves.

Merci à tous

Résumé

Notre thèse porte sur la "Conception et simulation de l'antenne cornet SIW dans le domaine spatial", plus précisément dans la bande X, en utilisant le logiciel CST Microwave Studio. L'objectif est d'étudier et de concevoir l'antenne cornet plan H pour le guide d'ondes intégré au substrat, afin de l'utiliser comme une antenne à gain standard à l'Institut des Communications. En intégrant la technologie de guide d'ondes au substrat, nous cherchons à éliminer l'utilisation d'antennes volumineuses à gain élevé. Pour cela, l'utilisation de la technologie SIW s'est avérée la plus appropriée, car elle permet de construire des cornets plus légers, tels que des cornets pyramidaux, et de concevoir des structures planes compactes. Notre étude a été menée de manière théorique dans les trois premiers chapitres, puis de manière numérique dans le quatrième et dernier chapitre, en utilisant le simulateur CST. Nous avons ainsi pu simuler et évaluer les performances de l'antenne cornet SIW dans le contexte spatial.

Mots clés : antenne cornet, technologie SIW, bande X, CST, simulation, spatial.

Abstract

Our thesis is titled "Design and Simulation of SIW Horn Antenna in the Space Domain" specifically focusing on the X-band, using the CST Microwave Studio software. The objective is to study and design the planar H-shaped horn antenna for the integrated substrate waveguide, to be utilized as a standard gain antenna at the Institute of Communications. By incorporating the integrated substrate waveguide technology, we aim to eliminate the need for high-gain and large-sized antennas. Hence, the utilization of SIW technology was deemed preferable as it enables the construction of lighter horn antennas, such as pyramid horns, and facilitates the design of compact planar structures. The problem was theoretically investigated in the first three chapters and numerically analyzed in the fourth and final chapter, utilizing the CST simulator. This allowed us to simulate and assess the performance of the SIW horn antenna in the space domain.

Keywords: horn antenna, SIW technology, X-band, CST, simulation, space.

ملخص

أطروحتنا تحمل عنوان "تصميم ومحاكاة هوائي قرن SIW في مجال الفضاء"، مع التركيز بشكل خاص على نطاق الإكس باستخدام برنامج CST Microwave Studio الهدف من الدراسة هو دراسة وتصميم هوائي قرن SIW الشكل الأفقي المستوي للموجه المدمجة في القاعدة، ليتم استخدامه كهوائي ذو كسب قياسي في معهد الاتصالات. من خلال استخدام تكنولوجيا الموجه المدمج في القاعدة، نهدف إلى التخلص من الحاجة إلى الهوائيات ذات الكسب العالي والأحجام الكبيرة. ولذلك، تعتبر تكنولوجيا SIW (الموجه المدمجة في القاعدة) الأكثر ملائمة حيث تمكن من بناء هوائيات قرنية أخف وزناً مثل الهوائيات الهرمية وتسهم في تصميم هياكل مستوية مدمجة. تمت دراسة المشكلة نظرياً في الفصول الثلاثة الأولى وتحليلها عددياً في الفصل الرابع والأخير باستخدام محاكي CST. وهذا سمح لنا بمحاكاة وتقييم أداء هوائي قرن SIW في مجال الفضاء.

الكلمات الرئيسية: هوائي قرن، تكنولوجيا SIW، نطاق الإكس، CST، محاكاة، الفضاء.

TABLE DES MATIERES

<i>Dédicaces</i>	i
<i>Remerciements</i>	iii
<i>Résumé</i>	iv
LISTE DES ABREVIATIONS	viii
LISTE DES SYMBOLES	ix
LISTE DES FIGURES	xi
LISTE DES TABLEAUX	xiii
INTRODUCTION GENERALE	1
Chapitre I : Concepts des antennes	3
I.1. Introduction	4
I.2. Définition d'une antenne	4
I.3. Équations de Maxwell	4
I.4. Le rôle d'une antenne	6
I.4.1. Le rôle d'antenne d'émission	6
I.4.2. Le rôle d'antenne de réception	6
I.5. Les Caractéristiques des antennes	6
I.5.1. Les caractéristiques physiques des antennes	6
I.5.2. Le caractéristique radio –électriques des antennes	7
I.5.2.1. Bande de fréquences	7
I.5.2.2. La directivité.....	7
I.5.2.3. Le gain d'antenne et rendement.....	8
I.5.2.4. Diagramme de rayonnement.....	9
I.5.2.5. Coefficient de réflexions et ROS.....	9
I.5.2.6. Polarisation	10
I.5.2.7. Angle d'ouverture.....	11
I.6. Différents types d'antennes	12
I.6.1. Antennes à réflecteurs ou paraboliques.....	12
I.6.2. Les antennes filaires	13
I.6.3. L'antenne planaire ou patch	13
I.6.4. Antennes à ouverture rayonnante	14
I.7. Conclusion	17
Chapitre II : La technologie SIW	18
II.1. Introduction	19

II.2. Les technologies des guides d'ondes	19
II.3. Guide d'onde de section rectangulaire.....	20
II .4. Condition de propagation de l'onde	21
II .5. Fréquence de coupure f_{cmn}	22
II .6. Vitesse de Phase.....	23
II .7. Vitesse de Groupe.....	23
II .8. Longueur d'onde guidée	23
II .9. Les pertes dans les guides d'ondes.....	23
II .10. Technologie SIW	24
II.10.1. Différentes types de structures d'un SIW	24
II .10.2. Mécanismes des pertes.....	25
II .10.3. Paramètres de conception de la structure SIW	26
II .10.4. Réalisation des antennes à base du SIW	28
II .10.5. Avantages de la technologie SIW	29
II .11. Conclusion.....	30
Chapitre III : Caractéristiques d'antenne cornet en technologie SIW (Cornet SIW).....	31
III.1. Introduction	32
III.2. L'antenne cornet.....	32
III.3. Les caractéristique d'antenne cornet.....	33
III.3.1. La directivité	33
III.3.2. Le gain	34
III.3.3. Largeur de faisceau d'antenne cornet.....	34
III.4. Les types et leurs caractéristiques	34
III.4.1. Le cornet sectoriel plan H.....	35
III.4.1.1. Calcul du champ électromagnétique dans l'ouverture (plan H).....	35
III.4.1.2. La directivité	36
III.4.2. Le cornet sectoriel plan E	37
III.4.2.1. Calcul du champ électromagnétique dans l'ouverture (plan E).....	37
III.4.2.2. La directivité	38
III.4.3. Le cornet pyramidal	38
III.4.3.1. Diagrammes de rayonnement dans le plan E	39
III.4.3.2. Diagrammes de rayonnement dans le plan H.....	40
III.4.3.3. La directivité	40
III.6. Géométrie d'antenne cornet.....	41
III.7. L'antenne SIW cornet.....	42
III.7.1. Cornet SIW en plane E	42
III.7.2. Cornet SIW en plan H	43

III.7.2.1. Dimensionnement du ce cornet.....	44
III.7.2.2. Dimensionnement du guide SIW	45
III.8. Conclusion	46
Chapitre IV : Résultat de simulation d'antenne cornet SIW.....	47
IV.1. Introduction.....	48
IV.2. Présentation de l'outil de simulation CST Studio Suite	48
IV.3. Conception d'antennes cornets opérant en bande X.....	49
IV.3.1. Antenne cornet conventionnel sectoriel plan H	49
IV.3.2. Antenne cornet conventionnel pyramidal.....	53
IV.4. Simulation du SIW dans la bande X.....	57
IV.5. Conception d'antenne cornet SIW	59
IV.6. Limitations et considérations de conception	63
IV.7. Comparaison	64
IV.8. Conclusion	65
CONCLUSION EN GENERALE.....	69
Références	72

LISTE DES ABREVIATIONS

\vec{E} : Vecteur d'intensité du champ électrique.

\vec{H} : Vecteur d'intensité du champ magnétique.

C : La vitesse de la lumière.

CST : Computer Simulation Technologie.

dB : Décibel.

dBi : Décibel isotopique.

EM : Electromagnétique.

GHz : Gigahertz.

GIS : Guides d'ondes Intégrés aux Substrat.

GOR : Guide d'Onde Rectangulaire.

ITU : International Télécommunication Union.

K : est la constante de propagation.

SIW : Substrate Integrated Waveguide.

TE : Transverse électrique.

TEM : Transverse électrique et magnétique.

TM : Transverse Magnétique.

W : La pulsation de l'onde.

LISTE DES SYMBOLES

A : surface de l'antenne,

A_e : Section efficace d'ouverture d'antenne,

A_{opt} : Longueur optimale qui permet une directivité maximale

a : Largeur du GOR équivalent.

β_z : Constante de phase.

B_{opt} : Hauteur optimales qui permet une directivité maximale.

d : Diamètre des trous métalliques.

D : La directivité.

D_H : La directivité du cornet plan H.

D_E : La directivité de la Cornet sectorielle de plan E.

D_P : La directivité de la corne pyramidale.

$f_{c_{mn}}$: Fréquence de coupure.

\vec{j} : Le courant de conduction.

K_a : rapport d'efficacité d'ouverture.

s : Espace entre deux trous adjacents centre à centre sur un même rangé de trous.

S_{11} : Coefficient de réflexion.

Z_c : L'impédance caractéristique de la ligne d'alimentation.

Z_{ant} : L'impédance d'entrer de l'antenne.

η : Le rendement.

λ : longueur d'onde,

ρ_h : La longueur du sommet de la corne de plan H.

l_H : La longueur de l'évasement du cornet.

μ_0, ϵ_0 : Respectivement la perméabilité et la permittivité d'un vide.

ϵ_r : La permittivité du diélectrique remplissant le guide d'ondes.

ρ_e : La longueur du sommet de la corne de plan E.

ϵ : La permittivité

μ : La perméabilité

ρ : La densité volumique de charge électrique.

λ_0 : La longueur d'onde qui dépend de la fréquence de la source.

λ : Longueur d'onde

λ_c : La longueur d'onde de coupure

λ_g : La longueur d'onde guidée.

LISTE DES FIGURES

Figure I. 1 : Principe de transmission par onde EM.....	4
Figure I. 2: Rayonnement d'antenne directive	8
Figure I. 3: Les différents types de polarisation.....	11
Figure I. 4: Angle d'ouverture d'antenne.....	12
Figure I. 5: Antenne parabolique.....	13
Figure I. 6: Antenne filaire.....	13
Figure I. 7: Antenne patch.....	14
Figure I. 8: Exemple d'une antenne a ouverture rayonnante.....	14
Figure I. 9: Antenne cornet sectoriel plan H.....	16
Figure II. 1: guide d'onde rectangulaire	20
Figure II. 2: Propagation des modes (a) TEM ₀ (b) TE _{0n} (c) TEM _n ou TH _{mn}	21
Figure II. 3: Structure d'un guide SIW.....	24
Figure II. 4: Types de structures SIW.....	25
Figure II. 5: paramètre du SIW.....	26
Figure III. 1: Cornet obtenu en augmentant progressivement les dimensions du guide.....	32
Figure III. 2: Antenne cornet à gain standard	33
Figure III. 3: Antenne dans son repère et rayonnement d'une antenne directionnelle.....	34
Figure III. 4: les types rectangulaires d'antennes cornet : (a) Cornet plan H, (b) cornet plan E, (c) cornet pyramidal.....	34
Figure III. 5: Cornet sectoriel plan H.....	35
Figure III. 6: Cornet sectoriel plan en H et système de coordonnées.....	35
Figure III. 7: Cornet sectoriel plan E.....	37
Figure III. 8: Cornet sectoriel plan en E et système de coordonnées	37
Figure III. 9: Antenne cornet pyramidal.....	39
Figure III. 10: Cornet pyramidale en plan E et système de coordonnées.....	39
Figure III. 11: Cornet pyramidale en plan E et système de coordonnées	40
Figure III. 12: Géométrie d'une antenne cornet plan H.....	41
Figure III. 13: Exemple d'antennes cornet fabriquées.....	42
Figure III. 14: Géométrie du cornet SIW du plan E avec simulation à 30 GHZ.....	43
Figure III. 15: Géométrie du cornet SIW du plan H.....	43
Figure III. 16: la structure de la corne plane H.....	44
Figure III. 17: Description des dimensions du guide SIW.....	46
Figure IV. 1: CST MICROWAVE STUDIO.....	48
Figure IV. 2: Antenne cornet sectoriel plan H.....	49
Figure IV. 3: Coefficient de réflexion S ₁₁	50
Figure IV. 4: Diagramme de rayonnement d'antenne cornet sectoriel plan H en 3D.....	51
Figure IV. 5: Diagramme de rayonnement en coordonnées polaires pour la phase 0 degré.....	51
Figure IV. 6: Diagramme de rayonnement en coordonnées polaires pour la phase 90 degrés.....	52
Figure IV. 7: Diagramme de rayonnement du gain en coordonnées polaires pour la phase 0 degré (a) et pour phase 90 degré (b).....	53
Figure IV. 8: Antenne cornet pyramidal.....	54
Figure IV. 9: Coefficient de réflexion S ₁₁	54
Figure IV. 10: Diagramme de rayonnement en coordonnées polaires pour la phase 0 degré.....	55
Figure IV. 11: Diagramme de rayonnement en coordonnées polaires pour la phase 90 degré.....	55
Figure IV. 12: Diagramme de rayonnement du gain en coordonnées polaires pour la phase 0 degré (a) et pour phase 90 degré (b).....	56

Figure IV. 13: Structure du Guide SIW opérant dans la bande X.....	58
Figure IV. 14: Les paramètres S pour le guide SIW avec CST.....	58
Figure IV. 15: Configuration d'antenne cornet à base de SIW.	59
Figure IV. 16: Coefficient de réflexion S11.....	60
Figure IV. 17 : Diagramme de rayonnement pour la phase 0 degré (a) et pour phase 90 degré (b) de l'antenne cornet SIW en plan H à 10 GHz.....	60

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I. 1 : tables les bandes de fréquences ITU(5).	7
Tableau IV. 1: Valeurs des paramètres du guide SIW et les caractéristiques de diélectrique dans Bande X.....	57

INTRODUCTION GENERALE

Dans le domaine des ondes millimétriques, les lignes de transmission peuvent être formées à partir de guides d'ondes. Pour la transition entre les guides d'ondes et les milieux à propagation libre, on utilise généralement des antennes constituées d'éléments de guide d'ondes dans des sections progressivement croissantes, ces antennes sont appelées : cornets électromagnétiques (1). Les antennes cornet sont très populaires dans la bande des fréquences micro-ondes (au-dessus de 1 GHz).

Ils offrent un gain élevé, un ROS faible (avec alimentation par guide d'ondes), une bande passante relativement large et ils ne sont pas difficiles à mettre en œuvre. Bien qu'elles soient de conception relativement ancienne, les antennes cornet sont encore largement utilisées aujourd'hui dans le domaine des micro-ondes, en particulier dans les sites d'étude, les sources primaires de réflecteurs paraboliques et les applications nécessitant de grandes largeurs de bande.

Les principales qualités de ce type d'antenne sont la pureté de polarisation, qui permet de caractériser la polarisation d'autres antennes, la large bande passante (par rapport aux antennes résonnantes), et le gain élevé. Le principal inconvénient est sa taille et son poids.

Le développement de la technologie SIW est principalement dû à ses avantages de faible coût de production, de bon facteur de qualité et d'intégration facile dans les circuits de télécommunication.

Dans ce contexte, la nouvelle antenne cornet basée sur la technologie SIW passe d'abord par la conception d'une nouvelle technologie. Tout domaine utilisant les télécommunications nécessitera bien sûr l'utilisation d'antennes, car elles prennent de plus en plus d'importance dans les systèmes de transmission, tout comme les télécommunications spatiales.

C'est dans ce contexte que notre projet de recherche s'intitule " Conception et simulation antenne cornet SIW dans le domaine spatial". Pour atteindre nos objectifs, notre manuscrit est divisé en trois parties, organisées comme suit :

Dans le premier chapitre, nous introduirons une petite définition des antennes et présenterons quelques exemples de différents types d'antennes, suivis d'une description détaillée des principales propriétés radio électriques et physiques.

Le second chapitre est consacré aux notions générales sur les guides d'ondes puis une description détaillée sera donnée pour le cas de la technologie SIW puisqu'elle est la base de ce sujet d'étude.

Ce chapitre sera suivi par un autre qui introduira une étude sur les différentes caractéristiques d'antenne cornet dans le plan H et leur technique. On termine le chapitre par l'implémentation de cette antenne cornet avec la technologie SIW

Le quatrième chapitre s'intéressera plus particulièrement à l'étude d'antenne cornet dans le plan H. Ensuite la conception et simulation des guides de guide d'onde à l'aide de la technique SIW (Substrate Integrated Waveguide) dans la bande X et enfin nous allons concevoir l'antenne cornet opérant dans la bandes désirée en utilisant la technologie SIW. La présentation des résultats de simulation sous CST.

Ce document sera enfin clôturé par une conclusion générale répondant.

Chapitre I :

Concepts des

antennes

I.1. Introduction

Les antennes sont l'un des composants les plus importants des systèmes de communication sans fil. Pour pouvoir développer ce projet de fin d'étude, il est nécessaire d'étudier tous les termes nécessaires pour comprendre les antennes. Pour cela, ce chapitre introduit ces différents termes. (1)

I.2. Définition d'une antenne

Les antennes sont des dispositifs utilisés pour rayonner ou recevoir des champs électromagnétiques dans l'espace. Ils peuvent servir d'adaptateurs d'impédance entre l'espace et l'émetteur ou le récepteur (figure I. 1).(2)

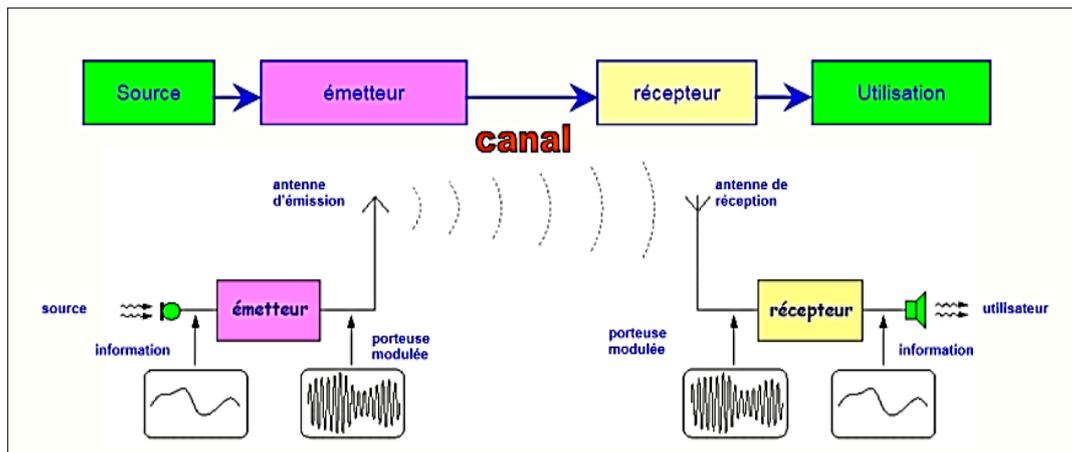


Figure I. 1 : Principe de transmission par onde EM(2).

I.3. Équations de Maxwell

Les équations de Maxwell expriment le comportement d'un champ électromagnétique par rapport à la source qui le génère. Ces équations différentielles contiennent toutes les informations nécessaires pour résoudre les problèmes électromagnétiques. Sont définies comme suit(2) :

$$\text{rot}(\vec{E}) = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad \text{Eq (I.1)}$$

$$\text{div}(\vec{B}) = 0 \quad \text{Eq (I.2)}$$

$$\overline{\text{rot}}(\vec{H}) = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad \text{Eq (I.3)}$$

$$\text{div}(\vec{D}) = \rho \quad \text{Eq (I.4)}$$

Les deux premières équations ne traitent que des champs électromagnétiques. On les appelle les équations intrinsèques et les deux autres sont appelées équations extrinsèques en raison de l'existence de source.

Dans les équations (I.3) et (I.4), deux nouvelles grandeurs H et D émergent, qui sont les réponses du milieu se propageant aux excitations magnétiques (champ magnétique) et électriques (Déplacement électrique), respectivement(2).

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu} \quad \text{Eq (I.5)}$$

$$\vec{D} = \epsilon * \vec{E} \quad \text{Eq (I.6)}$$

La permittivité $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$; la perméabilité $\mu = \mu_0 \mu_r$ des constantes caractérisant le milieu de propagation.

Ces deux constantes sont liées à la vitesse des ondes électromagnétiques dans le milieu :

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon \mu}} \quad \text{Eq (I.7)}$$

Dans l'équation [I.3], le terme \vec{j} est le courant de conduction et son terme homogène $\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$ est appelé courant de déplacement(2).

I .4. Le rôle d'une antenne

Si l'on considère le système de communication sans fil le plus simple, Celui-ci consistera en un bloc de transmission et un bloc de réception. Ces deux blocs séparent le canal de propagation où le signal transmis est transité avant d'être reçu(3).

I .4.1. Le rôle d'antenne d'émission

Afin d'assurer la transmission dans l'air, des équipements sont nécessaires pour générer des ondes de rayonnement. La fonction de l'antenne d'émission est de convertir la puissance électromagnétique dirigée. Provenant du générateur en puissance rayonnée(3).

I .4.2. Le rôle d'antenne de réception

A l'inverse au niveau d'antenne de réception, la puissance rayonnée peut être captée par l'antenne de réception. En ce sens, l'antenne se comporte comme un capteur et un transformateur qui convertit la puissance rayonnée en puissance électromagnétique guidée(3).

I .5. Les Caractéristiques des antennes

Il existe 2 grandes familles de caractéristiques pour une antenne utilisée dans une liaison spatiale(4):

I.5.1. Les caractéristiques physiques des antennes

- Les dimensions et masse de l'antenne. Cela dépend du type d'antenne et du type d'application.
- Caractéristiques mécaniques de l'antenne : Les antennes sont très sensibles à leur environnement et il est important de prendre en compte les paramètres suivants : résistance au vent, résistance thermique, etc.
- Caractéristiques thermiques : Il est important de comprendre l'effet des variations thermiques sur les matériaux utilisés pour fabriquer ces antennes.

I.5.2. Le caractéristique radio –électriques des antennes

I.5.2.1. Bande de fréquences

Dans la fréquence centrale de la résonance, ce qui détermine la fréquence d'utilisation la plus basse et la plus élevée. Il est courant d'utiliser des antennes pour la réception en dehors de la bande passante.

Les antennes sont la partie principale des systèmes de communication sans fil et sont des dispositifs qui convertissent les signaux de radiofréquence (tableau I.1) en ondes électromagnétiques équivalentes afin de les envoyer dans l'espace libre, et la communication sans fil nécessite des antennes pour diffuser et recevoir d'eux(5).

La bande	Fréquences concernées
L	1 GHz - 2 GHz
S	2 GHz - 4 GHz
C	4 GHz - 8 GHz
X	8 GHz - 12 GHz

Tableau I. 1 : tables les bandes de fréquences ITU(5).

La bande X : dans l'étude des antennes, nous nous sommes appuyés sur la fréquence X dans tous nos calculs et résultats, la bande X est une gamme de fréquences d'ondes radio de 8 GHz à 12 GHz, qui est la plus utilisée dans les communications et les radars (6).

I.5.2.2. La directivité

C'est un rapport entre la puissance rayonnée dans une direction donnée $P(\theta, \varphi)$ et la puissance que rayonnerait une antenne isotrope sans pertes.

$$D(\theta, \varphi) = 4\pi \frac{P(\theta, \varphi)}{Pr}$$

Eq (I .8)

Chaque antenne a des directions horizontales basées sur elle (figure I.2) (7):

- **Lobe principal** : Le lobe radioactif dont l'énergie et la direction de rayonnement sont les plus élevées est pris en compte.
- **Angle d'ouverture** : La force radioactive est la moitié de la force radioactive dans la direction la plus appropriée. Plus cet angle est étroit, plus l'antenne est dirigée.
- **Lobes secondaires** : Le rayonnement de l'antenne représente des directions indésirables.
- **Lobe arrière** : lobe secondaire dans la direction opposée, 180 degrés du lobe principal.

