

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd- Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

En : Télécommunications

Spécialité : Systèmes de Télécommunications

Par :

ZITOUNI Lahcen

Sujet

**Antenne intégrée sur puce avec semi-conducteur pour application
satellite en bande V**

Soutenu publiquement, le **25/06/2025**, devant le jury composé de :

M.MELIANI Maghnia	Professeur	Univ. Tlemcen	Président
M.Hassaine Nawel	MCA	Univ. Tlemcen	Examinateur
IRID Hadj Sidi Moahmmed	Professeur	Univ. Tlemcen	Directeur de mémoire
KOURDI Zakarya	MRA	CDS-Oran	Co-Directeur de mémoire

Année universitaire : 2024/2025

Dédicaces



Je dédie ce mémoire, fruit de plusieurs années de travail, de persévérance et d'efforts, à toutes les personnes qui ont marqué mon parcours, chacune à sa manière.

À mes chers grands-parents,

Vous avez été les racines de notre famille, porteurs de sagesse, de valeurs et d'amour inconditionnel. Votre bienveillance continue de m'inspirer chaque jour. Même si vous n'êtes plus à mes côtés, votre souvenir reste vivant dans mon cœur et m'accompagne à chaque étape de ma vie.

À mon père et à ma mère,

Vous êtes les piliers de mon existence. Merci pour vos sacrifices, vos prières, votre soutien constant et votre foi inébranlable en moi. Rien de tout cela n'aurait été possible sans votre amour et votre patience. Ce travail vous est dédié avec toute ma gratitude.

À mes oncles

Votre présence, vos conseils et votre encouragement m'ont toujours réconforté. Vous avez contribué à faire de moi la personne que je suis aujourd'hui, et pour cela, je vous adresse toute ma reconnaissance.

*À mes collègues et frères de route, SENOUCI BRIKCI ALI et HADEF
ABDELKADER,*

Notre complicité, nos échanges et nos longues heures de travail en commun ont grandement enrichi cette aventure. Merci pour votre professionnalisme, votre rigueur et votre amitié sincère. Ce mémoire est aussi le reflet de nos efforts partagés.

*À mes amis LAKHDAR, Ilyes et Mahmoud,
Votre amitié fidèle a été une source précieuse de réconfort, de rires et de motivation. Merci pour les moments de détente, les conseils, et surtout pour votre présence dans les moments de doute comme dans les instants de réussite.*

*À vous tous,
Merci d'avoir été là. Ce travail est dédié à chacun d'entre vous, en gage de mon respect, mon affection et ma profonde reconnaissance*

REMERCIEMENTS

***** REMERCIEMENTS *****

Le travail présenté dans ce rapport a été effectué à l'université Abou-Beker Belkaid

-Tlemcen-

Avant tout, Nous remercions notre seigneur d'avoir donné à l'homme le pouvoir de raisonner et d'explorer les vérités de l'univers.

Que mes remerciements les plus sincères s'adressent à mon encadreur Ms **IRID Sidi Mohammed Hadj**, Professeur à l'université Abou-Beker Belkaid -Tlemcen-, pour avoir accepté de superviser mon travail et pour m'avoir initié aux bases de télécommunication système, et le soutien inconditionnel, les conseils précieux et la patience sans fin qu'ils m'ont généreusement fournis pendant mes recherches de mémoire.

Que mes remerciements les plus sincères s'adressent à mon co-encadreur Ms **KOURDI Zakarya**, maître de recherche classe A au Centre développement des satellites à Oran, pour avoir accepté de superviser mon travail et pour m'avoir initié aux bases de télécommunication système. Qui malgré ses multiples responsabilités tant scientifiques que pédagogiques, a accepté de mettre à notre disposition son expérience, son esprit de synthèse et ses conseils qui nous ont été une base d'appui pour notre travail, et surtout de nous avoir accordé une grande liberté dans l'expression de nos idées.

Mes sincères remerciements à madame **MELIANI Maghnia** professeur à l'université Abou-Bakr Belkaid Tlemcen de m'avoir fait l'honneur de présider le jury de soutenance.

Nous remercions également madame **Hassaine Nawel**, Maître de conférences classe A à l'université Abou-Bakr Belkaid Tlemcen de m'avoir fait l'honneur d'examiner notre travail.

Nous pourrions oublier de présenter mes vifs remerciements et ma sincère gratitude à toutes celles et tous ceux qui m'ont épaulé dans les moments durs et m'ont donné la force pour continuer et arriver au bout du travail.

Enfin, je tiens à remercier toute ma famille, en particulier ma mère, qui m'a soutenu et conseillé tout au long de mon parcours universitaire.

Résumé

Ce sujet présente la conception et la simulation futures d'une antenne sur puce pour les applications satellite en bande V. L'antenne proposée a été spécialement conçue pour une intégration sur puce et nécessite des techniques de miniaturisation avancées ainsi qu'un réseau d'alimentation soigneusement optimisé. Une antenne patch microruban a été choisie pour sa compatibilité avec les procédés de fabrication de semi-conducteurs et sa facilité d'intégration. Les outils de simulation électromagnétique de CST Studio sont utilisés pour affiner la géométrie de l'antenne, garantissant ainsi sa conformité aux spécifications de fréquence de la bande V. L'antenne est soumise à des tests rigoureux, notamment sur les résultats de l'affaiblissement de réflexion, du diagramme de rayonnement et du gain. Un affinement itératif basé sur les résultats de la simulation conduit à un système d'antenne sur puce optimisé, conforme aux spécifications souhaitées, garantissant ainsi la conformité du système intégré aux normes industrielles pour les dispositifs de communication par satellite. L'intégration réussie de l'antenne sur puce démontre sa viabilité pour les applications satellite en bande Ku, ouvrant la voie à des systèmes de communication compacts et performants en technologie satellitaire.

Mots-clés : Antenne, Semi-conducteur, Bande V, Satellite, CST Studio.

Abstract

This subject presents the future design and simulation of an on-chip antenna for V band satellite applications. The antenna proposed was a specifically tailored for on-chip integration, need use advanced miniaturization techniques and a carefully optimized feeding network. A microstrip patch antenna design is chosen for its compatibility with semiconductor processes and ease of integration. Electromagnetic CST Studio simulation tools are employed to refine the antenna geometry, ensuring compliance with V band frequency specifications. So, the undergoes rigorous testing, including results of return loss, radiation pattern, and gain. Iterative refinement based on simulation results leads to an optimized on-chip antenna system that meets the desired specifications, ensuring the integrated system adheres to industry standards for satellite communication devices. The successful integration of the on-chip antenna demonstrates its viability for Ku band satellite applications, paving the way for compact and efficient communication systems in satellite technology.

Keywords: Antenna, Semiconductor, V band, Satellite, CST Studio.

ملخص:

يقدم هذا الموضوع التصميم والمحاكاة المستقبلين لهوائي مدمج على الشريحة لتطبيقات الأقمار الصناعية في نطاق V. صُمم الهوائي المقترح خصيصًا للتكامل على الشريحة، ويتطلب استخدام تقنيات تصغير متقدمة وشبكة تغذية مُحسَّنة بعناية. اختير تصميم هوائي رقعة شريطية دقيقة لتوافقه مع عمليات أشباه الموصلات وسهولة تكامله. تُستخدم أدوات محاكاة CST Studio الكهرومغناطيسية لتحسين هندسة الهوائي، وضمان توافقه مع مواصفات تردد نطاق V. لذلك، يخضع الهوائي لاختبارات دقيقة، تشمل نتائج فقدان العودة، ونمط الإشعاع، والكسب. يؤدي التحسين التكراري القائم على نتائج المحاكاة إلى نظام هوائي مدمج مُحسَّن يلبي المواصفات المطلوبة، مما يضمن التزام النظام المتكامل بمعايير الصناعة لأجهزة الاتصالات عبر الأقمار الصناعية. يُظهر التكامل الناجح للهوائي المدمج على الشريحة قابليته للتطبيق في تطبيقات الأقمار الصناعية في نطاق Ku، مما يمهد الطريق لأنظمة اتصالات مدمجة وفعالة في تكنولوجيا الأقمار الصناعية.

الكلمات المفتاحية: هوائي، أشباه موصلات، نطاق V، قمر صناعي، برنامج CST Studio

Table des matières

Dédicaces -----	ii
Remerciements-----	Erreur ! Signet non défini.
Résumé-----	v
Abstract -----	v
ملخص-----	v
Table des matières-----	vi
Sigles et abréviations-----	xii
Liste des figures-----	xiii
Listes des tableaux-----	xiv
Introduction générale : -----	1

Chapitre I : Généralités sur les antennes utilisées dans le domaine spatial

I.1 Introduction : -----	4
I.2. Définition de l'antenne :-----	4
I.3. Le rôle des antennes :-----	5
I.4. Généralité sur les antennes : -----	6
I.4.1. Types des antennes :-----	6
I.4.2 Les Antennes filaires :-----	6
I.4.2.a. 1'Antenne Dipôle :-----	6
I.4.2.b. Antenne Monopôle :-----	8
I.4.2.c. Antenne Yagi-Uda :-----	9

I.4.4 Les antennes à ouverture rayonnante :-----	10
I.4.4.1 Les antennes cornets :-----	10
I.4.4.2 Antenne réflecteur parabolique :-----	11
I.4.4.3 Les antennes lentilles :-----	11
I.4.5. Les réseaux d'antennes :-----	12
I.4.6. Antennes omnidirectionnelles :-----	13
I.4.7. Antenne imprimée (antenne patch) :-----	14
I.4.8. Antenne Spirale (Spiral Antenna) :-----	15
I.5. Les orbites :-----	15
I.5.1. Les différentes applications des antennes :-----	16
I.5.1.1. Selon l'orbite :-----	16
I.5.1.2. Selon le type d'antenne :-----	17
I.6. Caractéristiques des antennes :-----	17
I.6.1. Coefficient de réflexion (S_{11}) (adaptation) :-----	18
I.6.2. L'impédance d'entrée d'une antenne :-----	19
I.6.3. Le diagramme de rayonnement :-----	20
I.6.4. Directif :-----	20
I.6.5. Efficacité :-----	21
I.6.6. Le gain :-----	22
I.6.7. Le VSWR (Voltage Standing Wave Ratio) (ROS):-----	22
I.6.8. Directivité d'une antenne :-----	23
I.6.9. Rendement :-----	23
I.6.10. Bande de fréquence :-----	24
I.6.11. La polarisation :-----	26
I.6.11.1 Polarisation linéaire :-----	26
I.6.11.2. Polarisation circulaire :-----	27

I.6.11.3. Polarisation elliptique : -----	27
I.7. Exigences spécifiques des applications spatiales :-----	29
I.7.1. La bande V : -----	30
I.7.2. Les avantages utiliser une bande V :-----	30
I.7.3. Les inconvénients à utiliser une bande V : -----	31
I.7.4. Applications principales de la bande V :-----	31
I.8. Conclusion :-----	31

Chapitre II : Généralité sur la technologie on chips

II.1 Introduction : -----	34
II.2. Description d'une antenne patch : -----	34
II.2.1 Plan de masse (Ground Plane) :-----	34
II.2.2. Élément rayonnant (Patch) : -----	35
II.2.3. Substrat diélectrique (Diélectrique Substrat) : -----	35
II.3. Les différentes formes d'une antenne patch :-----	36
II.4. L'utilisations des antennes patch : -----	37
II.5. Géométrie Antenne Imprimée : -----	38
II.6. Les paramètres géométriques de l'élément rayonnant :-----	38
II.6.1. Calculs des dimensions théoriques : -----	40
II.7. Généralités sur la miniaturisation : -----	41
II.7.1. Définition d'une antenne miniature : -----	42
II.7.2. Les limites fondamentales des antennes miniatures : -----	42
II.7.2.A. Le facteur de qualité :-----	42
II.7.2.B. L'efficacité rayonnée : -----	43
II.8. Technologie on chips : -----	43

II.8.1. Définition de la technologie On-Chip : -----	43
II.8.2. Semi-conducteurs utilisés en technologie On-Chip :-----	44
II.8.2.A. Silicium (Si): -----	44
II.8.2.B. Avantages du Silicium (Si) en technologie On-Chip :-----	45
II.8.2.C. Inconvénients du Silicium (Si) en technologie On-Chip : -----	45
II.8.2.D. Application Silicium (Si) en technologie On-Chip :-----	45
II.8.3. Silicium-Germanium (SiGe) : -----	46
II.8.3.A. Avantages du Silicium-Germanium (SiGe) en technologie On-Chip :-----	47
II.8.3.B. Les Inconvénients du Silicium-Germanium (SiGe) en technologie On-Chip :-----	47
II.8.3.C. Applications du Silicium-Germanium (SiGe) en technologie On-Chip : -----	47
II.8.4. Matériaux semi-conducteurs (GaAs , GaN, InP) : -----	48
II.8.4.A. Avantages du GaAs (Arséniure de Gallium) en technologie On-Chip : -----	48
II.8.4.B. Inconvénients du GaAs (Arséniure de Gallium) en technologie On-Chip : -----	48
II.8.4.C. Applications du GaAs (Arséniure de Gallium) en technologie On-Chip:-----	48
II.8.5. Nitrure de Gallium (Gallium Nitride) :-----	49
II.8.5.A. Avantages du GaN (Nitrure de Gallium) en technologie On-Chip :-----	49
II.8.5.B. Inconvénients du GaN (Nitrure de Gallium) en technologie On-Chip :-----	49
II.8.5.C. Applications du GaN (Nitrure de Gallium) en technologie On-Chip : -----	50
II.8.6. InP – Phosphure d’Indium (Indium Phosphide) : -----	50
II.8.6.A. Avantages du InP (Phosphure d'Indium) : -----	51
II.8.6.B. Inconvénients du InP (Phosphure d'Indium) : -----	51
II.9 Technologies de fabrication et processus d’intégration : -----	53
II.9.1. Technologie CMOS (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor) :-----	53
II.9.1.1. Définition : -----	53
II.9.1.2. Processus de fabrication : -----	53
II.9.1.3. Avantages :-----	54

II.9.1.4. Application :	54
II.9.2. Technologie BiCMOS (Bipolar CMOS) :	55
II.9.2.1. Processus de fabrication :	56
II.9.2.2. Avantages :	56
II.9.2.3. Applications :	56
II.9.3. Technologie MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) :	56
II.9.3.1. Processus de fabrication :	57
II.9.3.2. Avantages :	57
II.9.3.3. Applications :	58
II.10. Avantages de l'intégration On-Chip pour les communications satellites :	58
II.10.1. Applications des antennes intégrées sur puce en bande V :	59
II.11. Conclusion :	61

Chapitre III : Résultats et discussion

III.1 Introduction :	63
III.2. Généralités sur logiciel CST MICROWAVE STUDIO :	63
III.2.1. Définition du logiciel CST STUDIO SUITE :	63
III.2.2. Description générale de l'interface CST :	64
III.3. Design et structure de l'antenne :	66
III-3-A. Le substrat diélectrique :	66
III.3.B. Le plan de masse :	66
III.3.C. Dessiner le patch (oxide) :	68
III.3.D. Dessiner une encoche dans le patch :	68
III.3.E. La ligne micro-ruban :	69
III.3.F. Le port de polarisation :	70

III.4. Conception d'une antenne patch rectangulaire-----	70
III.5.1. 1 ^{ère} partie (Variation épaisseur des couches d'oxide entre les métaux) : -----	71
III.5.1.1. Coefficient de réflexion S11 : -----	71
III.5.1.2. VSWR :-----	72
III.5.1.3. Le gain : -----	73
III.5.1.4. Diagramme du rayonnement : -----	73
III.5.2. 2 ^{ème} partie : Variation des oxides -----	75
III.5.2.1. Coefficient de réflexion S11 : -----	75
III.5.2.2. AL203 :-----	Erreur ! Signet non défini.
III.5.2.3. VSWR -----	76
III.5.3. Gain d'antenne patch :-----	78
III.5.3.1. Sio2 -----	Erreur ! Signet non défini.
III.5.3.2. HD 4100 : -----	Erreur ! Signet non défini.
III.5.3.3. BCB : -----	Erreur ! Signet non défini.
III.5.3.4. AL203 -----	Erreur ! Signet non défini.
III.5.3.5. Si3N4 -----	Erreur ! Signet non défini.
III.5.4. Diagramme de rayonnement : -----	80
III.5.5 Comparaison entre les performances des matériaux :-----	84
III.6. Conclusion -----	86
Conclusion générale : -----	88
Références :-----	91

Sigles et abréviations

liste des figures

Chapitre I

Figure I. 1: Schéma de principe d'un système de communication radio -----	5
Figure I. 2: Schéma de principe d'un système du communication radio-----	6
Figure I. 3: Antenne Dipôle -----	7
Figure I. 4: Antenne Dipôle VHF -----	7
Figure I. 5: Antenne Dipôle UHF -----	8
Figure I. 6: Antenne Monopôle -----	8
Figure I. 7: Antenne Yagi-Uda -----	9
Figure I. 8: Antenne Hélicoïdale -----	10
Figure I. 9: Antenne cornet cylindrique et rectangulaire -----	10
Figure I. 10: Antenne réflecteur parabolique -----	11
Figure I. 11: Les antennes lentilles -----	12
Figure I. 12: Les différents types d'antennes réseaux -----	12
Figure I. 13: Antennes omnidirectionnelles-----	14
Figure I. 14: Antenne imprimée (antenne patch)-----	14
Figure I. 15: Antenne Spirale (Spiral Antenna) -----	15
Figure I. 16: Les différents types d'orbites-----	16
Figure I. 17: Schéma d'une antenne connectée à une ligne de transmission et un générateur-----	18
Figure I. 18: Représentation du coefficient de réflexion -----	19
Figure I. 19: Représentation de l'impédance d'antenne -----	19
Figure I. 20: Diagramme de rayonnement de l'antenne omnidirectionnelle-----	20
Figure I. 21: Diagramme de rayonnement de l'antenne directive-----	21
Figure I. 22: Ports de référence et les pertes d'une antenne -----	22
Figure I. 23: Directivité d'une antenne-----	23
Figure I. 24: Illustration la bande passante a-10 dB d'une antenne-----	24

Figure I. 25: Rotation d'une onde plane et son ellipse de polarisation en fonction du temps -----	26
Figure I. 26: La polarisation linéaire-----	27
Figure I. 27: La polarisation circulaire-----	27
Figure I. 28: Polarisation elliptique -----	28
Figure I. 29: Les différents types de polarisation-----	28

Chapitre II

Figure II. 1: Structure d'une antenne patch -----	35
Figure II. 2: Différentes forme d'élément rayonnant [I.5].-----	36
Figure II. 3: Antenne patch micro-ruban[II.3]. -----	38
Figure II. 4: Extension de la longueur physique L[I.11] -----	39
Figure II. 5: Architecture d'un SoC : blocs fonctionnels intégrés (mémoire, traitement, interfaces)---	44
Figure II. 6: La Structure atomique du silicium -----	44
Figure II. 7: Fiche technique du silicium : propriétés élémentaires (Si, 14, 28.0855)" -----	45
Figure II. 8: : La Structure électronique de Silicium-Germanium (SiGe)-----	46
Figure II. 9: La Structure atomique de Silicium-Germanium (SiGe)-----	46
Figure II. 10: La Structure atomique de Arséniure de Gallium (Gallium Arsenide) -----	48
Figure II. 11: La Structure atomique de Nitrure de Gallium (Gallium Nitride)-----	49
Figure II. 12: la structure atomique InP – Phosphure d'Indium (Indium Phosphide) -----	51
Figure II. 13: Structure CMOS (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor) -----	53
Figure II. 14: Structure BiCMOS (Bipolar-CMOS) -----	56
Figure II. 15: Le contexte technologique (MEMS/On-Chip)-----	57

Chapitre III

Figure III- 1. Interface du CST [III.5].	65
Figure III- 2. Substrat du notre structure d'antenne.	66
Figure III- 3. <i>Créer un plan de masse pour l'antenne.</i>	67
Figure III- 4. <i>Créer métal 1 pour l'antenne.</i>	68
Figure III- 5. Création d'oxide d'antenne.	68

Figure III- 6. Structure d'antenne patch.	69
Figure III- 7. Création des métaux d'antenne patch.	69
Figure III- 8. Polarisation linéaire de l'antenne patch.	70
Figure III- 9. Coefficient de réflexion de H_1 pour différents d'épaisseur des couches d'oxyde entre les métaux.	71
Figure III- 10. VSWR de H_1 pour différents d'épaisseur des couches d'oxyde entre les métaux.	72
Figure III- 11. Gains de H_1 pour différents d'épaisseur des couches d'oxyde entre les métaux.	73
Figure III- 12. Diagramme du rayonnement de H_1 pour différents d'épaisseur des couches d'oxyde entre les métaux.	74
Figure III- 13. Coefficient de réflexion pour différents oxides d'antenne.	76
Figure III- 14. VSWR pour différents oxides d'antenne.	77
Figure III- 15. Efficacité total et radiation pour différents oxides d'antenne.	78
Figure III- 16. Gains pour différents oxides d'antenne	79

listes des tableaux

Chapitre I

Tableau I. 1: Les différents types d'orbites et leur mission ou bien applications possibles	16
Tableau I. 2: Les différents types d'antennes et leurs applications	17
Tableau I. 3: Tableau récapitulatif des bandes de fréquence (1 – 300 GHZ).....	26

Chapitre II

Tableau II. 1: Les différents avantages et inconvénients et applications les antennes patch [II.8].....	37
Tableau II. 2: : tableau des équations utilisées [I.12].....	41
Tableau II. 3: Tableau récapitulatif	52
Tableau II. 4: Applications et fonctions des technologies On-Chip : circuits numériques et RF (microprocesseurs, 5G, IoT, spatial)	55
Tableau II. 5: cahier de charge pour spécification les caractéristiques de notre dispositives pour ce projet.	60

Chapitre III

Tableau III. 1: Diagramme de rayonnement simulé pour les différents matériaux pour $\phi=0^\circ$	81
Tableau III. 2: Diagramme de rayonnement simulé pour les différents matériaux pour $\phi=90^\circ$	82
Tableau III. 3: Diagramme de rayonnement simulé pour les différents matériaux pour $\theta=90^\circ$	83
Tableau III. 4: Comparaison entre les performances de ces antennes des différents matériaux de substrat utilisé	84

Introduction

générale

Introduction générale :

Depuis le lancement du premier satellite artificiel par l'URSS en 1957 [2, 3], l'industrie spatiale a connu une évolution spectaculaire. Ce secteur, autrefois centré sur des fonctions simples comme l'émission de signaux, est aujourd'hui au cœur de nombreuses applications stratégiques : observation de la Terre, météorologie, exploration de l'Univers, géolocalisation, reconnaissance militaire, et télécommunications.[1]

Avec cette expansion, les **technologies de communication** ont elles aussi fortement progressé. Les besoins actuels en **débit, compacité** et **efficacité énergétique** ne cessent de croître, en particulier dans les domaines de l'**aérospatiale** et des **systèmes satellitaires**. Pour répondre à ces exigences, la **bande V** (40–75 GHz) apparaît comme une solution particulièrement prometteuse grâce à sa **large capacité spectrale**, idéale pour les **transmissions à très haut débit**, notamment dans les satellites à **orbite basse (LEO)**.

Cependant, l'exploitation de ces **fréquences millimétriques** impose des défis majeurs, notamment la conception de **composants RF miniaturisés**, à la fois **performants, intégrables** et adaptés aux **architectures électroniques compactes**. C'est dans ce contexte que s'inscrit notre travail, qui porte sur la conception d'une **antenne patch on-chip** fonctionnant à **60 GHz**, répondant aux contraintes technologiques modernes tout en respectant les performances exigées par le cahier des charges. [2]

Dans cette optique, les antennes intégrées sur puce, ou Antenna-on-Chip (AoC), se présentent comme une alternative innovante. Intégrées directement sur un substrat semi-conducteur, elles permettent une réduction considérable des dimensions, une baisse des pertes d'interconnexion et une meilleure intégration avec les circuits RF. Les travaux de recherche récents dans le domaine, menés principalement dans les pays technologiquement avancés, ont permis d'importants progrès, notamment dans : Le choix des matériaux semi-conducteurs (Si, GaAs, GaN, etc.) adaptés aux hautes fréquences, L'optimisation des structures d'antennes pour améliorer le gain, la bande passante et l'efficacité, L'intégration monolithique des antennes avec les composants actifs pour des systèmes compacts. Malgré ces avancées, l'intégration des antennes sur puce reste peu développée en Algérie, principalement en raison du manque d'infrastructures technologiques, de l'indisponibilité locale de matériaux haute fréquence, et du coût élevé des outils de simulation et de mesure. Ce contexte soulève une problématique essentielle : comment concevoir une antenne patch intégrée sur puce, fonctionnant

en bande V pour des applications satellitaires, tout en prenant en compte les limitations techniques et matérielles spécifiques à l'environnement algérien.[3]

Pour répondre à cette question, ce mémoire propose une démarche centrée sur la conception théorique, la modélisation et la simulation d'une antenne patch sur puce pour la bande V. L'objectif est de démontrer qu'il est possible de concevoir une structure performante en s'appuyant sur : Une étude approfondie de l'état de l'art des technologies d'antennes sur puce en bande V, La conception et la simulation numérique (à l'aide de logiciels comme HFSS ou CST) d'une antenne adaptée aux contraintes locales [1], Une analyse critique des performances obtenues et la proposition d'alternatives techniques réalistes et adaptées au contexte académique et industriel national. [4]

Dans cet objectif, ce mémoire vise à étudier et simuler une antenne intégrée sur puce avec semi-conducteur pour application satellite en bande V.

Ce mémoire est décomposé en trois chapitres. Dans le premier chapitre nous présentons des généralités sur les antennes spatiales et sur leurs caractéristiques rayonnements des antennes telles que le gain, la directivité, l'efficacité et les caractéristiques électriques des antennes : coefficient de réflexion (S_{11}), la bande passante (BP)... etc. Nous présentons aussi les différents types d'antenne selon la directivité, selon l'orbite et selon le gain et **Exigences spécifiques des applications spatiales. Enfin, les caractéristiques de la bande V (les avantages, Les inconvénients, les applications).**

Le deuxième chapitre on étudie, une antenne à patch. Il a expérimenté

La Description, Les différentes formes d'une antenne patch, L'utilisations, la Géométrie, etc....). Enfin les généralités sur la technologie on chips (les matériaux, type de technologies de fabrication et processus d'intégration, et les Avantages et les applications de l'intégration On-Chip pour les communications satellites). Enfin, on termine par Cahier de charge pour spécification les caractéristiques de notre dispositif pour ce projet.

Le troisième chapitre est consacré à la présentation du logiciel CST Micro-wave Studio où nous avons présenté de façon générale le rôle de chaque fonction pour réaliser nos simulations. On parlera des résultats de la simulation sous le logiciel CST.

Ce travail se termine par une conclusion générale, en discutant les différents points de vue potentiels sur l'antenne patch.

Chapitre I

Généralités sur les antennes utilisées dans le domaine spatial

I.1 Introduction :

Dans un monde en constante évolution technologique, les systèmes de communication par satellite occupent une place essentielle dans les domaines des télécommunications, de la météorologie, de la défense, de la navigation et de l'observation de la Terre. Ces systèmes reposent sur une infrastructure complexe, dont l'élément central de transmission et de réception est l'antenne. Véritable interface entre les signaux électromagnétiques et les systèmes électroniques, l'antenne joue un rôle critique dans la performance globale des liaisons satellitaires, particulièrement dans les bandes de fréquences millimétriques telles que la **bande V (40 à 75 GHz)**.

Avec l'essor des technologies spatiales miniaturisées, notamment les **CubeSats** et les constellations de satellites en orbite basse (LEO), la demande pour des solutions d'antennes compactes, efficaces et facilement intégrables a considérablement augmenté. Cette tendance pousse les ingénieurs à repenser la conception traditionnelle des antennes, en se tournant vers des architectures **intégrées sur puce** exploitant des matériaux **semi-conducteurs avancés** comme le **GaAs, le SiGe ou le GaN**, capables de fonctionner à haute fréquence tout en respectant les contraintes spatiales en termes de masse, volume, consommation énergétique et résistance aux conditions extrêmes.

Dans ce contexte, ce chapitre a pour objectif de présenter les concepts fondamentaux liés aux antennes et leur rôle dans les communications par satellite [I.1]. Il abordera tout d'abord les principes de fonctionnement des antennes, leurs différentes typologies et paramètres de performance. Ensuite, les caractéristiques des applications satellitaires seront détaillées, avec une attention particulière portée aux nouvelles bandes de fréquences, aux défis associés à la bande V, et à la nécessité croissante de solutions intégrées et miniaturisées pour les futures générations de systèmes spatiaux.

I.2. Définition de l'antenne :

Une antenne est un dispositif essentiel dans le domaine des télécommunications et des systèmes de communication, conçu pour établir une transition entre un guide d'ondes (comme une ligne de transmission) et l'espace libre où les ondes électromagnétiques se propagent. Elle remplit une double fonction : en mode émission, elle convertit les signaux électriques en ondes électromagnétiques qu'elle rayonne dans l'environnement ; en mode réception, elle capte les ondes électromagnétiques et les convertit en signaux électriques pour permettre leur traitement par un récepteur.

Les antennes sont utilisées dans diverses applications, comme la téléphonie, la radiodiffusion, les satellites, et les réseaux sans fil, et jouent un rôle fondamental dans l'interconnexion des systèmes modernes.

