REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA



Faculté de **T**echnologie

Département du **G**énie **E**lectrique

Mémoire de fin d'études de Master

Filière : Télécommunications

Spécialité : Systèmes des télécommunications

Étude et conception d'une antenne à ondes de fuite basée sur un guide d'ondes intégré à un substrat de métamatériaux pourl'application 5G.

Présentés par :

TRIK Farhouh Nadjelaa

MAIZI Maroua

Proposés et Dirigés par :

M. SOUMALI Chaabane

Promotion 2024


بسم الله الرحمن الرحيم

Remerciement

Nous remercions tout d'abord, ALLAH qui nous a donné la force et le courage afin de parvenir à élaborer ce modeste travail.

En tout premier lieu, nous remercions vivement notre encadreurs monsieur SOUMALI Chaabane, pour leur disponibilité, ses précieux conseils,et pour nous à donner beaucoup d'aides sur le logiciel CST, leur soutien moral et scientifique nous a permis de mener à terme ce travail.

Nous souhaitons également remercier toute l'équipe pédagogique du département électrique. Nos vifs remercîments vont aussi à nos enseignants qui ont fait de leurs mieux pour nous donner une formation universitaire solide qui nous a permis de préparer ce modeste mémoire.

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

Nous voudrons remercier nos familles qui nos encouragées dans la poursuite de notre travail de mémoire. Enfin, nous tenons également à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Dédicace

Louange à Allah, qui nous a donné la vie, et merci pour le début et la fin. À la fin de nos prières, nous disons que toute louange est due à Allah, le Seigneur des Mondes.

Je vois ma période académique arriver à sa fin, après tant de labeur et de diligence consacrés à la quête de la connaissance. Pendant toutes ces années, mes espoirs et rêves nocturnes se sont matérialisés, et mon combat est devenu clair pour ceux qui m'entourent. Aujourd'hui, je me tiens ici, avec mon projet de fin d'études en main, fière de mes efforts et la tête haute. Louange à Allah pour chaque opportunité et pour Sa satisfaction. Ainsi, me voilà, ayant atteint ce succès et réalisé mon rêve.

Avec tout mon amour, je dédie une partie de mon succès et de ma graduation à :

À celui qui a embelli mon nom avec les plus beaux titres, qui m'a soutenue sans limites, et m'a donné sans compter, m'apprenant que le travail acharné et la connaissance sont les clés du succès et du progrès. À mon premier soutien dans ma carrière, mon appui, mon protecteur, et mon refuge après Allah.

Mon père bien-aimé

Dédicace

À celle qu'Allah a fait de mon paradis sous ses pieds, qui m'a embrassée les mains avant même que je ne foule le sol, et m'a guidée à travers les épreuves et les luttes.

Ma mère bien-aimée

À ceux qui se sont le plus souciés de ma présence, de qui j'ai tiré force et amour, qui m'ont appris le sens de la vie.
À mes frères Ahmed, Mohammed, Monsif, et le reste de mes compagnons bien-aimés.

À ceux qui se sont caractérisés par la loyauté et la générosité, qui m'ont accompagnée dans ce parcours : mes amis et collègues, toujours soutenants et compréhensifs.

Je dois également exprimer ma gratitude sincère au professeur dévoué qui n'a ménagé aucun effort pour m'orienter et m'aider dans le domaine de la recherche scientifique : Soumali Chaabane. Son assistance a été inestimable pour guider ma recherche et affiner sa substance scientifique. Qu'Allah le récompense de tout le bien.

Enfin, merci à tous ceux qui ont cru en moi et m'ont soutenue, malgré les défis. Me voici aujourd'hui, à la fin de mes années d'études, ayant réalisé mon rêve malgré tous les obstacles. Louange à Allah, qui ne m'a pas déçue.