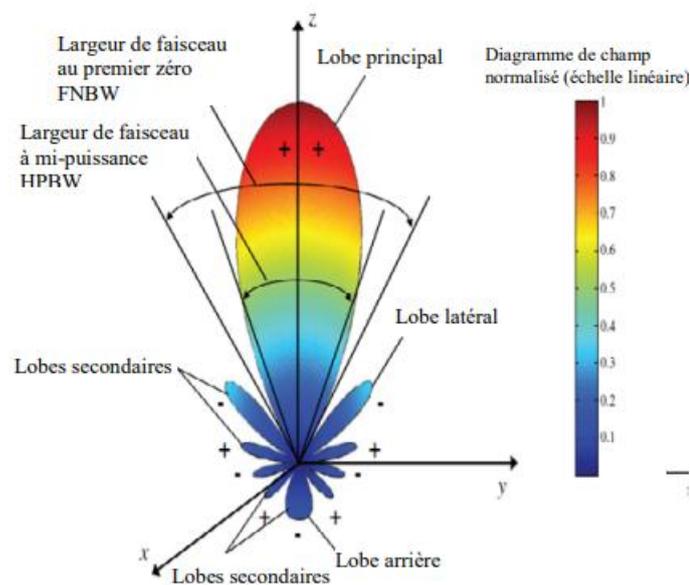


Figure I. 2: Rayonnement d'antenne directive (8).

I.5.2.3. Le gain d'antenne et rendement

Le profit est un aspect important de la direction et est protégé par le ratio énergétique s'il est moins important dans certaines directions et plus important dans d'autres(9).

$$G(\theta, \varphi) = \frac{P(\theta, \varphi)}{P_r} = \frac{P(\theta, \varphi)}{P_t / 4\pi R^2} = 4\pi R^2 \frac{P(\theta, \varphi)}{\iint P(\theta, \varphi)} \quad \text{Eq (I.9)}$$

Avec :

P : densité de puissance moyenne d'antenne directive (W/m²).

P₀ : densité de puissance moyenne d'isotrope (W/m²).

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

Le gain par décibel est : $|G|_{dB} = 20 \log_2 (G)$

Si l'antenne est omnidirectionnelle et sans perte, alors elle a un gain de 1 ou 0 dB. Le gain est généralement exprimé en dB ou en dBi puisqu'une antenne isotrope est utilisée comme référence.

Le rendement η de l'antenne est converti en capacité à transmettre de la puissance électrique sous forme de puissance rayonnée PR à l'entrée PA. Elle est définie comme le rapport entre la puissance totale rayonnée par une antenne et la puissance qui lui est fournie(10).

$$\eta = \frac{Rr}{Rr + RP} \quad \text{Eq (I .10)}$$

I.5.2.4. Diagramme de rayonnement

Une représentation du rayonnement en 2D ou 3D est rayonné pour l'énergie, le gain ou le champ électrique à une longue distance dépend de θ dans les plans verticaux : le plan E et le H. Il est possible d'identifier plusieurs paramètres du rayonnement des antennes, notamment la conquête, le niveau de résistance et les lobes secondaires(9).

I.5.2.5. Coefficient de réflexions et ROS

Le rapport d'ondes stationnaires (ROS) est une mesure de l'inadéquation entre la ligne de transmission et la charge de l'antenne, plus ROS est élevé, plus la correspondance est mauvaise(11).

La valeur minimale de ROS correspond à une adaptation parfaite et est égale à 1(Pour les applications spatiales la valeur maximale du ROS doit être inférieure à 2 en dB).

$$ROS = \frac{V_{\max}}{V_{\min}} = \frac{1 + |S_{11}|}{1 - |S_{11}|} \quad \text{Eq (I .11)}$$

$$S_{11} = \Gamma = \frac{Z_{\text{ant}} - Z_c}{Z_{\text{ant}} + Z_c} \quad \text{Eq (I .12)}$$

S11 : le coefficient de réflexion.

Le module du coefficient de réflexion est souvent exprimé en décibel (dB) et se définit comme suit :

$$|S_{11}| \text{ dB} = 20 \log_{10}(|S_{11}|) \quad \text{Eq(I .13)}$$

I .5.2.6. Polarisation

La polarisation d'une antenne dans une direction donnée est la polarisation des ondes émises par l'antenne, peut être classée comme linéaire, circulaire ou elliptique (figure I.3). La polarisation d'une onde rayonnée est un graphique tracé en fonction du temps aux extrémités d'un vecteur à un emplacement fixe dans l'espace(12).

$$\vec{E} = E_{\theta} \vec{U}_{\theta} + E_{\varphi} \vec{U}_{\varphi} \quad \text{Eq (I .14)}$$

POLARISATION LINEAIRE

- linéaire lorsque le champ électrique E se propage en maintenant une direction constante avec le temps.
- le diagramme de rayonnement est un dipôle magnétique sont en phase E_θ et E_φ et RA=∞.

$$\Delta\varphi = \varphi_v - \varphi_x = n\pi \quad \text{Eq (I .15)}$$

POLARISATION CIRCULAIRE

- Circulaire lorsque le vecteur champ E décrit un cercle qui varie dans le temps.
- Ce champ E a deux composantes d'égale amplitude et déphasées de 90°.
- E_θ et E_φ sont égaux en module et vibrent en quadrature et RA=1.

$$|\varepsilon_x| = |\varepsilon_y| \Rightarrow E_x = E_y = E \quad \text{Eq (I .16)}$$

$$\Delta\varphi = \varphi_y - \varphi_x \neq \begin{cases} +n\pi/2 \text{ pour CW} \\ -n\pi/2 \text{ pour CCW} \end{cases} (n = 0, 1, 2, 3 \dots) \quad \text{Eq (I.17)}$$

POLARISATION ELLIPTIQUE

Lorsque le vecteur champ E décrit une ellipse dans le temps, la polarisation est appelée ellipse. Il correspond au cas général du champ E, qui contient deux composantes d'amplitudes différentes décalées de $\pi/2$. Certaines antennes ont une polarisation elliptique ou circulaire. Si la polarisation de l'antenne n'est pas adaptée à la polarisation de l'onde, le signal sera affaibli à l'infini.

Les composantes E_θ et E_ϕ vibrent en quadrature, mais leur mode est arbitraire, et le rapport axial RA est compris entre : $\infty \geq RA \geq 1$.

$$\Delta\varphi = \varphi_y - \varphi_x = \begin{cases} +(2n + 1)\pi/2 & \text{pour CW (RHEP)} \\ -(2n + 1)\pi/2 & \text{pour CCW (LHEP)} \end{cases} \quad \text{Eq (I.18)}$$

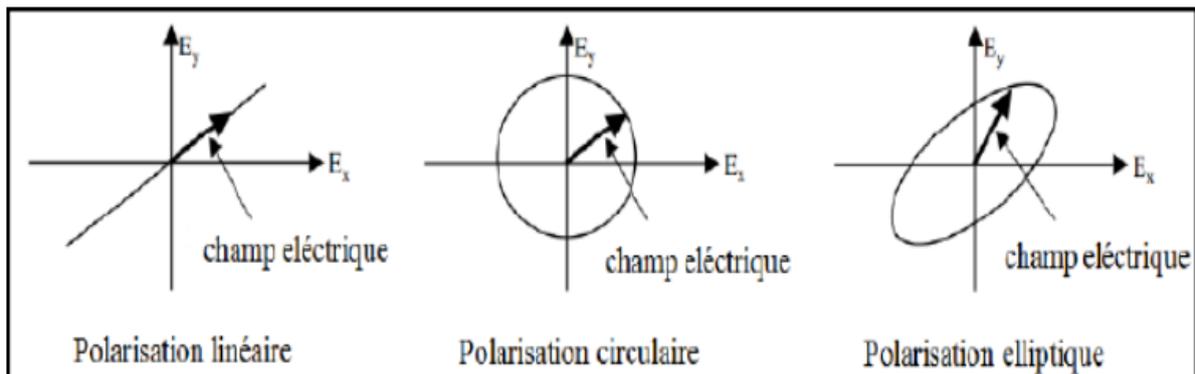


Figure I. 3: Les différents types de polarisation(13).

I .5.2.7. Angle d'ouverture

L'angle d'ouverture du lobe principal est estimé à -3 dB, qui est la plage angulaire spécifiée sur un graphique 2D où le gain est $\text{dB} \geq G_{\text{max}}, \text{dB} - 3$, (ou $G = G_{\text{max}}/2$ si on ne travaille pas en dB). Plus 3dB est faible, plus le gain maximal est important, mais plus le pointage devrait faire appel à des techniques élaborées (figure I.4).

La section d'ouverture effective A_e de l'antenne est la surface de section représentée par l'antenne en émission ou en réception. C'est un paramètre clé pour les performances de l'antenne. Le gain (G) est lié au diamètre d'ouverture comme (4) :

$$G = \frac{4\pi \cdot A_e}{\lambda^2}; A_e = K_a \cdot A \quad \text{Eq(I.19)}$$

Avec :

λ : longueur d'onde, A_e : Section efficace d'ouverture d'antenne,

A : surface de l'antenne, K_a : rapport d'efficacité d'ouverture.

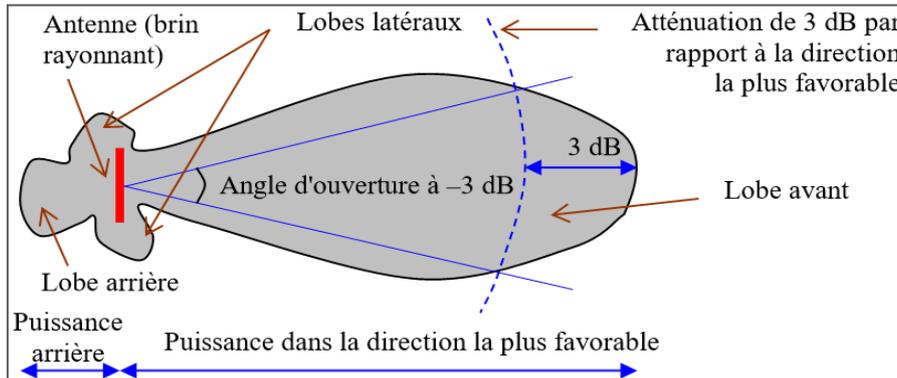


Figure I. 4: Angle d'ouverture d'antenne(14).

Le taux d'efficacité dépend de la répartition de l'énergie dans l'ouverture. Si la distribution est linéaire, alors $K_a = 1$ mais cela signifie un grand nombre de feuilles secondaires. En pratique, on veut limiter l'énergie émise dans ces lobes pour une plus grande directivité, donc $K_a < 1$ fait $A_e < A$.

I .6. Différents types d'antennes

I .6.1. Antennes à réflecteurs ou paraboliques

C'est une antenne universelle, c'est à dire qu'elle est adaptée à toutes les fréquences, utilisée à partir de 1,1 GHz, le rôle du réflecteur est de renvoyer les ondes reçues vers l'antenne source. L'émetteur génère le signal à transmettre. Il est relié à l'antenne par un câble relié au cornet d'alimentation, qui est la source, placé au foyer du réflecteur ; le but de la source est d'éclairer complètement la surface du réflecteur avec le signal à transmis. Il se caractérise par une très forte directivité la (figure I.5).



Figure I. 5: Antenne parabolique(15).

I .6.2. Les antennes filaires

Les antennes filaires comprennent toutes les antennes formées à partir de câbles conducteurs de petit diamètre, y compris des modèles tels que des antennes dipôles, des antennes monopôles, des antennes à boucle résonante, des antennes Yagi et des antennes hélicoïdales. Cette grande famille comprend des antennes relativement simples la (figure I. 6).

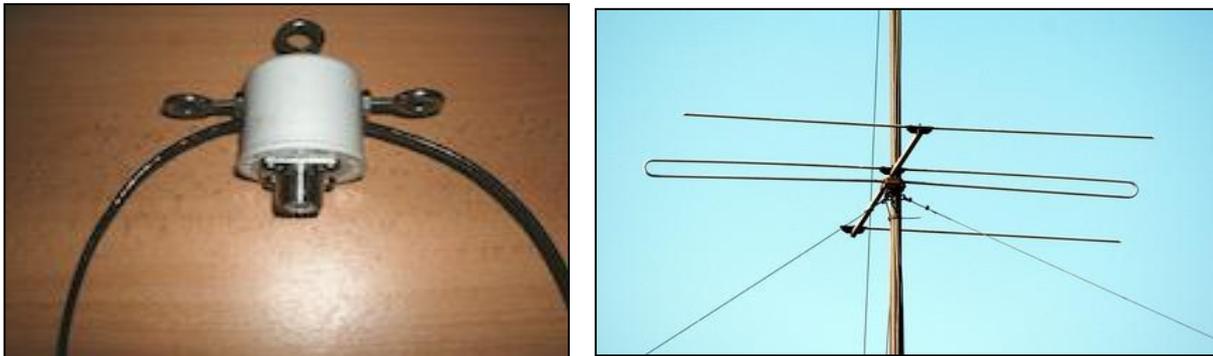


Figure I. 6: Antenne filaire(15).

I .6.3. L'antenne planaire ou patch

L'antenne patch est un nouveau type d'antenne, qui est fréquemment développé et utilisé. Il se compose d'un diélectrique avec un plan de masse métallique sur une face. Les sculptures en métal, en revanche, peuvent supporter des courants de surface qui génèrent un rayonnement électromagnétique. Le courant est transporté du générateur à l'antenne via une ligne micro ruban (figure I. 7).

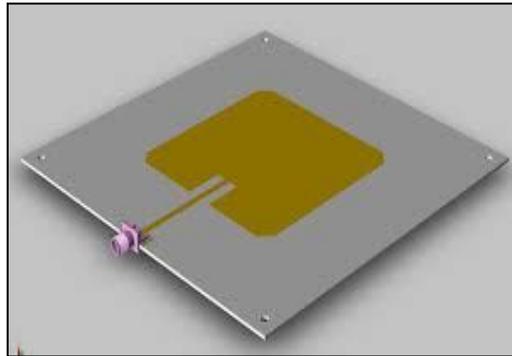


Figure I. 7: Antenne patch (16).

I.6.4. Antennes à ouverture rayonnante

Les antennes à ouverture rayonnante sont très utiles pour les applications aéronautiques et spatiales car elles s'intègrent bien dans les châssis des avions ou des équipements spatiaux. Parmi les antennes à ouverture rayonnante les plus connues, on peut citer : les antennes cornets, les antennes paraboliques à réflecteur et les antennes lentilles. Les cornets sont des guides d'onde de sections progressivement croissantes se terminant par une ouverture rayonnante de profil rectangulaire ou circulaire.

L'impédance à la frontière entre les deux milieux (guide d'onde et air) provoque la réflexion d'une partie de l'onde. Ceci est réalisé en utilisant une section de guide d'ondes à cornet évasé qui change progressivement. Plus l'ouverture du klaxon est grande, plus le signal radar sera focalisé dans la direction souhaitée (figure I. 8) (17).

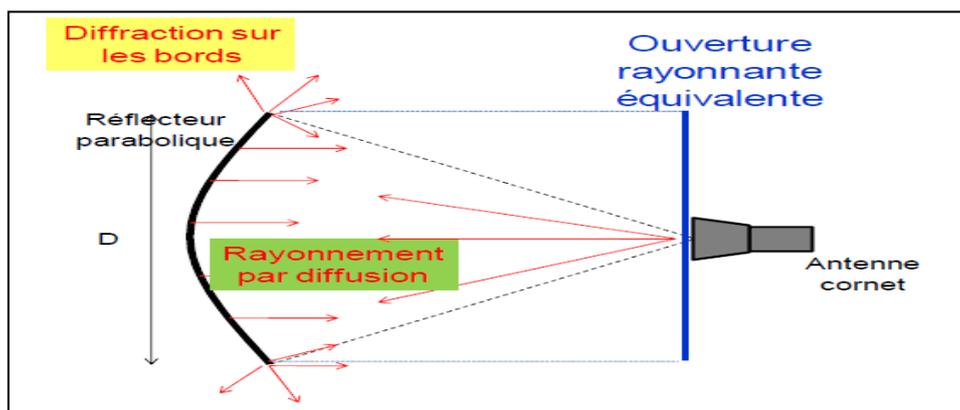


Figure I. 8: Exemple d'une antenne à ouverture rayonnante(18).

Parmi les antennes à ouverture rayonnante les plus connues, on peut citer : les antennes cornets, les antennes paraboliques à réflecteur et les antennes lentilles.

Les cornets sont des guides d'onde de sections progressivement croissantes se terminant par une ouverture rayonnante de profil rectangulaire ou circulaire.

Les antennes cornets se déclinent en plusieurs types, chacun ayant ses propres caractéristiques et utilisations spécifiques, y compris dans le domaine spatial. Voici quelques exemples de types d'antennes cornets adaptés à l'environnement spatial :

1. Cornet à profil rectangulaire : Ce type d'antenne cornet avec une ouverture rayonnante rectangulaire peut être utilisé dans les missions spatiales pour des applications telles que la télémétrie, les communications satellitaires ou l'observation de la Terre. Il offre une directivité élevée et une bonne efficacité.
2. Cornet à profil circulaire : Les antennes cornets à ouverture circulaire sont également utilisées dans le domaine spatial. Elles offrent une symétrie circulaire dans le diagramme de rayonnement, ce qui peut être avantageux pour certaines applications satellites.
3. Cornet pyramidal : Les cornets pyramidaux sont des antennes cornets compactes et légères, ce qui les rend adaptées aux contraintes de poids et d'espace des missions spatiales. Ils peuvent être utilisés pour des applications de télémétrie, de communication ou de surveillance dans l'espace.
4. Cornet sectoriel plan H : Les antennes cornets sectorielles dans le plan H sont également pertinentes dans le domaine spatial. Elles permettent une couverture directionnelle étendue dans un secteur spécifique, ce qui peut être utile pour les satellites de communication ou d'observation qui nécessitent une zone de couverture spécifique.
5. Cornet sectoriel plan E : Les antennes cornets sectorielles dans le plan E sont également utilisées dans le domaine spatial. Elles offrent une couverture directionnelle étendue dans un secteur spécifique dans le plan E, adaptée aux besoins de certaines missions spatiales.

Ces différents types d'antennes cornets sont utilisés dans des applications spatiales pour leurs performances spécifiques, notamment en termes de directivité, de largeur de bande, de gain et de réponse en fréquence. Le choix du type d'antenne cornet dépendra des exigences techniques et des objectifs de la mission spatiale.

Un exemple connu d'antenne cornet de type plan H dans le domaine spatial est l'antenne cornet plan H utilisée sur les satellites de communication.

Ces antennes sont conçues pour fournir une couverture directionnelle précise et une grande efficacité dans la transmission et la réception des signaux de communication.

L'antenne cornet plan H est caractérisée par une ouverture rayonnante de forme rectangulaire dans le plan horizontal (H). Elle est souvent utilisée pour des applications de communication par satellite, où une directivité élevée et une large bande passante sont nécessaires. Ces antennes permettent de focaliser le faisceau dans une direction spécifique, ce qui permet une meilleure utilisation de la puissance du signal et une réduction des interférences indésirables.

Dans le domaine spatial, les antennes cornets plan H sont utilisées sur des satellites de communication géostationnaires ou en orbite basse pour établir des liaisons de communication avec la Terre. Elles offrent une bonne performance dans des conditions de transmission à longue distance et peuvent être utilisées pour des applications telles que les télécommunications, la diffusion de données, les services Internet par satellite et les services de radiodiffusion. Ces antennes cornets plan H sont conçues avec des matériaux légers et durables pour résister aux conditions extrêmes de l'espace, notamment aux températures extrêmes, au vide et aux radiations. Elles sont soigneusement calibrées et alignées pour garantir une performance optimale et une stabilité à long terme. En résumé, les antennes cornets plan H dans le domaine spatial sont des composants essentiels des satellites de communication, permettant une transmission efficace des signaux vers et depuis la Terre. Elles jouent un rôle crucial dans la mise en place des réseaux de communication spatiale et facilitent les communications à longue distance (figure I. 9).

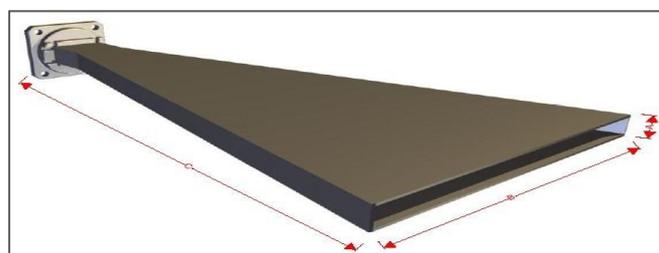


Figure I. 9: Antenne cornet sectoriel plan H (19).

I. 7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté en détail la signification des antennes, leurs différents types et caractéristiques (rayonnement, directivité, etc.). Ce qui nous permet de choisir la bonne antenne pour étudier sur des programmes de simulation, mieux interpréter les principes physiques et tout cela pour les concrétiser sur des applications spatiales.

Chapitre II : La technologie SIW

II.1. Introduction

La technologie des guides d'ondes intégrés au substrat GIS ou SIW (Substrate Integrated Waveguide) représente une solution très prometteuse pour le développement de circuits et de composants fonctionnant dans la bande millimétrique.

En raison de la similitude entre les guides d'ondes et ces derniers, la plupart des composants basés sur des guides d'ondes rectangulaires conventionnels ont été repensés pour fonctionner de manière équivalente en utilisant la technologie SIW. La technologie est compatible avec une grande variété de composants passifs, actifs et même d'antennes. Cette section décrit les progrès de la structure SIW et l'intégration de cette technologie avec des composants. Dans ce chapitre, nous aborderons les bases de la technologie SIW et des guides rectangulaires (1).

II.2. Les technologies des guides d'ondes

Un guide d'ondes est un type de ligne de transmission un peu spécial constitué d'un seul conducteur creux contenant de l'air ou un diélectrique qui permet aux ondes EM d'être confinées à l'intérieur de ce dernier pour la propagation.

Un guide d'onde peut être considéré comme un filtre passe-haut avec sa propre fréquence de coupure (2).

Les conditions aux limites imposées par la théorie des champs électromagnétiques (EM) nécessitent :

- Le champ électrique E se termine généralement par des conducteurs.
- Le champ magnétique H est parfaitement tangent à la surface conductrice (2).

L'application de conditions aux limites sur les parois métalliques du conducteur lorsque l'onde se propage selon l'axe z rend le mode TEM impossible car les champs E (H) ne peut être orthogonaux à la direction de propagation partout dans la section d'analyse, par la perpendiculaire (tangentielle) à n'importe où aux parois, seuls les modes de propagation supérieurs sont possibles. Il existe deux types de modèles d'ordre supérieur :

- Mode Transverse Electrique (TE) seul le champ électrique E est orthogonal à la direction de propagation.

- Mode Transverse Magnétique (TM) seul le champ magnétique H est orthogonal à la direction de propagation.

Les guides d'ondes métalliques se présentent sous de nombreuses formes, mais les plus connues sont les guides d'ondes à sections rectangulaires et circulaires (2).

Dans notre projet, nous nous intéressons aux guides d'ondes de section rectangulaire, puisqu'ils ont approximativement les mêmes propriétés que les guides d'ondes intégrés dans un substrat GIS (SIW substrat integrated wave guides) en mode Transverse Electric TE_{mn} .

II.3. Guide d'onde de section rectangulaire

Un guide d'ondes de section rectangulaire, de largeur a sur l'axe x et de hauteur b sur l'axe y , rempli d'un diélectrique, généralement de l'air est dessiné sur la (figure II.1). Les champs se déplacent à travers le diélectrique, mais ils sont confinés dans l'espace par quatre parois conductrices (2).