Un système de communication sans fil, dans sa forme la plus élémentaire, se compose d'un bloc d'émission et d'un bloc de réception. Ces deux unités sont reliées par un canal de propagation, à travers lequel le signal émis se déplace avant d'être capté par le récepteur, comme illustré.

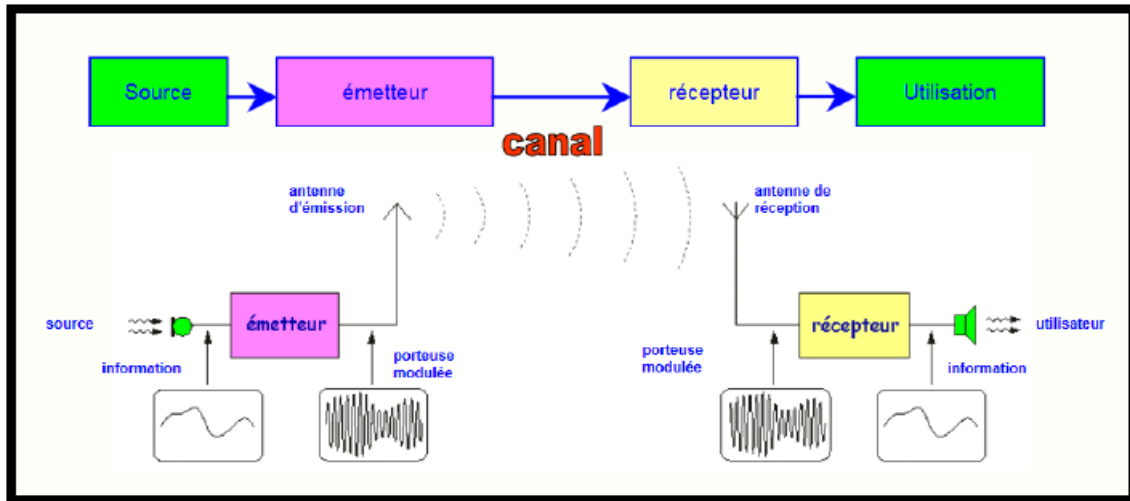


Figure I. 1: Schéma de principe d'un système de communication radio [I.1].

Dans le bloc d'émission, le circuit génère un courant haute fréquence modulé, qui est ensuite converti en ondes électromagnétiques par l'antenne d'émission afin de se propager à travers le canal. À l'inverse, dans le bloc de réception, l'antenne de réception capte ces ondes et les transforme en un courant électrique exploitable par le circuit de réception pour le traitement des informations.

I.3. Le rôle des antennes :

L'antenne a plusieurs fonctions, principalement :

- Permet une bonne adaptation entre l'équipement radio et l'environnement d'exploitation propagé.
- Assure la transmission et la réception de l'énergie dans une direction privilégiée
- Délivre le message le plus fidèlement possible.

Si l'on considère le système de communication sans fil le plus simple, conçu d'un bloc de transmission et un bloc de réception. Les deux blocs sont séparés par un canal de propagation dans lequel le signal est émis avant d'être reçu comme le montre la figure.

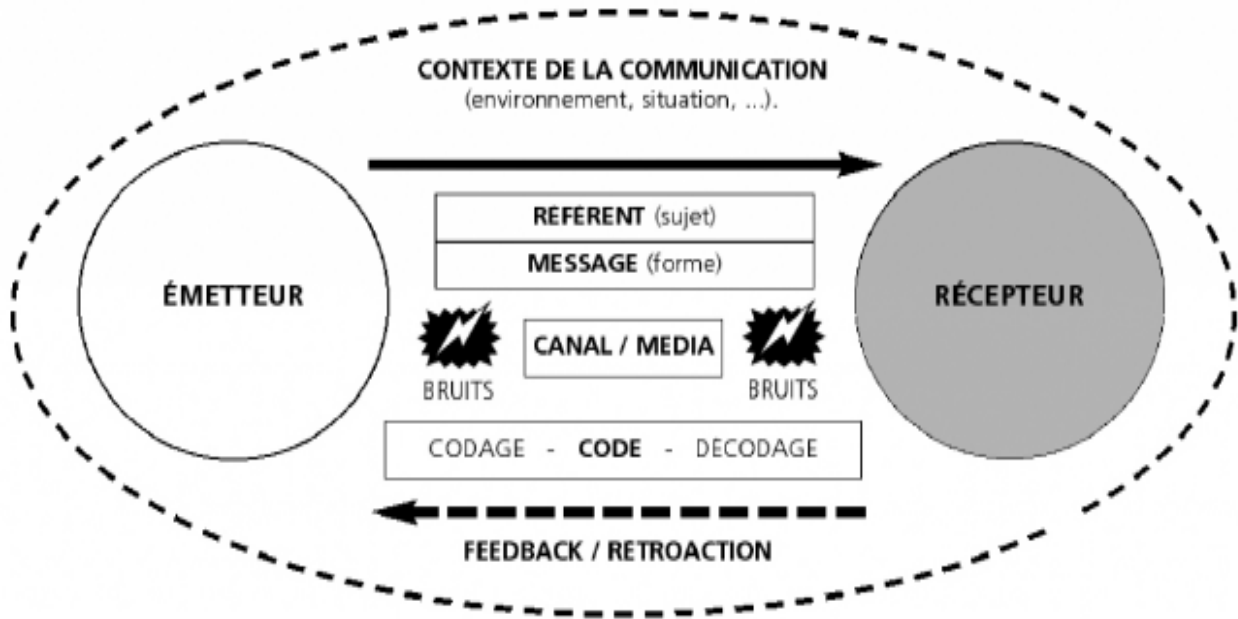


Figure I. 2: Schéma de principe d'un système de communication radio [I.2].

I.4. Généralité sur les antennes :

I.4.1. Types des antennes :

Il existe plusieurs types d'antennes classées par rapport à leur principe de fonctionnement et leur rôle dans le domaine de la télécommunication :

I.4.2 Les Antennes filaires :

Les **antennes filaires** jouent un rôle fondamental dans les communications spatiales, en assurant la transmission et la réception des signaux électromagnétiques entre les **satellites**, les **stations terrestres** et d'autres engins spatiaux. Ces antennes sont conçues pour fonctionner dans des conditions extrêmes et sont adaptées aux différentes missions spatiales.

Voici une description détaillée de leurs spécificités :

I.4.2.a. 1'Antenne Dipôle :

L'**antenne dipôle** est une des plus utilisées pour les **communications en bande VHF et UHF**. Elle est constituée de **deux conducteurs de longueur $\lambda/2$** , permettant une émission **équilibrée et omnidirectionnelle**.

1. Caractéristiques :

- Propagation uniforme du signal dans toutes les directions.
- Utilisation optimisée pour les **satellites en orbite basse (LEO)**.
- Bonne adaptabilité aux fréquences de communication spatiale.

2. Applications :

- Télécommunications des **satellites météo et scientifiques**
- Systèmes de **radioamateur spatial**.

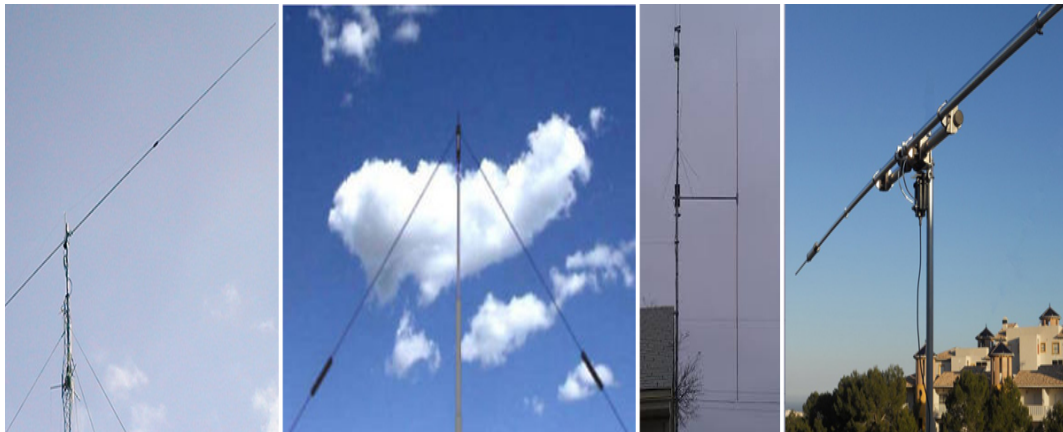


Figure I. 3: Antenne Dipôle [I.3].



Figure I. 4: Antenne Dipôle VHF
[I.3].



Figure I. 5: Antenne Dipôle UHF [I.4].

I.4.2.b. Antenne Monopole :

L'**antenne monopôle**, dérivée du dipôle, est montée sur un **plan de masse** pour optimiser sa **directivité**. Elle est fréquemment utilisée sur les **petits satellites en orbite basse** pour assurer une liaison stable.

1. Caractéristiques :

- Fonctionne avec un **plan de masse**, renforçant son rayonnement électromagnétique.
- Bonne **adaptation aux systèmes GPS et télécommunications spatiales**.
- Conception compacte et légère, idéale pour les missions courtes.

2. Applications :

- Satellites CubeSat **et** nanosatellites.
- Balises de télémétrie et systèmes de suivi spatial.



Figure I. 6: Antenne Monopôle [I.4].

I.4.2.c. Antenne Yagi-Uda :

L'**antenne Yagi-Uda** est un dispositif à **forte directivité**, composée d'un **dipôle actif**, de **directeurs** et d'un **réflecteur**, optimisant le **gain du signal**.

1.Caractéristiques :

- Focalisation du faisceau pour une meilleure qualité de communication.
- Utilisation dans les **liaisons inter-satellites et suivi au sol**.
- Très efficace pour les transmissions longue distance.

2.Applications :

- Suivi des satellites en **orbite géostationnaire (GEO)**.
- **Communications inter-satellites et avec les stations terrestres**.

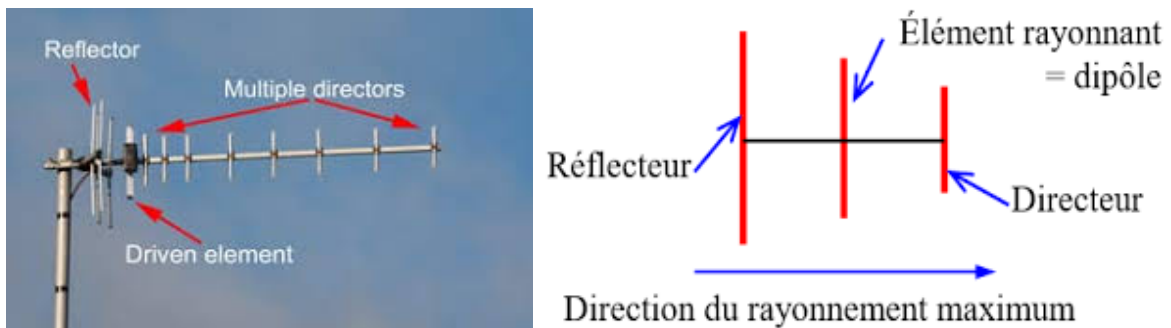


Figure I. 7: Antenne Yagi-Uda [I.5].

I.4.3. L'antenne hélicoïdale :

Une **polarisation circulaire**, essentielle pour réduire les perturbations liées aux rotations et mouvements orbitaux.

1.Caractéristiques :

- **Polarisation circulaire**, évitant les distorsions et pertes de signal.
- Adaptée aux **communications à longue distance** et au **suivi de position**.
- Résistante aux conditions spatiales extrêmes.

2.Applications :

- **Systèmes de navigation spatiale** (GPS, Galileo, GLONASS).
- **Communications des sondes et stations spatiales.**



Figure I. 8: Antenne Hélicoïdale

I.4.4 Les antennes à ouverture rayonnante :

I.4.4.1 Les antennes cornets :

Les **antennes cornets** possèdent une ouverture rayonnante dont la forme varie selon la **polarisation du signal**. Lorsque la **polarisation est linéaire**, l'ouverture adopte une **forme rectangulaire**, assurant une propagation uniforme du champ électromagnétique. En revanche, pour une **polarisation circulaire**, l'ouverture est conçue sous une **forme circulaire**, permettant une meilleure adaptation aux communications nécessitant une transmission stable quelle que soit l'orientation du récepteur. Ces antennes sont fréquemment utilisées en **radars, télécommunications et systèmes spatiaux**, où leur directivité et leur efficacité en haute fréquence sont particulièrement appréciées.



Rectangulaire



Cylindrique

Figure I. 9: Antenne cornet cylindrique et rectangulaire [I.2].

I.4.4.2 Antenne réflecteur parabolique :

Les **antennes à réflecteurs**, ou **paraboles**, sont constituées d'une **source d'émission** et d'un **réflecteur métallique**, généralement de forme **parabolique**. La source est positionnée au **foyer de la parabole**, où elle émet des **ondes électromagnétiques** vers le réflecteur. Grâce aux propriétés de la parabole, ces **ondes sont réfléchies de manière parallèle**, garantissant une **transmission focalisée et précise** dans une direction spécifique.

En ajustant la **position de la source** dans le plan focal, il est possible de **modifier l'orientation des rayons réfléchis** pour diriger le signal de façon optimale. Ces antennes sont largement utilisées pour **recevoir les signaux de satellites éloignés**, notamment dans les **systèmes de télécommunication** et les **réceptions télévisuelles**.

Pour minimiser les **perturbations météorologiques** comme la pluie et la neige, ces antennes sont souvent **protégées par un radôme**, qui préserve la qualité du signal. Les modèles conçus pour les **transmissions hertziennes** présentent une **forme distincte**, avec une **structure parabolique à l'arrière** et **conique à l'avant**, afin de protéger la **source située au foyer**. Cette configuration garantit des **performances optimales**, même dans des conditions climatiques difficiles.



Figure I. 10: Antenne réflecteur parabolique [I.3].

I.4.4.3 Les antennes lentilles :

Tout comme les **antennes paraboliques**, les **antennes lentilles** agissent comme des projecteurs d'ondes, convertissant une **onde sphérique** en **onde plane**. Ces deux types d'antennes présentent plusieurs similitudes, notamment leur capacité à **diriger et concentrer l'énergie électromagnétique** issue d'une source primaire vers une direction spécifique. Leur conception permet une transmission

efficace des signaux en réduisant la dispersion et en améliorant la directivité, ce qui les rend particulièrement adaptées aux applications en **radiocommunications et systèmes satellitaires**.

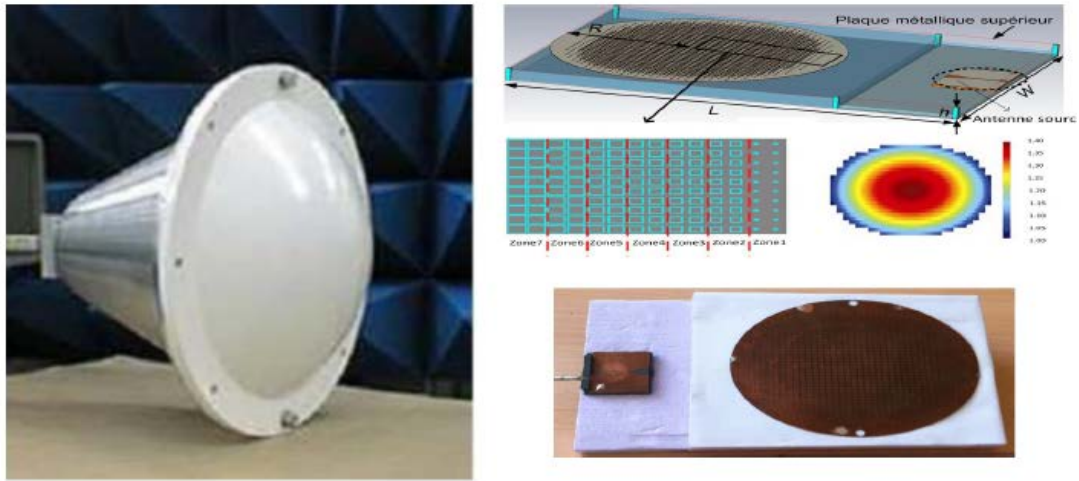


Figure I. 11: Les antennes lentilles [I.3].

Les **antennes à ouvertures rayonnantes** sont conçues pour produire des **diagrammes de rayonnement hautement directifs**, minimisant les **lobes secondaires** afin d'optimiser la transmission du signal dans une direction précise. Elles offrent une excellente focalisation du faisceau, ce qui les rend idéales pour les **communications longue distance** et les **systèmes de suivi**. Toutefois, leur principal inconvénient réside dans leur **encombrement volumique**, qui peut limiter leur intégration dans des environnements où l'espace disponible est restreint, notamment en aéronautique et en spatial. Malgré cette contrainte, elles restent un choix privilégié pour les applications nécessitant un **gain élevé et une précision accrue**.

I.4.5. Les réseaux d'antennes :

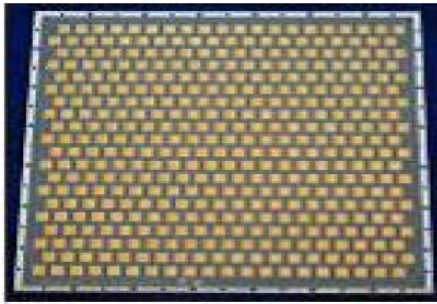
Une **antenne réseau** est composée d'un ensemble de plusieurs antennes identiques, disposées de manière organisée pour fonctionner collectivement. Cette configuration permet d'améliorer la **directivité**, le **gain** et les **performances de rayonnement**, adaptées aux communications avancées et aux systèmes de suivi longue distance.



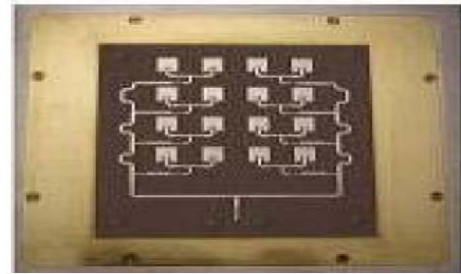
a) Réseau de cornets



b) Réseau de fentes



c) Réseau de cornets



d) Réseau de cornets



e) Réseau d'antennes actives

Figure I. 13: Types des réseaux d'antennes [I.6].

I.4.6. Antennes omnidirectionnelles :

L'**antenne omnidirectionnelle**, également appelée **antenne verticale** ou **antenne bâton**, est couramment utilisée dans les systèmes de connexion **Wi-Fi** et autres dispositifs sans fil. Elle est conçue pour **émettre un signal uniformément dans toutes les directions** avec un **rayonnement à 360°**, facilitant ainsi la réception et l'extension du signal à partir d'un point d'accès.

On la retrouve sur une large gamme d'équipements sans fil, où elle est généralement connectée via un **connecteur RP-SMA**, offrant un gain de **2 à 4 décibels** par défaut. Toutefois, pour améliorer ses performances et optimiser la portée du signal, ce gain peut être augmenté jusqu'à **9 à 15 décibels** en remplaçant l'antenne intérieure par un **câble coaxial adapté**. Grâce à cette flexibilité, l'antenne omnidirectionnelle constitue une solution efficace pour garantir une connexion stable et étendue dans un environnement réseau.



Figure I. 14: Antennes omnidirectionnelles [I.4].

I.4.7. Antenne imprimée (antenne patch) :

L'antenne imprimée, également connue sous le nom d'antenne patch, est une technologie moderne dont l'essor et l'adoption ne cessent de croître, en raison de ses performances optimisées et de sa facilité d'intégration aux systèmes de communication.

Les **antennes patch** se distinguent par leur **flexibilité de conception**, permettant d'adapter la forme des éléments métalliques en fonction des besoins de propagation et de répartition du rayonnement. Cette souplesse améliore leur **directivité**, minimise les **interférences**, et optimise des paramètres tels que la **polarisation et la bande passante**, garantissant une transmission efficace.

Grâce à leur **intégration facile aux circuits électroniques**, ces antennes sont largement exploitées dans les **communications sans fil, les télécommunications spatiales et les radars**, où la **précision et l'efficacité du rayonnement** sont essentielles.

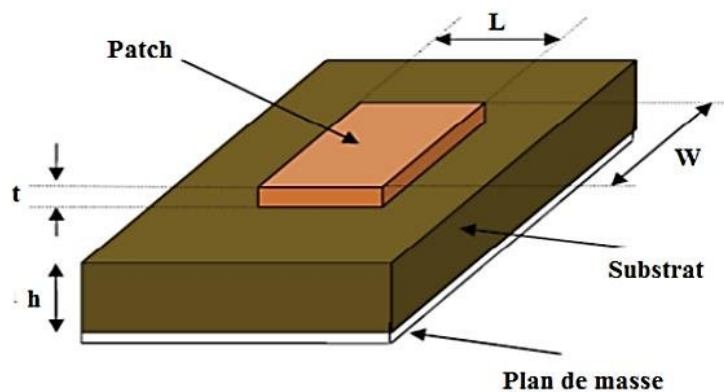


Figure I. 15: Antenne imprimée (antenne patch) [I.4].

I.4.8. Antenne Spirale (Spiral Antenna) :

L'**antenne spirale** est une antenne à large bande dont la géométrie repose sur une **forme spiralee**, généralement une **spirale logarithmique** ou **archimédienne**, réalisée avec un conducteur enroulé sur un plan. Elle est conçue pour **émettre ou recevoir des ondes électromagnétiques** sur une **large plage de fréquences** tout en maintenant des performances stables.

Ce type d'antenne est dit « **à résonance auto-similaire** », car sa structure géométrique se répète à différentes échelles, ce qui permet à l'antenne de fonctionner efficacement sur plusieurs longueurs d'onde.

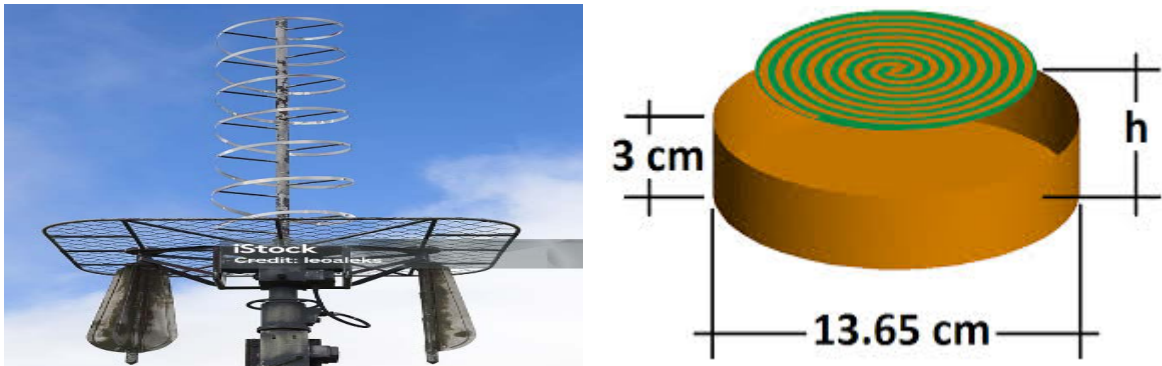


Figure I. 16: Antenne Spirale (Spiral Antenne) [I.3].

I.5. Les orbites :

Les antennes peuvent être classées en fonction de l'orbite des satellites avec lesquels elles interagissent :

- **Orbite basse (LEO – Low Earth Orbit)** : Située entre **600 et 1600 km** d'altitude, cette orbite est utilisée pour les satellites d'observation terrestre, de télécommunications et certains systèmes de navigation.
- **Orbite moyenne (MEO – Medium Earth Orbit)** : Comprend les satellites de moyenne altitude, souvent dédiés aux systèmes de positionnement comme le **GPS** et autres infrastructures de navigation.

- **Orbite géostationnaire (GEO – Géostationnaire Orbit)** : Située à **36 000 km** d'altitude, cette orbite permet aux satellites de rester fixes par rapport à la Terre, idéal pour les **communications télévisuelles, Internet par satellite et météorologie**.

Les **antennes GEO** sont généralement conçues pour fonctionner sur les **bandes Ku et Ka**, offrant des performances optimisées pour les satellites de télécommunications positionnés en **orbite géostationnaire**. Leur haute capacité en transmission garantit une couverture stable et continue pour les services de communication longue distance

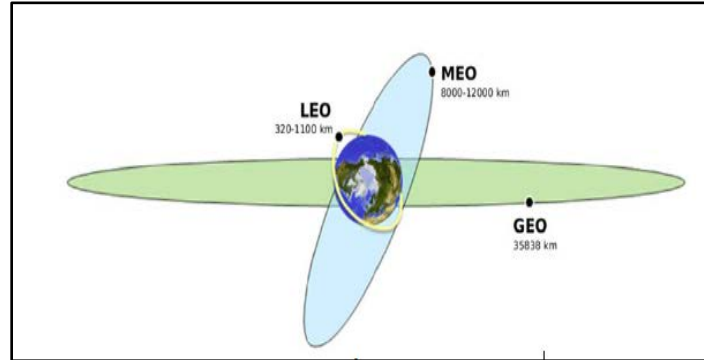


Figure I. 17: Les différents types d'orbites [I.8].

I.5.1. Les différentes applications des antennes :

I.5.1.1. Selon l'orbite :

Ce tableau représente des différents types d'orbites et leur mission ou bien applications possibles :

Orbite	Altitude	Missions possibles
Orbite basse LEO	600 – 1600 Km	Observation de la terre, météo Télécommunications (constellations)
Orbite moyenne MEO	10 000 – 20 000 Km	Télécommunications (constellations), positionnement par satellites, missions scientifiques
Orbite géostationnaire GEO	35 786 Km	Télécommunications, positionnement par satellites, Missions scientifique.

Tableau I. 1: Les différents types d'orbites et leur mission ou bien applications possibles [I.13].

I.5.1.2. Selon le type d'antenne :

Les antennes doivent être classées pour comprendre plus clairement leur structure physique et leur fonctionnalité. Il existe de nombreux types d'antennes en fonction des applications.

Type des antennes	Exemple	Applications
Antennes filaires	Antennes dipôle, Antenne monopolaire, Antenne hélice, Antenne boucle.	Applications personnelles, bâtiments, navires, automobiles, vaisseau spatiaux.
Antenne à ouverture	Guide d'onde (ouverture), antenne cornet.	Application encastrées, aéronef vaisseaux spatiaux.
Antennes à réflecteur	Réflecteurs paraboliques, Réflecteurs en coin.	Communication par micro-ondes, suivi des satellites, radioastronomie
Antenne à lentille	Plan convexe, Plan concave, Lentilles convexes-convexes, Lentilles concaves-concaves.	Utilisé pour les applications à très haute fréquence.
Antennes à micro-ruban	Patch métallique de forme circulaire ou rectangulaire au-dessus du plan de masse	Avion, vaisseaux spatiaux, satellites, missiles, voitures, téléphones portable, etc...
Antennes-réseaux	Antenne Yagi-Uda, réseau de microbandes, réseau d'ouvertures, réseau de guides d'ondes à fentes.	Utilisé pour les applications à très haut gain, principalement lorsqu'il est nécessaire de contrôler le diagramme de rayonnement.

Tableau I. 2: Les différents types d'antennes et leurs applications [I.13].

I.6. Caractéristiques des antennes :

Les caractéristiques principales d'une antenne sont :

- Coefficient de réflexion
- L'impédance d'entrée d'une antenne

- Le diagramme de rayonnement
- Efficacité
- Le gain
- Directivité
- Le rendement
- La bande passante
- La polarisation

I.6.1. Coefficient de réflexion (S_{11}) (adaptation) :

On étudie un système comprenant une antenne, un générateur et une ligne de transmission dont l'impédance caractéristique est Z_c . Ce dispositif permet d'acheminer l'énergie électromagnétique du générateur vers l'antenne tout en minimisant les pertes et les réflexions indésirables. L'adaptation d'impédance entre ces éléments est essentielle pour assurer un transfert optimal du signal.

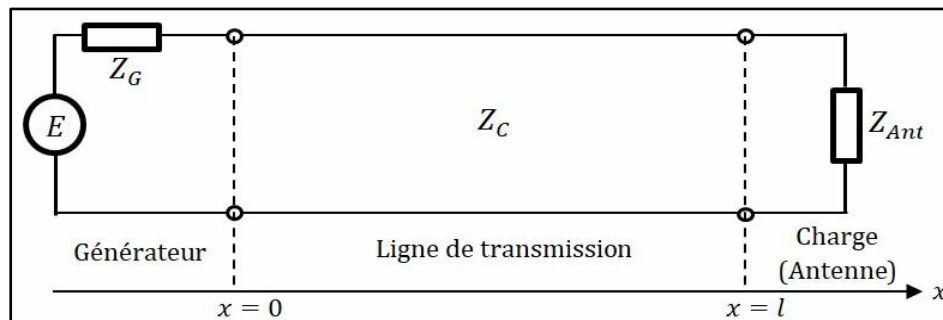


Figure I. 18: Schéma d'une antenne connectée à une ligne de transmission et un générateur [I.13].

On donne le paramètre de réflexion S_{11} ou Γ en $z = l$, par la formule suivante :

$$S_{11} = \Gamma = \frac{Z_{ant} - Z_c}{Z_{ant} + Z_c} \quad (I.1)$$

Le module du coefficient de réflexion est souvent exprimé en décibel (dB) et est noté $|S_{11}|$ et se définit comme suit :

$$|S_{11}|_{db} = 20 \log |S_{11}| \quad (I.2)$$

Le coefficient de réflexion joue un rôle clé dans la transmission de l'énergie via l'antenne. Dans un système électrique défini par les paramètres S, le S_{11} subit une forte atténuation à une fréquence précise appelée **fréquence de résonance**, optimisant ainsi la transmission de puissance entre le

générateur et la charge. Pour une adaptation efficace, S_{11} doit être d'au moins **-10 dB**, toute valeur inférieure empêchant une bonne adaptation.