Votre diplômée, NADJELAA

Dédicace

Avec l'aide de Dieu tout-puissant

J’ai pu réaliser Ce modeste travail que je dédie :

**Ma très chère mère qui a toujours éclairé ma voie.*

**Mon cher père qui a toujours un appui dans ma vie.*

**À mes chers frères et sœurs*

Ainsi que tous mes amis

À tous ceux que j’aime et je respect

MAIZI Maroua

ملخص

الشبكات الخلوية من الجيل الخامس تمثل تطورا كبيرا في مجال الاتصالات المتنقلة، حيث توفر سرعات نقل بيانات تصل إلى جيجابايت في الثانية، وقت إنتقال منخفض يبلغ حوالي ملي ثانية، واتصالات عالية السعة لأجهزة إنترنت الأشياء. ولتعزيز النطاق العريض المتنقل، من الضروري استخدام الموجات الميلمترية من 26 جيجاهرتز إلى 30 جيجاهرتز، بما في ذلك نشر العديد من الخلايا الصغيرة للاتصال الموثوق.

يقترح هذا العمل هوائيا بموجات مسربة يعتمد على خط نقل مركب من اليمين إلى اليسار ودليل موجي متكامل على الركيزة. يوفر هذا الهوائي كسبا عاليا وقدرة على مسح الشعاع، مما يقلل من التكلفة واستهلاك الطاقة في المصفوفات المرحلية. الهدف هو دراسة وتصميم هذا الهوائي باستخدام برنامج لتلبية متطلبات الجيل الخامس.

الكلمات المفتاحية: هوائي موجة التسرب، الدليل الموجي المتكامل للركيزة، المواد الخارقة.

Résumé

Les réseaux 5G représentent une avancée majeure en connectivité mobile, offrant des vitesses de transmission de données atteignant le gigabit par seconde, une faible latence d'environ 1 milliseconde, et une haute capacité de connexions pour les appareils IoT. Pour améliorer la bande large mobile (eMBB), l'utilisation des ondes millimétriques (mmWave) de 26 GHz à 30 GHz est nécessaire, impliquant le déploiement de nombreuses petites cellules pour une connectivité fiable.

Ce travail propose une antenne à ondes de fuite (LWA) basée sur une ligne de transmission composite droite-gauche (CRLH) et un guide d'ondes intégré au substrat (SIW). Cette antenne offre un gain élevé et une capacité de balayage de faisceau, réduisant ainsi les coûts et la consommation énergétique des réseaux phasés. L'objectif est d'étudier et de concevoir cette antenne avec le logiciel CST STUDIO SUITE pour répondre aux exigences des réseaux 5G.

Mots clés : antenne à onde de fuite (LWA), Guide d’onde Intégré au Substrat (GIS), Métamatériau.

Abstract

Fifth-generation (5G) mobile networks represent a significant advancement in mobile connectivity, crucial for both person-to-person and person-to-machine communications. 5G promises data transmission speeds of up to one gigabit per second per user, enabling simultaneous connections of numerous devices such as sensors and Internet of Things (IoT) devices. These devices will operate using machine-to-machine (M2M) connections and require high device density per area. With optimized network architecture, latency is reduced to approximately 1 millisecond, facilitating applications like autonomous driving and remote machine control.

To enhance enhanced mobile broadband (eMBB), utilizing wide frequency bands is crucial, including millimeter waves (mmWave) in the 26 GHz to 30 GHz range. However, higher frequencies necessitate deploying numerous small cells and pico cells to ensure reliable connectivity.

This research proposes an innovative solution: a leaky-wave antenna (LWA) based on a composite right/left-handed transmission line (CRLH) integrated on a substrate integrated waveguide (SIW). This configuration offers advantages such as high gain and beam-scanning capability, while avoiding the high costs and energy consumption associated with phased arrays.

The goal is to study and design this LWA antenna using CST STUDIO SUITE software to meet the requirements of fifth-generation small cell networks.

Keywords: leaky-wave antenna (LWA), substrate integrated waveguide (SIW), metamaterial.