Les modes supérieurs sont produits par la combinaison de plusieurs ondes planes réfléchies selon divers motifs sur la paroi. Les réflexions des plaques latérales génèrent à elles seules des modes TE_{m0} , tandis que les modes TE_{0n} ne sont réfléchis que par les plaques inférieure et supérieure. Le mode TE_{mn} peut être obtenu en combinant quatre plaques comme indiqué sur la (figure II.2) (2).

m indique le nombre de demi-longueurs d'onde du champ selon la largeur a .

n désigne le nombre de demi-longueurs d'onde du champ correspondant à la hauteur b .

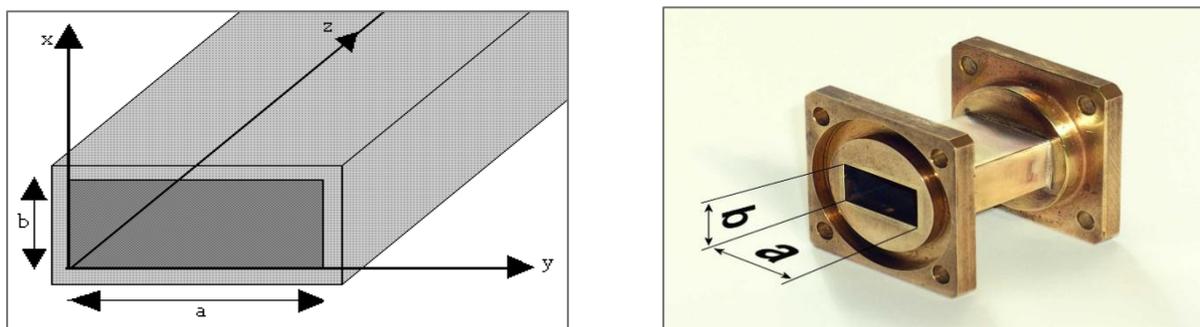


Figure II. 1: guide d'onde rectangulaire (2).

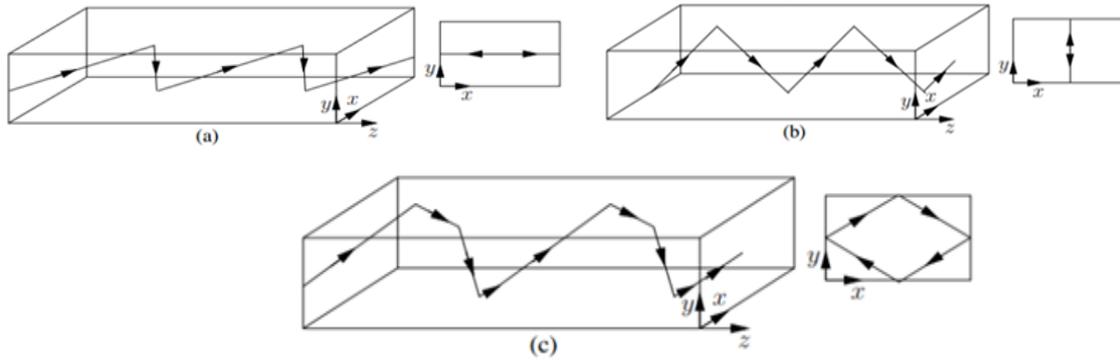


Figure II. 2: Propagation des modes (a) TE_{m0} (b) TE_{0n} (c) TE_{mn} ou TH_{mn} (2).

Le mode TE_{10} est appelé mode fondamental car il possède la fréquence de coupure la plus basse. Par un choix judicieux de la fréquence de fonctionnement, seul le mode fondamental peut exister. Ensuite, nous fonctionnons en monomode. L'avantage du monomode est que la dispersion du signal est plus faible. Il convient de rappeler que la dispersion est principalement causée par des vitesses de propagation différentes selon la fréquence. Cependant, l'énergie des composantes spectrales réparties sur plusieurs modes a le même résultat car chaque mode se déplace à une vitesse différente suivant l'axe z. Les guides d'ondes tout comme les fibres, souffrent de dispersion pour deux raisons :

- Pour chaque mode supérieur $v_{pz} \neq \text{cte}$.
- Pour deux modes supérieurs différents $v_{pz_{m1n1}} \neq v_{pz_{m2n2}}$.

C'est un avantage très important dès qu'on désire communiquer sur de longues distances ou à grande vitesse (2).

II .4. Condition de propagation de l'onde

Pour qu'une onde électromagnétique se propage sans perte à l'intérieur du guide, la relation suivante doit être satisfaite

$$\frac{1}{\lambda_0^2} = \frac{1}{\lambda_c^2} + \frac{1}{\lambda_g^2} \quad \text{Eq (II.1)}$$

- λ_0 : la longueur d'onde qui dépend de la fréquence de la source.
- λ_c la longueur d'onde de coupure.
- λ_g la longueur d'onde guidée.

Les guides d'ondes peuvent être caractérisés par deux longueurs d'onde principales λ_c et λ_g .

Cependant, il est important de savoir comment les distinguer comme suit :

- λ_c Est la longueur d'onde, provenant de la fréquence de coupure de chaque mode et dépendant des dimensions du guide.
- λ_g Est la périodicité du mode de propagation, c'est-à-dire la longueur d'onde du guide (3).

II .5. Fréquence de coupure $f_{c_{mn}}$

La fréquence de coupure est le paramètre le plus important du guide d'ondes car elle détermine si des modes supérieurs sont présents.

Chaque mode a une fréquence de coupure définie par :

$$f_{c_{mn}} = \frac{v_p}{2} \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2} \quad \text{Eq (II.2)}$$

Il existe donc un mode plus optimal (m, n) basé sur une combinaison de facteurs, notamment

- La fréquence de fonctionnement
- La façon dont les ondes sont excitées dans le guide.
- Les dimensions du guide

L'énergie du signal hyperfréquence est répartie entre tous les modes excités, tandis que l'énergie des modes non propagatifs est répartie entre tous les modes présents. Aux discontinuités, des modes supérieur locaux (contenant certaines fractions de l'énergie du signal) apparaissent puis disparaissent. Le champ résultant correspond à la somme de tous les champs de mode existants (2).

II .6. Vitesse de Phase

La vitesse de phase d'un conducteur est la vitesse à laquelle une onde semble se propager le long des parois du conducteur. Cette vitesse est plus rapide que la vitesse de propagation, mais ce n'est qu'une vitesse apparente (2).

$$v_{pz} = \frac{v_p}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_{mnz}}{f}\right)^2}} \quad \text{Eq (II.3)}$$

II .7. Vitesse de Groupe

La vitesse de groupe reflète le fait que les différentes composantes du champ qui forment ensemble le champ de guidage se propagent toutes en se réfléchissant à des angles différents par rapport à l'axe de guidage, ainsi la vitesse de transmission dans un conducteur est la plus lente de l'onde que la vitesse de propagation (2).

$$v_g = v_p \sqrt{1 - \left(\frac{f_{cmn}}{f}\right)^2} \quad \text{Eq (II.4)}$$

II .8. Longueur d'onde guidée

La longueur d'onde guidée λ_g est définie par la constante de phase β_z représente le changement de phase du signal le long de l'axe de propagation dans le guide d'onde (2).

Après simplification, on obtient la formule suivante :

$$\lambda_g = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_{cmn}}{f}\right)^2}} \quad \text{Eq (II.5)}$$

$\lambda = \frac{v_p}{f}$ La longueur d'onde dans le milieu de propagation.

II .9. Les pertes dans les guides d'ondes

Il existe différents types de perte (atténuation) dans les guides d'ondes ; Les principaux sont :

- Perte diélectrique.
- Perte de conducteur.
- Perte de rayonnement.
- Perte d'onde acoustique de surface.

La perte diélectrique et la perte dans le conducteur dépendent du matériau utilisé et de la qualité du conducteur. Les pertes de rayonnement et d'ondes de surface dépendent de la qualité de la structure (4).

II .10. Technologie SIW

Théoriquement, la structure SIW est très similaire à celle du guide d'onde rectangulaire en mode TE_{mn} , mais en mode TM_{mn} ; le SIW est constitué de deux plaques métalliques horizontales séparées par un diélectrique, similaire au guide d'onde rectangulaire, et les deux dernières diffèrent du fait qu'elles sont isolées de chacun d'eux. Dans GOR, en revanche, deux rangées de trous métalliques ou d'air sont remplacées par deux autres plaques verticales pour former un guide (5).

Le mode magnétique transversal nécessite des courants de surface sur les deux plans conducteurs horizontaux du guide d'onde rectangulaire. Cependant, dans ce cas, les espaces créés par les trous métalliques rendent difficile la circulation de tels courants latéraux (5).

Le mode fondamental de SIW est le même que guide d'onde rectangulaire en mode TE_{mn} , c'est-à-dire TE_{10} . La (figure II.3) montre la structure de SIW.

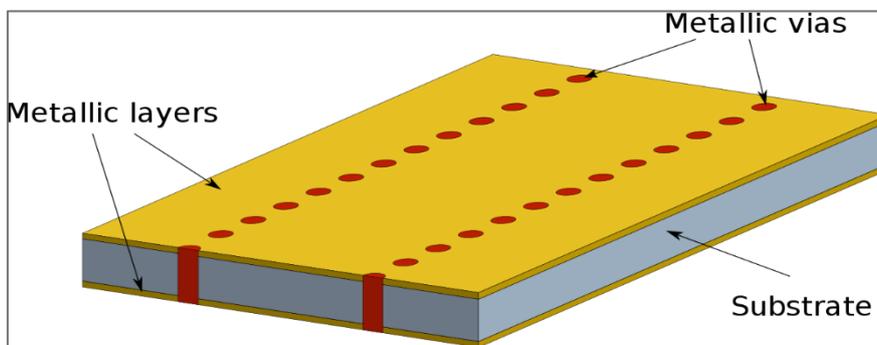


Figure II. 3: Structure d'un guide SIW (6).

II.10.1. Différentes types de structures d'un SIW

Tous les paramètres présents dans guide d'onde rectangulaire en TE_{mn} sont également présents dans SIW en mode TE_{mn} , comme la fréquence de coupure, la vitesse de phase, l'impédance TE et la vitesse de groupe, etc. Tout comme GOR, lorsque la fréquence d'excitation est comprise entre la fréquence du mode TE_{10} et TE_{20} , SIW fonctionne en monomode, ce qui nous permet d'obtenir les meilleures performances du guide d'ondes, car si

la fréquence est inférieure à la fréquence du mode TE_{10} , il ne passera pas, s'il est supérieur à TE_{20} les différents modes du mode se propageront cela provoque une distorsion et une dispersion des ondes.

Pour la bande de fréquence de fonctionnement du SIW est limitée à la bande de fréquence entre $f_{c_{10}}$ et $f_{c_{20}}$. De cette façon, les performances optimales du guide sont garanties.

Diverses topologies ont été proposées pour améliorer la structure de SIW en termes de taille et de bande passante. Une structure SIW pliée a été proposée dans (7) et consiste à ajouter un troisième plan métallique entre les deux plans supérieur et inférieur et qui touche une seule rangée des trous métalliques. Cela permet une réduction significative de la taille tout en augmentant la perte. Dans (8), le concept de SIW demi-mode est introduit, permettant de réduire de moitié la taille du guide d'onde. Chacune de ces structures est illustrée à la (figure II.4).

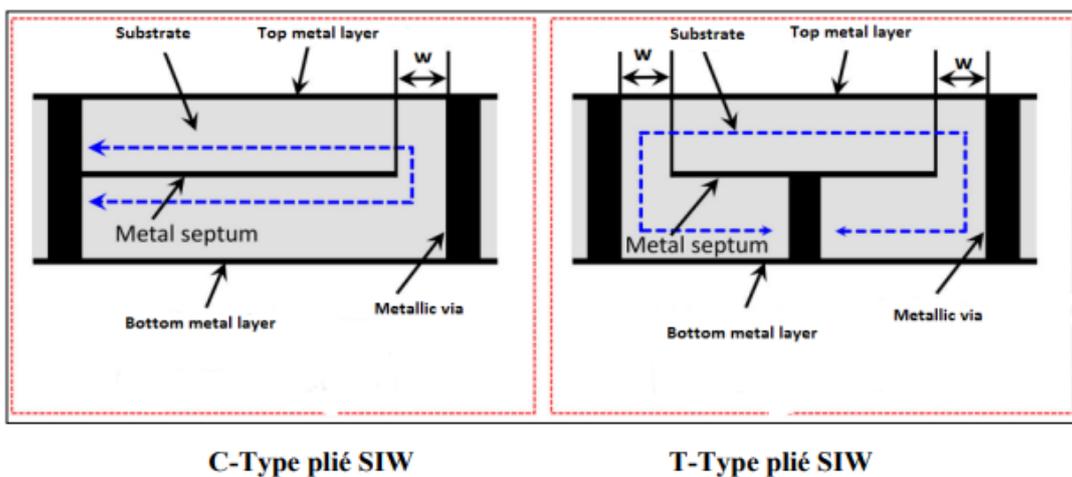


Figure II. 4: Types de structures SIW (4).

II .10.2. Mécanismes des pertes

La réduction des pertes est la clé du succès de la technologie SIW, qui est particulièrement importante pour la bande des ondes millimétriques. Il existe trois mécanismes de perte qui doivent être pris en compte lors de la conception de circuits basés sur des structures SIW, qui sont causés par la perte de conduction, la perte diélectrique et la perte de rayonnement causée par la séparation entre les vias métalliques (9) ; (10) et (11).

Le comportement des pertes dans les conducteurs et les diélectriques dans les structures SIW est similaire à celui des GOR remplis de diélectriques, nous pouvons donc modéliser les SIW en utilisant les équations classiques pour les GOR équivalents (12).

Cela signifie que les pertes de conduction diminueront de manière significative avec l'augmentation de l'épaisseur du substrat. Les pertes dans le diélectrique ne dépendent que du matériau utilisé, pas de la géométrie du guide d'onde. Finalement, les pertes par rayonnement sont acceptables si le rapport s/d (espacement/diamètre des trous) est inférieur à 2,5 (12) (13), mais en pratique une valeur de 2 (12) (14) est recommandée. En fait, lorsque l'espacement s est petit et le diamètre d est grand, l'espacement entre les vias métalliques diminue, se rapprochant ainsi de l'état d'un plan métallique continu, et ainsi la perte de rayonnement est minimisée.

II .10.3. Paramètres de conception de la structure SIW

Pour implémenter un composant sur une structure technologique SIW, certaines règles doivent être prises en compte lors de la conception. Ces règles permettent à la fois la gestion de l'énergie électromagnétique et la minimisation des pertes compte tenu des contraintes de fabrication imposées (4).

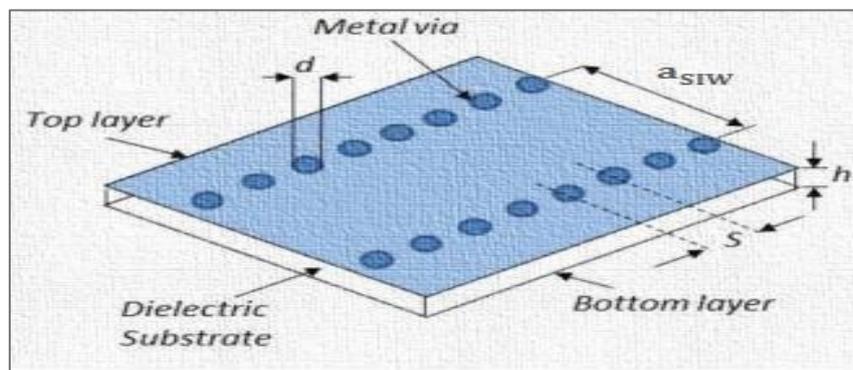


Figure II. 5: paramètres du SIW (4).

La (Figure II.5) montre tous les paramètres requis pour la conception de SIW. Ils sont définis comme suit :

Pour concevoir un guide d'onde, nous devons d'abord définir la fréquence de coupure pour déterminer les dimensions du guide. On définit la fréquence de coupure $f_{c_{10}}$ du mode fondamental TE_{10} du guide d'onde rectangulaire équivalent.

- La largeur GOR équivalente est déterminée comme suit :

$$a = \frac{c}{2 * f_{c10} \sqrt{\epsilon r}} \quad \text{Eq (II.6)}$$

En raison de la similitude entre ces deux guides d'ondes, nous définissons les paramètres du SIW par la largeur a du GOR équivalent.

- Diamètre des trous :

$$d \leq 0.1033 * a \quad \text{Eq (II.7)}$$

- Espace entre deux trous adjacents centre à centre sur un même rangé de trous :

$$s \leq 2 * d \quad \text{Eq(II.8)}$$

- Largeur entre deux trous centre à centre de rangé différent :

$$W = 0.5 * \left(a + \sqrt{(a + 0.54 * d)^2 - 0.4 * d^2} \right) + 0.27 * d \quad \text{Eq (II.9)}$$

- Largeur totale du SIW :

$$W_{SIW} = W + d \quad \text{Eq (II.10)}$$

- Longueur totale du SIW sans Alimentation :

$$L_{SIW} = (\text{Nombre} - 1) * s + d \quad \text{Eq(II.11)}$$

La conception des structures SIW nécessite une attention particulière pour obtenir des performances optimales. Voici quelques considerations importantes:

1. Dimensionnement du guide d'onde : Les dimensions du guide d'onde, telles que la largeur et la hauteur, doivent être déterminées en fonction de la fréquence de fonctionnement et des paramètres du mode souhaité. Des simulations électromagnétiques peuvent être utilisées pour optimiser ces dimensions.
2. Fréquence de coupure : La fréquence de coupure doit être choisie en fonction des exigences du circuit ou du composant. Il est important de s'assurer que la fréquence de

fonctionnement se situe entre les fréquences de coupure du mode TE_{01} et du mode TE_{02} pour un fonctionnement monomode.

3. Matériaux diélectriques : Le choix du matériau diélectrique affecte les performances globales du guide d'onde SIW. Les matériaux à faible perte et à constante diélectrique élevée sont généralement préférés pour réduire les pertes diélectriques.
4. Pertes de conduction : Les pertes de conduction dans les structures SIW dépendent de la conductivité du matériau utilisé pour les parois conductrices. Des matériaux de haute qualité et une bonne conception de la structure peuvent réduire les pertes de conduction.
5. Pertes de rayonnement : Les pertes de rayonnement sont causées par la présence d'ouvertures ou de vias métalliques dans la structure SIW. Il est important de maintenir un rapport approprié entre l'espacement et le diamètre des trous pour minimiser les pertes de rayonnement.

Une fois que la conception est finalisée, la fabrication des structures SIW peut être réalisée à l'aide de techniques de fabrication de circuits imprimés standard. Les étapes typiques de fabrication comprennent le dépôt des couches de substrat et de conducteur, la gravure des motifs nécessaires, le forage des trous, le placage des trous avec du métal et le revêtement final. Des techniques avancées, telles que la lithographie et l'usinage chimique, peuvent également être utilisées pour obtenir une précision et des performances élevées.

II .10.4. Réalisation des antennes à base du SIW

Récemment, certains chercheurs se sont intéressés aux antennes cornets dites H-plane utilisant la technologie SIW (33) (16) Cette antenne, associée à un diélectrique dans le même substrat, augmente le gain et réduit la largeur du lobe principal dans les plans H et E. Cette topologie d'antenne est utilisée pour former des réseaux d'antennes afin d'augmenter encore le gain.

Dans (35), les auteurs proposent de connecter un circuit à fentes empilées à l'ouverture d'une antenne cornet SIW plan H. Ce dernier améliore non seulement la directivité, mais également la bande passante.

Les structures SIW offrent de nombreuses applications potentielles dans le domaine des circuits et des composants millimétriques. Voici quelques exemples d'applications courantes :

1. Diviseurs de puissance et coupleurs : Les structures SIW peuvent être utilisées pour réaliser des diviseurs de puissance et des coupleurs à haut rendement dans la gamme millimétrique. Ces dispositifs permettent de distribuer ou de combiner efficacement la puissance entre plusieurs voies.
2. Réseaux de distribution d'énergie : Les guides d'ondes SIW peuvent être utilisés pour la conception de réseaux de distribution d'énergie à haute fréquence. Ils offrent une faible perte de transmission et une grande efficacité dans la distribution de l'énergie.
3. Composants passifs : Les structures SIW peuvent être utilisées pour la réalisation de divers composants passifs, tels que des résonateurs, des isolateurs et des commutateurs. Ces composants sont utilisés dans une variété d'applications, y compris les systèmes de communication sans fil, la télédétection et les radars.
4. Transitions et adaptateurs d'impédance : Les structures SIW sont également utilisées pour réaliser des transitions et des adaptateurs d'impédance entre différentes technologies de guide d'onde, telles que les guides d'onde coaxiaux et les guides d'onde rectangulaires.

Il convient de noter que les structures SIW sont encore un domaine de recherche active, et de nouvelles applications et avancées continuent d'émerger. Leur flexibilité et leurs performances élevées en font une technologie prometteuse pour les systèmes millimétriques et submillimétriques.

II .10.5. Avantages de la technologie SIW

Les guides d'ondes intégrés au substrat (SIW) offrent des avantages très intéressants tels que (18) :

- Faible coût de fabrication.
- Petite taille et poids léger.
- Aucune perte de rayonnement, faible perte de transmission.
- Facilité de mise en œuvre.
- Excellentes applications à large bande.
- Très bonne dispersion.
- Un facteur de qualité élevé.
- Facile à intégrer avec d'autres systèmes.

II .11. Conclusion

Ce chapitre présente la technologie SIW comme le candidat le plus prometteur pour la réalisation de circuits et de systèmes à ondes millimétriques au cours de la prochaine décennie.

La structure SIW est basée sur un substrat diélectrique avec des couches métalliques supérieures et inférieures percées de trous métallisés, offrant une conception compacte, à faibles pertes et flexible pour intégrer des éléments rayonnants sur un seul substrat et fournir une solution économique. Ce symposium fournira un aperçu de l'état actuel et des tendances futures de la recherche universitaire et industrielle sur la technologie SIW et la conception de composants SIW, explorera de nouvelles interconnexions compactes et à large bande passante et identifiera les options de conception pour minimiser les pertes.

Chapitre III :
Caractéristiques
D'antenne Cornet En
Technologie SIW
(Cornet SIW)

III.1. Introduction

Si l'on veut que l'énergie électromagnétique se propage librement dans l'espace, la solution est de laisser l'extrémité du guide ouvert. Le calcul des dimensions du guide rectangulaire doit être démarré avant le cornet et clarifier comment le champ électrique et magnétique ne se propage pas pendant les fréquences de fonctionnement.

Pendant ce temps, une petite partie peut être alignée sur l'ouverture radiante, tandis que la majeure partie est réfléchi sur l'ouverture de guidage. Il y a donc une rupture d'impédance à l'extrémité ouverte du guide qui provoque la réflexion de presque toute l'énergie incidente. La solution est d'assurer la transition entre le guide et l'espace libre : en augmentant progressivement les dimensions du guide, on se rapproche des conditions de propagation en espace libre, on réalise ainsi une antenne cornet (figure III.1).

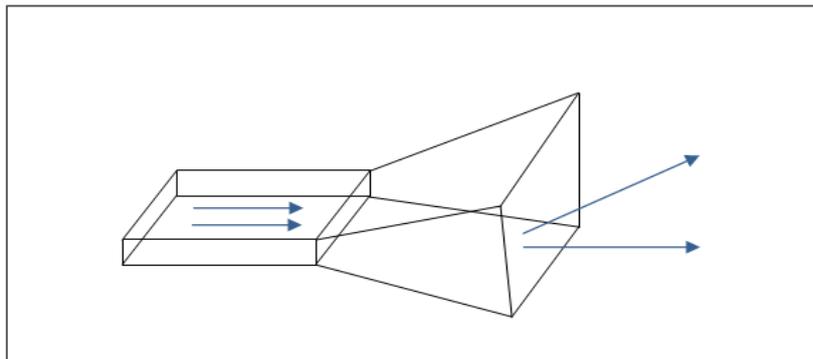


Figure III. 1: Cornet obtenu en augmentant progressivement les dimensions du guide.