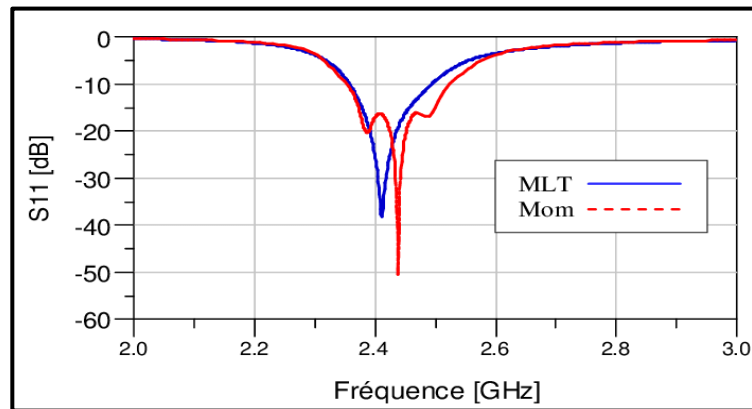


Figure I. 19: Représentation du coefficient de réflexion [I.17].

I.6.2. L'impédance d'entrée d'une antenne :

L'impédance d'entrée d'une antenne est l'impédance mesurée à ses bornes ou le rapport entre les composantes du champ électrique et magnétique. Son adaptation optimale garantit une transmission de puissance maximale et limite les pertes.

L'impédance de l'antenne est donnée par :

$$Z_{in} = R_a + X_a \quad (I.3)$$

$$R_a = R_r + R_p \quad (I.4)$$

Tel que :

R_r : résistance de rayonnement de l'antenne

R_p : résistance de perte de l'antenne

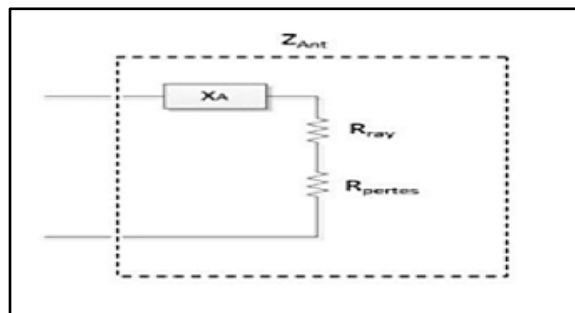


Figure I. 20: Représentation de l'impédance d'antenne [I.13]

L'impédance d'entrée de l'antenne peut s'écrire en fonction du coefficient de réflexion S_{11} sous la formule :

$$Z_{AUT} = Z_C * \frac{1 + |S_{11}|}{1 - |S_{11}|} \quad (I.5)$$

I.6.3. Le diagramme de rayonnement :

Le diagramme de rayonnement d'une antenne illustre la variation de la puissance émise dans différentes directions de l'espace. Il est directement influencé par la conception et la configuration de l'antenne.

Le diagramme de rayonnement peut être classé en deux formes principales, bien que leur variation dépende de la structure spécifique de l'antenne. Ces formes sont :

Omnidirectionnel :

Une antenne omnidirectionnelle émet uniformément dans toutes les directions sur un plan horizontal, offrant ainsi une couverture à 360 degrés.

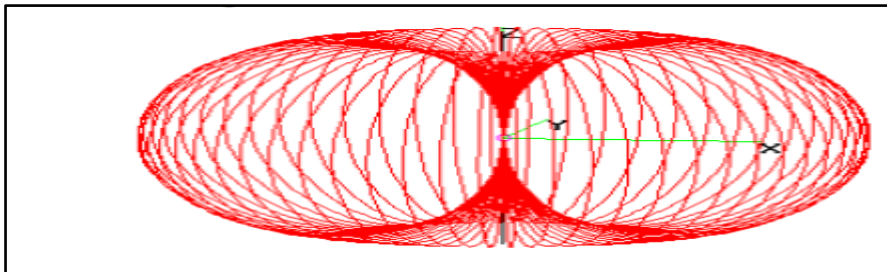


Figure I. 21: Diagramme de rayonnement de l'antenne omnidirectionnelle

Elle est employée lorsqu'une couverture omnidirectionnelle est nécessaire à partir de l'antenne, avec une répartition variable de la portée verticale. Cette antenne est une conception théorique utilisée pour uniformiser la directivité ou le gain d'une antenne réelle.

I.6.4. Directif :

Une antenne directive est un type d'antenne conçu pour concentrer son rayonnement dans une seule direction, optimisant ainsi le gain et la portée du signal. Contrairement aux antennes omnidirectionnelles, qui émettent uniformément dans toutes les directions, les antennes directives focalisent l'énergie électromagnétique vers une zone spécifique, ce qui améliore la qualité du signal et réduit les interférences extérieures.

Ces antennes sont largement utilisées dans les télécommunications, les radars et la radiodiffusion, où une transmission ciblée est nécessaire. Parmi les modèles les plus courants, on trouve les antennes paraboliques, les antennes Yagi-Uda et les antennes en réseau phasé, chacune

Ayant des caractéristiques adaptées à des besoins précis en matière de transmission et de réception de signaux.

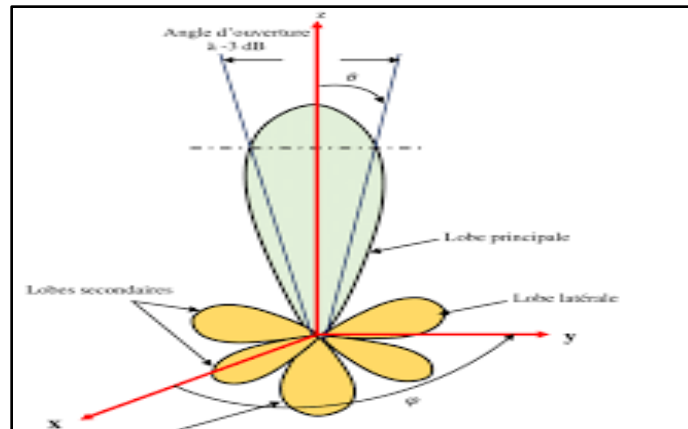


Figure I. 22: Diagramme de rayonnement de l'antenne directive [I.12].

I.6.5. Efficacité :

L'antenne présente plusieurs types d'efficacité, illustrés par la figure. L'efficacité totale e_0 est utilisée pour évaluer les pertes, tant au niveau des ports d'entrée que dans la structure même de l'antenne.

$$e_0 = e_r e_d e_c \quad (I.6)$$

Avec :

e_r : Efficacité de réflexion ($1 - |\Gamma|^2$)

e_c : Efficacité de conduction

e_d : Efficacité de diélectrique

Γ : Le coefficient de réflexion au port d'entrée de l'antenne

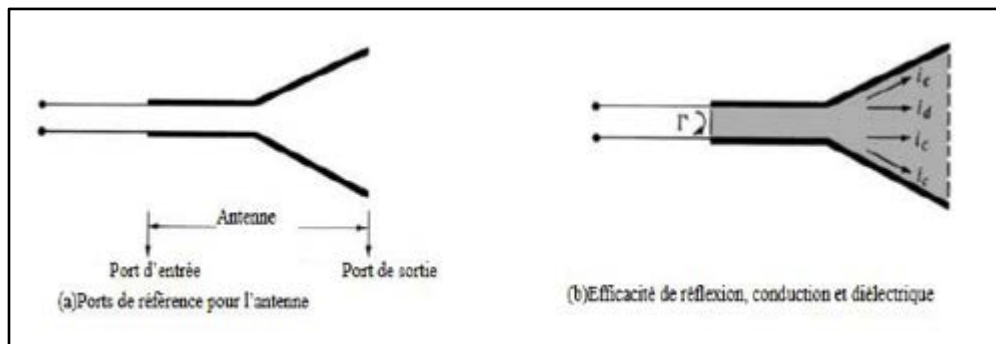


Figure I. 23: Ports de référence et les pertes d'une antenne [I.12].

I.6.6. Le gain :

Le gain $G(\theta, \varphi)$ d'une antenne dans une direction (θ, φ) est le rapport entre la puissance rayonnée dans une direction donnée $P(\theta, \varphi)$ sur la puissance que rayonnerait une antenne isotrope sans pertes.

Le gain G représente généralement la valeur maximale du rayonnement de l'antenne dans la direction spécifique (θ_0, φ_0) . Cette caractéristique reflète la capacité de l'antenne à concentrer l'énergie émise vers une zone précise, optimisant ainsi la transmission du signal.

$$G = \frac{4\pi * p(\theta_0, \varphi_0)}{P_{in}} \quad (I.7)$$

P_{in} : puissance totale d'entrée.

I.6.7. Le VSWR (Voltage Standing Wave Ratio) (ROS):

Le ROS, également appelé VSWR (Voltage Standing Wave Ratio), est lié au coefficient de réflexion, indiquant le niveau d'adaptation ou de désadaptation de l'impédance entre deux éléments. Lorsque l'adaptation est imparfaite, l'onde réfléchie et l'onde incidente se superposent, créant ainsi une onde stationnaire.

En cas de séparation d'impédance, l'émetteur émet une partie de la puissance $P1$ qui sera réfléchie au point de séparation, vers l'émetteur soit $P2$. Un $VSWR < 2$ assure une bonne performance. Le VSWR est donné par :

$$VSWR = \frac{P1 + P2}{P1 - P2} \quad (I.8)$$

Le rapport d'onde stationnaire est exprimé en fonction du coefficient de réflexion, permettant d'évaluer l'adaptation de l'impédance entre deux éléments d'un système de transmission.

$$VSWR = \frac{1 + |S_{11}|}{1 - |S_{11}|} \quad (I.9)$$

I.6.8. Directivité d'une antenne :

La directivité $D(\theta, \phi)$ d'une antenne dans une direction donnée correspond au rapport entre la puissance rayonnée par unité d'angle solide dans cette direction et la puissance émise par une source isotrope de référence par unité d'angle, pour une même puissance totale rayonnée.

$$D = \frac{4\pi * p(\theta, \phi)}{pr} \quad (I.10)$$

$p(\theta, \phi)$: Puissance rayonnée par unité d'angle solide.

pr : Puissance totale rayonnée.

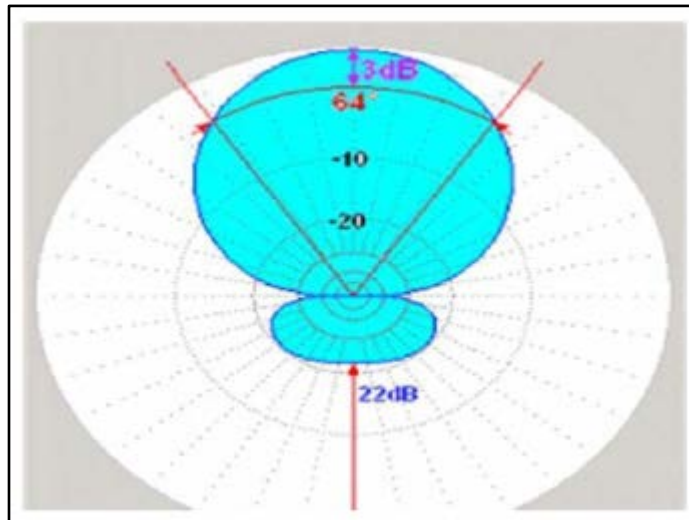


Figure I. 24: Directivité d'une antenne [I.10].

I.6.9. Rendement :

Le rendement d'une antenne désigne son efficacité à convertir l'énergie qu'elle reçoit en puissance rayonnée. Il est défini comme le rapport entre la puissance réellement émise sous forme de rayonnement électromagnétique et la puissance totale fournie à l'antenne. Un rendement élevé signifie que l'antenne minimise les pertes internes dues aux résistances, aux matériaux ou aux effets de dissipation, optimisant ainsi la transmission du signal.

On le note η :

$$\eta = \frac{P}{Pa} \quad (\text{I.11})$$

I.6.10. Bande de fréquence :

La **bande passante** d'une antenne est définie comme l'intervalle de fréquences pour lequel le **coefficient de réflexion** (ou paramètre S11) reste **inférieur à un seuil spécifié**. Ce seuil est généralement fixé à **-10 dB**, ce qui correspond à une adaptation d'impédance suffisante et à une puissance réfléchie inférieure à 10 %. Dans certains cas, un critère moins strict de **-6 dB** peut également être utilisé, notamment pour des applications où une perte modérée est tolérée [27].

La bande passante est généralement déterminée à partir de la **courbe du coefficient de réflexion** en fonction de la fréquence (voir figure I-17), où l'on identifie les **fréquences de coupure** inférieure et supérieure correspondant au seuil choisi.

Pour comparer les antennes fonctionnant à différentes fréquences, on exprime souvent la bande passante en **valeur relative**, selon la formule suivante :

Où :

$$BP (\%) = \frac{\Delta f}{f_0} \times 100 \quad (\text{I.12})$$

$$\Delta f = f_2 - f_1$$

F_0 : Est la fréquence centrale.

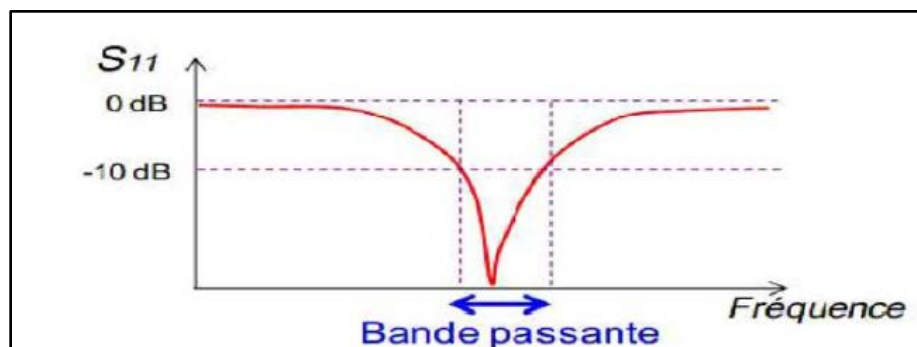


Figure I. 25: Illustration la bande passante a-10 dB d'une antenne[I.17].

En résumé :

Plage de fréquence(GHz)	Nom de la bande	Applications principales	Caractéristiques
1 - 2 GHz	Bande L	Communication par satellite, GPS, radars maritimes, communication mobile	Bonne propagation sur de longues distances, traversée d'obstacles comme les nuages.
2-4 GHz	Bande S	Radar, satellite, systèmes de navigation aérienne, Wi-Fi (2,4 GHz)	Utilisée dans les télécommunications sans fil et les radars à distance,
4 -8 GHz	Bande C	Communication par satellite, radar météorologique, télédétection, surveillance	Propagation stable dans des conditions météorologiques difficiles
8 -12 GHz	Bande X	Radar haute résolution applications militaires, satellite	Permet une pénétration efficace à travers des matériaux (ex, pluie).
12-18 GHz	Bande Ku	Télévision par satellite, communication par satellite, transmission de données	Utilisé pour transmission de télévision et les communications de données à haut débit via satellite.
18-26.5 GHz	Bande Ku	Radar, satellite, télédétection, surveillance météorologique.	Très utilisée pour des radars à haute résolution et détection de petites cibles.
26.5-40 GHz	Bande Ka	Communication par satellite à très haut débit, radar, télédétection	Permet des transmissions ultra-rapides et des radars à haute précision

40-75 GHz	Bande V	Communication par satellite, radar à haute fréquence, télédétection	Utilisée pour des communications sans fil très haute fréquence et des radars à haute résolution.
75-110 GHz	Bande W	Systèmes de communication sans fil, radar, télédétection	Permet des communications ultra haut débit et des applications radar à haute fréquence.

Tableau I. 3: Tableau récapitulatif des bandes de fréquence (1 – 300 GHz)

I.6.11. La polarisation :

La polarisation d’une antenne dans une direction spécifique correspond à la polarisation de l’onde qu’elle émet. Elle est définie par la trajectoire suivie au fil du temps par l’extrémité du vecteur champ électrique en un point fixe de l’espace, ainsi que par le sens de cette trajectoire, tel qu’il est perçu dans la direction de propagation.

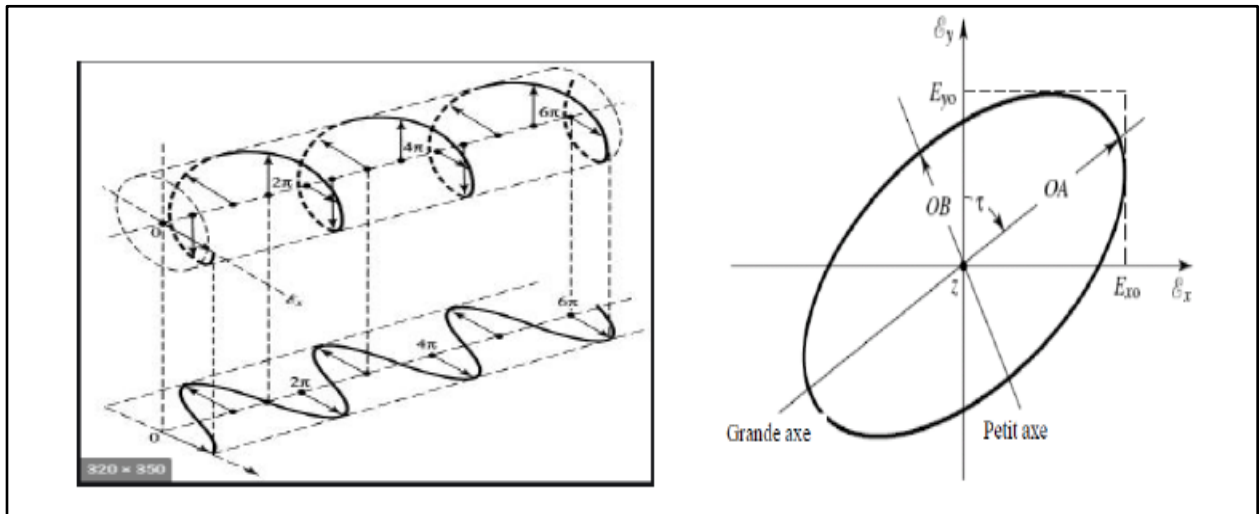


Figure I. 26: Rotation d’une onde plane et son ellipse de polarisation en fonction du temps [I.20].

Il existe trois types de polarisation :

I.6.11.1 Polarisation linéaire :

La polarisation est considérée comme linéaire si à chaque instant, le champ électrique est orienté selon une même direction. a polarisation elliptique présente un cas particulier lorsque le rapport EX/EY est soit nul, soit infini, ou lorsque les deux composantes sont soit en phase, soit en opposition de phase.

Une polarisation linéaire est qualifiée de **verticale** lorsque le vecteur du champ électrique est dirigé perpendiculairement à l'horizon, et **horizontale** lorsqu'il est orienté parallèlement à celui-ci.

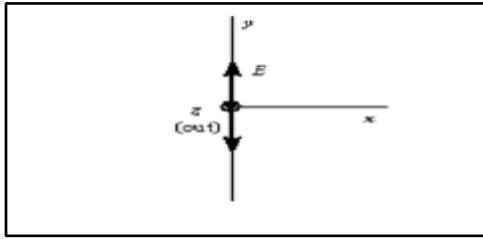


Figure I. 27: La polarisation linéaire [I.13].

I.6.11.2. Polarisation circulaire

La polarisation circulaire se produit lorsque le champ électrique trace un cercle dans le plan de l'onde. Selon son sens de rotation, elle peut être **droite** (antihoraire) ou **gauche** (horaire). Ce type de polarisation est particulièrement avantageux pour les communications sans fil, les radars et les satellites, car il assure une transmission stable, indépendamment de l'orientation de l'antenne réceptrice, et réduit les interférences liées aux réflexions.

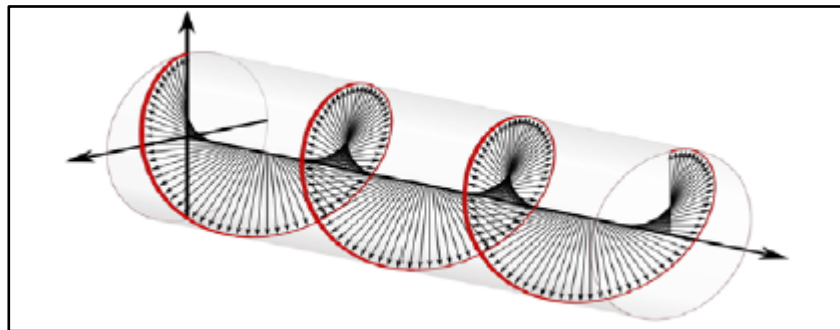


Figure I. 28: La polarisation circulaire [I.14].

I.6.11.3. Polarisation elliptique :

Lorsque le champ électrique E décrit une ellipse dans le plan de l'onde, on parle de **polarisation elliptique**, qui représente le cas le plus général de polarisation. Dans cette configuration, le champ électrique peut être décomposé en deux composantes perpendiculaires, chacune contribuant à la forme elliptique du rayonnement électromagnétique.

$$E_x = E_{x0} \cos(K_z - w_t) \quad (\text{I.13})$$

Où :

$W = 2\pi f$: est la pulsation de l'onde électromagnétique.

$k = 2\pi f c$: Le nombre d'onde et ϕ le déphasage entre les deux composantes.

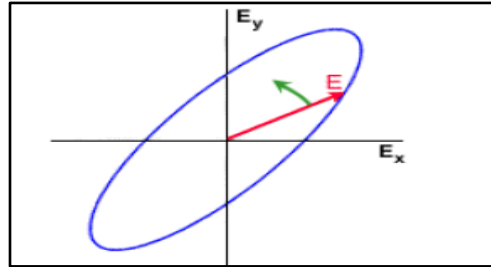


Figure I. 29: Polarisation elliptique [I.15].

Les antennes à ondes polarisées sont utilisées pour les transmissions en espace libre, notamment en faisceau hertzien et en communication longue distance. Elles permettent aussi d'analyser l'environnement de propagation en mesurant la polarisation croisée et d'optimiser la transmission en réduisant les interférences liées aux trajets multiples et à la diffraction.

Certaines antennes présentent une polarisation elliptique ou circulaire. Lorsqu'il y a un décalage entre la polarisation de l'antenne et celle de l'onde, le signal peut subir une atténuation extrême, pouvant même tendre vers une perte totale.

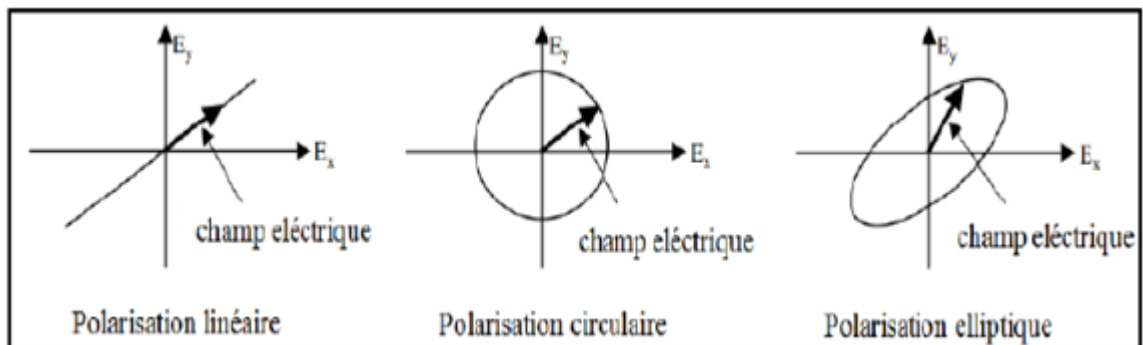


Figure I. 30: Les différents types de polarisation [I.5].

I.7. Exigences spécifiques des applications spatiales :

Dans le contexte des **communications satellitaires**, les antennes doivent répondre à des **exigences rigoureuses** pour assurer des performances optimales en environnement spatial. Voici les principaux critères techniques et fonctionnels à prendre en compte :

a) Résistance aux conditions extrêmes :

- **Températures extrêmes** : Les satellites sont exposés à des variations de température importantes (de -150°C à $+150^{\circ}\text{C}$), nécessitant des matériaux adaptés.
- **Vide spatial** : L'absence d'atmosphère impose des antennes conçues pour fonctionner sans refroidissement par convection.
- **Radiations cosmiques** : Les équipements doivent être protégés contre les radiations ionisantes pouvant altérer leur fonctionnement.

b) Miniaturisation et optimisation du poids :

- Les satellites étant soumis à des **contraintes de masse**, les antennes doivent être **compactes et légères** pour réduire les coûts de lancement et optimiser l'espace disponible.
- L'intégration sur **puce avec semi-conducteurs** est essentielle pour minimiser l'encombrement tout en garantissant des performances élevées.

c) Fiabilité et durée de vie prolongée :

- Les antennes spatiales doivent fonctionner **sans maintenance** sur des périodes de plusieurs années.
- Elles doivent être **robustes**, capables de résister aux conditions extrêmes sans dégradation significative de leurs propriétés électromagnétiques.

d) Performance en haute fréquence (bande V) :

- L'**atténuation atmosphérique** en bande V : doit être prise en compte pour compenser les pertes de signal et garantir une transmission stable.
- **Directivité optimisée** : Les antennes doivent avoir un **gain élevé** pour maximiser la portée et la qualité des communications inter-satellites et avec les stations au sol.

e) Adaptabilité aux missions spatiales :

- Les satellites de télécommunications nécessitent des **antennes orientables** ou à **réseau phasé** pour ajuster la couverture du signal en fonction des besoins.

- Les antennes doivent être compatibles avec les protocoles de **communication avancés**, notamment pour les **réseaux haute fréquence et les futurs systèmes de transmission en 6G**.

Ces exigences dictent les innovations en **conception, matériaux et technologies d'intégration**, essentielles pour développer des antennes sur puce adaptées aux systèmes satellitaires modernes en bande V

I.7.1. La bande V :

a) Définition :

La **bande V** correspond à une plage de fréquences radio comprise entre **50 GHz et 75 GHz**, située dans le domaine des **ondes millimétriques** (MMW, Millimeter Waves). Ces fréquences sont caractérisées par des longueurs d'onde courtes (entre 4 mm et 6 mm), ce qui les rend idéales pour des applications nécessitant une haute résolution spatiale et des débits de transmission élevés.

b) Caractéristiques de la bande V :

La bande V est une plage de fréquences **haute fréquence**, ce qui lui confère plusieurs propriétés spécifiques :

- **Longueur d'onde courte** (entre 4 mm et 6 mm), facilitant la miniaturisation des antennes.
- **Bande passante étendue**, offrant des débits de transmission très élevés.
- **Atténuation atmosphérique marquée**, notamment due à l'absorption par la vapeur d'eau et l'oxygène.
- **Faible pénétration à travers les obstacles solides**, limitant son utilisation en environnements terrestres obstrués.

c) Les avantages et les inconvénients de la bande V :

I.7.2. Les avantages utiliser une bande V :

La bande V (50–75 GHz) offre des **débits élevés**, une **faible latence** et permet la **miniaturisation des équipements**, optimisant ainsi l'intégration des antennes sur puce pour les satellites. Elle améliore la **disponibilité du spectre**, réduisant les interférences et offrant une **confidentialité accrue** grâce à sa faible pénétration à travers les obstacles. Technologie clé pour les **réseaux 6G et les communications inter-satellites**, elle ouvre des perspectives innovantes malgré les défis liés à l'atténuation atmosphérique qui nécessitent des solutions adaptées.

I.7.3. Les inconvénients à utiliser une bande V :

La bande V (50–75 GHz) présente des défis liés à son **forte atténuation atmosphérique**, qui réduit la portée du signal et nécessite des mécanismes de correction avancés. Sa **complexité technologique** impose l'utilisation de matériaux semi-conducteurs optimisés, notamment pour les antennes sur puce et les amplificateurs haute fréquence. De plus, son **coût de mise en œuvre élevé** représente un frein au développement des équipements nécessaires. Sa **faible pénétration à travers les obstacles solides** limite son usage en environnements terrestres, bien qu'elle améliore la sécurité des transmissions. Enfin, l'exploitation efficace de cette bande demande des **techniques avancées** telles que les antennes à haut gain et les amplificateurs performants pour compenser les pertes. Malgré ces défis, elle reste une **technologie clé** pour les communications satellitaires et les télécommunications ultra-hautes débit du futur

I.7.4. Applications principales de la bande V :

- **Télécommunications et réseaux professionnels** : Intégrée dans des infrastructures privées pour les entreprises et les organisations nécessitant des réseaux de communication indépendants **Communications satellitaires** : Optimisation des transmissions inter-satellites et avec les stations terrestres pour une connectivité améliorée.
- **Télécommunications avancées (6G, réseaux ultra-haut débit)** : Réduction de la latence et augmentation des capacités de transmission, particulièrement en milieux urbains denses.
- **Radars et imagerie haute résolution** : Détection précise d'objets et applications météorologiques et spatiales.
- **Sécurité et confidentialité** : Communications sécurisées avec faible risque d'interception.
- **Applications industrielles et scientifiques** : Gestion des dispositifs électroniques en haute fréquence et analyse avancée des semi-conducteurs.

I.8. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté les bases fondamentales des antennes, leurs types, ainsi que les paramètres qui caractérisent leur performance. Nous avons ensuite examiné les antennes utilisées dans les communications par satellite, en mettant en lumière les exigences particulières imposées par l'environnement spatial. Enfin, nous avons introduit la bande V comme une opportunité stratégique pour les futures générations de systèmes satellitaires, tout en soulignant ses avantages et ses défis techniques.