Table des matières

Liste des figures VI
Liste des tableaux VIII
Liste des abréviations IX
Introduction générale XII
Chapitre 1 : Système 5G et Communication par Ondes Millimétriques 4
1.1. Introduction 3
1.2. Aperçu du la cinquième génération 5
1.3. Principe et objectifs de la 5G 7
1.4. Les technologies clés de la 5G 12
1.4.1. Antennes massives (M-MIMO) : 13
1.4.2. La communication device-to-device (D2D) : 13
1.4.3. Tranchage de réseau (network slicing) : 13
1.4.4. Virtualisation des fonctions réseau (NFV) : 13
1.4.5. Communication de machine à machine (M2M) 14
1.4.6. Onde millimétrique (mm-onde) 14
1.5. La norme de la technologie 5G 15
1.5.1. Normes internationales : 15
1.5.2. Processus de normalisation : 16
1.5.3. Réglementations gouvernementales : 16
1.5.4. Harmonisation internationale : 16
1.6. Les ondes millimétriques 17
1.7 Conclusion 24
Chapitre 2 : Etude des guides d'onde intégrée au substrat (SIW) et Métamatériaux 4
2.1 Introduction 24
2.2 Guide d'ondes intégré au substrat (SIW) 25
2.2.1 Introduction 25
2.2.2 Historique 26
2.2.3 Facteurs clés dans le développement du SIW 27
2.2.4 Facteurs clés dans le développement du SIW 28
2.2.5 Rôle crucial des simulations électromagnétiques avancées dans le développement du SIW 29
2.2.6 Applications du SIW dans divers domaines 30
2.2.7 Perspectives futures et recherche continue sur le SIW 31
2.2.8 Structure et dimensionnement 32

2.2.9 Transition du micro ruban à SIW 37
2.3 Métamatériaux électromagnétiques 40
2.3.1 Introduction 40
2.3.2 Définition de métamatériaux 42
2.3.3 Classification des métamatériaux 44
2.3.4 Ligne de transmission composite main droite/main gauche (CRLH TL) 49
2.3.5 CRLH TL équilibré 54
2.3.6 Application des CRLH TL 57
2.4 Conclusion 58
Chapitre 3 : Antenne à onde de fuites 21
3.1 Antennes à Onde Fuyante 60
3.1.1 Définition et Principes 60
3.1.2 Introduction aux Antennes à Onde Fuyante 60
3.1.3 Principes de Fonctionnement des Antennes à Onde Fuyante 61
3.1.4 Définition du Principe de Rayonnement de Fuite 61
3.1.5 Importance du Principe de Rayonnement de Fuite 62
3.1.6 Mécanismes du Rayonnement de Fuite 62
3.2 Classification de LWAs 62
3.3 Le rôle des antennes à onde fuyante dans la technologie des ondes millimétriques 63
3.3.1 Mécanisme de propagation des ondes 64
3.4 Caractéristiques et avantages des antennes à onde fuyante : 67
3.4.1 Large bande passante 67
3.4.2 Conception à faible profil 68
3.4.3 Réduction des interférences 70
3.5 Antenne à onde de fuites basées sur les métamatériaux 70
3.5.2 LWA sur le guide d'onde intégré au substrat 74
Chapitre 4 : Conception d'une antenne LWA 21
4.1 Introduction 78
4.2 Conception d'une Antenne à Onde de Fuite 78
4.3 Conception du Guide d'Ondes Intégré au Substrat 81
4.4 Conception de l'Antenne à Onde de Fuite (unit celle) 90
4.4.1 Sélection des Paramètres de la Cellule CRLH 90
4.5 Simulations et Évaluation des Performances 92
4.6 Conception d'une antenne à balayage en fréquence (LWA) 94
4.7 Assemblage de l'Antenne Complète 96

Chapitre 5 : Résultat de la simulation par logiciel CST STUDIO SUITE 100
5.1 Introduction.....100
5.2 Analyse des résultats obtenus pour une antenne à onde de fuite SIW.....101
5.2.1 Diagramme de S11 et S21 à différentes fréquences..... 101
5.3 Conclusion 105
Conclusion générale.....102
Référence de Bibliographie 102

Liste des figures

Chapitre 1 : Système 5G et Communication par Ondes Millimétriques

Figure 1.1 : Les ambitions de 5G.

Figure 1.2: Bande de fréquence des ondes millimétriques.

Chapitre 2 : Etude des guides d'onde intégrée au substrat (SIW) et Metamatériaux

Figure 2.1: Géométrie de guide onde intégré au substrat SIW.

Figure 2.2: les dimensions de SIW.

Figure 2.3: Transition d'un SIW vers un microruban avec ses paramètres.