III.2. L'antenne cornet

L'antenne cornet est une antenne directionnelle qui peut fonctionner sur une large bande de fréquence pour le radar, ou agir comme une antenne source éclairant un réflecteur équivalent. Entre la fréquence de coupure du mode de fonctionnement et le premier mode supérieur du guide d'onde rectangulaire utilisé pour l'alimenter (figure III.2) (1), l'extrémité de l'antenne cornet ouvert est conformée pour assurer une transition vers l'espace libre. Les guides d'ondes se composent généralement de deux formes : la circulaire ou la rectangulaire la plus couramment utilisée. Les profils radiologiques peuvent être obtenus dans le plan E ou dans le plan H ou les deux (2).

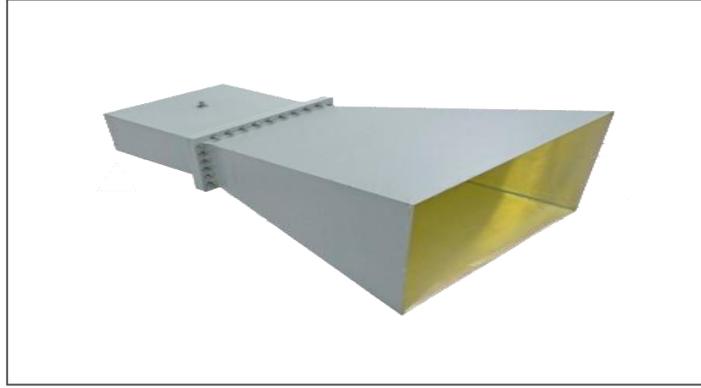


Figure III. 2: Antenne cornet à gain standard (3).

III.3. Les caractéristique d'antenne cornet

III.3.1. La directivité

La directivité d'une antenne se calcule à partir de la relation :

$$D(\theta, \phi) = \frac{\Delta P_s(\theta, \phi)}{P/4\pi R^2} \quad \text{Eq (III.1)}$$

On a la densité surfacique de puissance rayonnée à la distance R dans la direction $D(\theta, \phi)$, P est la puissance rayonnée totale. La densité surfacique de puissance est égale au module du vecteur de Poynting, ce qui permet d'écrire :

$$\Delta P_s(\theta) = |\vec{P}| = \left| \frac{1}{2} \text{Re} (\vec{E}\Delta\vec{H}^*) \right| = \frac{1}{2} \frac{E^2}{\eta} \quad \text{Eq(III.2)}$$

La puissance rayonnée P est égale à l'intégrale du module du vecteur de Poynting sur la sphère rayon (4):

$$P = \iint_s \Delta P_s \cdot ds \quad \text{Eq (III.3)}$$

Et : $ds = R^2 \cdot \sin \theta d\theta d\phi$

On obtient :

$$D(\theta, \phi) = \frac{E^2(\theta, \phi)}{\int_0^{2\pi/2} \int_0^2 E^2(\theta, \phi) \sin \theta d\theta d\phi} 4\pi \quad \text{Eq(III.4)}$$

III.3.2. Le gain

Le gain d'une antenne à cornet conique est de 25 dB et la plage de portée est généralement de 10 à 20 dB. Le gain d'antenne peut être calculé avec l'expression (5):

$$D(\theta, \varphi) = 10 \log \frac{10A}{\lambda^2} \quad \text{Eq(III.5)}$$

Avec A : Surface de l'ouverture [m²].

λ : longueur d'onde [m].

III.3.3. Largeur de faisceau d'antenne cornet

La bande passante de l'antenne cornet est comprise entre 10:1 et 20: 1. L'ouverture du faisceau de l'antenne cornet diminue si la fréquence de travail augmente (figure III.3).

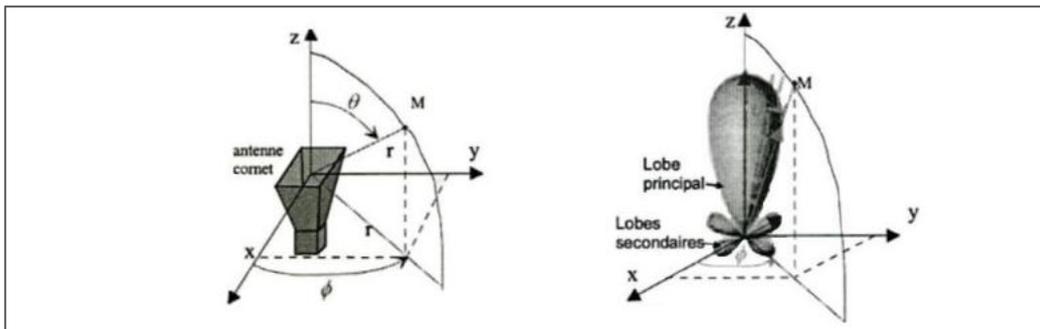


Figure III. 3: Antenne dans son repère et rayonnement d'une antenne directionnelle(1).

III.4. Les types et leurs caractéristiques

Il existe trois types d'antennes cornet rectangulaires suivant : cornet plan H, cornet plan E et cornet pyramidal plan H et plan E (figure III. 4).

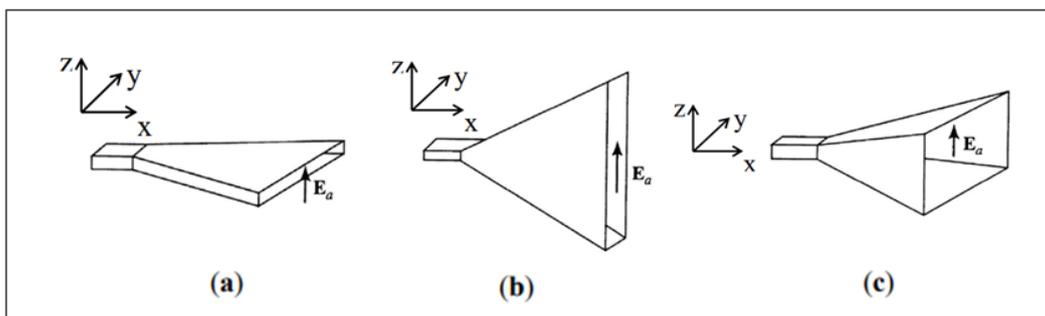


Figure III. 4: les types rectangulaires d'antennes cornet : (a) Cornet plan H, (b) cornet plan E, (c) cornet pyramidal.

III.4.1. Le cornet sectoriel plan H

III.4.1.1. Calcul du champ électromagnétique dans l'ouverture (plan H)

Pour ce type, sur lequel repose de notre thèse, cela signifie que seules deux parois du répertoire hiérarchique situé dans le plan H s'enflammeront. Les deux autres dans le plan E sont parallèles (figure III. 5) (2).

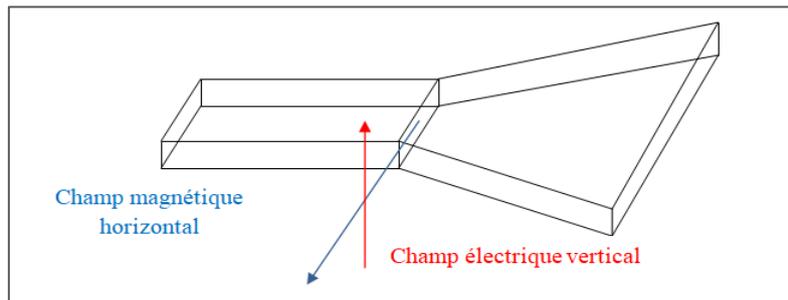


Figure III. 5: Cornet sectoriel plan H.

En allumant les dimensions du guide d'ondes rectangulaire dans la direction de H, la figure Géométrique la plus détaillée est illustrée (figure III.6).

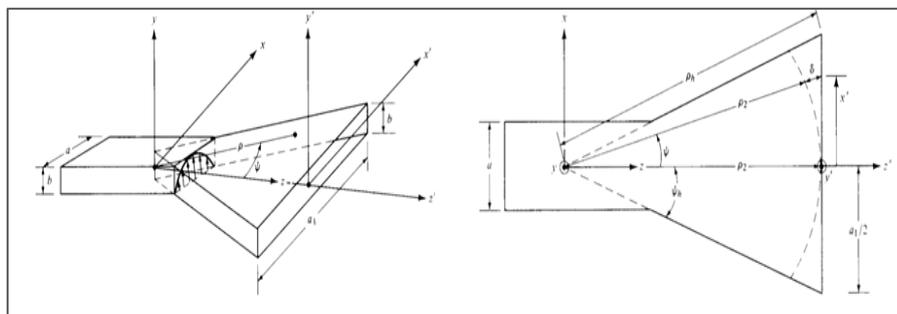


Figure III. 6: Cornet sectoriel plan en H et système de coordonnées (6).

$$\rho_2 = \rho_h \cos \psi_h \quad \text{Eq(III.6)}$$

Dans certaines conditions, la constante B trouvée dans les expressions du champ électrique est interprétée comme le coefficient de réflexion de l'onde à l'ouverture du Cornet, la transition entre le guide pyramidal et l'espace libre.

Ensuite, nous obtenons l'expression couramment utilisée actuellement pour le champ électromagnétique dans l'ouverture de la corne en coordonnées rectangulaires. Les dimensions du cornet doivent être grandes devant la longueur d'onde (2).

$$\mathbf{E}_x(\mathbf{y}) = E \cos\left(\pi \frac{y}{a}\right) \exp\left(-j \frac{ky^2}{2\rho_H}\right) \quad \text{Eq(III.7)}$$

$$\mathbf{H}_y(\mathbf{y}) = \frac{E}{\eta} \cos\left(\pi \frac{y}{a}\right) \exp\left(-j \frac{ky^2}{2\rho_H}\right) \quad \text{Eq(III.8)}$$

Dans l'ouverture du cornet, le champ contient la distribution d'amplitude du mode fondamental traversant le guide d'onde rectangulaire. Il a la structure vectorielle d'une onde plane, c'est-à-dire qu'il respecte la traînée des ondes du vide, mais introduit une déviation de phase quadratique par rapport au centre de l'ouverture (1).

III.4.1.2. La directivité

La directivité du cornet sectoriel du plan H est calculée par l'expression de directivité générale pour les ouvertures (6):

$$D_0 = \frac{4\pi}{\lambda^2} \cdot \frac{\left| \iint_{S_A} \mathbf{E}_a d\mathbf{s}' \right|^2}{\iint_{-} |\mathbf{E}_a|^2 d\mathbf{s}'} \quad \text{Eq(III.9)}$$

Et après calcul de l'intégrale, le résultat de la directivité du cornet plan H devient :

$$D_H = \frac{b}{\lambda} \frac{32}{\pi} \left(\frac{A}{\lambda}\right) \varepsilon_{ph}^H = \frac{4\pi}{\lambda^2} \varepsilon_t \varepsilon_{ph}^H (Ab) \quad \text{Eq (III.10)}$$

La relation optimale entre la hauteur évasée A et la longueur du sommet de la corne ρ_h qui produit la directivité maximale possible est

$$A = \sqrt{3\lambda\rho_h} \quad \text{Eq (III.11)}$$

III.4.2. Le cornet sectoriel plan E

III.4.2.1. Calcul du champ électromagnétique dans l'ouverture (plan E)

Pour ce type de corne, c'est l'inverse de ce que dans le plan h deux parois du guide pyramidal du plan E vont enflammer. Et les deux qui sont dans le plan h, sont toujours parallèles (figure III. 7).

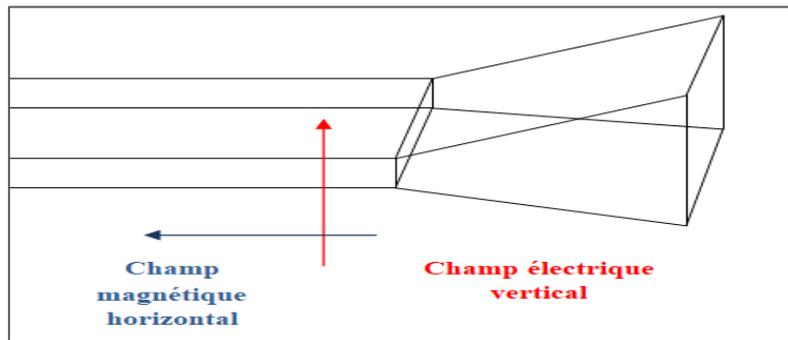


Figure III. 7: Cornet sectoriel plan E.

Le cornet est traité comme un guide d'onde radial pour trouver les champs situés dans une ouverture. La surface fermée est un plan infini qui coïncide avec l'ouverture de la corne de cette espèce et des techniques de développement parabolique sont utilisées. Puisque la corne est fixée sur un plan de masse infini, les champs à l'extérieur du trou sont inconnus et un équivalent exact ne peut pas être formé. Et il est prouvé que si les champs du guide d'ondes de l'alimentation sont en mode T₁₀, les champs en mode d'ordre inférieur à l'ouverture du cornet sont donnés par (figure III.8)(6).

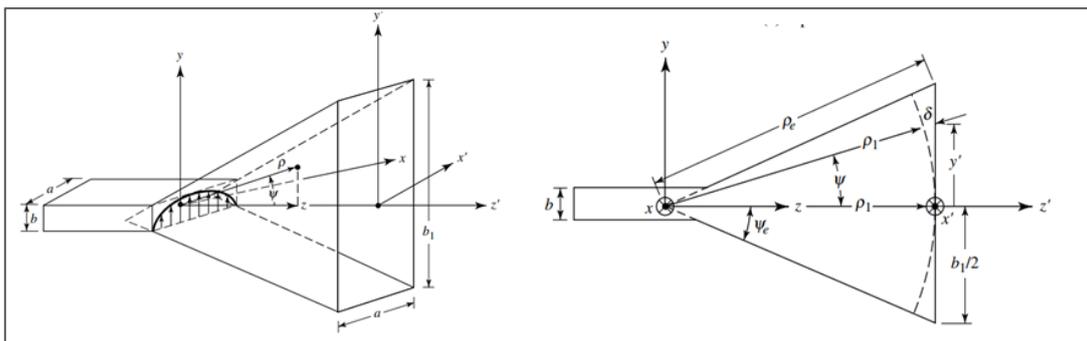


Figure III. 8: Cornet sectoriel plan en E et système de coordonnées (6) .

$$\rho_1 = \rho_e \cos \psi_e$$

Eq (III.12)

Un nombre premier est utilisé pour indiquer le champ à l'ouverture du cornet. Ces expressions sont similaires au champ de mode TE₁₀ pour un guide d'onde rectangulaire avec des tailles d'ouverture a et b_1 ($b_1 > a$). La seule différence est le terme exponentiel complexe, qui est utilisé ici pour désigner le changement de phase quadratique du champ à travers l'ouverture du cornet.

$$\mathbf{E}_x(\mathbf{y}) = \mathbf{E} \cos\left(\pi \frac{y}{a}\right) \exp\left(-j \frac{\mathbf{k}x^2}{2\rho_E}\right) \quad \text{Eq (III.13)}$$

$$\mathbf{H}_y(\mathbf{y}) = \frac{\mathbf{E}}{\eta} \cos\left(\pi \frac{y}{a}\right) \exp\left(-j \frac{\mathbf{k}x^2}{2\rho_E}\right) \quad \text{Eq (III.14)}$$

Il y a une distribution d'une onde plane avec une déviation de phase au carré avec le centre de l'ouverture ayant une dépendance X . Et la distance de l'ouverture au sommet de la pyramide ρ_E peut changer.

III.4.2.2. La directivité

De la même manière que nous avons calculé la directivité de la Cornet sectorielle de plan H, nous avons trouvé la directivité de la Cornet sectorielle de plan E.

$$D_E = \frac{a}{\lambda} \frac{32}{\pi} \frac{B}{\lambda} \varepsilon_{ph}^E = \frac{4\pi}{\lambda^2} \varepsilon_t \varepsilon_{ph}^E a B \quad \text{Eq (III.15)}$$

La relation optimale entre la hauteur évasée B et la longueur du sommet de la corne ρ_E qui produit la directivité maximale possible est

$$B = \sqrt{2\lambda\rho_E} \quad \text{Eq (III.16)}$$

III.4.3. Le cornet pyramidal

Le cornet pyramidal est une antenne très populaire dans les gammes de fréquences hyperfréquences (de ≈ 1 GHz à 30 GHz). Le guide d'onde d'alimentation est évasé dans les deux sens, le plan E et le plan H. Tous les résultats sont des combinaisons des analyses du cornet sectoriel du plan E et du cornet sectoriel du plan H. La distribution du champ à l'ouverture est approximée comme suit (figure III. 9) (7) :

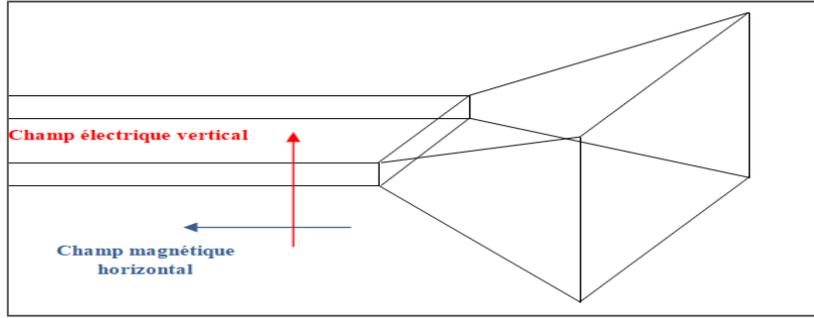


Figure III. 9: Antenne cornet pyramidal.

Il est nécessaire de prendre la différence de phase quadratique dans ces deux plans E et H pour obtenir l'expression du champ électromagnétique dans l'ouverture (2):

$$E_x(x, y) = E \cos\left(\pi \frac{y}{a}\right) \exp\left(-j \frac{k}{2} \left\{ \frac{x^2}{\rho_E} + \frac{y^2}{\rho_H} \right\}\right) \quad \text{Eq (III.17)}$$

$$H_y(x, y) = \frac{E}{\eta} \cos\left(\pi \frac{y}{a}\right) \exp\left(-j \frac{k}{2} \left\{ \frac{x^2}{\rho_E} + \frac{y^2}{\rho_H} \right\}\right) \quad \text{Eq (III.18)}$$

III.4.3.1. Diagrammes de rayonnement dans le plan E

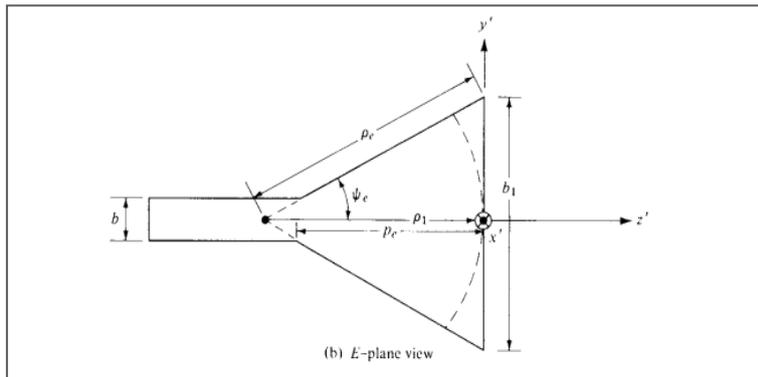


Figure III. 10: Cornet pyramidale en plan E et système de coordonnées (6).

$$p_e = (b_1 - b) \left[\left(\frac{\rho_e}{b_1} \right)^2 - \frac{1}{4} \right] \int_{-b/2}^{b/2} \quad \text{Eq (III.19)}$$

Dans $\phi = 0$, nous avons à évaluer le diagramme de rayonnement non normalisé :

$$E_E(\theta) = (1 + \cos \theta) \int_{-b/2}^{b/2} e^{jk \left(\sin \theta x - \frac{x^2}{2\rho_E} \right)} dx \quad \text{Eq (III.20)}$$

Dans le plan E, il y a une distribution de champ uniforme de l'ouverture et à partir de là, le diagramme devient directionnel à mesure que la taille de l'ouverture augmente.

III.4.3.2. Diagrammes de rayonnement dans le plan H

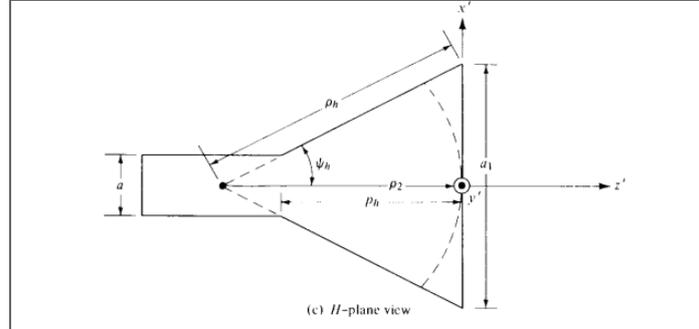


Figure III. 11: Cornet pyramidale en plan E et système de coordonnées (6).

$$p_h = (a_1 - a) \left[\left(\frac{\rho_h}{a_1} \right)^2 - \frac{1}{4} \right]^{1/2} \quad \text{Eq (III.21)}$$

$\phi = \pi/2$, nous avons à évaluer le diagramme de rayonnement non normalisé :

$$E_H(\theta) = (1 + \cos \theta) \int_{-a/2}^{a/2} \cos \left(\pi \frac{y}{a} \right) jk \left(\sin \theta \cdot y - \frac{y^2}{2\rho_H} \right) dy \quad \text{Eq(III.22)}$$

Au plan H, une répartition uniforme des champs dans l'ouverture. L'expansion du champ cosinus se réalise au fur et à mesure que l'on s'éloigne du centre de l'ouverture vers l'abaissement des lobes secondaires, et inversement la déviation de la phase quadratique provoque la disparition du minimum et la montée des lobes secondaires (6).

III.4.3.3. La directivité

Puisque la corne pyramidale est constituée des deux types de cornes sectorielles de niveau E et H, nous pouvons facilement extraire la directivité de la corne pyramidale en introduisant les facteurs d'efficacité de phase des deux plans et le facteur d'efficacité de conicité de niveau H.

$$D_p = \frac{4\pi}{\lambda^2} \epsilon_t \epsilon_{ph}^E \epsilon_{ph}^H AB \quad \text{Eq (III.23)}$$

Ou par une équation simplifiée et résumée :

$$D_p = \frac{\pi \lambda^2}{32ab} D_E D_H \quad \text{Eq (III.24)}$$

Où D_E et D_H sont les directivités des cornes sectorielles planes E - H données par (III.23) et (III.24), respectivement. Il s'agit d'une relation bien connue qui a été largement utilisée dans la conception des cornes pyramidales.

D est la directivité de l'antenne, A et B sont les dimensions de l'ouverture, et D_E et D_H sont la directivité dans les plans E et H. Identifiez la directivité directement à partir des paramètres géométriques et de la fréquence de fonctionnement. Deux valeurs optimales permettant une directivité maximale peuvent être déterminées (8).

$$A_{opt} = \sqrt{3\lambda\rho_h} \quad \text{Eq (III.25)}$$

$$B_{opt} = \sqrt{3\lambda\rho_E} \quad \text{Eq (III.26)}$$

III.6. Géométrie d'antenne cornet

La géométrie de l'antenne cornet plan H est décrite sur la figure III.12. Il y a 2 parties : le guide d'ondes rectangulaire et le cornet (figure III. 12).

Guide : La largeur du guide A et la hauteur du guide B sont définies pour un fonctionnement monomode. C'est fait dans lequel la longueur du guide est ajustée, cela n'affecte pas le réglage ou le diagramme de rayonnement de l'antenne.

Les dimensions du Cornet : la largeur de l'ouverture W et la longueur D, sont des paramètres pour améliorer la plage de réglage de l'antenne (4) (9).