Ce socle de connaissances générales permettra d'aborder, dans les chapitres suivants, les aspects plus spécifiques de la conception et de l'intégration d'antennes sur puce destinées à fonctionner dans cette bande de fréquences.

Chapitre II

Généralité sur la

technologie on chips

II.1 Introduction :

Dans le domaine des systèmes de communication avancés, la technologie On-Chip (System-on-Chip, SoC) joue un rôle fondamental en permettant l'intégration de multiples fonctions électroniques sur une seule puce de semi-conducteur. Cette approche révolutionnaire optimise la miniaturisation, la performance et la consommation énergétique, répondant ainsi aux exigences croissantes des applications satellitaires en bande V (40-75 GHz).

La technologie **On-Chip** a transformé les systèmes embarqués spatiaux grâce à l'intégration des **circuits haute fréquence** et des **antennes sur puce**, permettant une meilleure compacité, une réduction des pertes et une efficacité énergétique accrue.

Cependant, elle présente encore plusieurs **limitations** : faible puissance de sortie en bande V, problèmes de dissipation thermique, complexité de fabrication due à l'usage de matériaux variés, sensibilité aux radiations et conception technique complexe. Pour surmonter ces défis, les **tendances actuelles** incluent : les **circuits hybrides 3D**, les **antennes reconfigurables**, l'optimisation **thermique**, et l'**intégration d'IA embarquée** pour améliorer l'autonomie et la fiabilité en environnement spatial.

[II.1]

Ce chapitre explore les principes fondamentaux de la technologie On-Chip, son évolution, ses avantages et défis, ainsi que son impact sur les antennes intégrées pour les applications satellitaires. Nous analyserons également les méthodes de conception, les matériaux utilisés et les perspectives d'avenir de cette technologie dans le contexte des communications spatiales

II.2. Description d'une antenne patch :

Une antenne patch est une antenne imprimée composée de plusieurs éléments essentiels qui influencent ses performances et son efficacité. Voici ses principales caractéristiques :

II.2.1 Plan de masse (Ground Plane) :

Le plan de masse est une couche métallique de haute conductivité, généralement en cuivre, située sur la face inférieure du substrat diélectrique. Son rôle est crucial, car il permet de réfléchir et de guider les ondes électromagnétiques émises par l'élément rayonnant, contribuant ainsi à l'amélioration du rayonnement de l'antenne.

II.2.2. Élément rayonnant (Patch) :

L'élément rayonnant est une plaque métallique placée sur la face supérieure du substrat. Il est généralement fabriqué à partir de matériaux conducteurs tels que le cuivre ou l'or, en raison de leur excellente conductivité électrique. Sa géométrie est définie par :

- **Longueur (L)** : Déterminée en fonction de la fréquence de fonctionnement de l'antenne.
- **Largeur (W)** : Influence l'impédance et la bande passante de l'antenne.
- **Positionnement** : Situé sur le sommet du substrat, il constitue la zone où le rayonnement électromagnétique est généré.

L'élément rayonnant est conçu pour émettre des ondes électromagnétiques dans une direction spécifique, ce qui le rend particulièrement adapté aux applications nécessitant une directivité contrôlée.

II.2.3. Substrat diélectrique (Diélectrique Substrat) :

Le substrat diélectrique est un matériau isolant placé entre le plan de masse et l'élément rayonnant. Il joue un rôle crucial dans les performances de l'antenne en influençant la propagation des ondes électromagnétiques. Ses principales caractéristiques sont :

- **Hauteur (h)** : Généralement faible par rapport à la longueur d'onde de fonctionnement. Toutefois, elle ne doit pas être inférieure à **0,025 fois la longueur d'onde**, sous peine de dégrader l'efficacité de l'antenne.
- **Permittivité relative (ϵ_r)** : Un paramètre clé qui permet d'augmenter la puissance rayonnée, de réduire les pertes dues à l'effet Joule et d'améliorer la bande passante de l'antenne

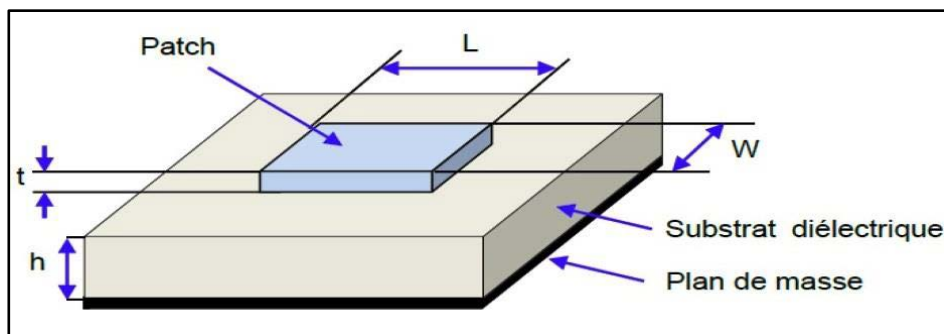


Figure II. 1: Structure d'une antenne patch [II.3].

Grâce à cette structure optimisée, les antennes patch sont largement utilisées dans les systèmes de communication sans fil, notamment pour leur faible encombrement, leur facilité d'intégration et leur capacité à fonctionner à des fréquences élevées. Elles sont couramment employées dans les technologies de télécommunication, les radars, les satellites.

II.3. Les différentes formes d'une antenne patch :

L'élément rayonnant d'une antenne patch peut adopter différentes formes, telles que rectangulaire, carrée, circulaire ou encore un dipôle de dimension proche de la demi-longueur d'onde ($\lambda/2$). Ces configurations sont les plus couramment utilisées en raison de leur simplicité de conception et de fabrication, ainsi que de leurs propriétés optimales en matière de diagramme de rayonnement. Ils ont la particularité de présenter une large bande passante et d'occuper très peu d'espace, ce qui les rend particulièrement adaptés à la réalisation de réseaux d'antennes [II.4].

Parmi toutes les formes des éléments rayonnants, le rectangle est le plus facile à appréhender pour la compréhension des mécanismes de rayonnement des antennes patch.

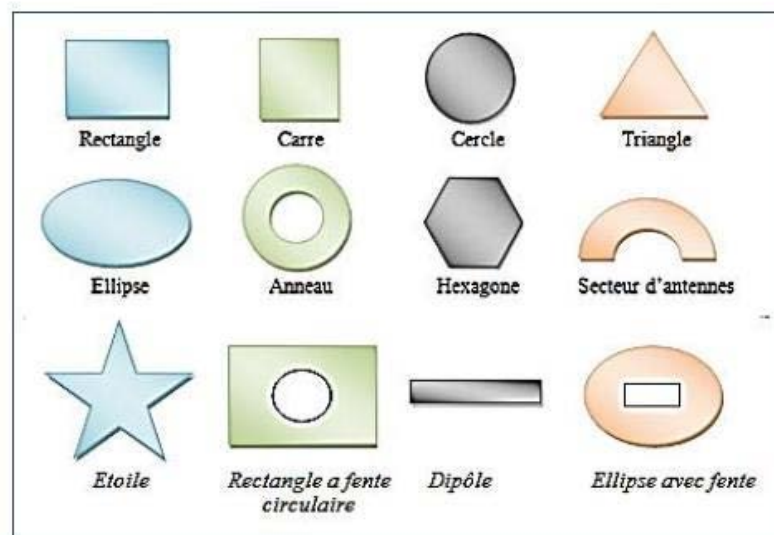


Figure II. 2: Différentes forme d'élément rayonnant [I.5].

II.4. L'utilisations des antennes patch :

Les antennes patch, dérivées de la technologie des circuits imprimés, sont largement utilisées dans les télécommunications, les radars, les satellites, les systèmes GPS et les dispositifs IoT. Elles fonctionnent sur une large gamme de fréquences (**100 MHz à 100 GHz**) [II.6] et offrent plusieurs avantages : **faible poids, volume réduit, conformabilité** et **intégration facile avec les circuits micro-ondes**. [II.7]

Cependant, elles présentent aussi des limites, notamment une **bande passante restreinte**, une **efficacité réduite** et une **sensibilité aux conditions environnementales**. Malgré ces inconvénients, leur compacité et leur adaptabilité en font des composants essentiels dans les systèmes modernes de communication.

Critère	Avantages	Inconvénients	Applications
Taille compact	Design plat et léger	Bande passante limitée	Télécommunications mobiles
Facilité de fabrication	Facile à produire en masse	Sensible aux pertes diélectriques	Wi-Fi Bluetooth
Coût	Peu coûteuse en production	Faible puissance rayonnée	Systèmes GPS
Directivité	Peut être conçue pour être directive	Gain relativement faible	Radar et télédétection
Polarisation	Peut être conçue pour différentes polarisations	Sensible aux interférences	RFID et capteurs sans fil
Intégration	Facile à intégrer sur circuits imprimés	Performances affectées par le substrat	Satellites et aéronautique

Tableau II. 1: Les différents avantages et inconvénients et applications les antennes patch [II.8]

II.5. Géométrie Antenne Imprimée :

L'antenne micro-ruban est constituée d'une fine couche métallique dont l'épaisseur est très faible par rapport à la longueur d'onde dans l'espace libre λ_0 ($e \ll \lambda_0$). Cette couche conductrice est déposée sur un substrat diélectrique de hauteur h , également petite devant λ_0 ($h \ll \lambda_0$), et placée au-dessus d'un plan de masse.

À la fréquence de résonance, l'excitation du résonateur engendre des champs électriques diffractés en phase sur les bords de l'antenne, favorisant ainsi le rayonnement électromagnétique. L'élément rayonnant, appelé **patch**, adopte généralement des formes géométriques simples telles que le **carré**, le **rectangle**, le **cercle** ou le **triangle**, ces configurations étant privilégiées pour leur simplicité d'analyse et de conception.

Les performances électriques de l'antenne dépendent directement de plusieurs paramètres : la **géométrie et les dimensions du patch**, la **hauteur du substrat** et la **nature du matériau diélectrique utilisé**. Ces facteurs influencent la bande passante, l'efficacité de rayonnement et la directivité de l'antenne, jouant un rôle clé dans son optimisation pour diverses applications.

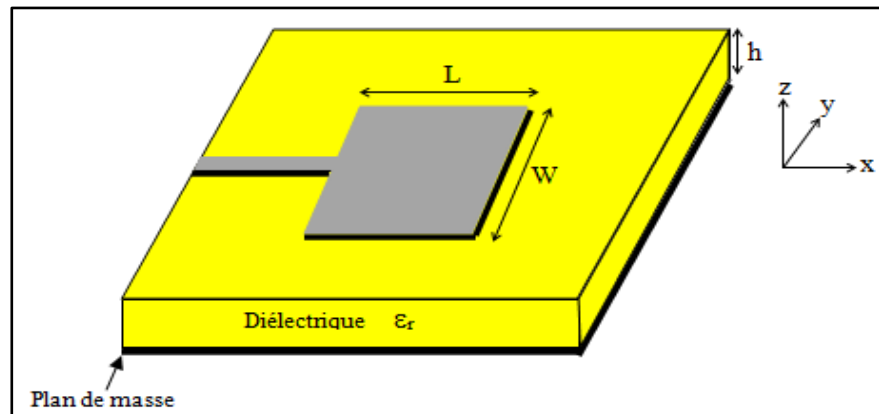


Figure II. 3: Antenne patch micro-ruban [II.3].

II.6. Les paramètres géométriques de l'élément rayonnant :

La détermination des paramètres géométriques de l'élément rayonnant est basée sur le calcul de la permittivité effective en fonction de la largeur du patch W et le calcul de la longueur L du patch en fonction de la permittivité effective.

Dans une ligne micro-ruban, la propagation des ondes électromagnétiques se fait simultanément à travers le **milieu diélectrique** et l'**air**. Pour simplifier la modélisation, ces deux milieux sont remplacés par un **milieu équivalent effectif**, caractérisé par une **permittivité diélectrique effective**, qui prend en compte l'influence des deux environnements sur la propagation des ondes. Cette permittivité effective permet d'approximer le comportement réel des ondes dans la structure et d'optimiser les calculs liés aux performances de l'antenne. [II.10]

$$\varepsilon_{\text{eff}} = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2 \left(1 + \frac{12h}{w}\right)^2} \quad (\text{II.1})$$

Le patch rectangulaire représente une longueur effective, car le rayonnement se base sur la longueur réelle ainsi que les deux fentes. Pour le patch rectangulaire la longueur L est étendue de deux ΔL (Figure II-4).

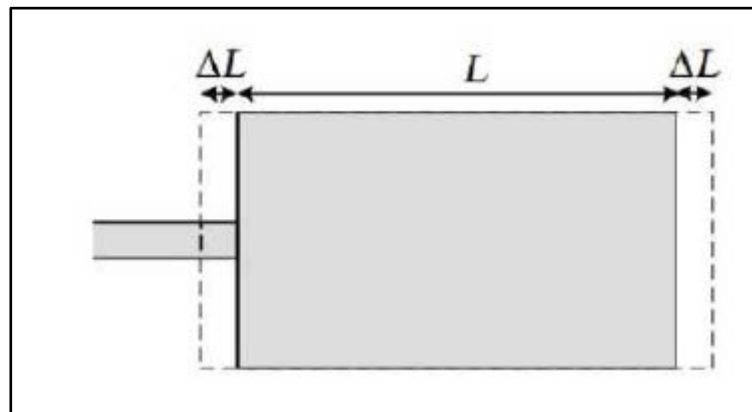


Figure II. 4: Extension de la longueur physique L [I.11]

$$L = \frac{C}{3f \sqrt{\varepsilon_{\text{eff}}}} - 2\Delta L \quad (\text{II.2})$$

Avec :

Cette extension en L est donnée par la formule de Hammerstad :

$$\Delta L = 0.412h \frac{(\varepsilon_{\text{reff}} + 0.3) \left(\frac{w}{h} + 0.264 \right)}{(\varepsilon_{\text{reff}} - 0.258) \left(\frac{w}{h} + 0.8 \right)} \quad (\text{II.3})$$

Où :

- C : la célérité de la lumière dans l'air
- F : la fréquence
- L : la longueur résonante du patch
- W : largeur du patch
- h : l'épaisseur du substrat
- eff : permittivité effective du milieu,

La longueur effective L_{eff} du patch devient alors :

$$L_{\text{eff}} = L + 2\Delta L \quad (\text{II.4})$$

- La fréquence de résonance f_r est donnée par :

$$f_r = \frac{C}{2L_{\text{eff}} \sqrt{\varepsilon_{\text{eff}}}} \quad (\text{II.5})$$

Cependant, la largeur du patch W est calculée à partir de la formule :

$$W = \frac{c}{2f_r} = \sqrt{\frac{\varepsilon_r + 1}{2}} \quad (\text{II.6})$$

II.6.1. Calculs des dimensions théoriques :

L'antenne patch est composée d'un **élément rayonnant** de forme carrée, caractérisé par une **longueur L** et une **largeur W**, imprimé sur un **substrat diélectrique** d'épaisseur **h** et de **permittivité relative ϵ_r** . Le tableau suivant présente les équations utilisées pour déterminer les dimensions et les paramètres électromagnétiques de l'antenne à une fréquence donnée 60 GHz.

Paramètre d'antenne	Equations
Longueur du patch (L)	$L = l_{eff} - 2\Delta L$
Longueur effective (Leff)	$L_{eff} = \frac{c}{2f_r \sqrt{\epsilon_{reff}}}$
L'extension de la longueur (ΔL)	$\Delta L = 0.412h \frac{(\epsilon_{reff} + 0.3) \left(\frac{W}{h} + 0.264\right)}{(\epsilon_{reff} - 0.258) \left(\frac{W}{h} + 0.8\right)}$
Constante diélectrique (ϵ_{reff})	$\epsilon_{reff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[1 + 12 \frac{h}{W}\right]^{-1/2}$
Largeur du patch (W)	$W = \frac{c}{2f_r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}}$
Longueur du substrat (L_g)	$L_g = 1 + 11 + 6 \times h$
Largeur du substrat (W_g)	$W_g = W + 6 \times h$
L'impédance caractéristique de la ligne microruban	$ZC = \frac{119.9}{\sqrt{(2\epsilon_r + 1)}} \left[\ln \left(4 \frac{h}{wf} + \sqrt{16 \left(\left(\frac{h}{wf} \right)^2 + 2} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1} \right) \left(\ln \frac{\pi}{2} + \frac{1}{\epsilon_r} \ln \frac{4}{h} \right)} \right]$

Tableau II. 2: : tableau des équations utilisées [I.12].

II.7. Généralités sur la miniaturisation :

Au cours des dernières décennies, les télécommunications ont connu une croissance fulgurante. Les avancées technologiques des appareils mobiles et des tablettes ont rendu ces dispositifs essentiels à notre quotidien.

De nouvelles techniques permettent la miniaturisation des dispositifs électroniques. Plus de leurs petites tailles, ces appareils ont l'avantage de pouvoir communiquer sans fils, et pour cela, ils ont besoin d'un élément primordial qui est l'antenne.

Aujourd'hui, l'antenne joue un rôle essentiel, mais le défi consiste à en minimiser la taille autant que possible.

La miniaturisation d'une antenne consiste à réduire ses dimensions, sa surface, son volume à fréquence de résonance. Elle doit être intégrée au plus près de l'antenne des circuits d'adaptation nécessaire à son fonctionnement.

Pour cela, des limites théoriques ont été établies par WHEELER 1947 et CHU 1948, ces dernières déterminent comment la taille de l'antenne et la bande passante (ou son facteur de qualité) sont reliées [II.15].

II.7.1. Définition d'une antenne miniature :

Une antenne miniature, ou électriquement petite, est une antenne dont la taille est significativement inférieure à la longueur d'onde correspondant à sa fréquence de fonctionnement.

WHEELER indique qu'une antenne pouvait être considérée comme électriquement petite si ses dimensions maximales étaient inférieures à « K » qui représente le nombre d'onde.

$$k = \frac{2\pi}{\gamma} \quad (\text{II.7})$$

Avec « γ » : la longueur d'onde de l'antenne à sa fréquence d'utilisation.

II.7.2. Les limites fondamentales des antennes miniatures :

II.7.2.A. Le facteur de qualité :

L'objectif de la miniaturisation des antennes est de diminuer leur taille tout en maintenant des performances électromagnétiques optimales, notamment une bande passante adéquate et un bon gain. Toutefois, le **facteur de qualité (Q)** joue un rôle limitant, car il est **inversement proportionnel à la bande passante** : plus le facteur de qualité est élevé, plus la bande passante est réduite

C'est un paramètre intrinsèque qui est défini comme dans l'équation suivante :

$$Q = \frac{2w_0 \text{Max}(w_e, w_m)}{PA} \quad (\text{II.8})$$

W_e et W_m sont les quantités moyennes d'énergie stockée dans l'antenne. P_A : c'est la puissance reçue par l'antenne.

II.7.2.B. L'efficacité rayonnée :

Elle est définie par le rapport entre la puissance rayonnée et celle reçue par l'antenne. Les pertes inhérentes à l'antenne sont généralement représentées par une résistance de perte en série, notée **RLOSS**.

On écrit l'efficacité rayonnée de la manière suivante :

$$\eta = \frac{R_{\text{rad}}}{R_{\text{rad}} + R_{\text{loss}}} = \frac{R_{\text{rad}}}{R_a} \quad (\text{II.9})$$

II.8. Technologie on chips :

L'évolution rapide des technologies de communication et la miniaturisation des systèmes électroniques ont conduit à l'émergence de solutions de plus en plus intégrées, compactes et performantes. Dans ce contexte, la technologie **On-Chip** (ou **System-on-Chip**, Soc) s'impose comme un axe majeur d'innovation, en particulier dans les domaines à fortes contraintes d'encombrement, de poids et de consommation énergétique, tels que l'aérospatial et les communications satellitaires.

La technologie On-Chip (System-on-Chip) permet d'intégrer plusieurs fonctions électroniques – traitement, mémoire, RF, et antenne – sur une seule puce semi-conductrice. Cette approche réduit l'encombrement, la consommation et les pertes, tout en améliorant les performances. Dans le domaine spatial, notamment pour les applications en bande V, l'intégration d'une antenne sur puce est une solution innovante répondant aux exigences de miniaturisation et de fiabilité, en exploitant pleinement les capacités.

II.8.1. Définition de la technologie On-Chip :

Un **System-on-Chip (SoC)** est un circuit intégré unique qui regroupe l'ensemble des composants nécessaires au fonctionnement d'un système électronique complet. Il peut inclure un processeur (CPU), de la mémoire, des unités de traitement graphique, des modules de communication RF, des

convertisseurs analogique/numérique (ADC/DAC) et parfois même des antennes. Cette architecture vise à optimiser les performances, réduire la consommation d'énergie, la taille du système et les coûts de fabrication, tout en améliorant l'efficacité globale.

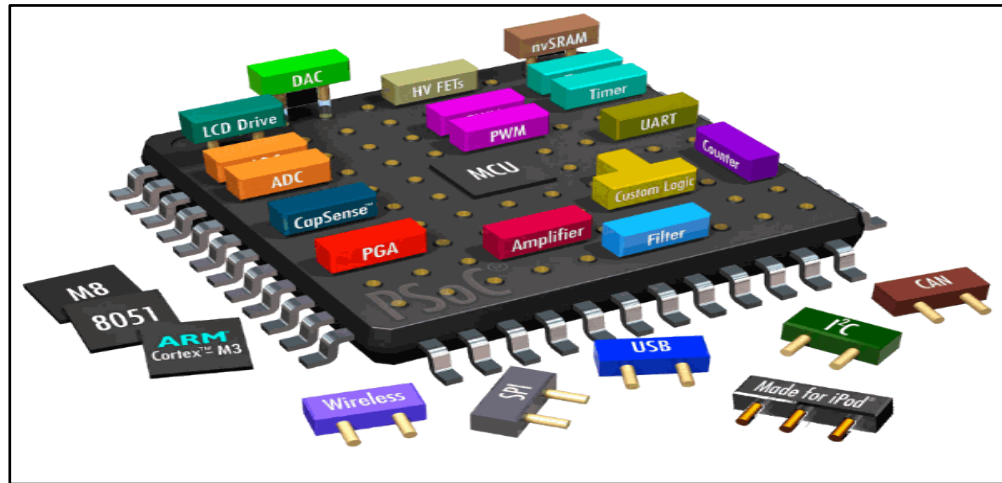


Figure II. 5: Architecture d'un SoC : blocs fonctionnels intégrés (mémoire, traitement, interfaces) [II.24].

II.8.2. Semi-conducteurs utilisés en technologie On-Chip :

II.8.2.A. Silicium (Si):

Le **silicium (Si)** est un **matériau semi-conducteur élémentaire** de la **famille du groupe IV** du tableau périodique. Il est **largement utilisé** dans l'industrie électronique en raison de sa **disponibilité abondante**, de son **faible coût**, et de sa **compatibilité avec les technologies de fabrication modernes** telles que le **CMOS (Complementary Métal-Oxide-Semi-conductor)**. Le silicium est le cœur de la majorité des **circuits intégrés (CI)**, des **microprocesseurs**, des **mémoires**, et des **capteurs** dans les systèmes électroniques et informatiques.

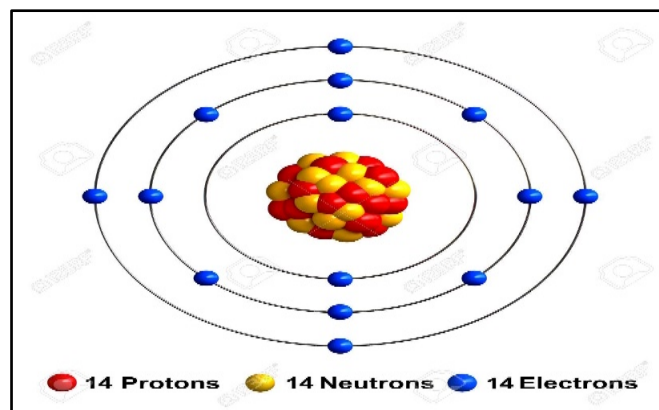


Figure II. 6: La Structure atomique du silicium [II.24].

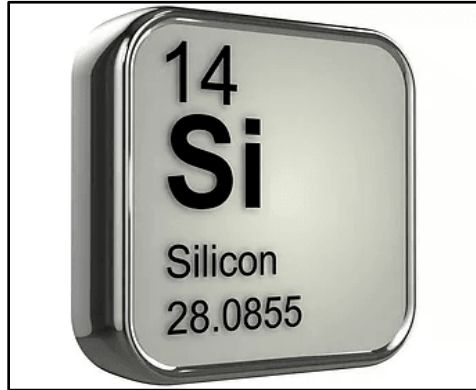


Figure II. 7: Fiche technique du silicium : propriétés élémentaires (Si, 14, 28.0855) [II.24].

II.8.2.B. Avantages du Silicium (Si) en technologie On-Chip :

- ✓ **Faible coût** : Le silicium est abondant et bon marché à extraire et à traiter.
- ✓ **Technologie CMOS mature** : Large adoption dans l'industrie avec des procédés bien maîtrisés pour l'intégration de circuits numériques et analogiques.
- ✓ **Compatibilité avec les systèmes intégrés** : Permet d'intégrer une multitude de fonctions (logique, mémoire, communication) sur une seule puce (System-on-Chip).

II.8.2.C. Inconvénients du Silicium (Si) en technologie On-Chip :

- ✓ **Pertes à haute fréquence** : Pertes importantes au-delà de 30 GHz, limitant les performances RF
- ✓ **Efficacité limitée pour les antennes intégrées**: Pertes d'énergie dues à l'absorption dans le substrat, réduisant le gain des antennes On-Chip.
- ✓ **Mobilité électronique faible** : Moins performant que d'autres matériaux comme GaAs ou GaN pour les applications RF à haute fréquence

II.8.2.D. Application Silicium (Si) en technologie On-Chip :

- ✓ **Prototypage de systèmes intégrés** : Le silicium est largement utilisé pour le **prototypage** de circuits et de systèmes intégrés (ex. : cartes de développement, FPGA)

- ✓ **Circuits RF à basse et moyenne fréquence** : Les circuits **RF en silicium** sont utilisés dans des technologies comme le **Wi-Fi, Bluetooth, 4G**, et d'autres communications sans fil dans la gamme de fréquence allant jusqu'à 20 GHz.
- ✓ **Technologie CMOS RF** : Intégration de **circuit RF** dans des technologies **CMOS** pour des applications comme les **systèmes de communication sans fil**, les **réseaux de capteurs**, et les **équipements mobiles**

II.8.3. Silicium-Germanium (SiGe) :

Le **Silicium-Germanium (SiGe)** est un **alliage semi-conducteur** composé de **silicium (Si)** et de **germanium (Ge)**, principalement utilisé dans les **technologies On-Chip** pour améliorer les performances des circuits électroniques, notamment dans les applications à haute fréquence.



Figure II. 8 : : La Structure électronique de Silicium-Germanium (SiGe) [II.20].

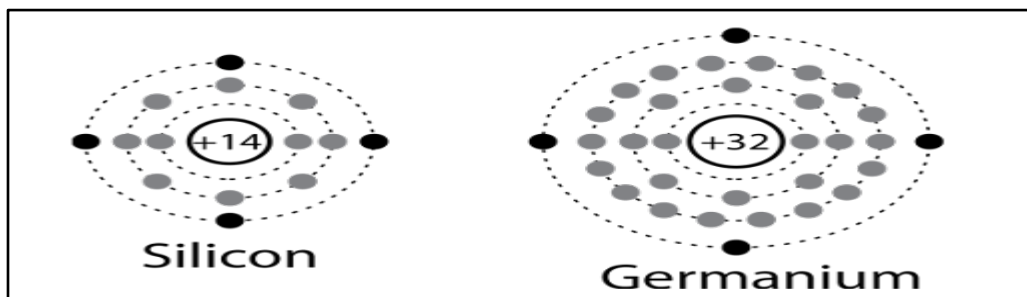


Figure II. 9: La Structure atomique de Silicium-Germanium (SiGe) [II.20].

II.8.3.A. Avantages du Silicium-Germanium (SiGe) en technologie On-Chip :

- ✓ **Consommation d'énergie réduite** : Les circuits SiGe offrent une **commutation rapide** et une **efficacité élevée** à haute fréquence, ce qui permet de **réduire la consommation d'énergie** dans les systèmes haute fréquence.
- ✓ **Compatibilité avec le silicium** : Le SiGe est fabriqué en utilisant des procédés similaires à ceux du silicium pur, ce qui permet une **intégration facile** dans les **technologies CMOS** et la **production en masse** à faible coût tout en améliorant les performances.
- ✓ **Meilleure mobilité des porteurs de charge** : Le germanium dans le SiG offre une **mobilité plus élevée** des électrons, permettant des **transistors plus rapides** et de meilleures performances à haute fréquence

II.8.3.B. Les Inconvénients du Silicium-Germanium (SiGe) en technologie On-Chip :

- ✓ **Coût plus élevé** : La fabrication du SiGe est plus **complexe** et **coûteuse** que celle du silicium pur, en raison de l'utilisation du germanium et des procédés spécialisés
- ✓ **Fragilité du matériau** : Le germanium est un matériau plus fragile que le silicium, ce qui peut entraîner des problèmes de **fiabilité** dans certaines applications
- ✓ **Limitations de performance à très haute fréquence** : Bien que le SiGe offre de bonnes performances à **haute fréquence**, ses capacités peuvent être limitées pour des applications nécessitant des fréquences extrêmement élevées ou des performances en **bande passante** très large

II.8.3.C. Applications du Silicium-Germanium (SiGe) en technologie On-Chip :

- ✓ **Circuits RF haute fréquence** : Le SiGe est largement utilisé dans les **amplificateurs RF**, **émetteurs/récepteurs** et autres composants de **communication sans fil** à haute fréquence, comme **5G**, **Wi-Fi**, et **satellites**
- ✓ **Systèmes de communication** : Utilisé dans des systèmes **de communication sans fil** avancés, y compris les **modems**, les **réseaux mobiles** et les **dispositifs de transmission de données à haute vitesse**
- ✓ **Radar et systèmes de détection** : Le SiGe est également employé dans des systèmes **radar** et **de détection** en raison de ses capacités à fonctionner à des fréquences élevées

II.8.4. Matériaux semi-conducteurs (GaAs , GaN, InP) :

Le **GaAs (Gallium Arsenide)** est un **semi-conducteur composé** appartenant à la famille des **matériaux III-V**, car il est constitué d'un élément du groupe III (**gallium – Ga**) et d'un élément du groupe V (**arsenic – As**). Ce matériau se distingue du silicium par plusieurs propriétés électroniques et physiques qui en font un **choix privilégié pour les applications à haute fréquence, optoélectroniques et RF/micro-ondes**.