Figure 2.4: distribution des champs électrique et champs magnétique d'une ligne micro ruban.

Figure 2.5: Représentation vectorielle d'une onde plane avec trièdre direct et indirect caractérisé par la règle de la main droite et main gauche respectivement : (a) milieu main droite, (b) milieu main gauche.

Figure 2.6: Classement des matériaux en fonction du signe de leur permittivité Ɛ et de leur perméabilité μ.

Figure 2.7: Modèle de circuit équivalent pour une TL sans perte a) TL RH pure, b) TL LH pure, c) CRLH TL.

Figure 2.8: Les différents intervalles de propagation.

Figure 2.9: Diagramme de dispersion/atténuation d'une CRLH TL, d'après l'équation γ(ω), en comparaison avec une TL RH pure (β_{PRH}) et une TL LH pure (β_{PLH}).

Figure 2.10: Diagramme de dispersion d'une TL CRLH équilibrée, d'après l'équation (2.19), en comparaison avec une TL RH pure (β^{PRH}) et une TL LH pure (β^{PLH}).

Chapitre 3 : Antenne à onde de fuites

Figure 3.1 : Un schéma général d'une antenne à onde fuyante. Les lignes pleines et en pointillés représentent respectivement les plans d'amplitude constante et de phase constante.

Figure 3.2: Cellule unitaire CRLH, (a) modèle de LT typique.

Figure 3.3: Principe du balayage électronique du faisceau.

Figure 3.4: Principe de réglage électronique de la largeur du faisceau dans des conditions de polarisation non uniforme, (a) Largeur de faisceau étroite par introduction d'une polarisation uniforme (V1 = V2 = … = V0), et (b) largeur de faisceau large par introduction d'une polarisation non uniforme (V1 ≠ V2 ≠ … ≠ V0).

Figure 4.1: Small cell use case with dual plane beam steering characteristic.

Figure 4.2: Transition microruban vers SIW.

Figure 4.3 : Évolution du design de la ligne de transmission : de la microbande au guide d'ondes intégré au substrat (SIW).

Figure 4.4: Simulation du coefficient de réflexion |S11| de SIW.

Figure 4.5: Simulation du coefficient de transmission |S21| de SIW.

Figure 4.6: Simulation du champ électrique à la fréquence f = 28 GHz.

Figure 4.7: L'impédance caractéristique du SIW.

Figure 4.8: diagramme de dispersion, avec transition mise en évidence entre la fréquence f_0 et de la plage RH – LH.

Figure 4.9 : Conception de la Cellule Unitaire à balayage de fréquence.

Figure 4.10 : LWA avec balayage en fréquence composé de $N_{cell} = 8$.

Figure 5.1: Variation du S11 en dB selon la Fréquence.

Figure 5.2 : Variation du S21 en dB selon la Fréquence

Figure 5.3 : Diagramme polaire de la directivité dans le plan Phi=0 de la fréquence 26 GHz.

Figure 5.4 : Diagramme polaire de la directivité dans le plan Phi=0 de la fréquence 28 GHz.

Figure 5.5 : Diagramme polaire de la directivité dans le plan Phi=0 de la fréquence 30 GHz.

Liste des tableaux

Tableau4.1 : Dimensions du SIW et de la transition micro ruban (les mesures sont en mm).

Tableau 4.2 : Dimensions de la cellule et des fentes de la cellule unitaire LWA à balayage de fréquence de la figure 4.9 (toutes les mesures sont en mm).

Liste des abréviations

3GPP: 3rd Generation Partnership Project.

ITU: International Telecommunication Union.

IMT-2020: International Mobile Telecommunications-2020.

mMTC: Massive Machine Type Communications.

eMBB: Enhanced Mobile Broadband.

uRLLC: Ultra-Reliable and Low Latency Communications.

IoT: Internet of Things.

M-MIMO: Massive Multiple-Input Multiple-Output.

TDMA: Time Division Multiple Access.

SDMA: Space Division Multiple Access.

NFV: Network Functions Virtualization.

Edge Computing : Informatique à la périphérie du réseau.

HetNets: Heterogeneous Networks.

LTE: Long-Term Evolution.

D2D: Device-to-Device.