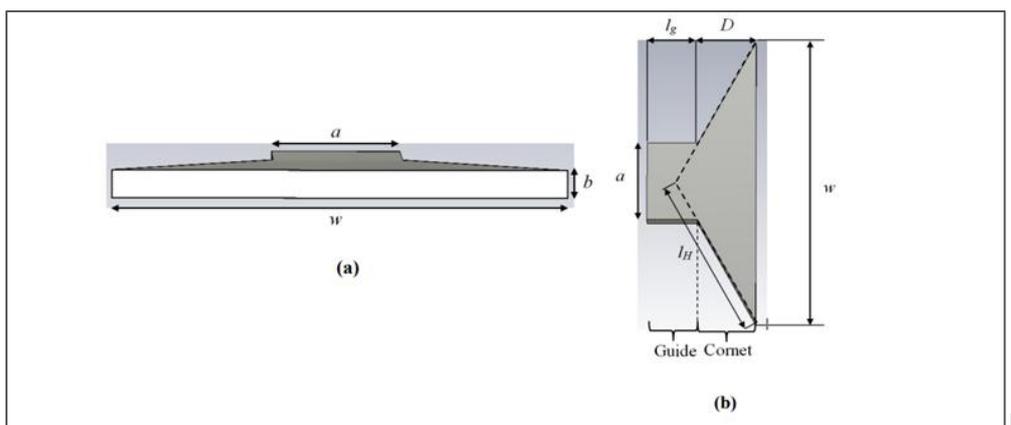


Figure III. 12: Géométrie d'une antenne cornet plan H(3).

III.7. L'antenne SIW cornet

Nous avons mentionné précédemment que les cornes de toutes sortes ont une large bande passante, un gain élevé. Il passe progressivement du mode guide d'ondes au mode espace libre des ondes magnétoélectriques. Et le rayonnement des buses est déterminé soit par un guide d'ondes, un réflecteur, un cornet (10).

Les antennes cornets sont couramment utilisées dans les communications hyperfréquences, les antennes réfléchissantes d'alimentation, les radars et les composants aérospatiaux. Pour faciliter son travail, certains scientifiques ont suggéré de le combiner avec la technologie SIW. L'objectif de la technologie SIW est d'optimiser l'utilisation d'antennes cornets planaires à intégrer dans les micro-ondes. L'un des avantages de combiner SIW et cornes est la réduction du poids de coupe. Une des conditions du succès de l'opération est que les cornes doivent être des cornes segmentaires plates. L'une des limitations de l'utilisation du substrat est le faible rendement avec une fréquence accrue et un faible gain.

L'antenne cornet est combinée par son type avec une charge isolante de forme rectangulaire, râpée dans le même substrat, ce qui permet de visualiser un faisceau étroit à la fois dans le plan E et le plan H (figure III. 13) (11).

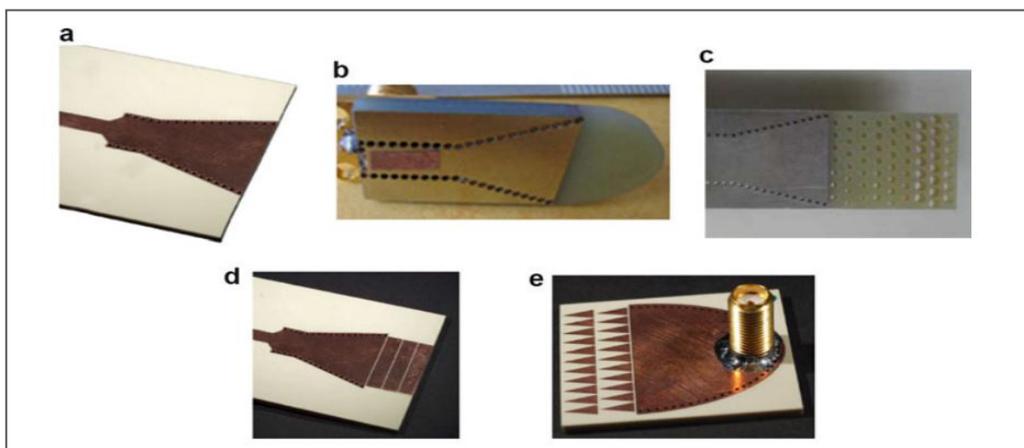


Figure III. 13: Exemple d'antennes cornet fabriquées (11).

III.7.1. Cornet SIW en plane E

Il est considéré comme un guide d'ondes transitoire conçu de telle manière qu'il peut passer par la conception d'un transformateur d'impédance quart d'onde avec plusieurs guides d'ondes étagés. Cette transformation peut être utilisée pour concevoir la surface entraînée d'une antenne cornet alimentée en ligne SIW. Le trou du guide d'onde est allumé et se déplace dans le grand trou pour former un cornet à jet plan E (figure III. 14).

Pour les obstacles mobiles, c'est l'échelle et la foulée qu'il faut améliorer. L'impédance de chaque section d'un transformateur quart d'onde est déterminée par (7) (11):

$$Z_i = \frac{\pi^2 h_i \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}}{8a \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_0}{2a}\right)^2}} \quad \text{Eq (III.27)}$$

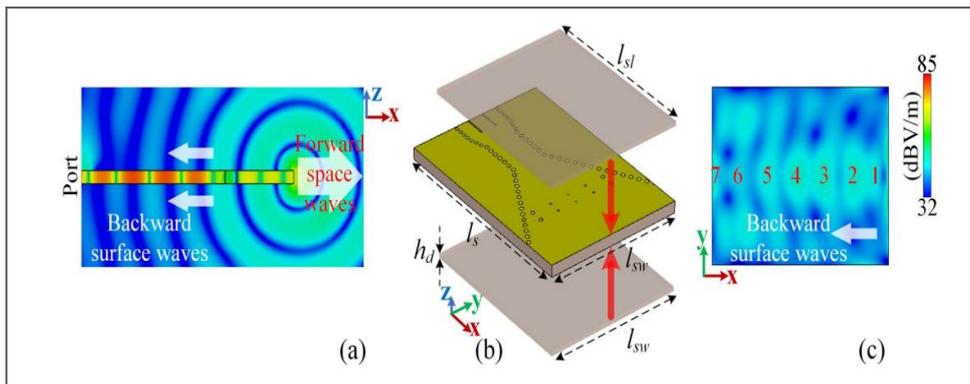


Figure III.14: Géométrie du cornet SIW du plan E avec simulation à 30 GHz (12).

III.7.2. Cornet SIW en plan H

L'antenne cornet intégrée dans le substrat est un trou de guide d'ondes en forme de cornet dans un grand trou qui maintient la dimension verticale constante sur le plan H. Le rayonnement est concentré dans le plan H et la structure géométrique est comme indiqué sur la figure III. 15, (Nous l'étudierons en détail car c'est l'objet du mémoire) :

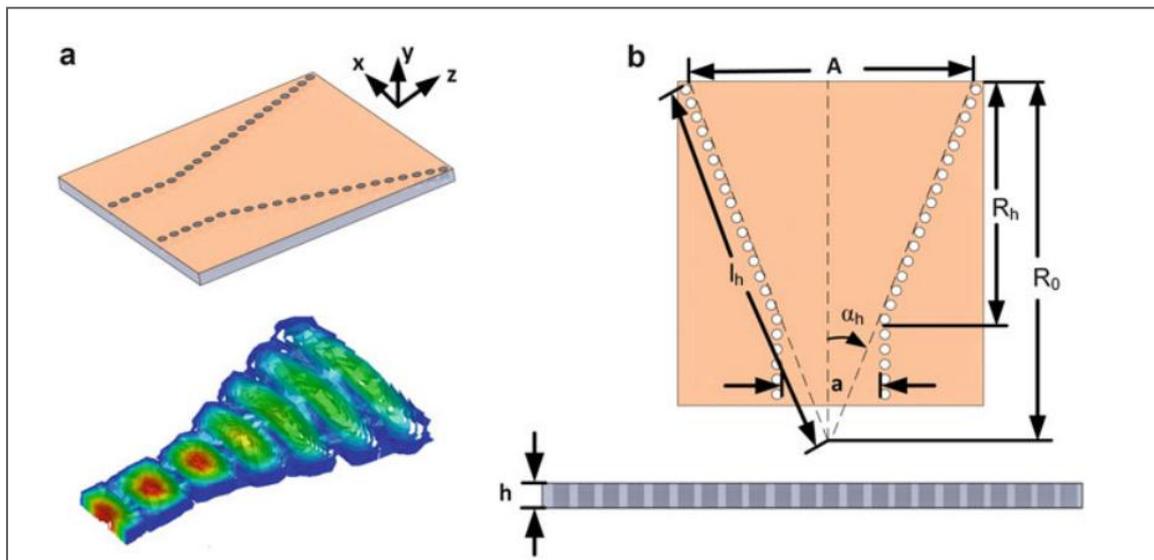


Figure III. 15: Géométrie du cornet SIW du plan H (11).

III.7.2.1. Dimensionnement du ce cornet

Le cornet plan H est créé en brûlant un guide d'ondes rectangulaire. Il s'agit d'une puce virtuelle à paramètres calculés, le gain de ce cornet est meilleure n'ajoutant une rainure rectiligne à structure tridimensionnelle à une couche de substrat partiellement vide empilée entre deux plaques métalliques du capot. La structure ne dépend pas des propriétés du substrat, et cette nouvelle approche améliore les performances des cornets de guides d'ondes intégrés au substrat (figure III. 16) (12).

Les dimensions du cornet (D , w) sur la Figure III.12 sont spécifiées en effectuant, dans le domaine temporel, une étude paramétrique sous CST. Les différentes dimensions respecte la relation suivante (9) :

$$D = (w - a) \sqrt{\left(\frac{l_H}{w}\right)^2 - \frac{1}{4}} \quad \text{Eq (III.28)}$$

$$l_h^2 = R_0 + \left(\frac{A}{2}\right)^2 \quad \text{Eq (III.29)}$$

$$\alpha_h = \arctan\left(\frac{A}{2R_0}\right) \quad \text{Eq (III.30)}$$

$$R_h = (A - a_{eq}) \sqrt{\left(\frac{l_h}{A}\right)^2 - \frac{1}{4}} \quad \text{Eq (III.31)}$$

Où l_H est la longueur de l'évasement du cornet, a la largeur du guide d'onde à l'entrée. Ces paramètres sont définis en visant une bande d'adaptation ($|S_{11}| < -10\text{dB}$).

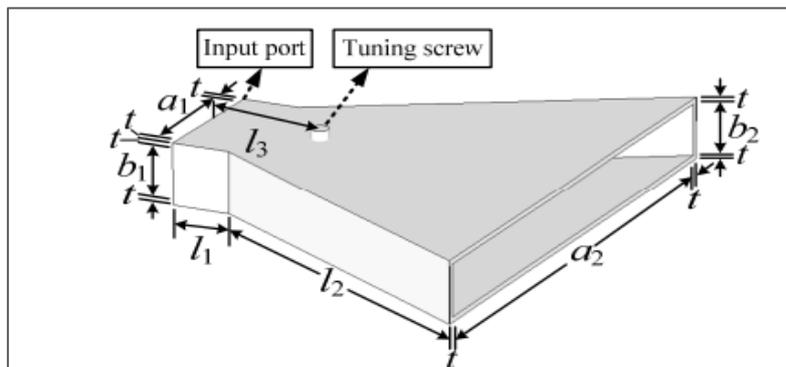


Figure III. 16: la structure de la corne plane H(13).

III.7.2.2. Dimensionnement du guide SIW

Les dimensions du guide d'onde la largeur a et la hauteur b alimentant le cornet sur la Figure III.16 sont définies pour la propagation d'un mode TE_{mn} . La fréquence de coupure f_c de mode (m, n) est donnée par l'équation (14) :

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{\mu_0\epsilon_0\epsilon_r}} \sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2} \quad \text{Eq (III.32)}$$

μ_0, ϵ_0 : respectivement la perméabilité et la permittivité d'un vide. ϵ_r : La permittivité du diélectrique remplissant le guide d'ondes.

Pour le fonctionnement monomode du TE₁₀, la fréquence de fonctionnement doit être comprise entre la fréquence de coupure de ce mode et la fréquence de coupure du mode TE₂₀.

Les règles correctes pour la conception de l'antenne cornet SIW doivent suivre les mêmes principes que pour les antennes cornet en espace libre (15). Pour assurer un gain élevé et une directivité claire de l'un des cornets du plan H, la largeur du guide d'ondes d'alimentation doit être :

$$\frac{\lambda_0}{2\sqrt{\epsilon_r}} < a < \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad \text{Eq (III.33)}$$

λ_0 : La longueur d'onde dans le vide.

La hauteur du guide b est inférieure à sa largeur a . Une valeur arbitraire est prise pour l'adaptation :

$$b < a, b > \frac{\lambda_0}{10} \quad \text{Eq (III.34)}$$

Et aussi les valeurs importantes pour la formation des trous SIW (Vias) de " d " et " P " [4] , $P > d$ la période doit être supérieure au diamètre du cylindre pour que le cercle soit réalisable (Figure III. 17).

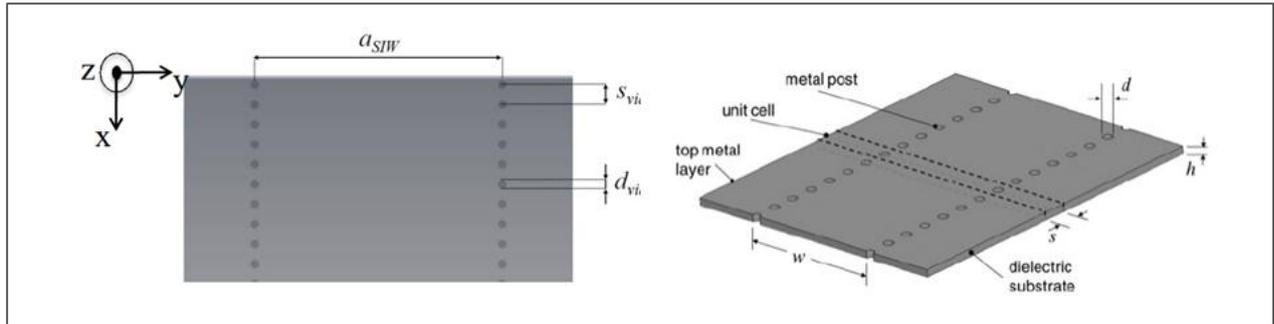


Figure III.17: Description des dimensions du guide SIW (10).

III.8. Conclusion

Au cours des années précédentes, de nombreux chercheurs ont prêté attention à l'antenne cornet du plan h en utilisant la technologie de l'Internationale socialiste (16). Cette antenne a été combinée avec un isolant dans le même substrat ce qui a permis d'augmenter le gain et de diminuer la largeur du lobe principal dans les plans H et E. Cette topologie d'antenne a été utilisée pour former un réseau d'antennes afin d'augmenter le courant alternatif libre trafic (17), les auteurs ont proposé des circuits de connexion avec des fentes empilées dans l'ouverture de l'antenne cornet plan SIW H. Ceux-ci permettent d'améliorer non seulement la directivité, mais aussi l'adaptation d'impédance (bande passante).

Chapitre IV : Résultat de simulation d'antenne cornet SIW

IV.1. Introduction

Ce chapitre présente les résultats de simulation et l'analyse de l'antenne cornet plan H et de l'antenne cornet basée sur la technologie SIW (Substrate Integrated Waveguide) dans la bande de fréquence X (8-12 GHz). La conception a été réalisée à l'aide du simulateur CST Microwave Studio. La première partie de ce chapitre se concentre sur une étude détaillée des paramètres de l'antenne conventionnel cornet plan H. La deuxième partie porte sur la conception d'un guide d'onde SIW simple et les résultats de simulation obtenus. Enfin, la dernière partie présente la conception de l'antenne cornet basée sur la technologie SIW, suivie de la simulation et de la présentation des résultats.

IV.2. Présentation de l'outil de simulation CST Studio Suite

CST MICROWAVE STUDIO est un outil spécial pour la simulation EM 3D à haute fréquence. CST promeut une technologie complète pour l'électromagnétique 3 Dimensions, et analysez rapidement et avec précision les dispositifs HF (Haute Fréquence) tels que les antennes, les filtres, les coupleurs, les structures planaires et multicouches, ainsi que leurs effets IS et CEM. CST MWS vous donne un aperçu rapide du comportement des EM dans les conceptions à haute fréquence, et fournit des modules de solveur supplémentaires pour des applications spécifiques. Intégrez-vous à une variété de flux de travail standard de l'industrie via l'interface utilisateur CST (Figure IV.1).

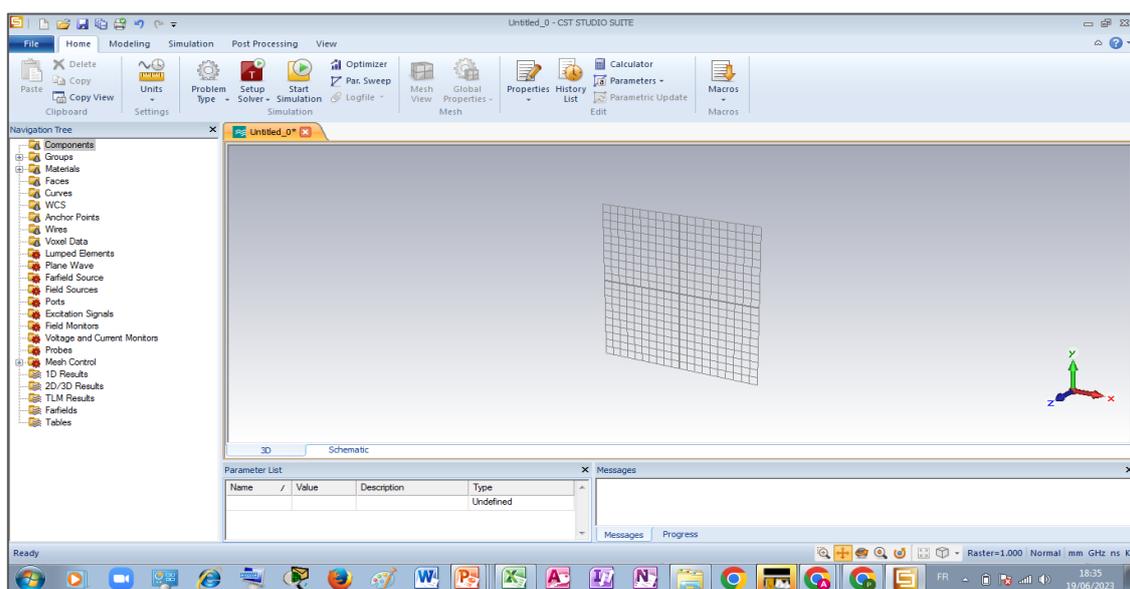


Figure IV. 1: CST MICROWAVE STUDIO.

CST est l'aboutissement d'années de recherche et de développement pour fournir les solutions informatiques les plus efficaces et les plus précises pour la conception électromagnétique 3D. CST MWS se concentre sur la fourniture de simulations électromagnétiques 3D rapides et précises de problèmes à haute fréquence. Ce produit fournit les utilisateurs peuvent raccourcir les cycles de développement grâce au prototypage virtuel au lieu de l'expérimentation avant les tests physiques et l'optimisation.

IV.3. Conception d'antennes cornets opérant en bande X

Les antennes cornets ont été largement utilisées aux fréquences micro-ondes comme alimentateur pour la radio, le suivi par satellite, les communications et comme réflecteur d'oscilloscope. Il a une structure simple avec un gain important. Une antenne cornet est une antenne qui a différentes formes selon l'étude (cylindre, cône, pyramide ...) .Les antennes pyramidales et à corne sectoriel sont conçues et simulées car les deux incluent un plan en H. Il s'agit de concevoir ces deux antennes avec une fréquence de coupure = 8 GHz, et la simulation est réalisée dans logiciel du CST.

IV.3.1. Antenne cornet conventionnel sectoriel plan H

La figure ci-dessous (figure IV.2) montre la conception de notre premier design d'antenne cornet sectoriel plan H réalisée dans la bande X [8-12] GHz.

On commence de dessiner un guide rectangulaire WR-90 ($a=22.86\text{ mm}$, $b=10.16\text{ mm}$, $Lg=10\text{ mm}$), puis une corne ($A=101.76\text{ mm}$, $B=10.16\text{ mm}$, $Lh=64\text{ mm}$) et leurs épaisseur $t=2\text{ mm}$, le matériel utilisé Copper annealed.

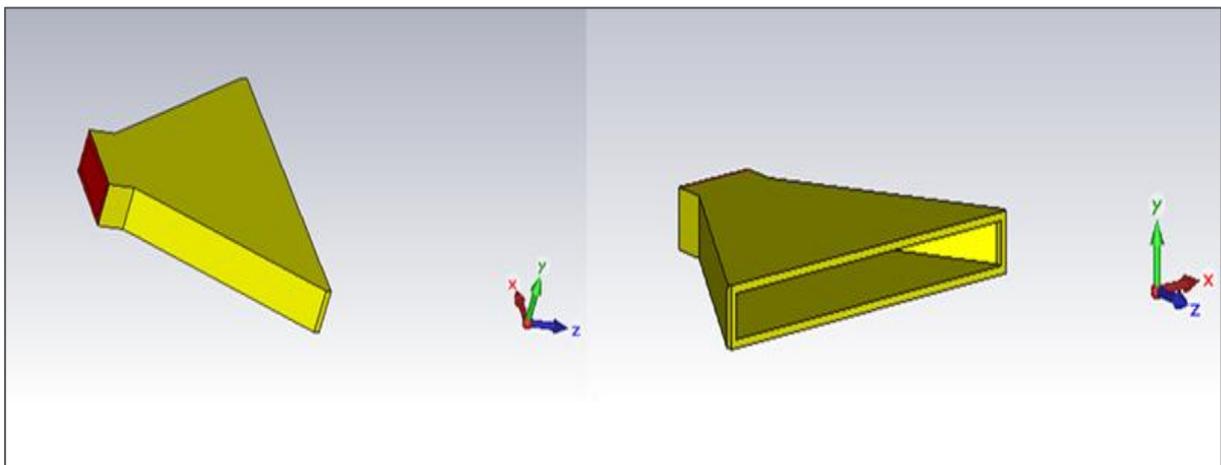


Figure IV. 2: Antenne cornet sectoriel plan H.

Après la simulation de conception, Le coefficient de réflexion est obtenu après simulation sous studio micro-ondes CST, et le résultat est présenté dans la figure ci-dessous (figure IV. 3).

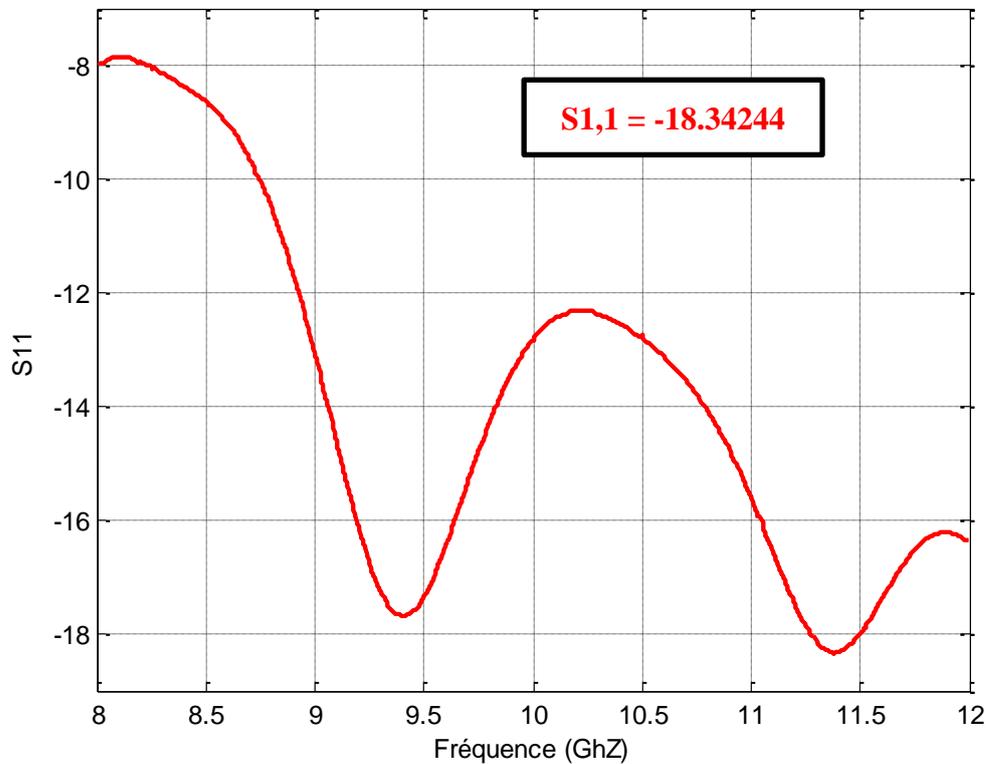


Figure IV. 3: Coefficient de réflexion S11.