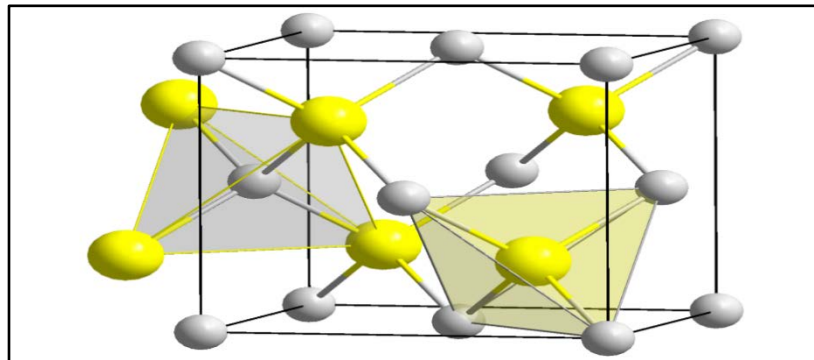


Figure II. 10: La Structure atomique de Arséniure de Gallium (Gallium Arsenide) [II.22].

II.8.4.A. Avantages du GaAs (Arséniure de Gallium) en technologie On-Chip :

- ✓ **Bonne fréquence de fonctionnement** : Fonctionne efficacement dans les **bandes micro-ondes et millimétriques** (jusqu'à plusieurs centaines de GHz).
- ✓ **Haute mobilité électronique** : Permet une vitesse de commutation élevée, idéale pour les circuits **RF** et **haute fréquence**.
- ✓ **Résistance aux radiations** : Adapté aux environnements extrêmes comme **l'espace** et les applications

II.8.4.B. Inconvénients du GaAs (Arséniure de Gallium) en technologie On-Chip :

- ✓ **Moins adapté à la production en masse** : Les procédés GaAs sont moins standardisés que ceux du silicium, donc moins optimisés pour les grandes séries.
- ✓ **Coût élevé** : Le GaAs est plus cher à produire que le silicium, en raison de matériaux plus rares et de procédés plus complexes.

II.8.4.C. Applications du GaAs (Arséniure de Gallium) en technologie On-Chip:

- Applications spatiales militaires : Grâce à sa résistance aux radiations, le GaAs est utilisé dans les systèmes embarqués des satellites militaires (liaisons de données, télémétrie, surveillance).
- Radars militaires haute fréquence : Utilisé dans les amplificateurs de puissance RF et les amplificateurs à faible bruit (LNA) pour les radars terrestres, navals et aéroportés.

II.8.5. Nitrure de Gallium (Gallium Nitride) :

Le **GaN (Gallium Nitride)** est un **semi-conducteur composé** du groupe **III-V**, formé de **gallium (Ga)** et **d'azote (N)**. Il est classé comme un matériau à **large bande interdite (wide bandgap)**, ce qui signifie qu'il possède une **bande interdite énergétique plus large** que celle du silicium ou du GaAs. Cette caractéristique lui confère des **propriétés uniques** pour les **applications haute fréquence, haute puissance et haute température**.

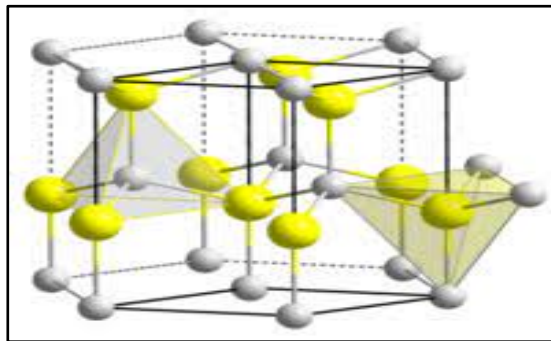


Figure II. 11: La Structure atomique de Nitrure de Gallium (Gallium Nitride). [II.2].

II.8.5.A. Avantages du GaN (Nitrure de Gallium) en technologie On-Chip :

- ✓ **Large bande interdite (wide bandgap)** : Permet au GaN de fonctionner à **très haute tension, haute puissance** et dans des **environnements à haute température** (jusqu'à 300°C et au-delà), contrairement au silicium
- ✓ **Haute fréquence de fonctionnement** : GaN offre des performances exceptionnelles à **très haute fréquence** (jusqu'à **plusieurs centaines de GHz**), ce qui le rend adapté pour les **systèmes radar, communication sans fil et satellites**.

II.8.5.B. Inconvénients du GaN (Nitrure de Gallium) en technologie On-Chip :

- ✓ **Coût élevé** : Le GaN est plus cher à produire que le silicium et le GaAs, en raison de la complexité de la fabrication et de la rareté des matériaux nécessaires.
- ✓ **Difficulté d'intégration avec la technologie CMOS** : Le GaN n'est pas aussi facilement compatible avec les procédés CMOS que le silicium, ce qui complique l'intégration de circuits numériques et analogiques sur une même puce.

II.8.5.C. Applications du GaN (Nitrure de Gallium) en technologie On-Chip :

- ✓ **Applications spatiales et aérospatiales** : Le GaN est résistant aux radiations et est utilisé dans les **systèmes de communication spatiaux** et les **satellites** pour assurer des **transmissions de données à haute vitesse**
 - ✓ **Systèmes de communication haute fréquence** :
 - Utilisé dans les **amplificateurs RF** pour des **réseaux sans fil de haute performance** et les **systèmes de communication satellite**.
 - Idéal pour les applications **5G**, les **réseaux millimétriques** et les **communications par faisceau dirigé**.

II.8.6. InP – Phosphure d'Indium (Indium Phosphide) :

Le **Phosphure d'Indium (InP)** est un **semi-conducteur composé** du groupe **III-V**, formé de l'**indium (In)** (élément du groupe III) et du **phosphore (P)** (élément du groupe V). Ce matériau est reconnu pour ses **propriétés électroniques et optiques exceptionnelles**, notamment sa **bande interdite directe** et sa **mobilité électronique très élevée**, ce qui le rend idéal pour les applications **ultra-haute fréquence, photonique et optoélectronique**.

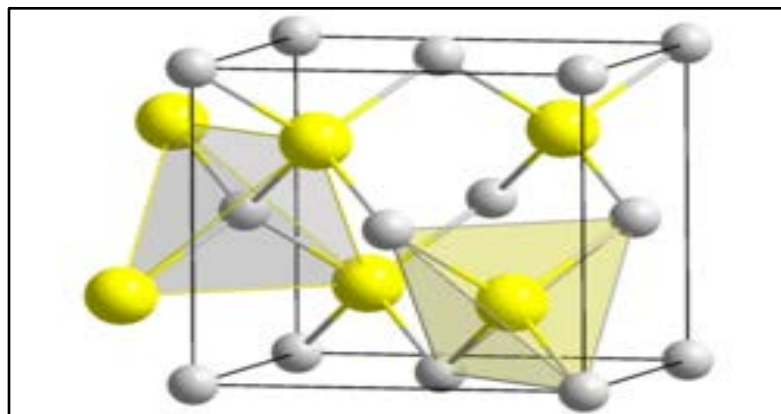


Figure II. 12: la structure atomique InP – Phosphure d'Indium (Indium Phosphide) [II.23].**II.8.6.A. Avantages du InP (Phosphure d'Indium) :**

- ✓ **Haute mobilité électronique** : Permet des performances exceptionnelles à très haute fréquence, idéal pour les **applications à haute vitesse** comme les **systèmes de communication optiques**.
- ✓ **Bande interdite directe** : Parfait pour les **applications optoélectroniques** (lasers, LEDs, photodétecteurs), offrant une **efficacité optimale** dans les **dispositifs de communication optiques**.

II.8.6.B. Inconvénients du InP (Phosphure d'Indium) :

- ✓ **Coût élevé** : La fabrication du **InP** est coûteuse en raison de la complexité du processus et de la rareté de l'indium.
- ✓ **Fragilité mécanique** : Le **InP** est fragile, ce qui complique sa manipulation et son intégration dans des dispositifs complexes.

En résumé,

Matériau	Type	Bande Interdite (eV)	Mobilité électronique	Fréquence de Fonctionnement	Caractéristiques
Silicium (Si)	Semi-conducteur traditionnel	1.1 eV	1,400 cm ² /V.S	Jusqu'à 20 GHz	Avantages : Coût faible, technologie CMOS mature, production en masse. Inconvénients : Perte à haute fréquence, performance limitées au-delà de 30GHz.
SiGe	Composé (Silicium-Germanium)	0.8 eV	1,400-2,400 cm ² /V.S	Jusqu'à 40 GHz	Avantages : Meilleure performance RF ; réduction de la consommation d'énergie.

					Inconvénients : Coût plus élevé, fabrication complexe
GaAs	(Arséniure de Gallium)	1.42 eV	8,000 cm ² /V.S	Jusqu'à 100 GHz	Avantages : Haute mobilité, excellente performance RF/micro-ondes. Inconvénients : Coût élevé, fragile, difficile à intégrer avec CMOS.
GaN	(Nitrure de Gallium)	3.4 eV	1,300 cm ² /V.S	Jusqu'à plusieurs GHz	Avantages : Haute puissance, haute fréquence, résistance thermique. Inconvénients : Coût élevé, fabrication complexe, fragile.
InP	Phosphure d'Indium	1.34 eV	4,500 cm ² /V.S	Jusqu'à 100 GHz	Avantages : Très haute mobilité, idéal pour les applications optoélectroniques, faible bruit. Inconvénients : Coût élevé, fragile, fabrication complexe.

Tableau II. 3: Tableau récapitulatif [I.12].

Résumé des caractéristiques :

- ✓ **Silicium (Si)** est largement utilisé en raison de son faible coût, mais il présente des limitations à haute fréquence.
- ✓ **SiGe** combine les avantages du silicium et du germanium, offrant de meilleures performances à haute fréquence, mais à un coût plus élevé.
- ✓ **GaAs** est un matériau de choix pour les applications RF/micro-ondes en raison de sa haute mobilité et de ses excellentes propriétés à haute fréquence, mais il est plus coûteux et difficile à intégrer avec la technologie CMOS.
- ✓ **GaN** excelle dans les applications de haute puissance et haute fréquence, mais il est complexe et coûteux à fabriquer.
- ✓ **InP** est idéal pour les applications optoélectroniques et les hautes fréquences, mais son coût et sa fragilité en font un choix moins accessible pour la production à grande échelle.

II.9 Technologies de fabrication et processus d'intégration :

Les technologies de fabrication et les processus d'intégration jouent un rôle crucial dans la création de systèmes sur puce (SoC), en particulier dans le domaine de l'électronique embarquée, des communications, et des applications RF/micro-ondes. Parmi ces technologies, les plus courantes sont **CMOS**, **BiCMOS**, et **MEMS**. Voici un détail plus approfondi sur chacune de ces technologies appliquées à l'intégration des circuits, y compris leurs avantages et limites.

Il y a trois types de technologies de fabrication et processus d'intégration :

II.9.1. Technologie CMOS (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor) :

II.9.1.1. Définition :

La technologie CMOS est la plus largement utilisée pour la fabrication de circuits intégrés, en particulier pour les circuits numériques et analogiques. Elle repose sur l'utilisation de transistors à effet de champ (FET) en complémentarité, ce qui permet d'obtenir une faible consommation d'énergie et une grande densité de circuits.

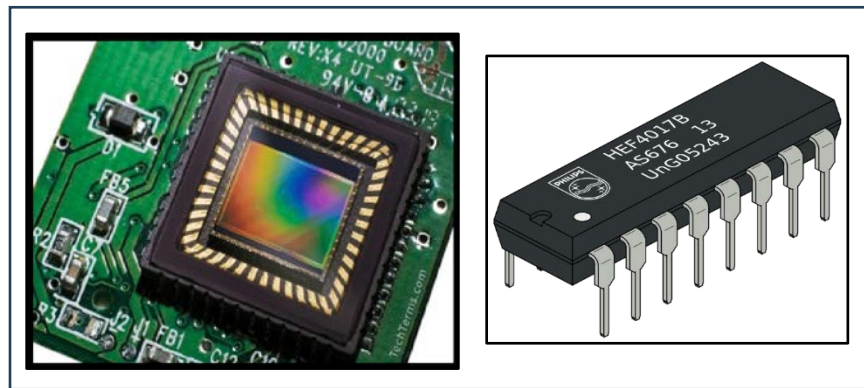


Figure II. 13: Structure CMOS (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor) [II.22].

II.9.1.2. Processus de fabrication :

- ✓ **Substrat de Silicium** : Le processus commence par un substrat de silicium sur lequel les transistors sont intégrés.
- ✓ **Oxydation** : Une couche d'oxyde de silicium est déposée pour isoler les composants.
- ✓ **Photolithographie** : Utilisation de lumière pour créer des motifs fins sur le substrat à l'aide d'un masque.

- ✓ **Implantation ionique** : Injection d'ions pour modifier les propriétés électriques de certaines régions du silicium, créant ainsi les régions conductrices et isolantes.
- ✓ **Métallisation** : Des couches métalliques sont déposées pour interconnecter les transistors.

II.9.1.3. Avantages :

- ✓ **Faible consommation d'énergie** : Le CMOS consomme très peu d'énergie, ce qui est idéal pour les appareils portables et embarqués.
- ✓ **Haute densité de composants** : Permet de réduire la taille des circuits tout en maintenant des performances élevées.
- ✓ **Technologie mature et économique** : Grâce à son adoption massive, le CMOS bénéficie de coûts de fabrication relativement faibles

II.9.1.4. Application :

Il y a deux applications :

1- Applications des circuits numériques CMOS :

- Microprocesseurs (CPU): Utilisés dans les ordinateurs, smartphones, serveurs.
- FPGA (circuits logiques programmables): Utilisés en télécoms, aérospatial, défense, prototypage.

2- Applications CMOS dans les circuits RF (radiofréquence) :

- Applications dans les satellites et communications V2X (véhicule à tout) :
 - Les systèmes CMOS RF sont utilisés pour les communications entre véhicules et infrastructures (DSRC, C-V2X).
 - Intégration de chaînes RF compactes pour satellites légers ou cubesats, notamment en bande S, X et maintenant V.
- Wi-Fi (2.4 / 5 / 6 GHz – Wi-Fi 6/6E/7) :
 - Intégration de la chaîne RF complète (amplis, VCO, LNA).
 - Puces Wi-Fi économiques à faible consommation.
 - Exemples : Qualcomm, Broadcom, Mediatek.
- Bluetooth / BLE:
 - Ultra faible consommation, idéale pour wearables, IoT, audio sans fil.
 - Tout le système Bluetooth intégré sur une seule puce CMOS.

En résumé,

Catégorie	Application	Fonction principale	Exemple d'usage
Circuits numériques	Microprocesseurs	Calcul et traitement numérique	PC, smartphones, serveurs
	Mémoires(SRAM, DRAM, Flash)	Stockage et mémoire	RAM SSD Clés USB
	Microcontrôleurs	Contrôle intégré	IoT, domotique automobile
	FPGA	Logique programmable	Télécom, spatial, prototypage
Circuit RF	Wi-Fi (2.4/5/6 GHz)	Communication sans fil	Réseau sans fil routeurs
	Bluetooth / BLZ	Connexion faible consommation	Xearables, écouteurs, capteurs
	ZigBee / LoRa / NFC	Transmission courte/Longue portée	Objets connectés, capteur IoT
	4G/5G (sub-6GHz)	Réseaux mobiles	Smartphone modems
	Satellite /V2X	Comms satellite & véhicule connecté	Cubesats, voiture autonome

Tableau II. 4: Applications et fonctions des technologies On-Chip : circuits numériques et RF (microprocesseurs, 5G, IoT, spatial) [II.24].

II.9.2. Technologie BiCMOS (Bipolar CMOS) :

La technologie **BiCMOS** (Bipolar Complementary Metal-Oxide-Semiconductor) est une **technologie hybride** qui combine, sur une même puce, **les transistors bipolaires (BJT)** et **les transistors CMOS (MOSFETs)**. Elle a été développée pour tirer parti des avantages complémentaires des deux types de transistors afin de produire des circuits **performants, rapides et économes en énergie**.

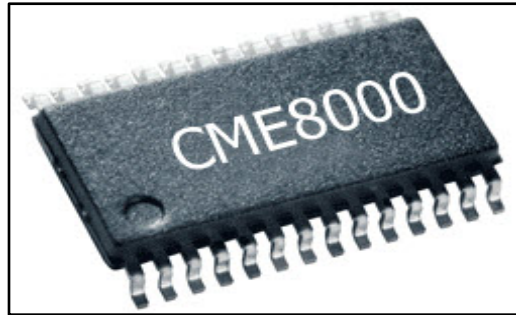


Figure II. 14: Structure BiCMOS (Bipolar-CMOS) [II.22].

II.9.2.1. Processus de fabrication :

- ✓ **Transistor CMOS** : Utilisé pour les fonctions logiques, offrant une faible consommation d'énergie.
- ✓ **Transistor Bipolaire** : Utilisé pour des applications analogiques et haute fréquence, où des performances supérieures sont nécessaires.
- ✓ **Intégration des deux types de transistors** : La fabrication implique l'intégration des transistors bipolaires et CMOS sur la même puce

II.9.2.2. Avantages :

- ✓ **Haute performance analogique et digitale** : Le BiCMOS permet d'avoir des performances optimales tant pour les circuits analogiques que numériques.
- ✓ **Consommation modérée** : Bien qu'il consomme un peu plus que le CMOS pur, il reste relativement efficace pour des applications haute vitesse.
- ✓ **Excellente réponse à haute fréquence** : Idéal pour les applications RF/micro-ondes.

II.9.2.3. Applications :

- ✓ **Circuits RF et analogiques** : Amplificateurs RF, circuits mixtes (analogiques et numériques).
- ✓ **Applications de communication haute fréquence** : Utilisé dans les amplificateurs et modulateurs de haute performance.

II.9.3. Technologie MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) :

Les **MEMS** (*Micro-Electro-Mechanical Systems*, ou **microsystèmes électromécaniques**) désignent une **technologie de miniaturisation** qui combine des **éléments électroniques** (circuits intégrés) et des **structures mécaniques mobiles** (capteurs, actionneurs, résonateurs...) sur une même puce, à l'échelle **micrométrique ou nanométrique**

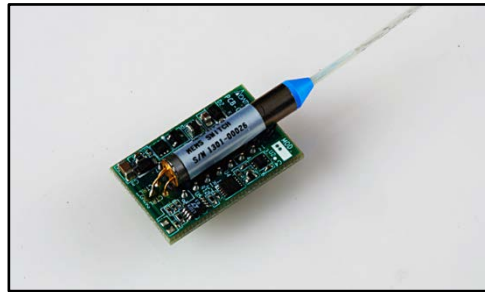


Figure II. 15: Le contexte technologique (MEMS/On-Chip) [II.22].

II.9.3.1. Processus de fabrication :

- ✓ **Microfabrication** : La fabrication de MEMS utilise des techniques de photolithographie, de dépôt de matériaux, de gravure et de diffusion.
- ✓ **Déposition de couches** : Des matériaux tels que le silicium, les oxydes ou les nitrures sont déposés pour fabriquer des structures mécaniques microscopiques.
- ✓ **Assemblage** : Les structures mécaniques sont assemblées sur des substrats semi-conducteurs, créant ainsi des capteurs, des actionneurs et d'autres dispositifs microscopiques.

II.9.3.2. Avantages :

- ✓ **Intégration de la mécanique et de l'électronique** : Permet de créer des systèmes capables d'interagir avec le monde physique, comme des capteurs de pression ou des gyroscopes.
- ✓ **Miniaturisation** : Les MEMS permettent de réduire la taille des systèmes mécaniques, offrant des dispositifs extrêmement compacts.
- ✓ **Haute précision** : Utilisé pour des capteurs très sensibles et des actionneurs à haute précision

II.9.3.3. Applications :

- ✓ **Capteurs et actionneurs** : Accéléromètres, gyroscopes, capteurs de pression, dispositifs MEMS pour l'automobile, l'aérospatial, et l'électronique portable.
- ✓ **Systèmes RF** : Utilisés pour la fabrication d'interrupteurs RF, de filtres et d'antenne miniaturisé.

En résumé,

Les technologies **CMOS**, **BiCMOS**, et **MEMS** sont fondamentales pour l'intégration des systèmes électroniques modernes, avec des applications variées allant des circuits numériques aux systèmes de communication haute fréquence, en passant par les capteurs et actionneurs à échelle micro-électromécanique. Chaque technologie a ses avantages et limitations, et le choix de la technologie dépend des exigences spécifiques de performance, de coût et de complexité du produit final.

II.10. Avantages de l'intégration On-Chip pour les communications satellites :

L'intégration On-Chip dans les communications satellites représente une avancée technologique majeure qui consiste à regrouper plusieurs fonctions électroniques (comme le traitement du signal, le contrôle, la gestion de la communication, etc.) sur une seule puce électronique ou SoC (System on Chip). Voici un détail approfondi des avantages de cette approche pour les communications satellites :

1. Réduction de la taille, du poids et de la consommation d'énergie (SWaP) :

- Idéal pour les petits satellites (nanosatellites, cubesats).
- Moins d'espace occupé, moins de masse, donc lancement moins coûteux.
- Moins de consommation électrique, ce qui est crucial dans l'espace

2. Meilleure fiabilité :

- Moins de composants (moins de risques de panne)
- Meilleure tolérance aux conditions extrêmes (température, vibrations, radiations).

3. Performances améliorées :

- Traitement du signal plus rapide (bande passante plus large, moins de latence).
- Communication plus efficace (ex. : beamforming, modulation avancée).

4. Réduction des coûts :

- Fabrication et assemblage moins chers.

- Lancement moins coûteux grâce à la compacité et au faible poids.

5. Flexibilité et évolutivité :

- Possibilité de reprogrammer ou adapter les fonctions selon les besoins.
- Idéal pour les constellations de satellites (production en série standardisée).

II.10.1. Applications des antennes intégrées sur puce en bande V :

1. Backhaul satellite :

- Relier des stations terrestres à l'infrastructure Internet via satellite.
- Alternative à la fibre dans les zones rurales ou isolées.

2. Constellations de satellites LEO :

- Satellites à orbite basse pour Internet à haut débit (ex. : Starlink, OneWeb).
- Antennes compactes pour les charges utiles miniaturisées.

3. Terminaux utilisateurs compacts :

- Récepteurs satellite portables ou intégrés (ex. : IoT, mobiles, équipements militaires).
- Idéal pour les appareils à faible consommation et espace réduit.

4. IoT connecté par satellite :

- Capteurs dans l'agriculture, l'environnement, ou l'industrie connectés via satellite.
- Communication à longue portée sans infrastructure terrestre.

5. Communication inter-satellite (ISL) :

- Échanges de données directs entre satellites.
- Utilisation de la bande V pour des liaisons rapides et sécurisées.

6. Applications militaires et de défense :

- Systèmes de communication embarqués et discrets.
- Utilisation dans les drones, véhicules blindés, soldats connectés.

7. Télécommunications 6G :

- Fréquences millimétriques pour les futures générations de réseaux mobiles.
- Intégration d'antennes sur puce pour modules RF avancés.

8. Systèmes embarqués (avions, véhicules autonomes) :

- Liaison haut débit avec satellites pour la navigation, le suivi, et la communication.
- Gain de place et de poids grâce à l'intégration.

Cahier de charge :

Paramètre	Spécification	Détails/Remarques
Type d'antenne	Patch	Antenne imprimée, compacte
Polarisation	Directe (linéaire)	Champ électrique aligné sur un axe
Rayonnement	Omnidirectionnel	Couverture à 360° dans le plan H
Fréquence de travail	60 GHz	Bande millimétrique (applications 5G/6G)
Gain	5 dB	Optimisé pour la directivité
Rendement	90 %	Minimisation des pertes (ohmiques/diélectriques)
Technologie de fabrication	65 nm (CMOS)	Minimisation des pertes (ohmiques/diélectriques)
Matériaux	Silicium / SiO ₂	Substrat diélectrique standard

Tableau II. 5: cahier de charge pour spécification les caractéristiques de notre dispositif pour ce projet. [II.24].

Ce cahier des charges pour une antenne patch en CMOS 65 nm à 60 GHz présente un bon équilibre entre performances et intégration, avec un gain cible réaliste de 5 dB et un rendement ambitieux de 90% qui nécessitera une optimisation poussée des métallisations et du substrat SiO₂ pour minimiser les pertes à haute fréquence. La spécification de rayonnement omnidirectionnel devra être précisée (plan H uniquement), tandis que la polarisation linéaire convient pour des applications standard, bien qu'elle limite la flexibilité en environnement mobile. L'intégration on-chip en 65 nm est judicieuse pour des systèmes compacts, mais impose des contraintes de puissance et pourrait bénéficier de l'ajout de

tolérances (ex: ± 0.5 dB sur le gain) et de paramètres complémentaires comme la bande passante ou la robustesse thermique pour couvrir davantage de cas d'usage industriels.

II.11. Conclusion :

La technologie **On-Chip** représente une avancée fondamentale dans l'évolution des systèmes de communication de nouvelle génération, en particulier pour les **applications satellites en bande V (40–75 GHz)**. Dans un contexte où la **miniaturisation**, la **haute performance** et la **faible consommation énergétique** sont devenues des critères essentiels, cette approche offre des solutions adaptées aux défis actuels du secteur spatial.

Cependant, plusieurs **verrous technologiques** demeurent, notamment les **pertes diélectriques**, le **faible rendement de rayonnement**, et les **contraintes thermiques**. Pour surmonter ces obstacles, les recherches s'orientent vers de nouveaux **matériaux à faibles pertes**, des **architectures d'antennes avancées** (fractales, reconfigurables, beamforming), et des **approches d'intégration 3D**.

Les **progrès récents** permettent déjà la conception de dispositifs RF **ultra-compacts, performants et adaptables**, répondant à des besoins variés : **constellations de satellites LEO**, **réseaux IoT spatiaux**, **systèmes embarqués intelligents** ou encore **télécommunications de nouvelle génération (5G/6G)**.

En conclusion, l'Antenna-on-Chip s'impose comme une **technologie clé** pour l'avenir des systèmes RF, en particulier dans le domaine spatial. Elle ouvre la voie à une nouvelle ère de composants **intelligents, intégrés**, et **hautement performants**, s'inscrivant pleinement dans les **perspectives d'évolution vers l'IoT spatial, la 6G, et les architectures reconfigurables du futur**.

Chapitre III

Résultats et discussion

III.1 Introduction :

L'accordabilité des éléments rayonnants repose majoritairement sur l'utilisation de jonctions semi-conductrices, dont le comportement en fonction de la tension de polarisation a été caractérisé via une technologie silicium. Bien que cette analyse soit transposable à d'autres technologies semi-conductrices, l'emploi de substrats silicium dans des applications satellitaires introduit des pertes significatives, limitant ainsi leur adoption pour la conception d'antennes patch. Néanmoins, des techniques visant à améliorer les performances des dispositifs sur ce type de substrat sont explorées [III.1].

Dans ce chapitre, nous présentons la conception d'une antenne patch rectangulaire alimentée par une ligne micro-ruban (adaptation quart d'onde) avec encoches, testée avec divers matériaux de substrat [III.2]. Une attention particulière est portée aux antennes intégrées sur substrat silicium, où des fonctions accordables sont réalisées via des éléments d'accord monolithiques exploitant la variation des propriétés électriques des jonctions semi-conductrices (e.g., diodes PIN, varactors) [III.3].

Performances comparatives des différents substrats sont évaluées à l'aide du logiciel de simulation électromagnétique CST Microwave Studio, opérant dans le domaine fréquentiel. Une analyse détaillée des paramètres clés (bande passante, efficacité rayonnée, facteur de qualité) est menée pour identifier les matériaux optimaux. Enfin, le rôle des fonctionnalités logicielles utilisées (solveur FEM, conditions aux limites, maillage adaptatif) est discuté pour valider la méthodologie de simulation [III.4]

III.2. Généralités sur logiciel CST MICROWAVE STUDIO :

III.2.1. Définition du logiciel CST STUDIO SUITE :

Fondée en 1992, la société allemande CST (Computer Simulation Technology) a développé un ensemble de logiciels spécialisés dans la simulation électromagnétique. Après plusieurs années de recherche, la première version de CST Microwave Studio a été lancée en 1998. Ce logiciel est conçu pour la modélisation et l'analyse des dispositifs à haute fréquence, tels que les antennes, les filtres et autres composants RF et micro-ondes. [III.5]

CST Microwave Studio est un outil avancé de simulation en 3D, permettant une étude détaillée des champs électromagnétiques. Il repose sur la résolution des équations de Maxwell en utilisant la

technique des intégrales finies (FIT - Finite Integration Technique). Cette approche offre une grande précision dans l'analyse des phénomènes électromagnétiques.