M2M: Machine-to-Machine.

mmWave: Millimeter Wave.

cmWave: Centimeter Wave.

LPWAN: Low-Power Wide-Area Network.

WPAN: Wireless Personal Area Network.

LOS : Line of Sight. Ligne de vue directe.

WiFi: Wireless Fidelity.

8K: 8K resolution (résolution 8K).

RAN : Radio Access Network (Réseau d'accès radio).

RAT : Random Access Technology (Technologie d'accès aléatoire).

UE : User Equipment (Équipement utilisateur).

WLAN: Wireless Local Area Network (Réseau local sans fil).

5G : Cinquième génération de réseaux mobiles (5th Generation).

n257 : Bande de fréquence spécifique de la 5G mmWave.

IEEE: Institute of Electrical and Electronics Engineers.

Beamforming : Formation de faisceau (concentration du signal dans une direction spécifique).

ATM : Absorption Atmosphérique (Atmospheric Absorption).

Kiosque : Terme français se référant à un dispositif ou une structure permettant d'accéder à des données ou des services.

SIW : Substrate Integrated Wavguide.

GIS : Guide d'Onde Intégré au Substrat.

RF: Radio Frequency.

PCB: Printed Circuit Board.

UHF: Ultra High Frequency.

FR4: Flame Retardant type 4.

CMOS: Complementary Metal-Oxide-Semiconductor.

MEMS: Micro-Electro-Mechanical Systems.

IRM : Imagerie par Résonance Magnétique.

RWG: Rectangular Wave guide.

TE: Transverse Electric.

TEM: Transverse Electromagnetic.

NRI: Negative Refractive Index

LHM: Left Handed Materials

SRR: Split-Ring Resonator

TL: Transmission Line

CRLH TL: Composite Right/Left Handed Transmission Line

MTM : Métamatériaux.

LWA : leaky wave antenna (Antenne à Onde Fuyante).

SSFIS : Structure Sélective en Fréquence Intégrée au Substrat

VHF : Très Haute Fréquence

PEC : Conducteur Parfaitement Électriquement Conducteur.

Introduction générale

Les réseaux mobiles de cinquième génération (5G) représentent la dernière avancée en matière de connectivité mobile, suscitant un grand intérêt dans de nombreux domaines de l'ingénierie et générant une forte impulsion au sein de la communauté scientifique. Pour soutenir le développement de l'internet mobile, les réseaux 5G deviendront de plus en plus le principal moyen d'accès au réseau pour les connexions de personne à personne et de personne à machine. Le nouveau système devra répondre à divers besoins et caractéristiques de service, en plus de l'augmentation classique du débit. Trois objectifs principaux ont été établis : une connectivité à très haut débit, un nombre massif de connexions et une latence ultra-faible.

Le réseau mobile 5G offrira une vitesse de transmission de données plus élevée, de l'ordre du gigabit par seconde pour un utilisateur unique, augmentant sensiblement le débit ressenti. Le service sera diversifié afin de pouvoir connecter simultanément des utilisateurs et un grand nombre d'équipements de type machine, tels que les capteurs et les dispositifs de l'Internet des objets (IoT). Ces dispositifs deviendront en effet plus omniprésents et intégrés dans nos vies, fonctionnant grâce à une connexion de machine à machine (M2M) qui devrait supporter une densité élevée de dispositifs par zone. Enfin, grâce à une architecture réseau optimisée, la latence (c'est-à-dire le délai de bout en bout de la connectivité) sera suffisamment réduite pour atteindre le seuil de 1 ms, permettant des services comme la conduite autonome, l'internet tactile et le contrôle à distance des machines.

En ce qui concerne plus particulièrement l'aspect de la bande large mobile améliorée (eMBB), l'utilisation de larges bandes de fréquences sera fondamentale pour permettre, avec une efficacité spectrale accrue, une augmentation de la vitesse de transmission des données. Pour cette raison, le système passera des fréquences traditionnelles, qui seront néanmoins utilisées et révisées, à des fréquences plus élevées moins encombrées, afin de disposer de segments de spectre plus larges. Une bande de spectre particulièrement intéressante est celle des fréquences radio à ondes millimétriques (mmWave), qui comprend approximativement les fréquences de 3 GHz à 300 GHz, et en particulier la portion de 26 GHz à 30 GHz, qui sera notre bande cible.