Résultats de simulation concernant la variation du coefficient de réflexion S11 dans bande [8,12], comme le montre la Figure IV.3, avec des valeurs optimisées de divers paramètres à la fréquence 8 GHz, S11 atteint une valeur de -8 dB, pour 9.4 GHz, s11 est égal à -17.89 dB, pour la fréquence 10 GHz, s11 est égal à -13.1 dB, pour la fréquence 11,38 GHz, le pic est égal à -18.24 dB, et enfin, pour le fréquences 12 GHz, le coefficient s11 atteint -16.2 dB. Nous obtenons un diagramme de rayonnement de en trois dimensions (3D) d'antenne cornet sectoriel en plan H à $f= 10$ GHz (figure IV. 4).

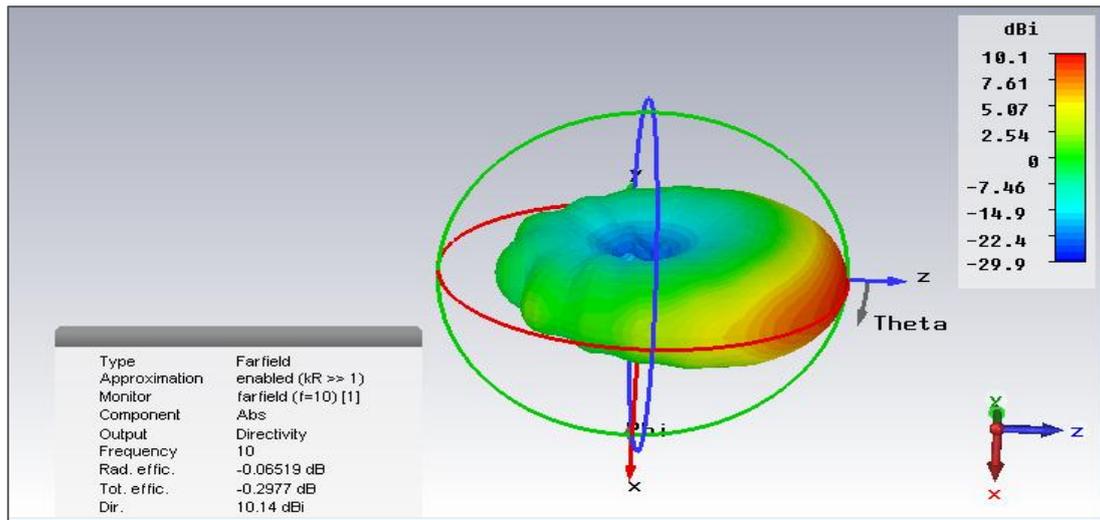


Figure IV. 4: Diagramme de rayonnement d'antenne cornet sectoriel plan H en 3D.

Cela nous montre une large bande de X qui démontre une meilleure adaptabilité et assure un transfert de puissance maximal.

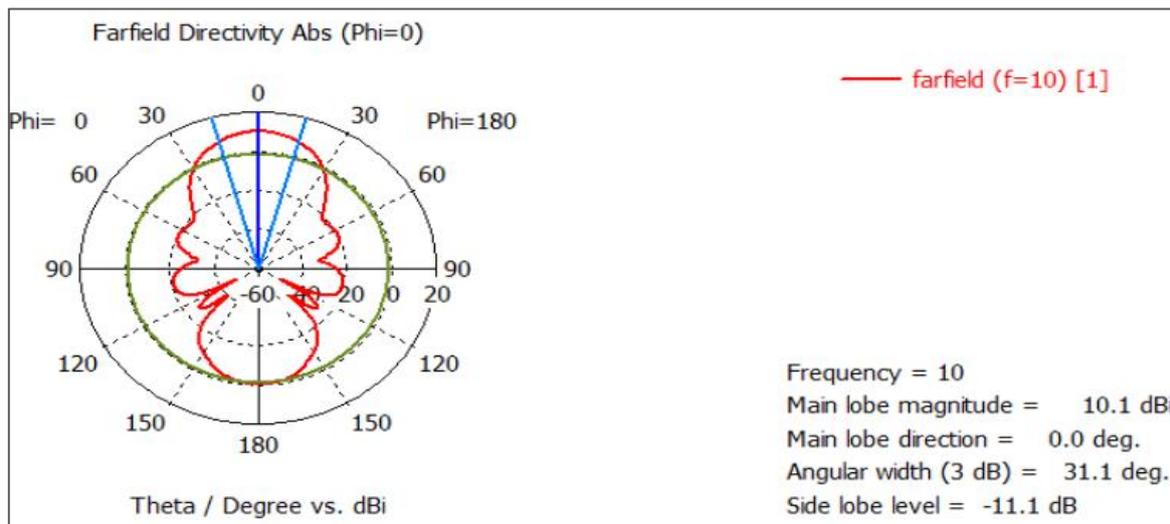


Figure IV. 5: Diagramme de rayonnement en coordonnées polaires pour la phase 0 degré.

La figure IV.5 montre le rayonnement simulé à une fréquence de 10 GHz sous la forme de polarisation de $\phi=0$, ce qui montre que l'amplitude du lobe principal (en anglais main lobe magnitude) est de 10,1 dBi, et la largeur angulaire d'amplitude (angular width) est 31,1 degrés, à côté Le niveau du lobe (side lobe level) est de -11,1 dB, ces valeurs montrent un bon rayonnement d'antenne.

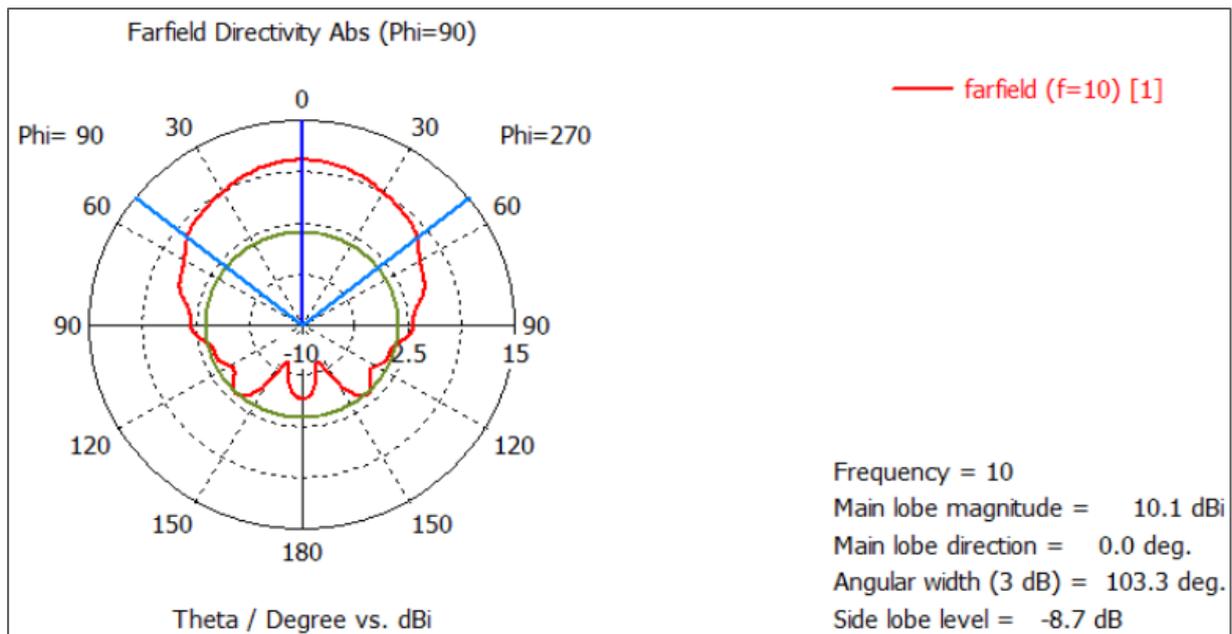


Figure IV. 6: Diagramme de rayonnement en coordonnées polaires pour la phase 90 degrés.

La figure IV.6 montre le rayonnement simulé sous forme polaire en $\phi=90$, on remarque que la magnitude du lobe principal et la fréquence sont les mêmes qu'en $\phi=0$, mais la variation sera dans la largeur angulaire de 103,3 degrés et le lobe latéral de -8,7 dB, ces valeurs présente un bon rayonnement d'antenne.

Aux les résultats de gain, ils sont presque identiques aux résultats obtenus dans la directivité (Figure IV. 7).

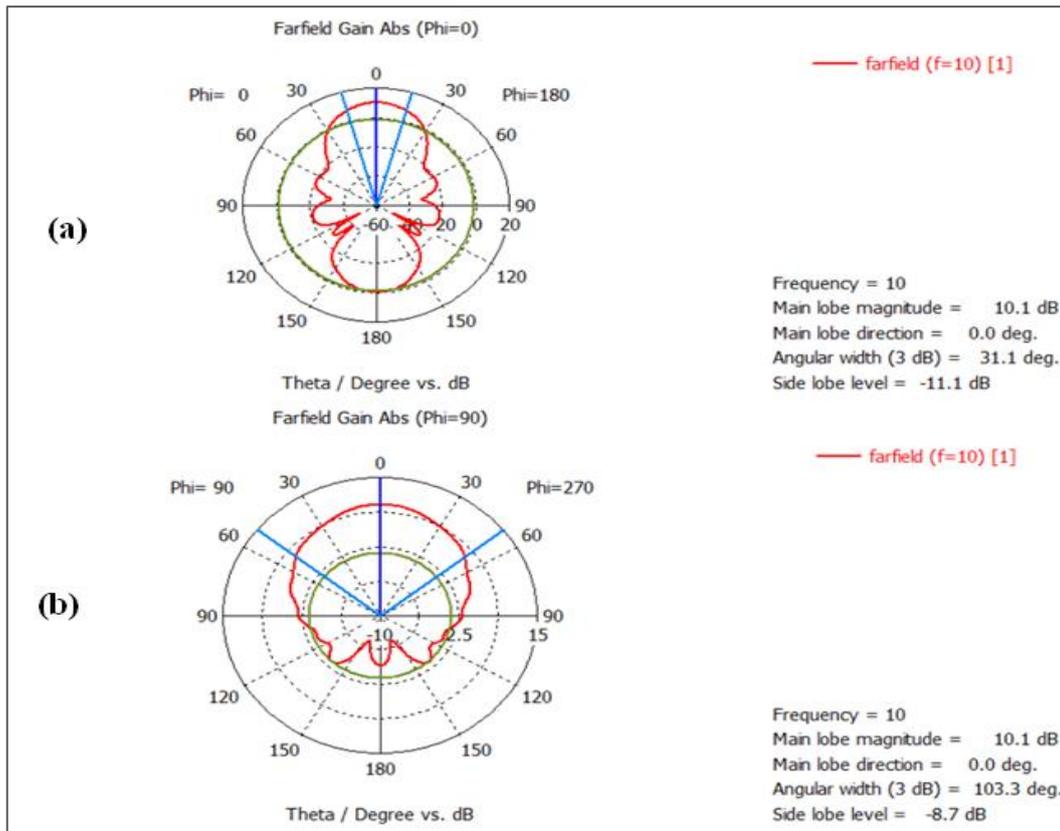


Figure IV. 7: Diagramme de rayonnement du gain en coordonnées polaires pour la phase 0 degré (a) et pour phase 90 degré (b).

IV.3.2. Antenne cornet conventionnel pyramidal

La figure ci-dessous Figure IV. 8 montre la conception de notre premier design d'antenne cornet pyramidal réalisée dans la bande X [8-12] GHz.

On commence de dessiner un guide rectangulaire WR-90 ($a=22.86 \text{ mm}$, $b=10.16 \text{ mm}$, $Lg=20 \text{ mm}$), puis une corne ($A=137 \text{ mm}$, $B=101 \text{ mm}$, $Lh=181 \text{ mm}$) et leurs épaisseur $t= 2 \text{ mm}$, le matériel utilisé Copper annealed.

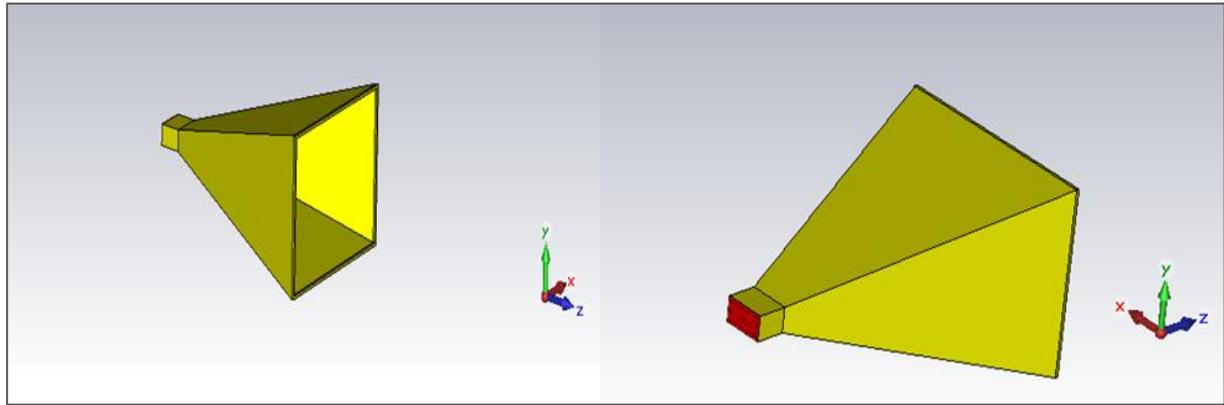


Figure IV. 8: Antenne cornet pyramidal.

Après la simulation de conception, Le coefficient de réflexion est obtenu après simulation sous CST, et le résultat est présenté dans la figure IV. 9 ci-dessous.

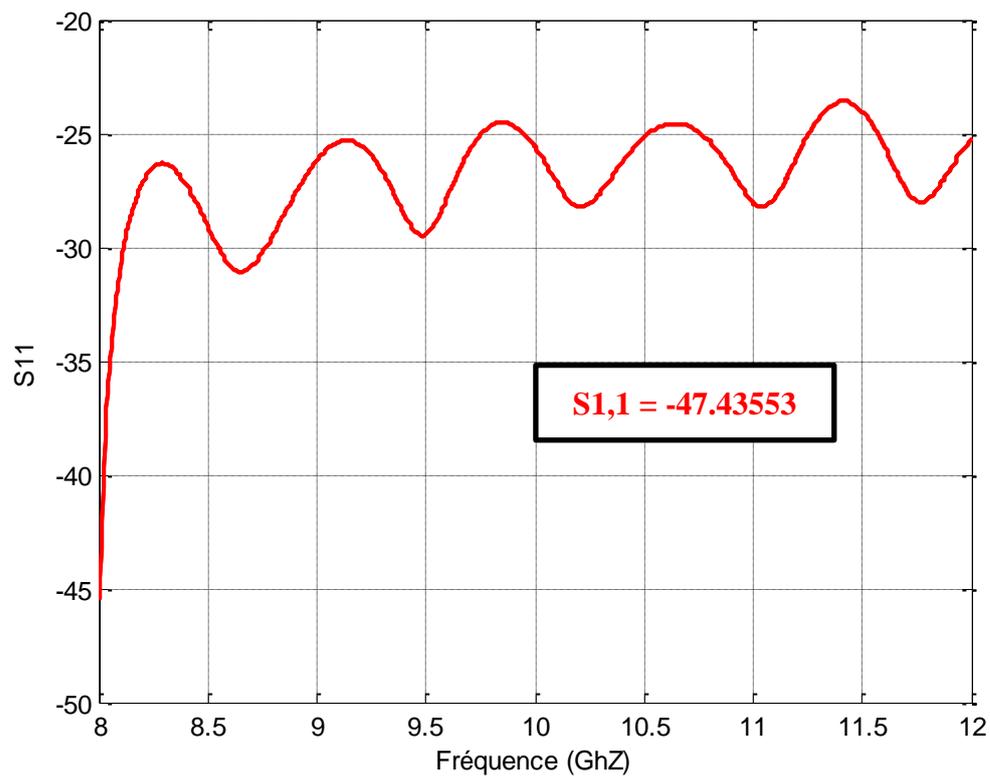


Figure IV. 9: Coefficient de réflexion S11.

Résultats de simulation obtenus par rapport au coefficient de réflexion S11 en fonction de la fréquence (GHz), comme le montre la Figure IV.9, avec des valeurs optimisées pour différents paramètres. A la fréquence de coupure de 8 GHz, S11 atteint une valeur de -

47,43553 dB, le coefficient s11 atteint -25,15 dB pour une fréquence égale à 10 GHz, et -25 dB pour une fréquence de 12 GHz.

Cela nous montre une large bande de fréquence de [8 -12] GHz, montrant une bonne adaptabilité et assurant le plus haut niveau de transfert de puissance.

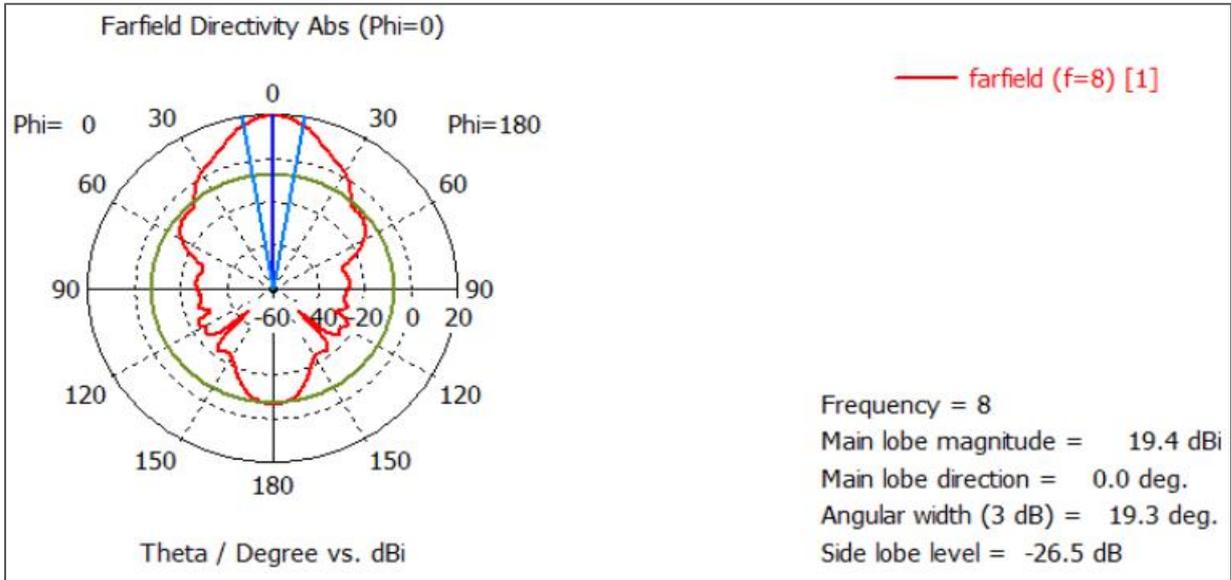


Figure IV. 10: Diagramme de rayonnement en coordonnées polaires pour la phase 0 degré.

Les émissions simulées à la fréquence 8 GHz La forme des coordonnées polaires lorsque phi = 0, l'amplitude du lobe principal représenté sur la (figure IV.10) est 19.4 dBi, une largeur angulaire de 19.3 degrés, et un niveau de lobe secondaire de -26.5 dB, ces valeurs indiquent que l'antenne rayonne bien.

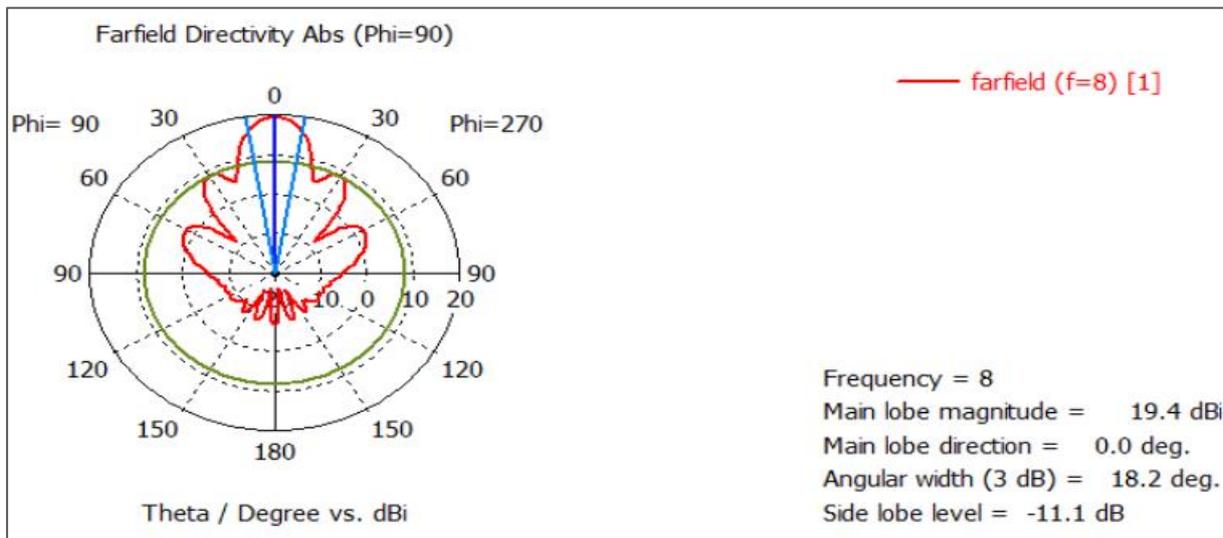


Figure IV. 11: Diagramme de rayonnement en coordonnées polaires pour la phase 90 degré.

La figure IV.11 montre le rayonnement simulé sous forme polaire à $\phi=90$, on note que l'on a la même amplitude du lobe principal et la même fréquence qu'en $\phi=0$, mais la variation se fera au niveau de l'amplitude à une largeur angulaire de 18.2 degrés et autour de -11.1 dB Dans le lobe, ces valeurs montrent un bon rayonnement d'antenne.

Aux les résultats de gain, ils sont presque identiques aux résultats obtenus dans le directivité (figure IV. 12).