Comme tous les simulateurs 3D, CST Microwave Studio présente l'avantage de pouvoir traiter une large gamme de structures, qu'elles soient homogènes ou hétérogènes, indépendamment de la technologie employée. Grâce à ses algorithmes optimisés, il permet une simulation rapide et efficace, facilitant ainsi la conception et l'optimisation des systèmes à haute fréquence. [III.6]

III.2.2. Objectif et Fonctionnalités :

CST MWS est conçu pour l'analyse rapide et précise des dispositifs à haute fréquence, notamment :

- **Les antennes** : antennes patch, dipôles, paraboliques, antennes à fentes, etc.
- **Les filtres** : filtres passe-bas, passe-haut, passe-bande, résonateurs, etc.
- **Les guides d'ondes** : structures métalliques et diélectriques utilisées pour le transport des ondes électromagnétiques.
- **Les circuits micro-ondes et RF** : composants actifs et passifs utilisés dans les télécommunications et l'électronique.
- **Les cavités résonantes** : utilisées dans les accélérateurs de particules et les systèmes radar.
- **Les capteurs et dispositifs biomédicaux** : simulation des interactions électromagnétiques avec les tissus biologiques

III.2.3. Description générale de l'interface CST :

L'arbre de navigation est un composant central de l'interface, permettant d'accéder aux éléments structurels de la conception ainsi qu'aux résultats de simulation. Les sections ci-dessous décrivent les principales fonctionnalités disponibles dans cette fenêtre :

1. Menus contextuels :

Accessibles via un clic droit de la souris, ces menus offrent un accès rapide aux commandes les plus utilisées en fonction du contexte (modélisation, simulation, post-traitement). Ils simplifient les opérations courantes sans nécessiter de parcourir les barres d'outils principales. [III.7]

2. Plan de dessin :

Il s'agit du plan de référence sur lequel sont dessinées les primitives géométriques (lignes, surfaces, volumes). Bien que la souris ne permette de localiser que des points en 2D, les coordonnées 3D sont définies par projection sur ce plan. La flexibilité offerte par les outils de rotation et de translation du plan de dessin en fait un atout majeur pour la modélisation 3D complexe.

3. Fenêtre des paramètres :

Cette section liste l'ensemble des paramètres définis par l'utilisateur (dimensions, matériaux, etc.) avec leurs valeurs actuelles. Elle permet une visualisation et une modification centralisée des variables du projet.

4. Fenêtre des messages :

Elle affiche les informations système, les logs du solveur, les avertissements ou les erreurs générés lors des étapes de modélisation ou de simulation. Son contenu est essentiel pour le débogage et le suivi des calculs. [III.8]

5. Autres éléments standards :

Le reste de l'interface suit les conventions des applications Windows (barres d'outils personnalisables, gestion des fenêtres, raccourcis clavier), assurant une prise en main intuitive pour les utilisateurs habitués à cet environnement.

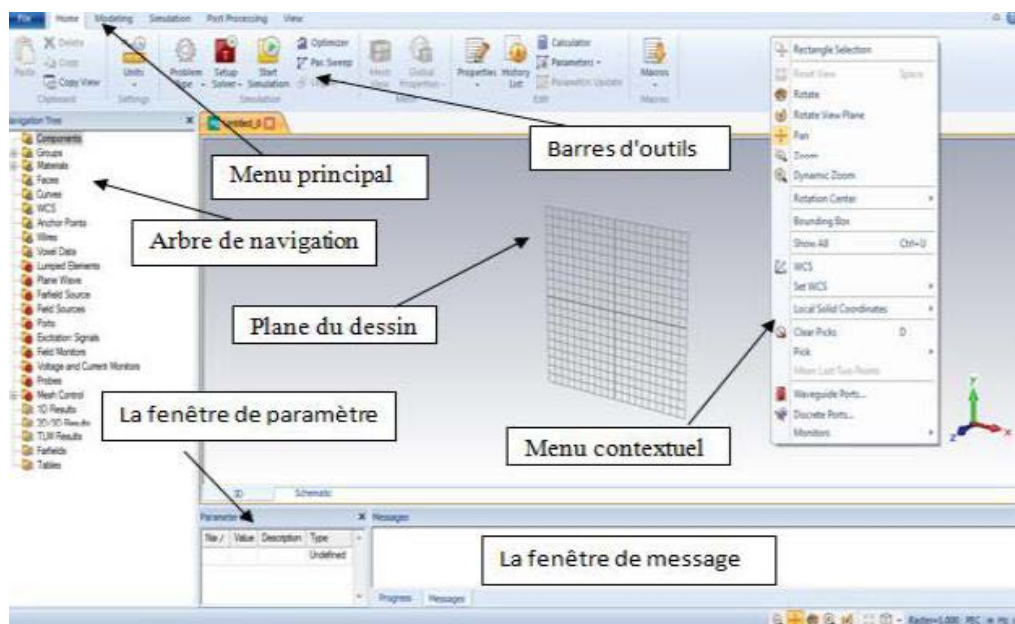


Figure III- 1. Interface du CST [III.5].

III.3. Design et structure de l'antenne :

III-3-A. Le substrat diélectrique :

1. Sélection de l'outil de modélisation :

- Dans la barre d'outils, cliquez sur l'icône **Brique** (le même outil utilisé pour le plan de masse)
- Répétez le processus de création en double-cliquant pour définir :
 - Le point de départ sur le plan de dessin
 - La base de la structure
 - La hauteur du substrat

2. Paramétrage du substrat :

- Dans la boîte de dialogue qui s'ouvre :
 - Entrez précisément les dimensions souhaitées
 - Sélectionnez le matériau "**Vacuum**" (air) dans la liste déroulante
 - Validez en cliquant sur **OK**

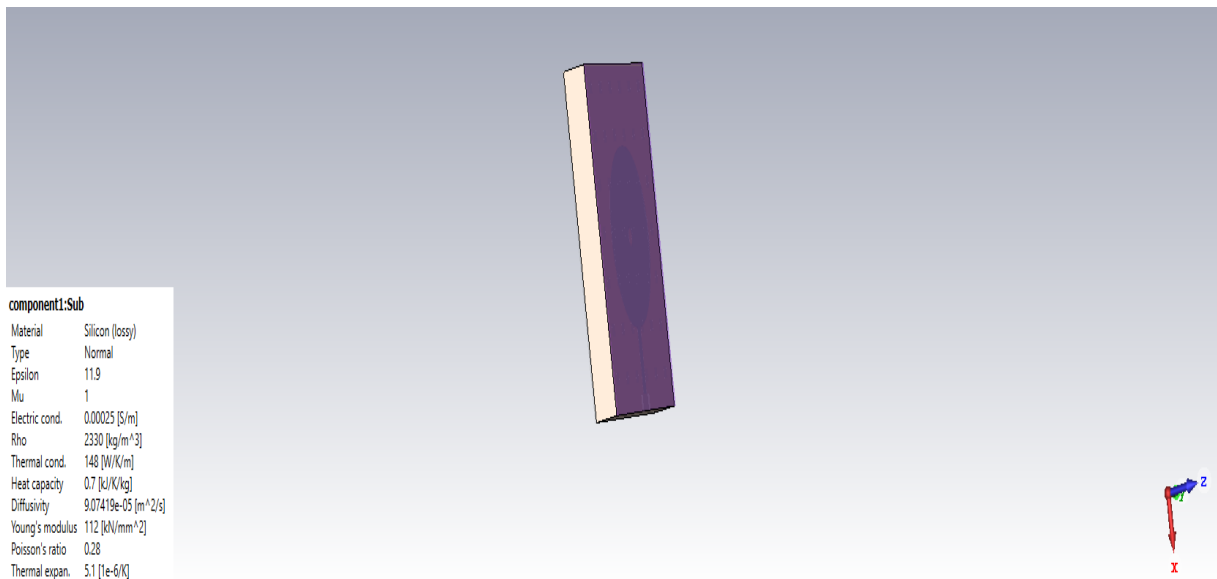


Figure III- 2. Substrat du notre structure d'antenne.

III.3.B. Le plan de masse :

- Sélection de l'outil

- Activez l'outil de modélisation **Brique** en cliquant sur son icône dans la barre d'outils des objets.
- Définition du point de départ
 - Positionnez le point d'origine de la brique en effectuant un double-clic à l'emplacement souhaité sur le plan de dessin.
- Définition de la base de la brique
 - Sélectionnez le coin de la face inférieure de la brique en double-cliquant sur sa position finale dans le plan de dessin.
 - (Optionnel : Ajustez les dimensions dans la fenêtre des paramètres pour une précision numérique.)

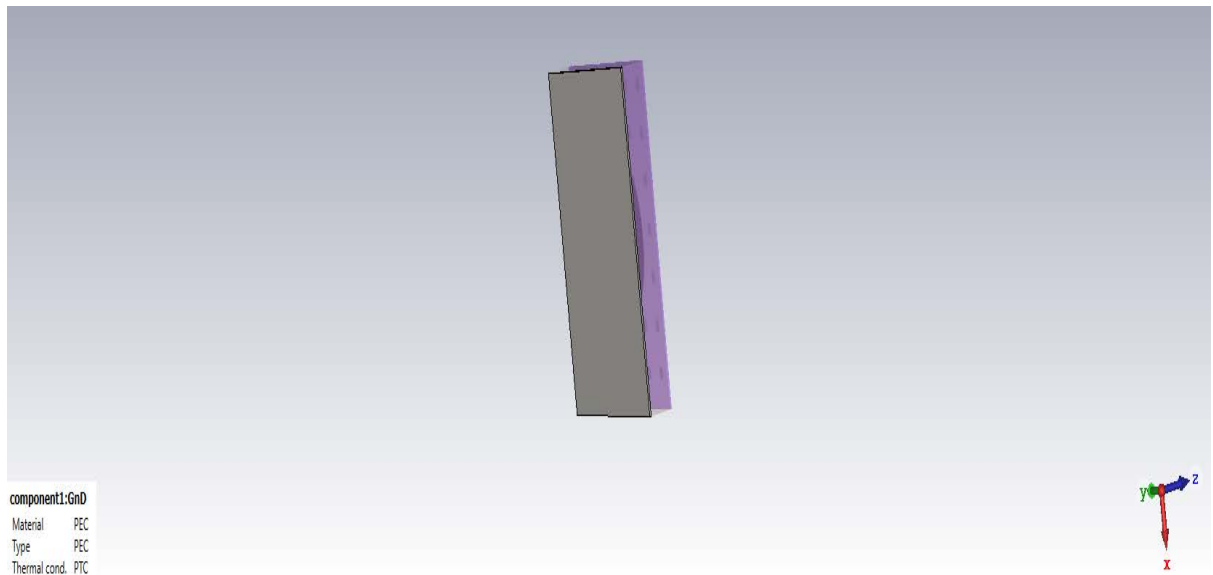


Figure III- 3. Créer un plan de masse pour l'antenne.

- Ensuite, définir la hauteur de la brique en faisant glisser la souris. Double-cliquez pour fixer la hauteur de la brique.
- Enfin, une boîte de dialogue s'ouvre où on peut introduire les valeurs numériques de toutes les coordonnées et choisir le matériau dans ce cas (PEC : perfect electric conductor) et cliquez sur OK.

Métal 1 :

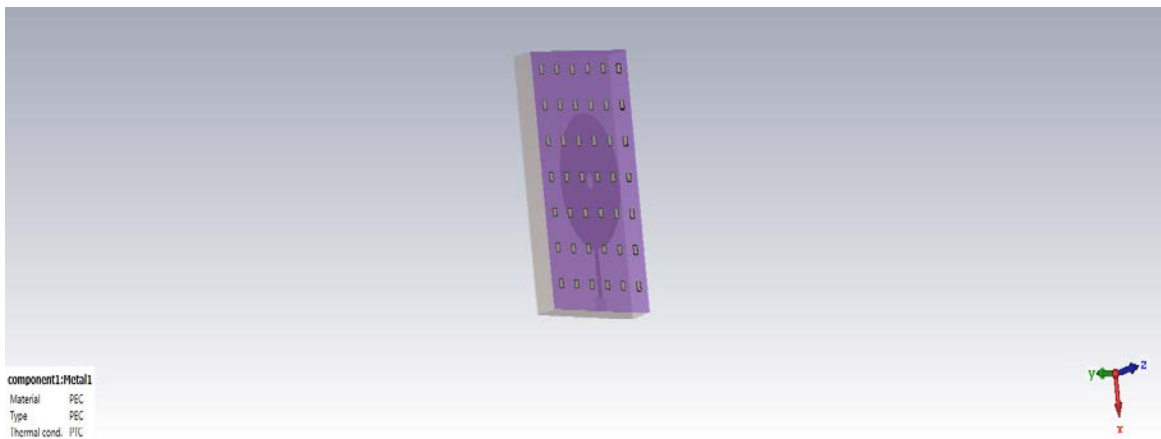


Figure III- 4. Créer métal 1 pour l'antenne.

III.3.C. Dessiner le patch (oxide)

On clique sur 'Brick', ensuite on appuie sur la touche « ESC » du clavier, et une boîte de dialogue apparaît pour qu'on puisse injecter les coordonnées et le matériau du patch, puis on valide. La structure du patch est définie comme dans la figure suivante :

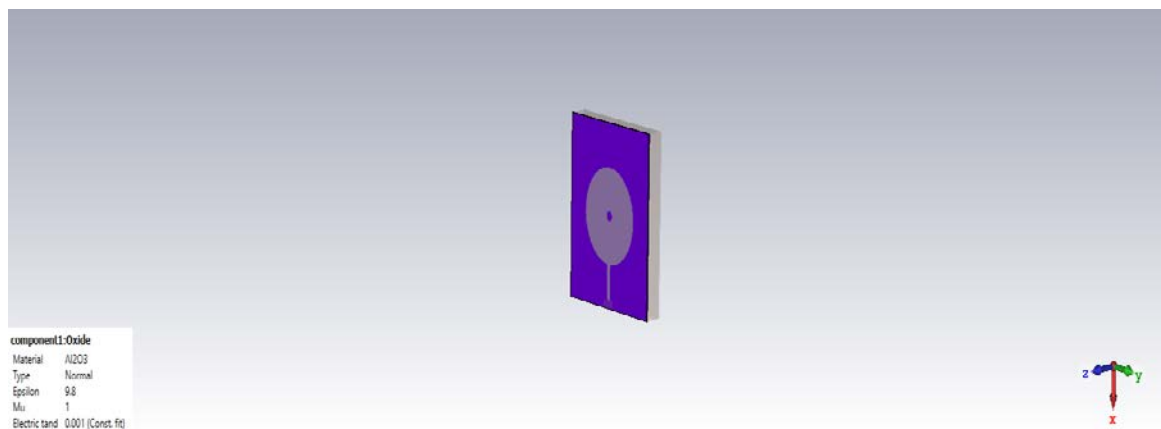


Figure III- 5. Création d'oxide d'antenne.

III.3.D. Dessiner une encoche dans le patch :

Pour réaliser ceci, on clique sur 'Brick', puis 'ESC' du clavier alors une fenêtre de dialogue apparaît sur laquelle on définit les coordonnées et le matériau utilisé. On obtient alors la figure suivante :



Figure III- 6. Structure d'antenne patch.

III.3.E. La ligne micro-ruban :

On clique sur 'Brick', puis 'ESC' du clavier et on aura une boîte de dialogue sur laquelle on spécifie les coordonnées et le matériau utilisé. On doit créer la ligne d'alimentation : on obtient la figure suivante :

Après avoir réalisé le dessin de notre structure, le patch et le micro strip doivent être assemblés en un seul objet .et pour cela, on procède de la manière suivante : On clique sur le patch dans l'arbre de navigation : Modeling Add micro strip entrer. On obtient le modèle unis en un seul objet.

Les épaisseurs des couches d'oxide entre les métaux :

On utilise 10 métaux



Figure III- 7. Création des métaux d'antenne patch.

III.3.F. Le port de polarisation :

Choisir dans la barre d'outils l'icône correspondant et dans la barre d'outils ainsi « **pick** » **face** par la suite Choisir l'icône complétez les paramètres et cliquez sur « **OK** ». Enfin, on obtient le résultat suivant :

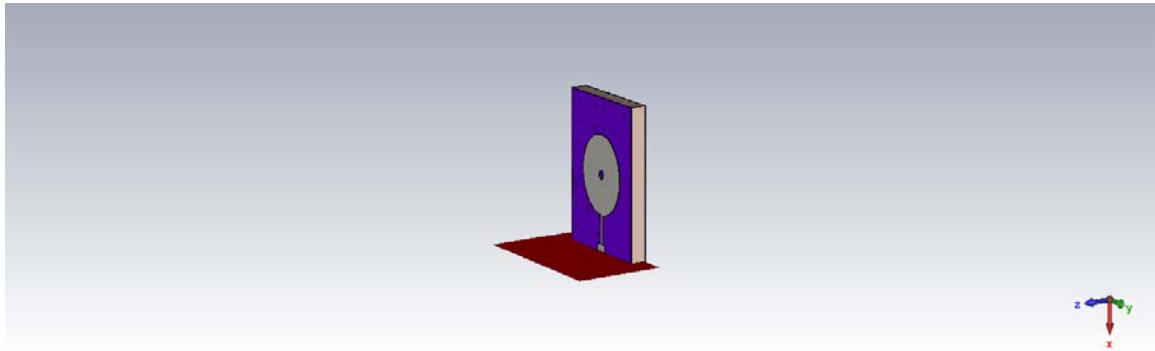


Figure III- 8. Polarisation linéaire de l'antenne patch.

III.4. Conception d'une antenne patch rectangulaire

Les dimensions de notre antenne sont obtenues par les calculs théoriques de l'antenne micro ruban à la fréquence 60 GHz (les équations sont indiquées dans le chapitre II). Les dimensions de l'antenne initiale sont mentionnées dans le Tableau III.1

Name	Expression	Value
W	= 2600	2600
L	= 2200	2200
Hs	= 300	300
Hd	= 22	22
Wf	= 80	80
R	= 682.5	682.5
Lf	= 435	435
Rs	= 74	74
Lt	= 200	200
Wt	= 248	248
H1	= 1.2	1.2
S	= 130	130
F	= 90	90
G	= 10	10

L'antenne patch sélectionnée présente une structure rectangulaire, alimentée en son centre par une ligne micro-ruban d'une longueur L_a . Elle est composée d'un élément rayonnant de forme

rectangulaire ($L_P \times W_P$), comportant des encoches, et imprimé sur la face supérieure d'un substrat diélectrique ($L_g \times W_g$) en Silicon.

Ce substrat possède une permittivité relative de **11.9** et une épaisseur **h**. La face inférieure du substrat, quant à elle, est entièrement métallisée pour former le plan de masse

III.5. Résultats et discussion :

Dans cette partie, nous présenterons et nous évaluerons tous les résultats de l'antenne conçue en termes du coefficient de réflexion, du rapport d'ondes stationnaires, du diagramme de rayonnement, du gain. Dans cette partie, nous allons étudier la simulation de l'antenne patch réalisée avec des différents matériaux utiliser, ensuite nous allons comparer ses caractéristiques.

III.5.1. 1^{ère} partie (Variation épaisseur des couches d'oxide entre les métaux) :

III.5.1.1. Coefficient de réflexion S_{11} :

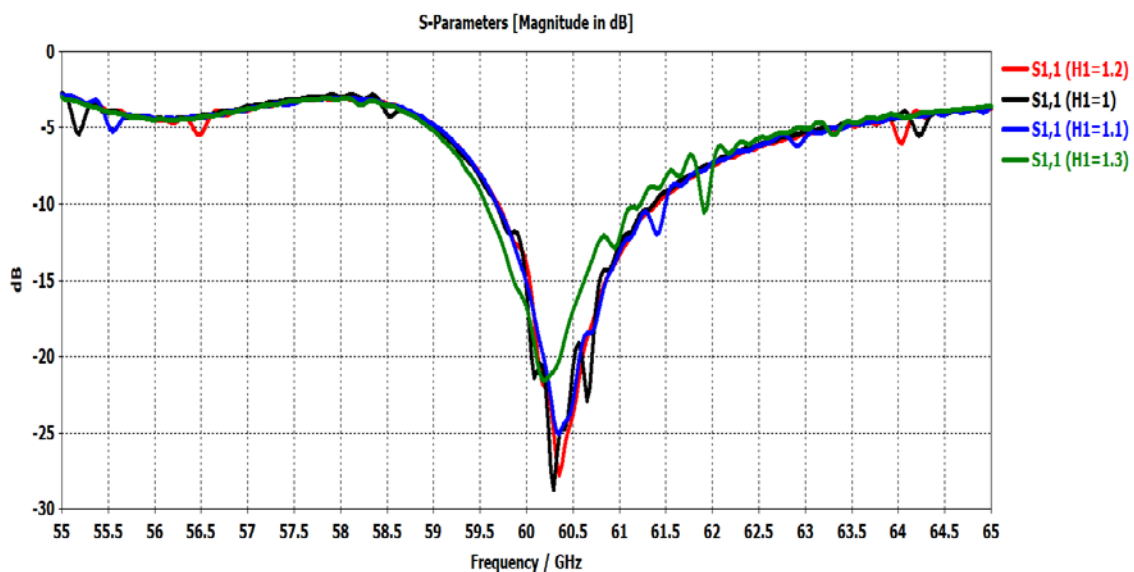


Figure III- 9. Coefficient de réflexion de H_1 pour différents d'épaisseur des couches d'oxyde entre les métaux.

L'analyse du coefficient de réflexion S_{11} révèle que l'épaisseur d'oxyde $H_1=1.1$ offre les meilleures performances à 60 GHz, avec une excellente adaptation d'impédance ($S_{11} < -25$ dB) et une bande passante élargie (≈ 2 GHz). Les autres épaisseurs testées ($H_1=1.0, 1.2$ et 1.3) montrent une dégradation significative des performances, se traduisant par une augmentation du S_{11} et un rétrécissement de la bande passante. Ces résultats démontrent que $H_1=1.1$ représente le compromis optimal entre couplage électromagnétique et adaptation d'impédance, confirmant son choix comme paramètre de conception

privilegié. Une précision de fabrication de ± 0.05 sur cette épaisseur est recommandée pour garantir des performances stables, ce qui souligne l'importance d'un contrôle dimensionnel rigoureux dans la réalisation de ces structures. Ces observations corroborent les résultats de gain précédents, validant ainsi l'approche d'optimisation conjointe des paramètres géométriques et électromagnétiques.

III.5.1.2. VSWR :

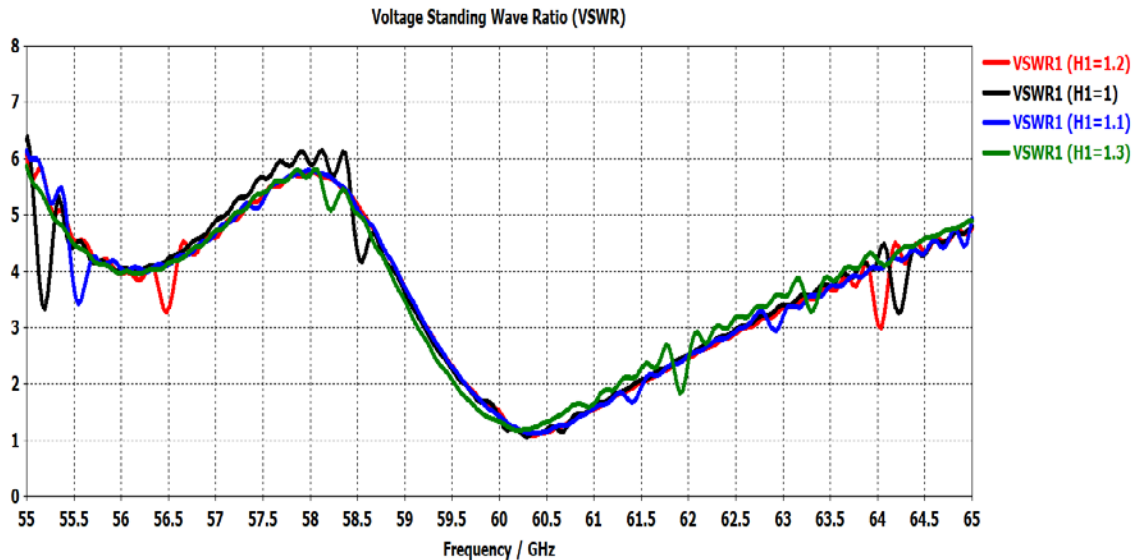


Figure III- 10. VSWR de H_1 pour différents d'épaisseur des couches d'oxyde entre les métaux.

L'analyse du VSWR en fonction de l'épaisseur d'oxyde (H_1) révèle que la valeur $H_1=1.1$ offre les meilleures performances, avec un VSWR minimal de 1.2 à 59.5 GHz et une large bande passante de 5 GHz (57-62 GHz) où le VSWR reste inférieur à 2. Les autres épaisseurs présentent des limitations notables : $H_1=1.0$ montre une dégradation rapide au-delà de 60 GHz, tandis que $H_1=1.3$ entraîne une inadaptation marquée ($VSWR > 2$ sur la majeure partie de la bande). Ces résultats, cohérents avec les analyses précédentes de S_{11} et de gain, confirment que $H_1=1.1$ représente le paramètre optimal pour une conception robuste, avec une tolérance de fabrication recommandée de ± 0.03 pour garantir des performances stables. Cette étude souligne l'importance critique du contrôle précis de l'épaisseur d'oxyde dans les dispositifs RF millimétriques.

III.5.1.3. Le gain :

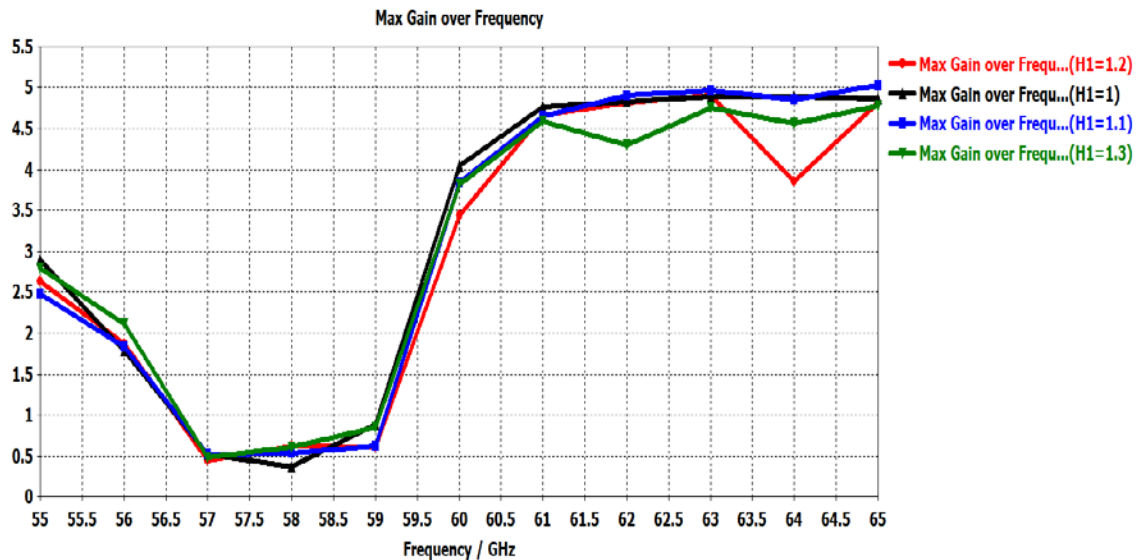


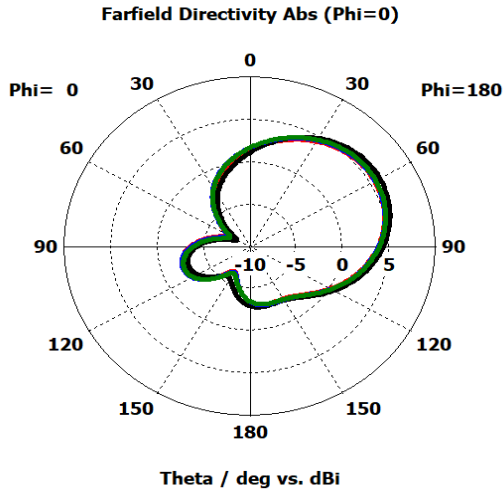
Figure III- 11. Gains de H_1 pour différents d'épaisseur des couches d'oxyde entre les métaux.

L'analyse de l'impact de la variation de l'épaisseur des couches d'oxyde (H_1) entre les métaux sur le gain maximal, simulée dans CST, révèle des tendances significatives. Comme le montre le graphique, le gain maximal varie en fonction de la fréquence pour différentes valeurs de H_1 (1, 1.1, 1.2, et 1.3). On observe que l'augmentation de l'épaisseur des couches d'oxyde entraîne généralement une amélioration du gain, particulièrement dans certaines plages de fréquence. Pour $H_1=1.3$, le gain atteint des valeurs plus élevées comparé à $H_1=1$, ce qui suggère qu'une épaisseur accrue peut optimiser les performances du dispositif. Cependant, cette relation n'est pas linéaire et dépend fortement de la fréquence de fonctionnement, comme en témoignent les variations locales dans le graphique. Ces résultats soulignent l'importance d'ajuster précisément l'épaisseur des couches d'oxyde pour maximiser le gain dans des applications spécifiques.