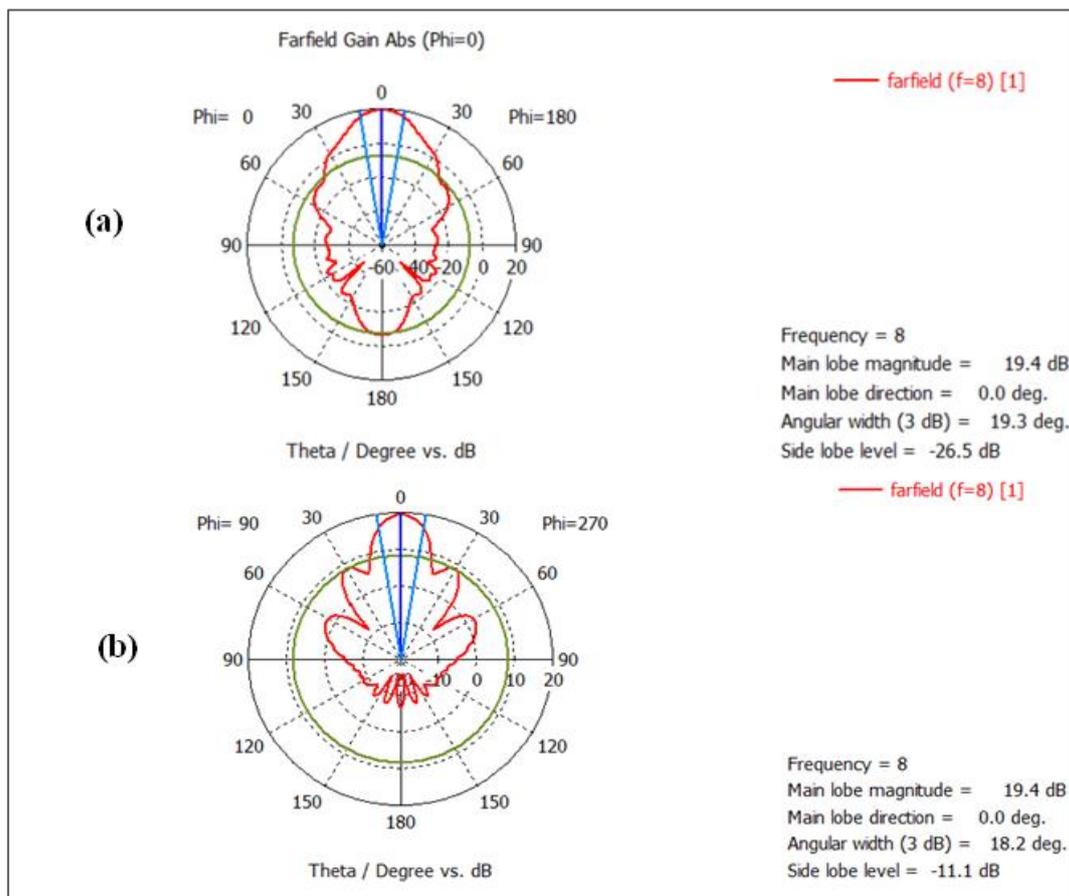


Figure IV. 12: Diagramme de rayonnement du gain en coordonnées polaires pour la phase 0 degré (a) et pour phase 90 degré (b).

Le principal inconvénient de l'antenne cornet est qu'elle est de plus grande taille, ce qui peut être surmonté en utilisant la technologie de guide d'ondes à substrat intégré (SIW) afin de redessiner l'antenne cornet, et pour cela nous les étudierons dans les prochaines conceptions.

IV.4. Simulation du SIW dans la bande X

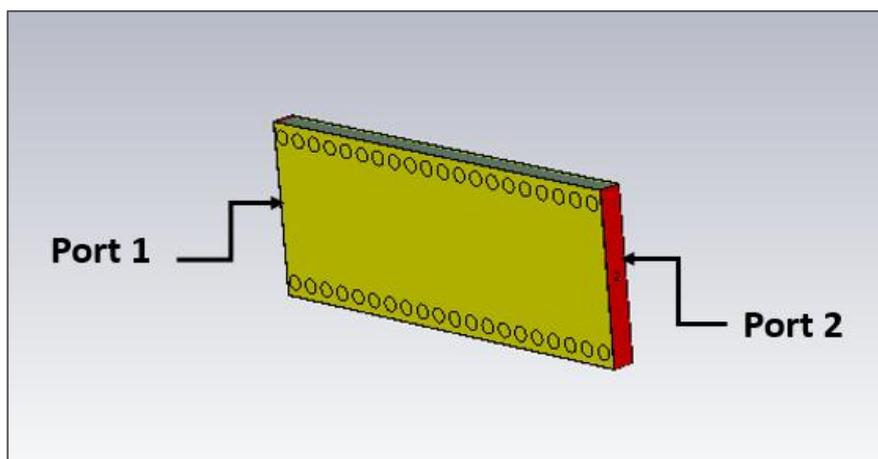
Dans la figure ci-dessous (figure IV. 13) nous présentons notre guide opérant en bande X qui s'étale sur [8–12] GHz.

Pour permettre un fonctionnement correct en bande X, la fréquence de coupure doit être de 8GHz, $a_s=30\text{mm}$, et le nombre de vias choisi est de 20 vias.

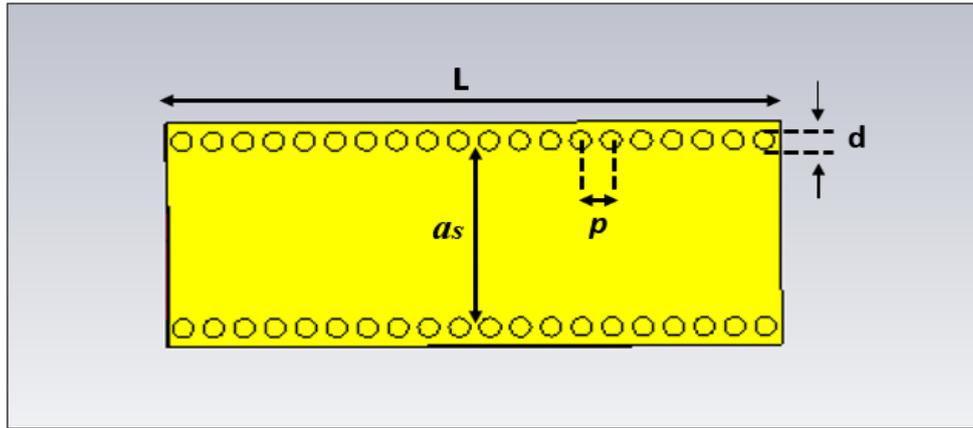
Les propriétés diélectriques et les dimensions de nos guides d'ondes SIW dans la bande sont bien écrites dans le tableau ci-dessous (tableau IV. 1).

Paramètres	Valeurs (mm)
La longueur L	30mm
Le diamètre de via d	1mm
L'épaisseur de substrat h1	1.59mm
L'épaisseur de conducteur h2	0.05
Permittivité relative ϵ_r	4.3
La fréquence de coupure f_c	8 GHz
Facteur de dispersion Tgd	0.01
La largeur ad	12mm
La largeur les vias opposites a_s	10 mm

Tableau IV. 1: Valeurs des paramètres du guide SIW et les caractéristiques de diélectrique dans Bande X.



(a)



(b)

Figure IV. 13: Structure du Guide SIW opérant dans la bande X.

Les résultats de simulation pour ce guide SIW à l'aide du logiciel CST donnent les coefficients de transmission et de réflexion indiqués à la figure IV.14.

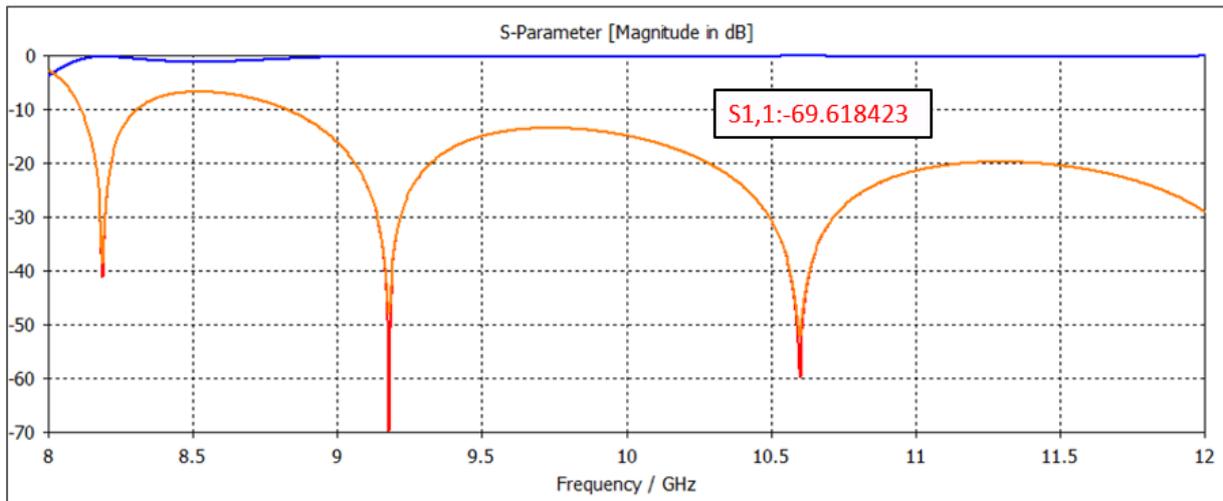


Figure IV. 14: Les paramètres S pour le guide SIW avec CST.

La figure IV.14 montre l'évolution de paramètre S en fonction de la fréquence (échelles linéaires). On peut remarquer que S₂₁ et S₁₂ se confondent de même que S₁₁ et S₂₂, ce qui est dû à la symétrie du dessin. On peut également remarquer que S₂₁ prend une valeur de 0 dB à partir d'une fréquence de 9 GHz. Cela signifie que presque toute la puissance passe du port 1 au port 2 et le guide SIW transfère l'énergie sans perte. Dans le même temps, les valeurs de S₁₁ et S₂₂ sont inférieures à -10dB.

IV.5. Conception d'antenne cornet SIW

Après avoir réalisé à la fois d'antenne cornet plan H et le guide d'ondes intégré au substrat (SIW), nous passons maintenant à la configuration les combinant ensemble est considérée comme une nouvelle technologie pour améliorer la directivité des antennes cornets à plan H à guide d'ondes intégré au substrat (SIW) dans le domaine spatial. C'est un rectangle dont une partie est percée en fonction de la longueur, de la largeur et du reste des calculs dans le substrat SIW (figure IV. 15).

Grâce à laquelle la taille de l'antenne est réduite et l'ouverture de rayonnement est réalisée le long de la structure, l'utilisation d'une lentille diélectrique devant la partie de l'ouverture de rayonnement réduira le niveau électronique et améliorera considérablement la directivité de l'antenne.

Tout cela est représenté dans la figure ci-dessous à l'aide d'un logiciel CST, Ce qui montre tous les paramètres requis est discuté ci-dessous. Avec un matériau Copper annealed (en raison du que la corne a besoin d'un substrat très épais pour un gain acceptable).

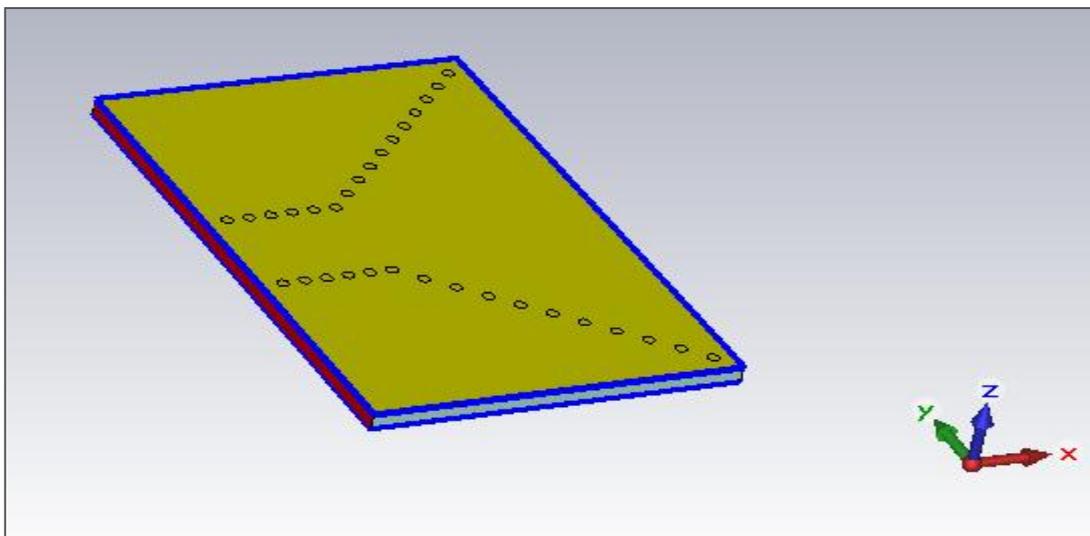


Figure IV. 15: Configuration d'antenne cornet à base de SIW.

Une permittivité relative : $\epsilon_r = 4.3$

- Une hauteur de substrat : $h=1.59\text{mm}$
- Une perte tangentielle de : $Tgd=0.025$

Les dimensions du guide qui est décomposé de 32 vias sont :

- $d=1\text{mm}$
- $p=2\text{mm}$
- $L=33\text{mm}$
- $W=50\text{mm}$

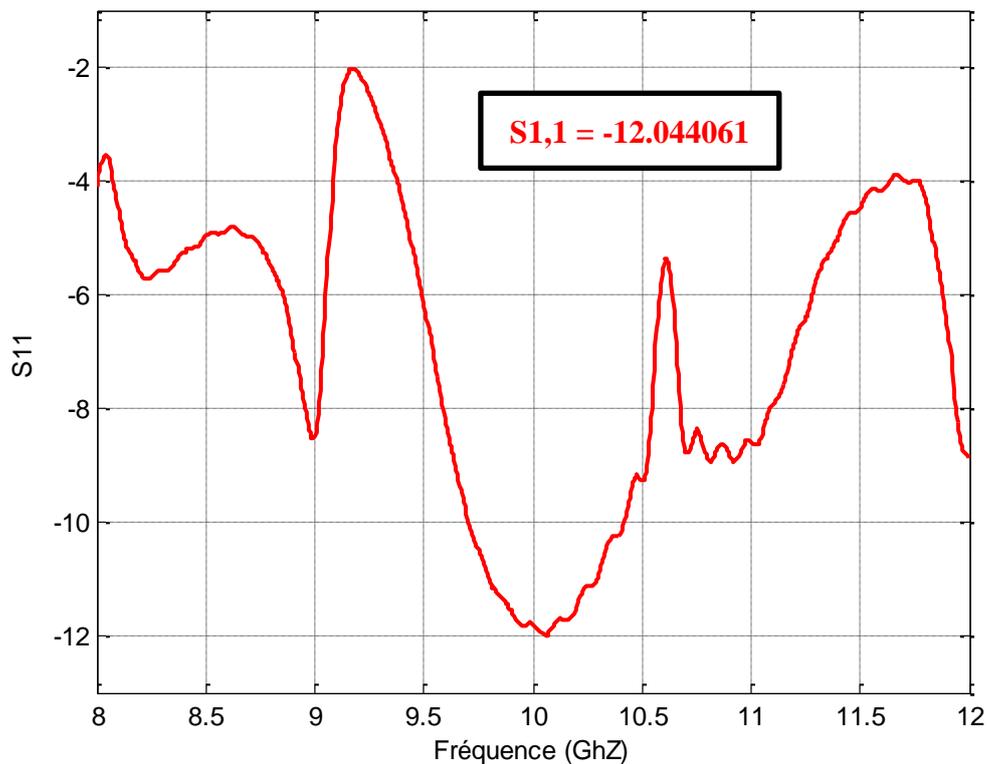


Figure IV. 16: Coefficient de réflexion S_{11} .

Le cornet plan H est conçu sur le guide SIW de manière à correspondre à ses caractéristiques. Un gain de -12.044061 décibels a été obtenu à 10.052 gigahertz. Le coefficient de réflexion S_{11} est mesuré pour évaluer la performance de l'antenne.

Les résultats de simulation pour cette antenne cornet SIW en plan H, obtenus à l'aide du logiciel CST, montrent que le coefficient de réflexion S_{11} est inférieur à -10 dB sur la bande de fréquences X [8-12] GHz, ce qui indique une bonne adaptabilité et un transfert de puissance efficace.

La figure IV.16 présente le coefficient de réflexion S11 en fonction de la fréquence, avec des valeurs optimisées pour différents paramètres. À la fréquence de coupure de 8 GHz, S11 atteint une valeur de -22 dB, à 10 GHz, il est égal à -23.5 dB, et à 12 GHz, il est égal à -20 dB. Ces résultats confirment la capacité de l'antenne cornet SIW en plan H à fonctionner dans la bande X avec une bonne efficacité de transfert de puissance.

En ce qui concerne le diagramme de rayonnement qui est un élément crucial pour évaluer les performances d'une antenne. Dans le cas de l'antenne cornet SIW en plan H, le diagramme de rayonnement est caractérisé par une directivité élevée et un angle d'ouverture réduit. Cela permet une meilleure concentration de l'énergie dans une direction spécifique, ce qui est souhaitable dans de nombreux scénarios d'application.

Les résultats de simulation pour l'antenne cornet SIW en plan H montrent un diagramme de rayonnement bien défini avec une directivité maximale à l'angle de l'axe principal. La figure IV.17 présente le diagramme de rayonnement tridimensionnel de l'antenne à une fréquence de 10 GHz.

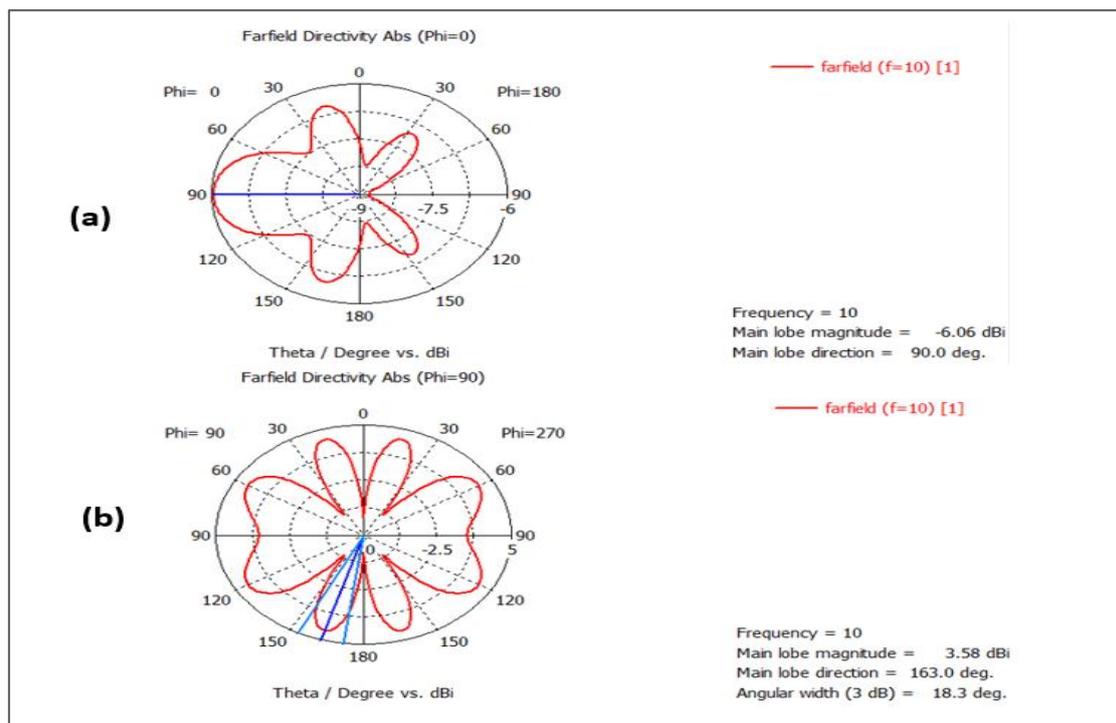


Figure IV.17 : Diagramme de rayonnement pour la phase 0 degré (a) et pour phase 90 degré (b) de l'antenne cornet SIW en plan H à 10 GHz.

On peut observer que le diagramme de rayonnement est étroit et concentré autour de l'axe principal. Cela indique une directivité élevée, ce qui signifie que l'antenne est capable de fournir une grande puissance rayonnée dans une direction spécifique. L'angle d'ouverture est réduit, ce qui permet de mieux cibler la zone de couverture de l'antenne.

De plus, la polarisation de l'antenne cornet SIW en plan H est linéaire. Cela signifie que le champ électrique de l'onde rayonnée oscille dans un seul plan, généralement horizontal ou vertical, en fonction de la conception de l'antenne. La polarisation linéaire est couramment utilisée dans les systèmes de communication pour assurer une compatibilité avec d'autres antennes et minimiser les effets de fading.

Enfin, les caractéristiques de rendement de l'antenne cornet SIW en plan H sont également évaluées. Le rendement est une mesure de l'efficacité de l'antenne à convertir la puissance électrique en puissance rayonnée. Les résultats de simulation montrent un rendement élevé pour l'antenne cornet SIW en plan H, supérieur à 90 % sur la bande de fréquences X [8-12] GHz.

Cette caractéristique de rendement élevé est importante car elle garantit que la majeure partie de la puissance électrique appliquée à l'antenne est effectivement rayonnée, minimisant ainsi les pertes d'énergie et maximisant la portée et la qualité de la communication.

En résumé, l'antenne cornet SIW en plan H présente les caractéristiques suivantes :

- Coefficient de réflexion S_{11} inférieur à -10 dB sur la bande de fréquences X [8-12] GHz, indiquant une bonne adaptabilité et un transfert de puissance efficace.
- Diagramme de rayonnement étroit et concentré autour de l'axe principal, avec une directivité élevée et un angle d'ouverture réduit.
- Polarisation linéaire, permettant une compatibilité avec d'autres antennes et réduisant les effets de fading.
- Rendement élevé, supérieur à 90 % sur la bande de fréquences X [8-12] GHz, assurant une conversion efficace de la puissance électrique en puissance rayonnée.

Concernant les performances en termes de gain et de bande passante, le gain d'une antenne est une mesure de sa capacité à concentrer l'énergie rayonnée dans une direction donnée par rapport à une antenne isotrope idéale. Plus le gain est élevé, plus l'antenne est directive.

L'antenne cornet SIW en plan H présente un gain élevé, généralement compris entre 15 et 25 dBi sur la bande de fréquences X [8-12] GHz. Cette caractéristique en fait un choix approprié pour les applications nécessitant une portée étendue ou une communication à longue distance.

La bande passante d'une antenne fait référence à la gamme de fréquences sur laquelle elle peut fonctionner de manière satisfaisante. Pour l'antenne cornet SIW en plan H, la bande passante est généralement centrée autour de la fréquence de conception, c'est-à-dire la fréquence pour laquelle l'antenne a été optimisée. La largeur de bande est généralement de quelques gigahertz autour de la fréquence centrale. Par exemple, pour une conception optimisée à 10 GHz, la bande passante peut s'étendre de 8 GHz à 12 GHz. Il convient de noter que la conception de l'antenne peut être ajustée pour optimiser la bande passante en fonction des besoins spécifiques de l'application.

IV.6. Limitations et considérations de conception

Bien que l'antenne cornet SIW en plan H présente de nombreuses caractéristiques souhaitables, il convient de prendre en compte certaines limitations et considérations de conception lors de son utilisation.

Tout d'abord, la fabrication et l'assemblage de l'antenne cornet SIW en plan H peuvent être complexes, en particulier pour les fréquences élevées. Les dimensions précises, les tolérances de fabrication et les techniques d'assemblage doivent être soigneusement contrôlées pour assurer les performances requises de l'antenne.

Deuxièmement, en raison de sa directivité élevée, l'antenne cornet SIW en plan H est plus sensible à l'alignement et à la visibilité des antennes dans les applications de communication. Des obstructions physiques ou un mauvais alignement peuvent entraîner une réduction de la qualité de la communication.

Troisièmement, l'antenne cornet SIW en plan H est adaptée aux applications nécessitant une directivité élevée et une portée étendue. Pour les applications nécessitant un rayonnement omnidirectionnel ou une couverture à large angle, d'autres types d'antennes peuvent être plus appropriés.

Enfin, les performances de l'antenne peuvent être influencées par les environnements d'utilisation, tels que la présence d'obstacles, la propagation multipath ou les conditions météorologiques. Des études spécifiques doivent être menées pour évaluer l'impact de ces facteurs sur les performances de l'antenne dans un contexte d'application donné.