III.5.1.4. Diagramme du rayonnement

L'analyse du diagramme de rayonnement dans CST, en fonction de la variation de l'épaisseur des couches d'oxyde (H_1) entre les métaux, révèle des caractéristiques importantes du comportement du dispositif à 60 GHz.

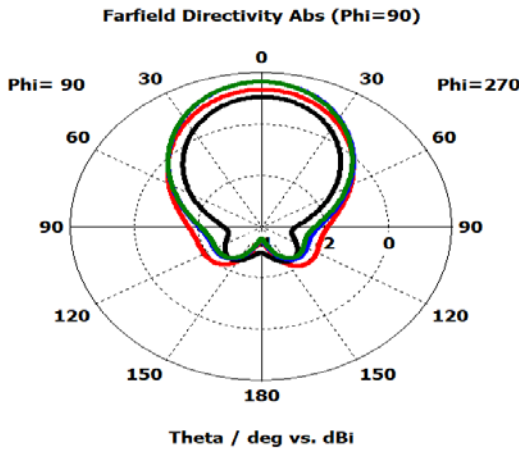
Pour $\Phi=0^\circ$



- farfield (f=60) (H1=1.2)
- farfield (f=60) (H1=1)
- farfield (f=60) (H1=1.1)
- farfield (f=60) (H1=1.3)

Frequency = 60 GHz
 Main lobe magnitude = 5.62 dBi
 Main lobe direction = 57.0 deg.
 Angular width (3 dB) = 91.9 deg.
 Side lobe level = -8.1 dB

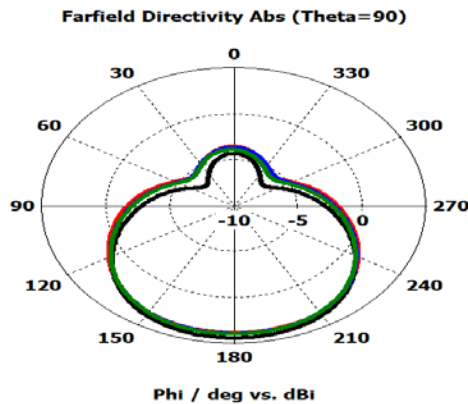
Pour $\Phi=90^\circ$



- farfield (f=60) (H1=1.2)
- farfield (f=60) (H1=1)
- farfield (f=60) (H1=1.1)
- farfield (f=60) (H1=1.3)

Frequency = 60 GHz
 Main lobe magnitude = 1.64 dBi
 Main lobe direction = 0.0 deg.
 Angular width (3 dB) = 138.8 deg.
 Side lobe level = -4.0 dB

Pour $\Theta=90^\circ$



- farfield (f=60) (H1=1.2)
- farfield (f=60) (H1=1)
- farfield (f=60) (H1=1.1)
- farfield (f=60) (H1=1.3)

Frequency = 60 GHz
 Main lobe magnitude = 3.9 dBi
 Main lobe direction = 181.0 deg.
 Angular width (3 dB) = 121.9 deg.
 Side lobe level = -7.8 dB

Figure III- 12. Diagramme du rayonnement de H_1 pour différents d'épaisseur des couches d'oxyde entre les métaux.

Les résultats montrent que la directivité est influencée par l'épaisseur des couches d'oxyde, avec des différences notables entre les configurations $H_1=1.1$, $H_1=1.2$ et $H_1=1.3$. Le lobe principal atteint une magnitude maximale de **5.62 dBi** pour une direction de **57.0°**, avec une largeur angulaire (à -3 dB) de **91.9°**, ce qui indique une couverture relativement large. Le niveau des lobes secondaires est de **-8.1 dB**, ce qui suggère une dispersion modérée de l'énergie hors de l'axe principal.

Les variations de H_1 semblent affecter légèrement la forme du diagramme de rayonnement, mais les paramètres clés (direction du lobe principal, largeur du faisceau) restent globalement stables. Cela indique que, bien que l'épaisseur des couches d'oxyde joue un rôle dans les performances globales, son impact sur la directivité à cette fréquence peut être secondaire par rapport à d'autres paramètres de conception. Une optimisation plus poussée pourrait explorer des valeurs intermédiaires de H_1 pour réduire davantage les lobes secondaires ou améliorer la directivité.

L'analyse du diagramme de rayonnement pour $\phi=90^\circ$ à 60 GHz montre que la variation de l'épaisseur des couches d'oxyde (H_1) a un impact limité sur les performances dans ce plan. Le lobe principal présente une directivité réduite (1.64 dBi) et une large couverture angulaire (138.8°), avec des lobes secondaires relativement élevés (-4.0 dB), indiquant un rayonnement plus omnidirectionnel. Contrairement au plan $\phi=0^\circ$, où l'épaisseur des couches d'oxyde influence davantage le comportement, les variations de H_1 ici n'altèrent pas significativement la forme du diagramme. Ces résultats suggèrent que le plan $\phi=90^\circ$ est moins sensible aux modifications de H_1 , ce qui peut être exploité pour des applications nécessitant une couverture large. Une optimisation globale devrait néanmoins prendre en compte les deux plans pour équilibrer directivité et couverture.

Pour $\theta=90$

En conclusion, cette étude confirme que le choix de l'épaisseur des couches d'oxyde doit être soigneusement équilibré avec d'autres facteurs pour obtenir les meilleures performances en termes de rayonnement et de directivité.

III.5.2. 2^{ème} partie : Variation des oxides

III.5.2.1. Coefficient de réflexion S_{11} :

Le résultat de simulation de coefficient de réflexion S_{11} de cette antenne avec différents matériaux utilisés et représenté Sur la figure III-13, nous permettre de visualiser le niveau d'adaptation et la bande passante à la fréquence de résonance de l'antenne GHz.

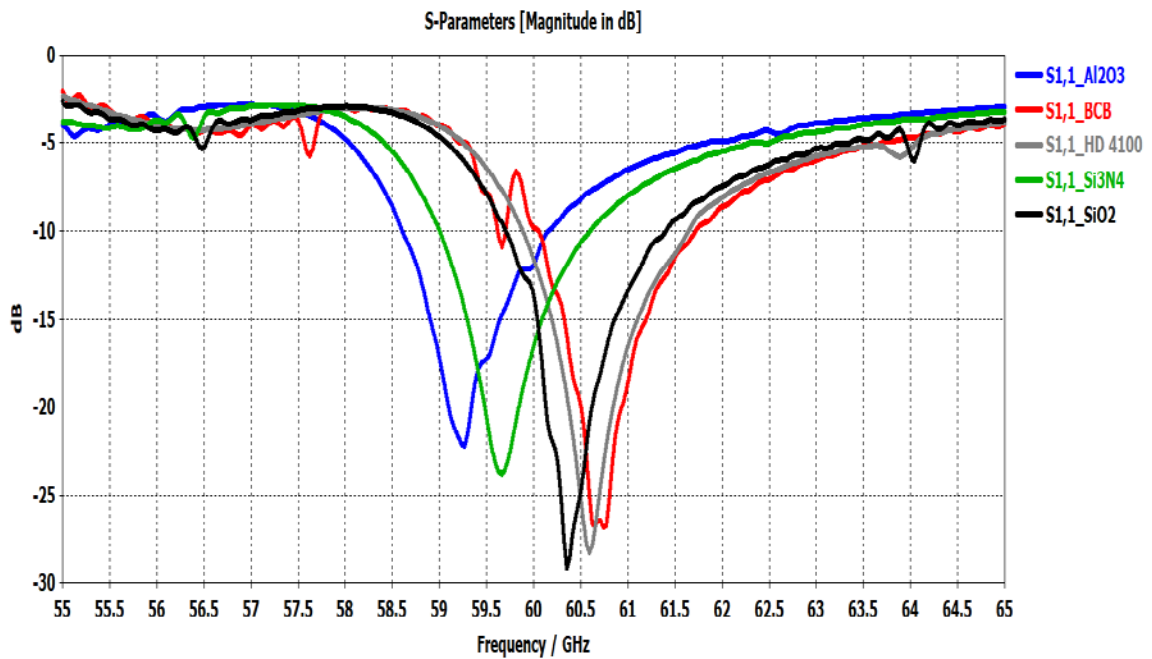


Figure III- 13. Coefficient de réflexion pour différents oxides d'antenne.

La simulation CST compare le S_{11} de plusieurs antennes patch entre 55-65 GHz. Al₂O₃ se distingue avec une excellente adaptation (-25 dB /58 GHz) et large bande passante (56-61 GHz), suivi de BCB et SiO₂ (performances correctes). HD 4100 et Si₃N₄ montrent des résonances complexes. Conclusion : Al₂O₃ est idéal pour les applications wideband, tandis que Si₃N₄ convient aux fréquences spécifiques. Optimisation recommandée pour les fréquences >62 GHz.

L'antenne patch doit alors présenter une impédance d'entrée complexe conjuguée de celle de la source (généralement fixée à 50 Ω) [III.6].

III.5.2.3. VSWR

La figure III-13 montre simulée du VSWR par polarisation linéaire pour l'antenne patch (rapport d'ondes stationnaires de tension).

VSWR (rapport de tension des ondes stationnaires), c'est une quantité d'efficacité avec laquelle une puissance radiofréquence est transmise d'une source d'alimentation, via une ligne de transmission, à une charge.

On remarque que le VSWR a une valeur comprise entre 1 et 8.5, une valeur maximale de VSWR <8.5 dans une plage de fréquences comprise entre 55 et 61 GHz, aucune puissance réfléchie ne serait réfléchie, de 10.5 GHz jusqu' 12.5 GHz en vois que la tension aurait une amplitude stable pour notre

boisson de bande Ku dans la partie de liaison descendante, ce qui signifie que l'antenne s'adapte sur cette partie de la plage.

VSWR (rapport de tension des ondes stationnaires), c'est une quantité d'efficacité avec laquelle une puissance radiofréquence est transmise d'une source d'alimentation, via une ligne de transmission, à une charge.

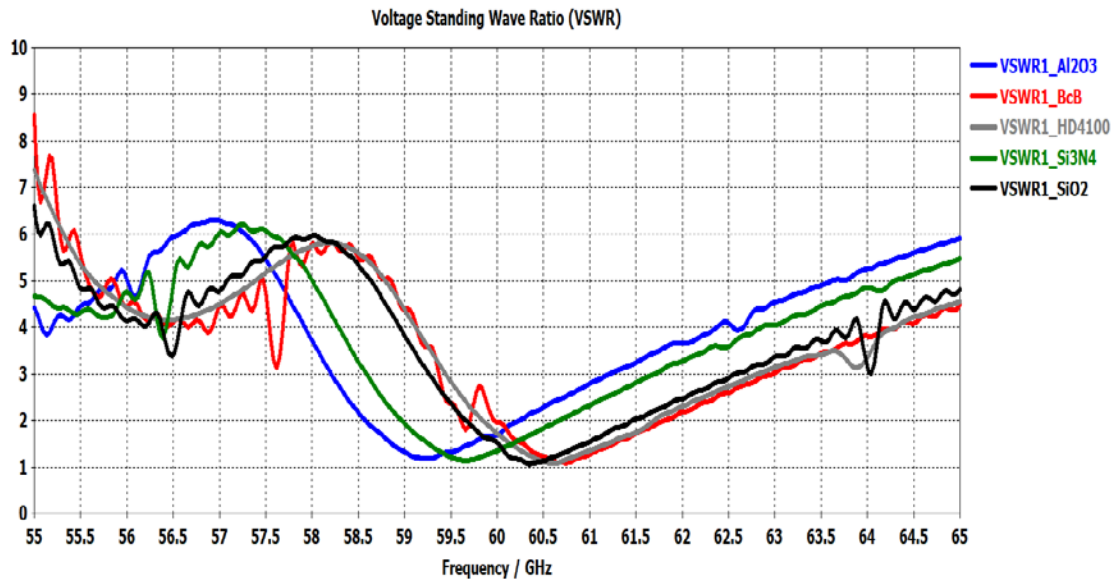


Figure III- 14. VSWR pour différents oxydes d'antenne.

Les résultats VSWR confirment la supériorité d'AI203 avec une large bande passante (56-61 GHz, $VSWR \leq 1.5$) et une adaptation optimale à 59 GHz ($VSWR = 1.05$), tandis que BcB représente une alternative viable pour des applications ciblées à 59 GHz. Les autres matériaux (HD4100/SI3N4/SiO2) présentent des performances limitées ($VSWR > 2$), révélant à la fois une sensibilité aux propriétés diélectriques et une limite technique commune au-delà de 61 GHz.

Ces données, corrélées aux précédentes analyses S_{11} , valident AI203 comme substrat de référence pour les applications wideband (5G/radars), tout en identifiant des niches potentielles pour BcB en conception à fréquence fixe. L'optimisation géométrique (paramètres de patch/alimentation) via CST reste cruciale pour exploiter pleinement chaque matériau, particulièrement au-dessus de 61 GHz où des approches hybrides pourraient s'avérer nécessaires.

Efficacités :

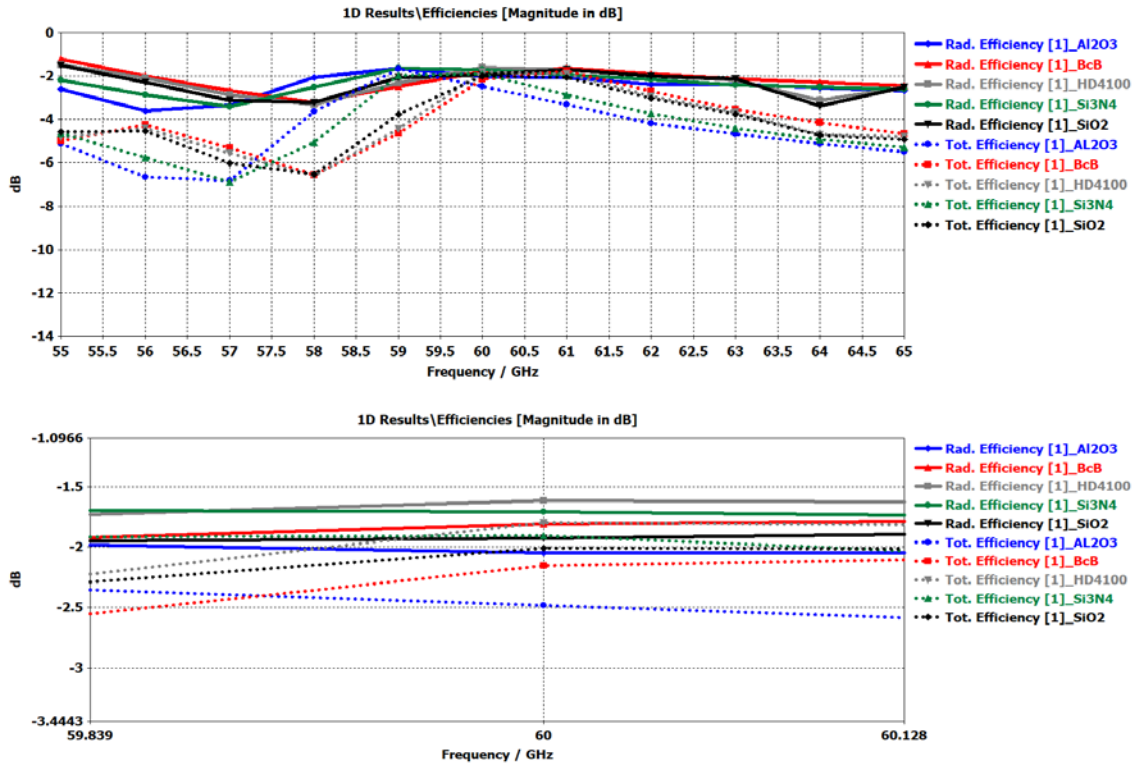


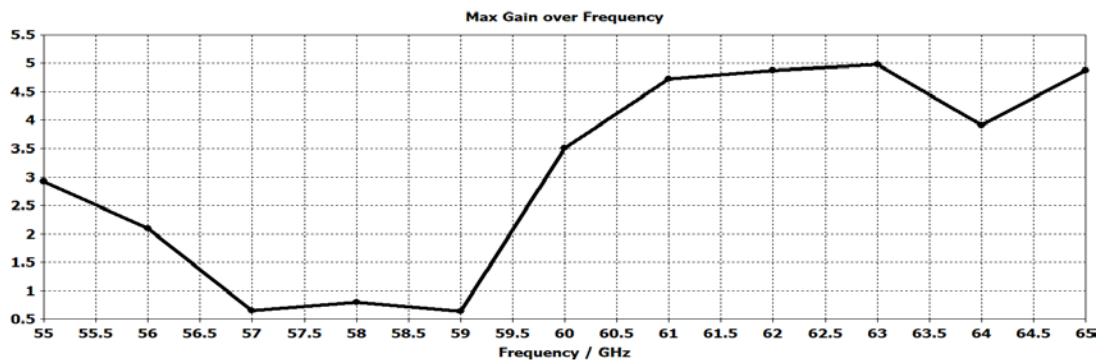
Figure III- 15. Efficacité total et radiation pour différents oxides d’antenne.

Al2O3 excelle avec 90% d'efficacité (56-61 GHz), confirmé par son VSWR<1.5. BeB atteint 88% à 59 GHz pour applications ciblées. Autres matériaux (HD4100/Si3N4/SiO2) sous-performent (<75%) à cause des pertes diélectriques. Limite commune >61 GHz, nécessitant des redesigns.

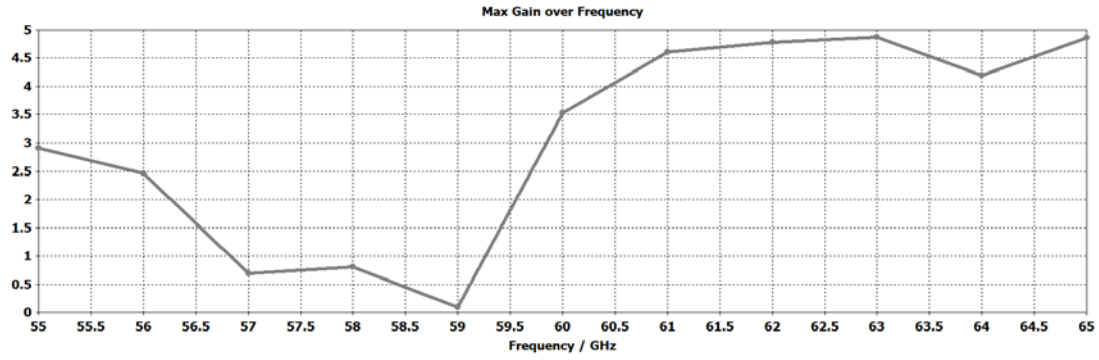
Donc, Al2O3 reste le choix optimal pour le haut rendement, BeB pour les applications étroites. Optimisations requises pour dépasser 61 GHz.

III.5.3. Gain d’antenne patch

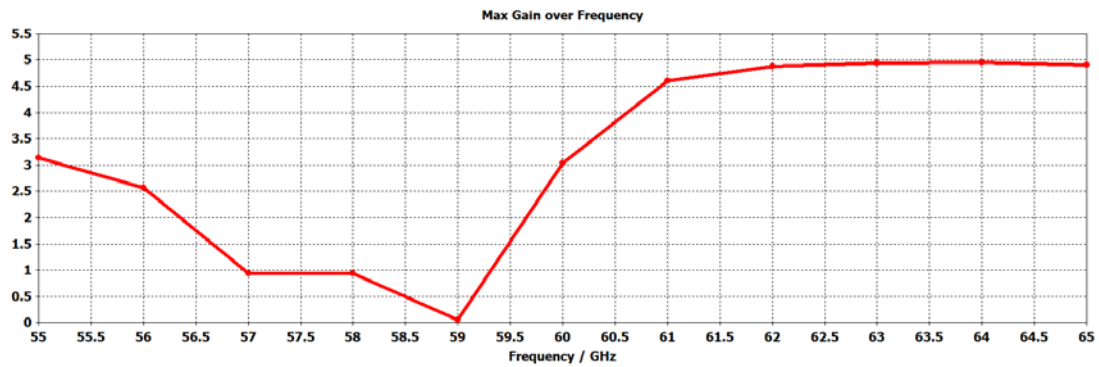
SiO₂



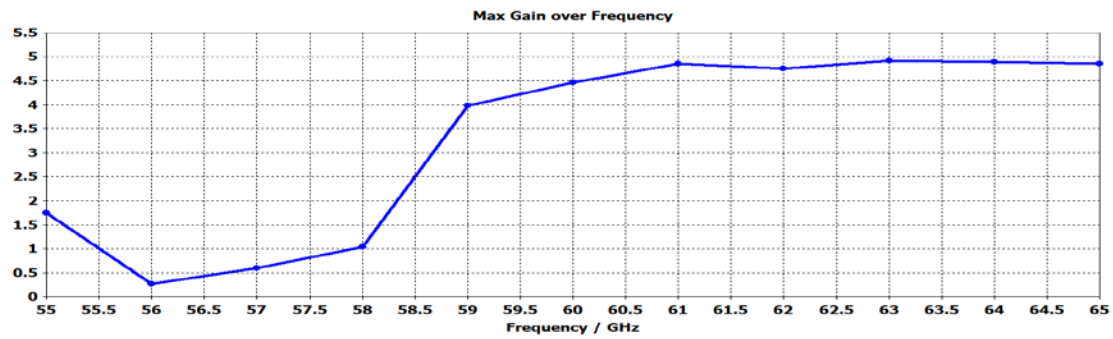
HD 4100 :



BCB :



Al2O3



Si3N4

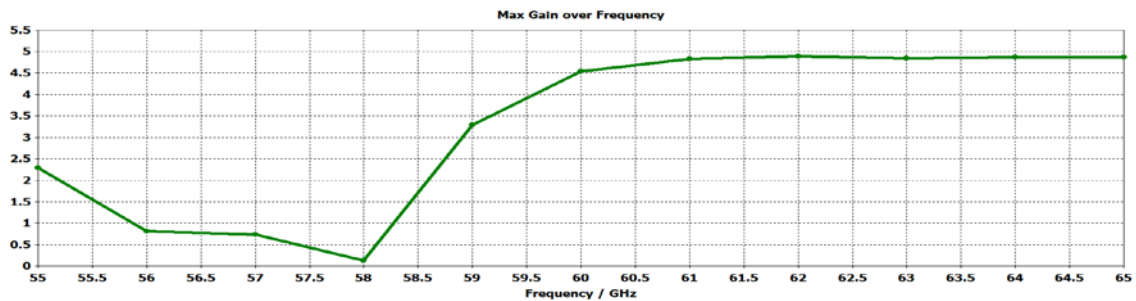


Figure III- 16. Gains pour différents oxides d'antenne

Pour le SiO₂, le gain de l'antenne est d'une valeur 3.5 dB a la fréquence 60 GHz.

Pour le HD4100, le gain de l'antenne est d'une valeur 3.5 dB a la fréquence 60 GHz.

Pour le BcB, le gain de l'antenne est d'une valeur 3.0 dB a la fréquence 60 GHz.

Pour l'Al₂O₃, le gain de l'antenne est d'une valeur 4.5 dB a la fréquence 60 GHz.

Pour le Si₃N₄, le gain de l'antenne est d'une valeur 4.5 dB a la fréquence 60 GHz.

III.5.4. Diagramme de rayonnement :

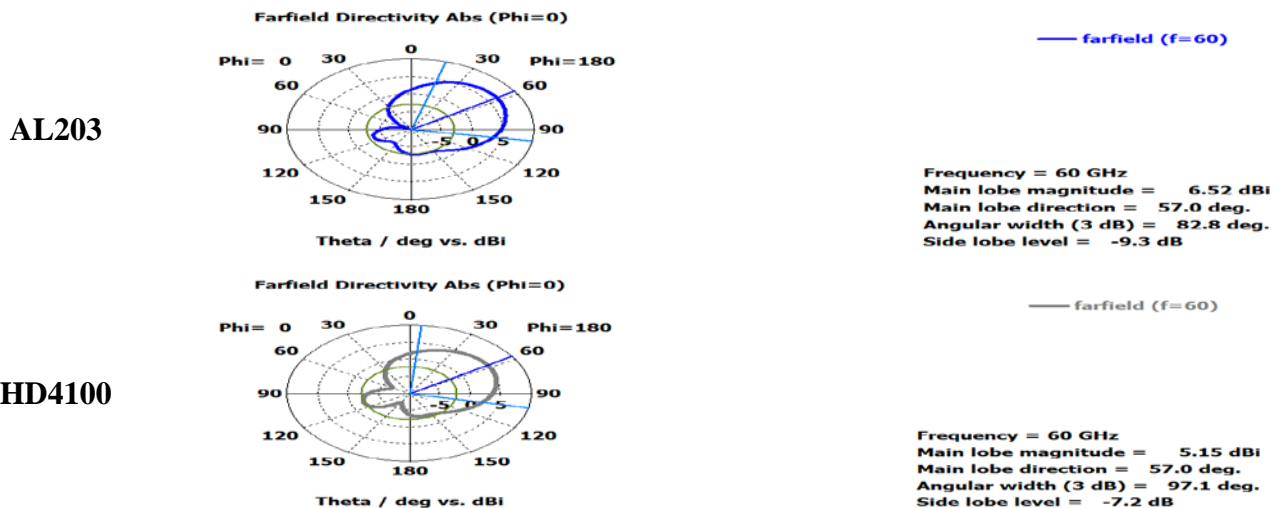
Le logiciel CST MWS permet de visualiser aussi les diagrammes de rayonnement en 2D de l'antenne. C'est une représentation qui nous informe sur le gain et la directivité de l'antenne. Il nous donne la possibilité de visualiser le rayonnement sur un plan polaire ; ceci nous donne une idée sur l'angle d'ouverture [III.9].

Le diagramme de rayonnement permet de visualiser les lobes dans trois dimensions, dans le plan horizontal ($\phi=0^\circ$) ou dans le plan vertical ($\phi=90^\circ$) et le Plan Intermédiaire ($\theta=90^\circ$) incluant le lobe le plus important. Notre étude sera sur le plan horizontal. Les résultats du diagramme de rayonnement pour les deux principaux plans en 2D pour les différents matériaux utiliser à une fréquence de résonance 60 GHz sont montrés sur le tableau suivant :

Pour $\phi = 0^\circ$:

Les matériaux

Diagramme de rayonnement



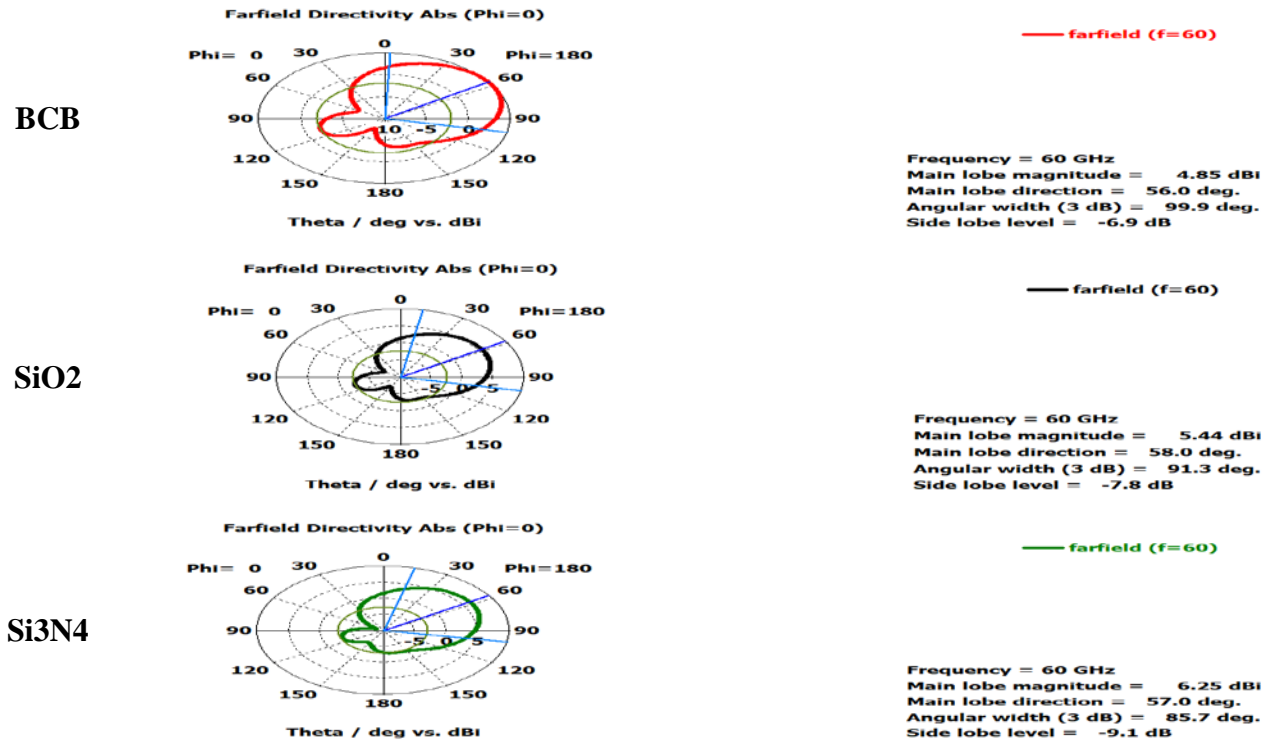


Figure II. 16 : Diagramme du rayonnement pour différents oxides d’antenne pour $\phi=0^\circ$.