IV.7. Comparaison

Les trois antennes mentionnées dans ce chapitre sont :

1. Antenne cornet sectoriel plan H : Cette antenne cornet sectoriel est conçue dans la bande de fréquence X (8-12 GHz). Elle présente une structure simple avec une corne et un guide rectangulaire. Les résultats de simulation montrent que le coefficient de réflexion S11 varie entre -8 dB et -18.24 dB sur la plage de fréquences étudiée. Le diagramme de rayonnement en 3D montre un bon rayonnement de l'antenne, avec un lobe principal d'amplitude de 10.1 dBi et une largeur angulaire d'amplitude de 31.1 degrés.
2. Antenne cornet pyramidal : Cette antenne cornet pyramidal est également conçue dans la bande de fréquence X. Les résultats de simulation montrent que le coefficient de réflexion S11 varie entre -47.44 dB et -25 dB sur la plage de fréquences étudiée. Le diagramme de rayonnement en 3D montre un bon rayonnement de l'antenne, avec un lobe principal d'amplitude de 19.4 dBi et une largeur angulaire d'amplitude de 19.3 degrés.
3. Antenne cornet basée sur la technologie SIW : Cette antenne cornet utilise la technologie SIW (Substrate Integrated Waveguide). Les résultats de simulation du guide SIW montrent des coefficients de transmission et de réflexion satisfaisants, indiquant un transfert d'énergie sans perte. L'antenne cornet SIW combine les avantages de la directivité des antennes cornets plan H avec la réduction de taille et l'ouverture de rayonnement réalisées grâce à la technologie SIW. Les détails spécifiques de la conception et des résultats de simulation de cette antenne ne sont pas mentionnés dans le texte fourni.

En résumé, les antennes cornets sectoriel plan H et pyramidal sont conçues de manière conventionnelle dans la bande de fréquence X, avec des résultats de simulation présentant des coefficients de réflexion satisfaisants et un bon rayonnement.

L'antenne cornet basée sur la technologie SIW offre des avantages potentiels en termes de réduction de taille et de directivité, mais des détails supplémentaires sur sa conception et ses résultats seraient nécessaires pour une comparaison plus approfondie.

IV.8. Conclusion

Dans ce chapitre, nous obtenons des résultats de simulation à la fois deux antennes cornet dans le plan H et pour la technologie de guide d'ondes intégré au substrat (SIW) et le plan H du Cornet et alimenté par le guide d'ondes intégré au substrat sont conçus pour fonctionner en bande X dans le logiciel CST. Les résultats obtenus après la simulation offrent de meilleures performances en termes de perte et d'adaptation, à la fois théoriquement et expérimentalement en utilisant la technologie SIW qui a contribué aux avantages des autres formes d'antennes cornets.

L'antenne cornet SIW en plan H est largement utilisée dans les systèmes de communication satellite. Elle est adaptée pour les applications nécessitant une portée étendue et une communication à longue distance, ce qui en fait un choix idéal pour les satellites de communication.

Supposons qu'une agence spatiale souhaite développer un satellite d'observation de la Terre pour des applications telles que la cartographie, la surveillance environnementale ou la gestion des ressources naturelles. Dans ce cas, l'antenne cornet SIW en plan H peut être utilisée comme une antenne principale pour la réception des signaux radar dans la bande X (8-12 GHz).

L'antenne cornet SIW en plan H offre une directivité élevée et une excellente sensibilité aux signaux radar dans la bande X. Grâce à sa conception en guide d'ondes imprimé, elle permet de concentrer l'énergie rayonnée dans une direction spécifique, ce qui est essentiel pour une observation précise de la Terre depuis l'espace.

Le satellite d'observation de la Terre équipé de l'antenne cornet SIW en plan H peut émettre des signaux radar vers la surface terrestre, puis recevoir les échos réfléchis pour la création d'images ou l'extraction de données utiles. L'antenne cornet SIW en plan H permet une résolution spatiale élevée, ce qui signifie qu'elle peut détecter de petits détails sur la surface

terrestre, tels que des changements topographiques, des variations de végétation ou des caractéristiques côtières.

En raison de sa bande passante large et de ses performances élevées, l'antenne cornet SIW en plan H est idéale pour les applications de surveillance et de cartographie nécessitant des signaux radar dans la bande X. Elle peut également être utilisée dans des missions de recherche scientifique, telles que l'étude des calottes glaciaires, des mouvements tectoniques ou des phénomènes météorologiques.

L'antenne cornet SIW en plan H peut être intégrée à la structure du satellite d'observation de la Terre, généralement sur le panneau supérieur ou sur un bras extensible pour une meilleure couverture angulaire. Les dimensions de l'antenne doivent être soigneusement optimisées pour assurer une compatibilité avec les contraintes d'espace et de poids du satellite.

En résumé, l'antenne cornet SIW en plan H est un choix privilégié pour les satellites d'observation de la Terre nécessitant des capacités de radar dans la bande X. Elle offre une directivité élevée, une résolution spatiale fine et une sensibilité aux signaux radar, ce qui permet une observation précise et détaillée de la surface terrestre depuis l'espace.

Dans le domaine spatial, l'utilisation de l'antenne cornet SIW en plan H dans la bande X offre des avantages au-delà de sa réponse en réflexion S11. Voici quelques résultats supplémentaires qui démontrent son efficacité :

1. Directivité élevée : L'antenne cornet SIW en plan H présente une directivité élevée, ce qui signifie qu'elle peut concentrer l'énergie rayonnée dans une direction spécifique. Cela permet d'optimiser la sensibilité et la résolution des systèmes de télédétection utilisant cette antenne. Par conséquent, elle peut être utilisée pour des applications de surveillance et de cartographie nécessitant une focalisation précise sur des zones spécifiques de la Terre.
2. Diagramme de rayonnement : En plus de la directivité, l'antenne cornet SIW en plan H offre un diagramme de rayonnement bien contrôlé. Cela signifie que son modèle de rayonnement peut être prédéterminé et ajusté en fonction des besoins spécifiques de la mission spatiale. Par exemple, pour la cartographie, le diagramme de rayonnement peut être optimisé pour minimiser les angles d'incidence indésirables et maximiser la sensibilité aux signaux réfléchis provenant de la surface terrestre.

3. Gain élevé : L'antenne cornet SIW en plan H présente un gain élevé, ce qui correspond à la quantité d'énergie rayonnée dans une direction donnée par rapport à une antenne isotrope idéale. Le gain élevé permet d'améliorer la sensibilité de réception des signaux faibles, ce qui est crucial pour les applications de télédétection nécessitant une détection précise des caractéristiques de la surface terrestre.
4. Rapport signal/bruit (SNR) amélioré : Grâce à sa directivité élevée et à son gain élevé, l'antenne cornet SIW en plan H contribue à améliorer le rapport signal/bruit des systèmes de réception dans le domaine spatial. Cela signifie qu'elle peut détecter des signaux faibles avec un rapport signal/bruit plus élevé, ce qui permet d'obtenir des mesures plus précises et une meilleure qualité d'image.
5. Compatibilité avec d'autres bandes de fréquences : Bien que nous ayons mentionné l'exemple de la bande X, l'antenne cornet SIW en plan H peut également être adaptée à d'autres bandes de fréquences utilisées dans le domaine spatial, telles que la bande Ku (12-18 GHz) ou la bande Ka (26.5-40 GHz). Cela offre une flexibilité pour répondre aux besoins spécifiques de différentes missions spatiales.

En conclusion, l'utilisation de l'antenne cornet SIW en plan H dans le domaine spatial pour la bande X offre des avantages significatifs tels qu'une directivité élevée, un diagramme de rayonnement bien contrôlé, un gain élevé, un rapport signal/bruit amélioré et une compatibilité avec d'autres bandes de fréquences. Ces caractéristiques permettent d'améliorer la sensibilité, la résolution et la précision des systèmes de télédétection spatiale, contribuant ainsi à une meilleure compréhension et utilisation de l'espace.

6. Capacité de suivi d'objets en mouvement : L'antenne cornet SIW en plan H peut être utilisée pour suivre des objets en mouvement dans l'espace. Par exemple, dans le domaine de la surveillance des débris spatiaux, cette antenne peut être utilisée pour détecter et suivre les objets en orbite, ce qui est crucial pour la sécurité des satellites et des missions spatiales.
7. Polarisation multiple : L'antenne cornet SIW en plan H peut être conçue pour offrir une polarisation multiple. Cela permet de recevoir et de transmettre des signaux polarisés dans différentes orientations, ce qui est utile pour diverses applications dans le domaine spatial, telles que la communication avec des satellites qui utilisent des polarisations spécifiques.

8. Capacité de formation de faisceaux : En utilisant un réseau d'antennes cornet SIW en plan H, il est possible de former des faisceaux directionnels pour améliorer la communication et la transmission de données dans l'espace. La formation de faisceaux permet de concentrer l'énergie du signal dans une direction spécifique, ce qui augmente l'efficacité et la portée de la communication.
9. Résistance aux environnements hostiles : Les antennes cornet SIW en plan H sont souvent fabriquées à partir de matériaux robustes et durables, ce qui les rend résistantes aux conditions environnementales extrêmes de l'espace, telles que les températures extrêmes, les radiations et le vide spatial. Elles sont conçues pour fonctionner de manière fiable et efficace même dans des environnements hostiles.
10. Intégration avec d'autres systèmes : L'antenne cornet SIW en plan H peut être intégrée avec d'autres systèmes et équipements utilisés dans le domaine spatial, tels que les amplificateurs de puissance, les convertisseurs de fréquence et les récepteurs. Cette intégration permet de construire des systèmes complexes et polyvalents pour répondre aux exigences spécifiques des missions spatiales.

CONCLUSION EN GENERALE

En conclusion générale, cette thèse a exploré différents aspects des antennes cornets en technologie SIW (Substrate Integrated Waveguide) dans le domaine des micro-ondes, avec un accent particulier sur les antennes cornets opérant en bande X. Les chapitres ont abordé divers sujets liés aux antennes et à la technologie SIW, fournissant ainsi une base solide pour l'étude des antennes cornets SIW.

Le premier chapitre a introduit les concepts des antennes, en définissant leur rôle en émission et en réception, ainsi que leurs caractéristiques physiques et radio-électriques telles que la bande de fréquences, la directivité, le gain, le diagramme de rayonnement, le coefficient de réflexion et la polarisation. Différents types d'antennes, tels que les antennes à réflecteurs, les antennes filaires, les antennes planaires et les antennes à ouverture rayonnante, ont également été discutés.

Le deuxième chapitre a présenté la technologie SIW, en se concentrant sur les guides d'ondes intégrés de section rectangulaire. Les conditions de propagation des ondes, la fréquence de coupure, la vitesse de phase, la vitesse de groupe et les pertes dans les guides d'ondes ont été examinées. La technologie SIW a été présentée, en mettant en évidence les différentes structures, les mécanismes de perte, les paramètres de conception et les avantages de cette technologie.

Le troisième chapitre s'est penché sur les caractéristiques des antennes cornets en technologie SIW. Les différentes caractéristiques de l'antenne cornet, telles que la directivité, le gain et la largeur de faisceau, ont été discutées. Les types d'antennes cornets, y compris le cornet sectoriel plan H, le cornet sectoriel plan E et le cornet pyramidal, ont été présentés avec leurs caractéristiques spécifiques.

Le quatrième chapitre a présenté les résultats de simulation des antennes cornets SIW. L'outil de simulation CST Studio Suite a été utilisé pour concevoir et simuler des antennes cornets opérant en bande X, ainsi que la technologie SIW elle-même. Les conceptions d'antennes cornets SIW en plan H et en pyramide ont été discutées, fournissant des résultats de simulation et des performances.

En conclusion, cette thèse a permis d'approfondir les connaissances sur les antennes cornets en technologie SIW dans le domaine des micro-ondes. Les différentes caractéristiques et types d'antennes cornets ont été explorés, et des résultats de simulation ont été obtenus. Cette recherche ouvre la voie à des développements futurs dans le domaine des antennes cornets SIW, notamment en utilisant le concept de chargement diélectrique du cornet, qui constitue une application prometteuse dans le domaine des radiocommunications.

En ce qui concerne les travaux futurs, plusieurs domaines peuvent être explorés pour améliorer davantage les caractéristiques de l'antenne cornet à plan H basée sur la technologie SIW. Voici quelques suggestions:

1. Optimisation de la bande passante : Bien que les prototypes développés dans cette thèse aient démontré une bande passante complète dans la dixième bande, il est possible d'explorer des techniques d'optimisation pour élargir encore la bande passante. Cela pourrait inclure l'utilisation de matériaux spécifiques, de structures de guide d'ondes modifiées ou de configurations d'alimentation optimisées.
2. Amélioration du gain et de la directivité : Bien que les antennes cornets à plan H basées sur la technologie SIW aient montré des performances satisfaisantes en termes de gain et de directivité, il reste possible de les améliorer. Des études supplémentaires pourraient être entreprises pour optimiser la conception de l'antenne, y compris les dimensions du cornet, les paramètres du guide d'ondes et les propriétés diélectriques du substrat, afin d'obtenir des performances accrues en termes de gain et de directivité.
3. Réduction de la taille de l'antenne : Dans le cadre de cette thèse, la taille de l'antenne a été constamment réduite en utilisant une charge tampon intégrée. Cependant, il reste encore des possibilités d'explorer des techniques de miniaturisation supplémentaires pour réduire davantage la taille de l'antenne cornet à plan H. Cela peut être réalisé en utilisant des matériaux à haute permittivité, en explorant des structures de guide d'ondes alternatives ou en utilisant des techniques avancées de fabrication.
4. Étude de la stabilité thermique et des effets environnementaux : L'efficacité des antennes cornets à plan H peut être influencée par des facteurs environnementaux tels que la température, l'humidité et les variations de pression. Des travaux futurs pourraient être axés sur l'étude de la stabilité thermique de l'antenne et des effets des conditions environnementales sur ses performances. Cela permettrait de développer des antennes robustes et adaptées à une utilisation dans des environnements difficiles.

5. Intégration de fonctionnalités supplémentaires : Les antennes cornets à plan H peuvent être améliorées en intégrant des fonctionnalités supplémentaires telles que la polarisation circulaire, la polarisation à double sensibilité ou la capacité de formation de faisceaux. Des recherches supplémentaires pourraient être entreprises pour étudier ces fonctionnalités et développer des techniques d'intégration appropriées.

En résumé, les travaux futurs dans le domaine de l'antenne cornet à plan H basée sur la technologie SIW offrent de nombreuses opportunités d'amélioration des performances, de miniaturisation et d'exploration de nouvelles fonctionnalités. Ces avancées contribueront à renforcer l'efficacité et la polyvalence des antennes cornets dans les applications de radiocommunications dans le domaine des micro-ondes.

Références

Chapitre I

- (1). Christophe Caloz, Tatsuo Itoh. "Electromagnetic Metamaterials: Transmission line theory and microwave applications". JOHN WILEY&sons, 2006.
- (2). Coll, Odile Picon et. « Les ANTENNES Théorie, Conception et Application ». DUNOD,2011.
- (3). Agouzoul, Abderrahmane. Conception et réalisation d'une antenne à résonateur diélectrique à 60 GHz ,(Mémoire de Maitrise en ingénierie, Université du Québec E-Témiscamingu). Aout 2013.
- (4). -Chercheur, Anne Claire LEPAGE Enseignant. " Caractéristiques des antennes ". Paris : Tech, 2015.
- (5). Kaufman, D.M. Pozar and B. "Increasing the Baud with of a microstrip antenna by proximity coupling". 1987. pp. PP.368-369. Vol. Vol.23.
- (6). S, Kumari V and Srivastava. "Design of H-Plane Horn Antenna using Substrate Integrated Waveguide". s.l. : , Int. Conference on the Microwave and Photonics, 2013.
- (7). Villemaud, Guillaume. cours master. s.l. : département génie électrique.
- (8). Hajj, M. "Conception, réalisation et caractérisation de nouveaux types d'antennes Sectorielles à base de matériaux BIE métalliques pour télécommunications terrestres",. France : s.n., 2009. Thèse de doctorat présentée à l'université de Limoges.
- (9). AzzazRahmaniSalima. « Analyse et conception des antennes imprimées multibandes en anneaux concentriques pour les réseaux de télécommunications ». 2013. Thèse de doctorat présenté à l'Université de Abou BakrBelkaid-Tlemcen.
- (10). « Cours TS-4600 équipements spatiaux micro-ondes II "Éléments de base des Communications par satellite"». 2010.
- (11). Guennach Mohamed. « Conception d'une antenne "PIFA" multi-bandes pour applications sans fil ». 2016. Mémoire d'Ingénieur présenté à l'Université Sidi Mohamed Ben Abella.
- (12). Ali, Brahimi. Mémoire Présenté par : En vue de l'obtention du diplôme de Magister Faculté de Génie .
- (13). AnnaNiang. « Antennes miniatures et structures électromagnétiques avec circuits non-Foster ». 2017. Thèse[de doctorat présenté à l'Université de Paris-Saclay.
- (14). Pointereau, : E. "Etude d'antennes à bande interdite électromagnétique Omnidirectionnelles en azimuth". France : s.n., 2007. Thèse de doctorat présentée à l'université de Limoges.
- (15). A. Benedetto, F. Benedetto. in Comprehensive Materials Processing. 2014.
- (16). Conception et modélisation d'une antenne microruban compacte pour une utilisation dans.
- (17). Hajj, M. "Conception, réalisation et caractérisation de nouveaux types d'antennes Sectorielles à base de matériaux BIE métalliques pour télécommunications terrestres". Thèse de doctorat présentée à l'université de Limoges, France, 2009.
- (18). Imane, ZAHZAH. Diplôme de Master Système de Télécommunication. 2019/2020.

Chapitre II

- (1). Mohan, A.R. Azad and A. « Sixteenth-mode substrate integrated wave guide band pass filter loaded with complementary split-ring resonator ». *ELECTRONICS LETTERS* 13th April 2017.
- (2). Grenier, Dominic. « Electromagnétisme et Transmission des Ondes ». Automne 2016.
- (3). COLLINO, Francis. Conditions absorbantes d'ordre élevé pour des modèles de propagation d'onde dans des domaines rectangulaires. 1992. Thèse de doctorat. INRIA.
- (4). Mejdji, LARIBI. «conception d'une antenne cornet-siw a gain variable », mémoire de la maîtrise en Ingénierie. UNIVERSITÉ DU QUÉBEC EN ABITIBITÉMISCAMINGUE. : s.n., Avril 2014.
- (5). Shigeki, F. « Waveguide line ». (in Japanese) Japan Patent 06-053 711 : s.n., Feb. 25 Patent, 1994.
- (6). Hanane, SENHADJI Salima et KADROUCI Aouicha. « Nouvelles structures des réseaux d'antennes antipodales de type Vivaldi ULB à rayonnement longitudinal en technologie SIW ». Université Abou BekrBelkaid de Tlemcen, 2016.
- (7). Daniels, R.C., Heath, R.W. « 60 GHz wireless communications emerging requirements and design recommendations ». IEEE, 2007.
- (8). Grigoropoulos, N., Izquierdo, B.S., Young, P.R. «Substrate integrated folded waveguides (SIFW) and filters ». IEEE, 2005.
- (9). Bozzi, M., Georgiadis, A. and Wu, K. « Review of substrate integrated wave guide circuits and antennas ». IET, 2011.
- (10). Bozzi, M., Perregrini, L., Wu, K. «Modeling of conductor, dielectric and radiation losses in substrate integrated waveguide by the boundary integral resonant mode expansion method ». IEEE,2008.
- (11). —. « Modeling of losses in substrate integrated waveguid by boundary integral resonant mode expansion method ». IEEE, 2008.
- (12). Lai, Q., Fumeaux, Ch., Hong, W., Vahldieck, R. « Characterization of the propagation properties of the half-mode substrate integrated waveguide ». IEEE, 2009.
- (13). Bozzi, M., Pasian, M., Perregrini, L., Wu, K. « On the losses in substrate integrated waveguides and cavities ». Int. J. Micro w. Wirel. Technol., 2009.
- (14). Bozzi, M., Pasian, M., Perregrini, L., Wu, K. « substrate integrated waveguides and cavities ». Int. Technol., 2009.
- (15). Ranade, S.R. and Nair, D.U. « Design of a substrate integrated waveguide H plane Homantenna on a PTFE substrate for automotive radar application ». 2011.
- (16). Wang, H., Fang, D.-G., Zhang, B., Che, W.-Q. « Dielectric loaded substrate integrated waveguide (SIW) - plane homantennas ». IEEE, 2010.
- (17). Iigusa, K.Li, K. Sato, K. Harada, H. «Gain Enhancemen to H-plane Sectoral Post-Wall Hom Antenna by Connecting Tapered Slots for Millimeter-Wave Communication ». IEEE,2012.
- (18). K.Wu, D. Deslandes and. accurate Modeling wave Mechansms, and design consdiration of substrat waveguide. (2006, Jun). IEEE Transaction on microwave theory and techniques.vol54.

Chapitre III

- (1). Razafimahatratra., Solofo Miharisoa Sarobidy. Contribution au dimensionnement d'une liaison radio sur le corps humain : étude canal et antenne à 60 GHz. [éd.] Français. Paris VI : . Université Pierre et Marie Curie - ; Université libre de Bruxelles (1970-..., 2017.

- (2). Patrick, VAUDON. – Master Recherche Télécommunications Hautes Fréquences et Optiques IRCOM. s.l. : –Université de Limoges.
- (3). K. Nikolova. “LECTURE 18. Horn Antennas,” Modern antennas in wireless telecommunications ECE753. .
- (4). S. Razafimahatratra, J. Sarrazin, A. Benlarbi-delaï, and P. De Doncker,. “Horn antenna design for BAN millimeter wave on-body communication,”. s.l. : in IEEE APS, 2014. p. p. 204.2.
- (5). S. R. Avenue. “RT/duroid ® 5870 /5880,”. s.l. : Rogers Corp, 2016. pp. pp. 100–101.
- (6). Constantine A. Balanis. "Antenna Theory Analysis and Design",. All rights reserved. Published simultaneously in Canada, : Third Edition, Copyright by John Wiley & Sons, Inc. , 2005.
- (7). D. Deslandes and K. Wu. “Integrated microstrip and rectangular waveguide in planar form,”. s.l. : IEEE Microw. Wirel, 2001. pp. pp. 68–70,. Vol. vol. 11, no. 2, .
- (8). MEJDI, LARIBI. "CONCEPTION D'UNE ANTENNE CORNET -SIW A GAIN VARIABLE". AVRIL 2014. UNIVERSITÉ DU QUÉBEC EN ABITIBI-TÉMISCAMINGUE.
- (9). Solofo Miharisoa Sarobidy Razafimahatratra. . Contribution au dimensionnement d'une liaison radio sur le corps humain : étude canal et antenne à 60 GHz. Université Pierre et Marie Curie - Paris VI; Université libre de Bruxelles (1970-..), : s.n., 2017.
- (10). Naeini, Wael M. Abdel-Wahab and Safieddin Safavi. Wide bandwidth 60-GHz Aperture-Coupled Microstrip Patch Antenna by SIW. june206. Vol. vol6.
- (11). Tarek Djerafi*, Ali Doghri and Ke Wu. Poly-Grames Research Center, École Polytechnique de Montréal, . Montreal, QC, Canada : s.n.
- (12). Nair., S. R. Ranade and D. U. Design of a substrate integrated waveguide H plane Horn antenna on a PTFE substrate for automotive radar application. s.l. : 2011 IEEE Applied Electromagnetics Conference, AEMC 2011,, , 2011. pp. pages 5–8.
- (13). ekasit nugool charoenalap, janenarong kwunchui , terasak parthepin. X band H plan sectoral horn antenna designed with two balanced.
- (14). Shibu Ghosh, Bikash Ranjan Behera ,. Characterstics of SIW Based Horn Antenna for X Band Applications Design Modelling and Analysis of Horn Antenna,. Mesra, Patna Campus Patna, Bihar, India : s.n.
- (15). Xu, F., Wu, K., Zhang,. . : 'Periodic leaky-wave antenna for millimeter wave applications based on substrate integrated waveguide ',. s.l. : X IEEE Trans. Antennas Propag., 2010. pp. pp. 340-347.
- (16). Ranade, S.R. et Nair, D.U. : ' Design of a substrate integrated waveguide H plane Horn antenna on a PTFE substrate for automotive radar application '. 2011 . p. pp.1 4.
- (17). Iigusa, K., et al. : 'Gain Enhancement of H-plane Sectoral Post-Wall Horn Antenna by Connecting Tapered Slots for Millimeter-Wave Communication' Antennas and Propagation. s.l. : IEEE Transactions on, 2012. p. pp.1 .