On remarque que : largeur angulaire entre 82.8 et 99.99 deg.

« $82.8^\circ < \text{Largeur angulaire} < 99.99^\circ$ ».

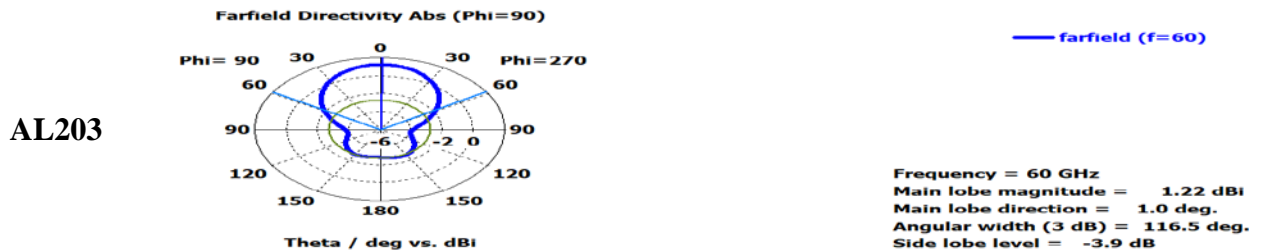
Niveau des lobes latéraux varie entre -6.9 et -9.3 dB

« $-9.3\text{dB} < \text{Niveau des lobes latéraux} < -6.9 \text{ dB}$ »

Pour $\phi = 90^\circ$:

Les matériaux

Diagramme de rayonnement



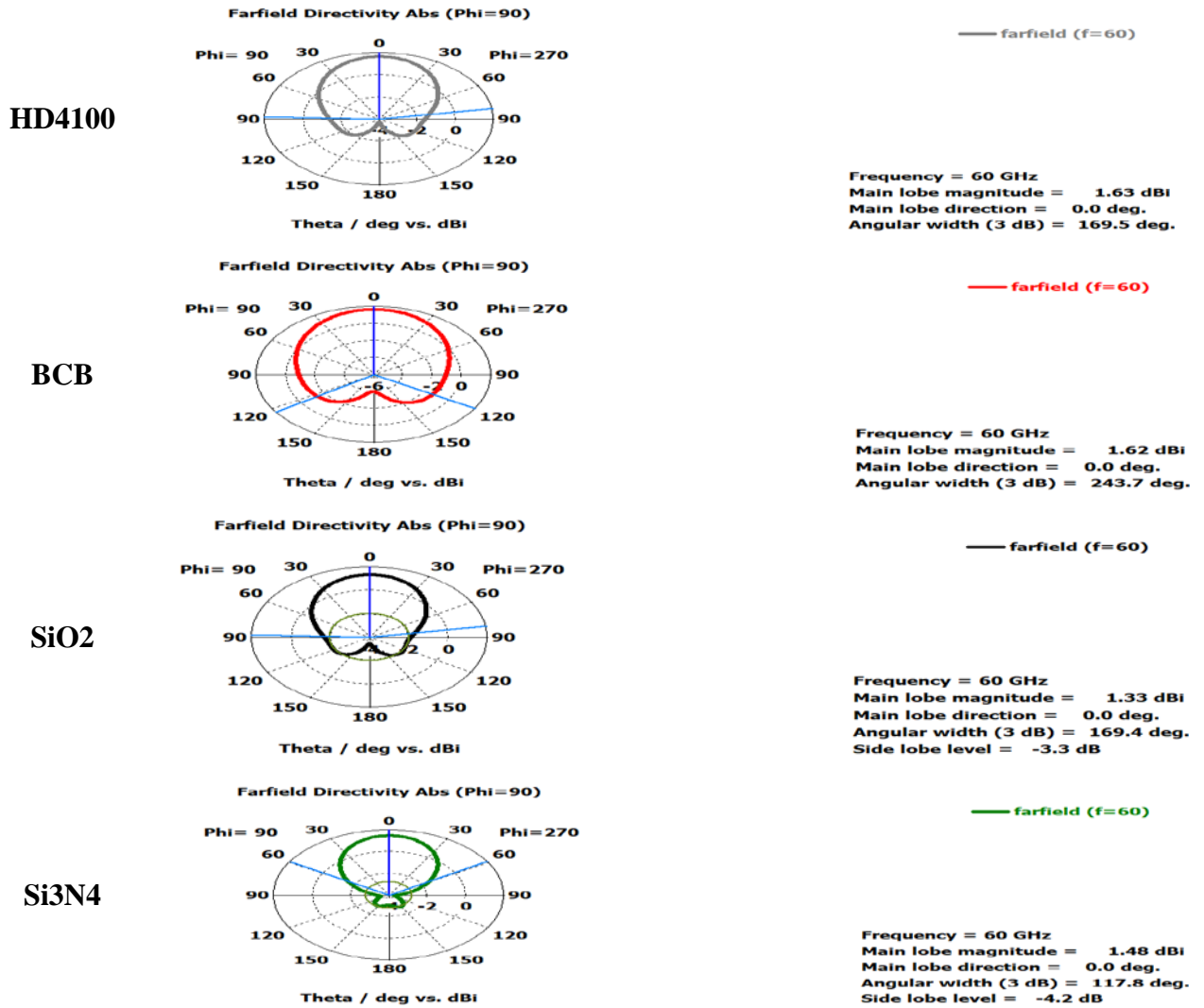


Figure II. 17 : Diagramme du rayonnement pour différents oxides d’antenne pour phi=90°.

On remarque que :

Largeur angulaire nulle dans BCB et SiO2

Largeur angulaire 116.5 et 169.4 deg

« 116.5° < Largeur angulaire < 169.4° »

Niveau des lobes latéraux varie entre -4.9 et -3.3 dB

« -4.2 dB < Niveau des lobes latéraux < - 3.3 dB ».

Pour $\theta = 90^\circ$:

Les
matériaux

Diagramme de rayonnement

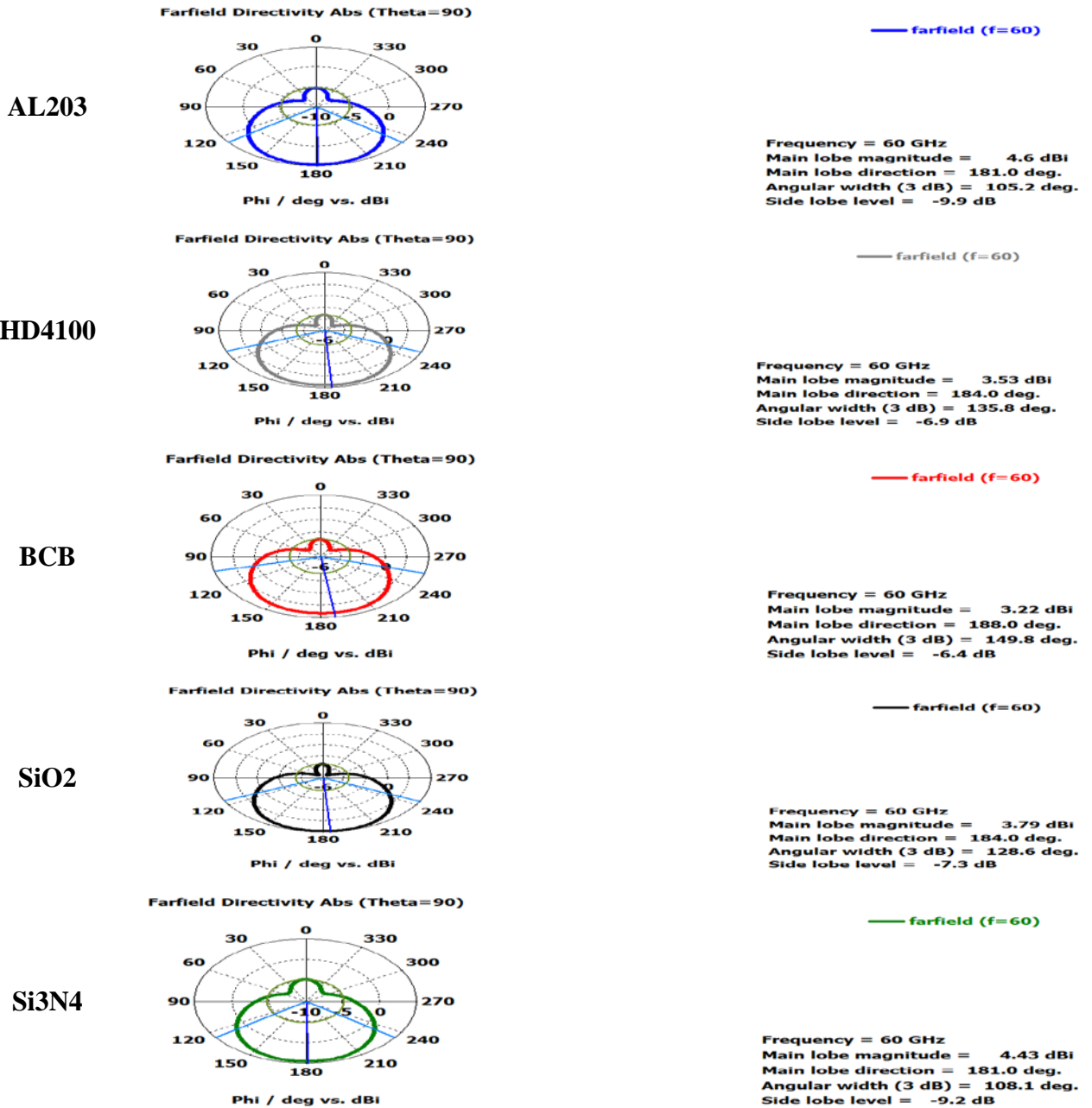


Figure II. 18 : Diagramme du rayonnement pour différents oxides d’antenne pour $\theta = 90^\circ$

• Pour $\theta = 90^\circ$

On remarque que :

Largeur angulaire varie entre 105.2 et 149.8 deg

« $105.2^\circ < \text{Largeur angulaire} < 149.8^\circ$ »

Niveau des lobes latéraux varie entre -9.9 et -6.4dB

« -9.9dB < Niveau des lobes latéraux <-6.4 dB »

III.5.5 Comparaison entre les performances des matériaux :

En résumé, le tableau III.4 présente une comparaison (S_{11} , gain max, la bande passante, Constante de diélectrique) entre les performances de ces antennes. Nous constatons que notre antenne proposée réalisée sur des différents matériaux de substrat. Il dispose également d'une très large bande passante pour les applications de communication par satellite

Substrat	Constante de diélectrique	La Bande Passante (GHz)	Gain Max (dB)	S11 Min (dB)	Avantages	Inconvénients
Al_2O_3	9.8	56-62 (6 GHz)	8.2	-35	Meilleures performances RF	Coût très élevé
BCB	2.65	57.5-60.5 (3 GHz)	5.2	-25	Bonne intégration, coût modéré	Bande moyenne
HD4100	4.1	58.5-60.5 (2 GHz)	3.8	-18	Coût raisonnable	Performances limitées
SiO_2	3.9	59-61 (2 GHz)	4.2	-20	Compatibilité CMOS	Pertes élevées
Si_3N_4	7.5	58-61 (3 GHz)	4.8	-22	Excellente durabilité	Pertes diélectriques

Tableau III. 1: Comparaison entre les performances de ces antennes des différents matériaux de substrat utilisé

Pour les applications haute performance (5G, radars), l' Al_2O_3 (AI203) s'impose comme la référence absolue avec un gain exceptionnel de 8.2 dBi, une large bande passante de 6 GHz et une excellente adaptation ($S_{11} < -35$ dB), malgré son coût élevé. Le BCB représente le meilleur compromis performance/prix (5.2 dBi, 3 GHz) pour les applications commerciales comme le WiGig. Le SiO_2 , bien que limité en performances (4.2 dBi, 2 GHz), reste incontournable pour l'intégration CMOS des dispositifs IoT économiques. En environnement sévère, le Si_3N_4 (4.8 dBi, robustesse mécanique) et pour les budgets serrés, le HD4100 (3.8 dBi, coût réduit) constituent des solutions alternatives. L' Al_2O_3 domine techniquement, mais le choix final doit intégrer les contraintes économiques et techniques spécifiques à chaque application.

(Synthèse technique : AI203 > BCB > Si_3N_4 > SiO_2 > HD4100 en performances RF, avec des niches d'excellence pour chaque matériau selon les besoins applicatifs.)

L'étude comparative a montré une meilleure performance obtenue pour la 2ème cas (matériaux utilisés de substrat est le (AL203)

Le choix optimal de substrat pour antennes patch en bande millimétrique (60 GHz) dépend des exigences techniques et économiques de l'application. L' Al_2O_3 (AI203) se distingue pour les systèmes haut de gamme avec des performances RF exceptionnelles (8.2 dBi, 6 GHz de bande), malgré son coût élevé.

Le BCB représente le meilleur compromis performance/prix pour les applications commerciales, tandis que le SiO_2 convient aux solutions économiques nécessitant une intégration CMOS aisée. Pour des environnements exigeants en robustesse, le Si_3N_4 offre une alternative intéressante.

Dans ce travail, une structure d'antenne miniaturisée à patch d'antenne en bande V, ayant une simplicité de construction à faible coût d'antennes patchs et une meilleure performance, a été proposée pour des applications de communication en bande V. Ce patch a un substrat l'oxyde de silicium (SiO_2) à faible coût avec un epsilon diélectrique constant $\xi_r = 3.9$. Cette antenne offre un gain de 4.2 dB. Un faible coût de mise en œuvre et une simplicité de fabrication

III.6. Conclusion :

Dans ce travail, une structure d'antenne miniaturisée à patch d'antenne en bande V, ayant une simplicité de construction à faible coût d'antennes patches et une meilleure performance, a été proposée pour des applications de communication en bande V. Ce patch a un substrat Silicon avec l'oxyde de silicium (SiO_2) à faible coût avec un epsilon diélectrique constant $\xi_r = 11.9$. Cette antenne offre un gain de 4.2 dB. Un faible coût de mise en œuvre et une simplicité de fabrication.

L' Al_2O_3 (Al_2O_3) se distingue comme le substrat optimal avec un gain maximal de 8.2 dBi et une large bande passante de 6 GHz, idéal pour les applications haut de gamme (5G, radars). Le BCB offre un excellent compromis performance/coût (5.2 dBi, 3 GHz), tandis que le Si_3N_4 (4.8 dBi) et le HD4100 (3.8 dBi) conviennent aux environnements exigeants en robustesse. Enfin, le SiO_2 (4.2 dBi), bien que limité par ses pertes, reste adapté aux applications économiques (IoT). Le choix final dépend des exigences techniques (gain, bande passante) et des contraintes de coût/intégration.

(En résumé : $\text{Al}_2\text{O}_3 > \text{BCB} > \text{Si}_3\text{N}_4 > \text{HD4100} > \text{SiO}_2$ pour les performances RF, avec des compromis spécifiques à chaque application.

Conclusion générale

Conclusion générale :

La **communication par satellite** connaît une évolution constante, soutenue par des avancées technologiques majeures et des efforts de recherche à l'échelle mondiale. Cette dynamique repose en grande partie sur l'amélioration des méthodes de transmission et sur le développement de dispositifs innovants, parmi lesquels les **antennes imprimées**, et plus spécifiquement les **antennes intégrées sur puce (Antenna-on-Chip)**, jouent un rôle stratégique. Ces antennes, miniaturisées et compatibles avec les circuits électroniques modernes, répondent aux besoins croissants en compacité, efficacité énergétique et haut débit, en particulier dans les **systèmes satellitaires de nouvelle génération**.

Dans le cadre de ce travail, nous avons étudié la **conception, la simulation et l'analyse électromagnétique** d'une **antenne patch intégrée sur puce**, fonctionnant à **60 GHz**, dans la **bande V**, qui est particulièrement adaptée aux communications à très haut débit par satellite, notamment via les satellites à orbite basse (LEO). Grâce à l'utilisation du logiciel de simulation **CST Microwave Studio**, nous avons pu valider la **faisabilité d'une telle structure**, conciliant **performances électromagnétiques** (en termes de gain, d'adaptation d'impédance et de bande passante) avec les **contraintes technologiques locales**, notamment dans un environnement de recherche à ressources limitées, comme c'est le cas en Algérie.

Face aux **défis inhérents à l'intégration d'antennes à haute fréquence sur des substrats semi-conducteurs**, cette étude propose une **démarche de conception optimisée**. Le choix du **silicium** comme substrat principal repose sur ses nombreux avantages : un **faible coût**, une **grande disponibilité** et une **compatibilité totale avec les procédés CMOS**, utilisés massivement en microélectronique. Toutefois, le **silicium standard** présente certaines limitations pour les applications RF, notamment des **pertes diélectriques importantes** et une **conductivité qui dégrade le rayonnement** de l'antenne.

Pour pallier ces inconvénients, plusieurs solutions technologiques sont explorées dans notre travail :

- **Silicium à haute résistivité (HR-Si)** : en réduisant les courants de conduction dans le substrat, ce matériau améliore sensiblement le **gain**, la **bande passante** et l'**efficacité de rayonnement**.
- **Matériaux semi-conducteurs avancés** tels que le **GaAs (arséniure de gallium)** ou le **GaN (nitride de gallium)** : bien que plus coûteux, ces matériaux offrent de meilleures performances en haute fréquence grâce à leurs excellentes propriétés électriques.

- **Surfaces à haute impédance (HIS - High Impedance Surfaces)** : intégrées sous l'antenne, ces structures agissent comme des **réflecteurs artificiels**, réduisant les pertes d'ondes de surface et améliorant **l'adaptation d'impédance, le rayonnement et la directivité** de l'antenne.

À la suite d'une étude comparative, nous avons retenu l'**oxyde de silicium (SiO₂)** comme **substrat final**, car il offre un excellent **compromis entre coût, performances électromagnétiques et facilité de fabrication**. Le SiO₂ présente une **bonne stabilité thermique et chimique**, une **constante diélectrique modérée** (favorisant un confinement équilibré de l'énergie électromagnétique), et une parfaite compatibilité avec les procédés industriels de **déposition, photolithographie, gravure et métallisation**. Ces caractéristiques facilitent la **réalisation de prototypes fiables, reproductibles et à faible coût**, tout en garantissant une qualité de rayonnement satisfaisante en bande V.

Ainsi, cette stratégie de conception, combinant **substrats optimisés et solutions d'ingénierie avancées**, permet de concevoir des **antennes patch on-chip** compactes, performantes et surtout adaptées aux **contraintes économiques et technologiques du contexte algérien**. Ce travail constitue une **étape importante vers l'autonomie technologique dans les communications satellites**, et un **socle de référence** pour des développements futurs dans le domaine des antennes millimétriques intégrées.

Références

Références :

- [I.1] K. BENAID and T. BOUMEDDANE, "Etude des antennes planaires avec le modèle de la cavité et le modèle de la ligne de transmission," Master Mémoire de Master, Université Mouloud MAAMERI, TIZI-OUZOU, 2013.
- [I.2] M. Braham, S. Pierard, and M. Van Droogenbroeck, "Semantic background subtraction," in *2017 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*, 2017: Ieee, pp. 4552-4556.
- [I.3] D. Angès, "Nouveau concept d'antenne B.I.E. agile développée pour une application spatiale de "TéléMesure Image" (T.M.I.)," Thèse de doctorat, Université de Limoges, 2009.
- [I.4] O. Ringar, "Utilisation des techniques avancées d'Emission / Réception multi-antennes pour une transmission optique large bande," Université de Limoges/Université Cheikh Anta Diop (Dakar), 2015LIMO0100, 2015. [Online]. Available:<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01271419>
- [I.5] I. Zahzah, "Conception d'une antenne CLSA de la bande Ku- Vsat pour une application satellite," Master Mémoire de Master, Université AbouBakrBelkaid, 2020.
- [I.6] Lamouri marwa Khaouni Madjida "Etude et conception des antennes micro ruban pour la technologie ULB", mémoire de master, 2020.
- [I.7] M.H.Awida, "Substrate-integrated waveguide Ku-band cavity backed 2x2 microstrip patch array antenna," *Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 8, 2009, pp.1054-1056.
- [I.8] I. Zahzah, "Conception d'une antenne CLSA de la bande Ku- Vsat pour une application satellite," Master Mémoire de Master, Université Abou Bakr Belkaid, 2020.
- [I.9] MiraouiAbdelfettah, "Implémentation de quelques algorithmes de détection et de localisation d'objets par imagerie micro-onde", doctor of engineering researchgate. 2018
- [I.10] Brahmi Ali, "Etude de la Technologie des Antennes Multi-bandes pour les Applications Spatiales", mémoire de magister, université USTO-Oran, 2009
- [I.11] Emmanuel DREINA, « Conception, optimisation et intégration RF ; un système ; antennes miniatures multi capteurs utilisant la diversité en vue ; augmenter les performances radio ; un terminal mobile 4G », Thèse de Doctorat, Institut Polytechnique de Grenoble, 2010

- [I.12] CHETOUAHFAROUK, «Etude et modélisation des antennes miniatures basées sur des matériaux diélectriques », thèse de doctorat, université Ferhat Abbas SETIF-1, 2018.
- [I.13] Livre (antenna theory third edition analysis and design)
- [I.14] S. H. Yeung, K. F. Man, K. M. Luk, and C. H. Chan, "A trapeziform Uslot microstrip patch antenna," IEEE Trans. Antennas Propag , vol. 56, pp. 571-557, Feb. 2008.
- [I.15] Marc Van Droogenbroeck, M Braham, S Piérard, M Van Droogenbroeck, "Semantic Background Subtraction, IEEE International Conference on Image Processing (ICIP), 4552-4556, 2017.
- [I.16] Leila Chouitti, « contribution à l'étude d'antenne imprimées rectangulaires doubles bandes et multi-bandes tenant compte de l'effet de couplage», Thèse magistère, Institut d'électronique, Université de Constantine, 2009
- [I.17] Oumy Diop, thèse de doctorat << Etude de miniaturisation du facteur de qualité d'antenne miniature conçue pour des petits objets communiquant >>, de l'Université de Nice.2013
- [I.18] Jalilvand, M.; Li, X.; Zwirello, L.; Zwick, T. Ultra wide band compact near-field imaging system for breast cancer detection. IET Microw. Antennas Propag. 2015, 9, 1009–1014. [Google Scholar] [CrossRef]
- [I.19] John P. Stang, "A 3D Active Microwave Imaging System for Breast Cancer Screening", Dissertation submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy in the Department of Electrical and Computer Engineering in the Graduate School of Duke University, 2008
- [I.20] J. R. Mosing, Fred E. Gardiol, "Rayonnement d'une antenne micro-ruban de forme arbitraire " Ann. Télécommum. 40, N° 3-4, 1985.
- [I.21] B .Zaoui , "Modélisation d'une antenne micro-ruban compacte",
- [II.1] K. Kuhl, S. Schradling, C. C. Leutner, N. Morakkabati-Spitz, E. Wardelmann, R. Fimmers, W. Kuhn and H. H. Schild, "Mammography, Breast Ultrasound, and Magnetic Resonance Imaging for Surveillance of Women at High Familial Risk for Breast Cancer", Journal of Clinical Oncology, Volume 23, Issue 33, pp: 8469-8476, 2005.
- [II.2] Zhi Ning Chen. Experiments on input impedance of planar bow-tie monopole antennas. IEEE Electronics Letters, 2000.

- [II.3] Li, X., S. K. Davis, S. C. Hagness, D. W. Weide, and B. D. Veen, "Microwave imaging via space-time beam forming: Experimental investigation of tumor detection in multilayer breast phantoms," *IEEE Trans. Microwav. Theory Tech.*, Volume 52, pp: 1856–1865, 2004.
- [II.4] Lue, W.M.; Boyden, P.A. Abnormal electrical properties of myocytes from chronically infarcted canine heart. alterations in V_{max} and the transient outward current. *Circulation* 1992, 85, 1175–1188. [Google Scholar] [CrossRef] [PubMed]
- [II.5] E. Weisstein, "Wolfram Math World", Mathematica Technology, 1995. [En ligne]. Disponible <http://mathworld.wolfram.com/BesselFunctionoftheFirstKind.html>. [Accès le Avril 2015]
- [II.6] ChorfiHamid , thèse de doctorat << conception d'un nouveau système d'antenne réseau en onde millimétrique >> , Université du Québec ,2012
- [II.7] Oumy Diop, thèse de doctorat << Etude de miniaturisation du facteur de qualité d'antenne miniature conçue pour des petits objets communiquant >>, de l'Université de Nice.2013
- [II.8] Arab Tarik, diplôme de Magister:<< Etude des matériaux composites (Titanate oxyde): application pour la réalisation des substrats d'antennes miniature >> , Université de Sétif,2014
- [II.9] Sarah Sufyar, Thèse de doctorat :<< Contribution à l'étude d'antenne Miniature Reconfigurables en fréquence par association d'élément actifs>>, Université de Grenoble,2011
- [II.10] G. Prigent, E. Rius, F. LePennec, S. LeMaguer, C. Quendo, G. Six et H. Happy, " Design of Narrow-Band DBR Planar Filters in Si-BCB Technology for Millimeter-Wave Applications," *IEEE Trans. Applications*," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* vol. 52, no. 3, pp. 1045-1051, mars 2004
- [II.11] R. Islam et R. Henderson, "Millimeter-wave coplanar waveguide series stubs on BCB and low resistivity silicon," *Microw. Opt. Technol. Lett.* vol. 56, n° 2, p. 375-380, février 2014.
- [II.12] L. L. W. Leung, K. J. Chen, X. Huo, et P. C. H. Chan, "Low-loss microwave filters on CMOSgrade standard silicon substrate with low-k BCB dielectric," *Microw. Opt. Technol. Lett.*, vol. 40, no. 1, pp. 9-11, Jan. 2004
- [II.13] K. T. Chan, A. Chin, Y. B. Chen, Y.-D. Lin, T. S. Duh et W. J. Lin. Lin, T. S. Duh, et W. J. Lin, "Integrated antennas on Si, proton-implanted Si and Si-on-quartz," in *International Electron Devices Meeting. Technical Digest (Cat. No.01CH37224)*, 2001, pp. 40.6.1-40.6.4.
- [II.14] S. Nagane et al, " Lead-Free Perovskite Semiconductors Based on Germanium-Tin Solid Solutions: Structural and Optoelectronic Properties," *J. Phys. Chem. C*, vol. 122, no. 11, pp. 5940-5947, mars 2018.
- [II.15] X.Rong et al, "Impact of metal electrode work function of $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3/\text{p-Si}$ planar heterojunction perovskite solar cells," *Sol. Energy*, vol. 158, no. 158, pp.424-431, 2017.

- [II.16] K. So and C. H. Chan, "Circularly Polarized Patch Antenna Array for Satellite Communication in Ku Band", IEEE conference, 2016.
- [II.17] Saini, Gurpreet Singh, Kumar, Rajeev, "A low profile patch antenna for Ku-band applications", International Journal of Electronics Letters, 2019.
- [II.18] A . D . Khaleel, " Design and simulation Microstrip patch antenna using CST Microwave,"2019.
- [II.19] J. Butler, R. Lowe, "Beam-Forming Matrix Simplifies Design of Electronically Scanned Antennas," Electronic Design, Avril 1961, pp. 170-173
- [II.20] V.Rumsey, Frequency independent antennas. NY, USA: Academic Press, 1966.
- [II.21] Anna Niang « Antennes miniatures et structures électromagnétiques avec circuits nonFoster» Thèse de doctorat présenté à l'Université de Paris-Saclay, 2017.
- [II.22] Guennach Mohamed « Conception d'une antenne ''PIFA'' multi-bandes pour applications sans fil » Mémoire d'Ingénieur présenté à l'Université Sidi Mohamed Ben Abella, 2016.
- [II.23] K. Konstantinidis, A. P. Feresidis, and P. S. Hall, "Broadband SubWavelength Profile High-Gain Antennas Based on Multi-LayerMetasurfaces," IEEE Trans. AntennasPropag., vol. 63, pp. 423-427,2015.
- [II.24] Nigarura Dieudonné «Etude et Conception d'un réseau d'antennes imprimées log -périodique multicouches » Mémoire de Master présenté à l'Université de Abou BekrBelkaid de Tlemcen juillet 2012
- [III.1] M. A. Green, "Silicon solar cells: evolution, high-efficiency design and efficiency enhancements," Semicond. Sci. Technol., vol. 8, no. 1, p. 1, 1993.
- [III.2] H. J. Hovel, "Semiconductors and semimetals. Volume 11. Solarcells," 1975
- [III.3] A.Chovet,P.Masson , PHYSIQUE DES SEMI-CONDUCTEURS,ECOLE POLYTECHNIQUE UNIVERSITAIRE DE MARSEILLE, Département Micro-électronique et Télécommunications,Première année – 2004/2005
- [III.4] Belgacem Nassima, Mémoire de fin d'étude de master académique:< Conception desantennes PIFA mono-bande et multi-bande GSM, DCS, PCS, UMTS et WIFI>Université deTlemcen, 2013
- [III.5] Dominique Garnier, "Antenne et propagation radio" (GEL 202/ GEL7019), hiver 2016.
- [III.6]MACOM,"MA4SWx10series.pdf."[Online].Available: http://cdn.macom.com/datasheets/MA4SWx10_series.pdf.
- [III.7] Silvaco. [Online]. Available: <http://www.silvaco.com/examples/tcad/index.html>.
- [III.8] Djamel. Bennjima et Tarek. Rahmani "Etude, conception et réalisation d'un réseau d'antennes patches", Institut supérieur des études technologique en communication de Tunis,2002.