Il est bien connu qu'une fréquence plus élevée signifie une longueur d'onde plus petite, ce qui entraîne l'inconvénient d'une plus grande atténuation dans l'espace libre et un blocage significatif dû aux bâtiments, aux murs en béton et à l'utilisateur lui-même. Par conséquent, la portée de communication sera réduite, nécessitant le déploiement d'un grand nombre de petites

cellules et de cellules pico, qui prendront également en charge les connexions M2M et IoT puisque ces dispositifs utilisent des transmissions sans fil à faible puissance et à courte portée.

Dans ce travail, nous avons opté pour une solution innovante : une antenne à ondes de fuite (LWA) basée sur une ligne de transmission composite à droite et à gauche (CRLH), développée sur un guide d'ondes intégré au substrat (SIW). Cette configuration a été choisie en raison de ses avantages par rapport aux antennes traditionnelles. Tout d'abord, avec la LWA, nous pouvons obtenir un gain élevé (qui peut par ailleurs être ajusté, comme nous le verrons dans le chapitre des résultats) avec une structure relativement simple, évitant ainsi le besoin de réseaux d'antennes. Ce type d'antenne offre intrinsèquement une fonctionnalité de balayage de faisceau, grâce à ses caractéristiques électromagnétiques et en particulier au comportement de la constante de phase, avec un faisceau principal qui change de direction avec le balayage de fréquence.

L'avantage principal est que cela constitue une alternative aux réseaux phasés traditionnels, évitant l'utilisation de déphaseurs, des composants qui augmentent considérablement le coût de production global et dissipent une quantité significative d'énergie. De manière générale, la solution est assez innovante puisque peu de configurations de LWA sur SIW sont présentes, en particulier avec des réglages à fréquences mmWave. Enfin, outre les avantages de faible coût et de faible consommation d'énergie, la production à grande échelle est possible grâce à la structure plane du SIW, qui peut être mise en œuvre avec des méthodes de PCB sur un substrat traditionnel.

Cependant, il existe certains inconvénients : en particulier, la LWA émet un faisceau qui varie en fréquence, donc en utilisant une large bande passante, le schéma global sera modifié par rapport à celui d'une seule fréquence.

Le travail mené propose une approche novatrice en utilisant une antenne LWA basée sur une ligne de transmission CRLH intégrée au SIW, offrant des solutions à des défis spécifiques des fréquences millimétriques pour les réseaux 5G. Les principales contributions de ce travail incluent :

Développement et Optimisation d'une Cellule Unitaire : Conception et optimisation d'une cellule unitaire pour l'antenne LWA, en utilisant des simulations paramétriques pour ajuster les dimensions et obtenir une dispersion équilibrée.

Balayage de Faisceau : Exploration des capacités de balayage de faisceau de l'antenne, avec une analyse de la relation entre la fréquence et la direction du faisceau principal.

Analyse de Performance : Évaluation des performances de l'antenne en termes de gain, d'efficacité de rayonnement et de capacité de balayage en fréquence.

Le manuscrit est structuré en cinq chapitres :

Chapitre 1 : Présentation du système 5G futur, avec ses objectifs et ses principales innovations, suivie d'un résumé des caractéristiques de la propagation des ondes millimétriques, en mettant en évidence les avantages et les inconvénients. Un contexte complet pour le développement de l'antenne est ainsi défini.

Chapitre 2 : Explication des deux technologies de transmission qui seront utilisées, le SIW et le CRLH. Présentation de l'état actuel des technologies, ainsi que de leur fonctionnement et de leurs caractéristiques. Le SIW est un type de guide d'ondes récent qui imite le guide d'ondes rectangulaire, offrant de bonnes performances de guidage électromagnétique avec l'avantage d'une structure plane, particulièrement adaptée aux applications mmWave. La ligne CRLH, avec ses caractéristiques électromagnétiques uniques, montre une constante de phase non linéaire, essentielle pour les fonctionnalités LWA.

Chapitre 3 : Théorie de l'antenne à ondes de fuite et mécanisme de rayonnement, en expliquant les relations importantes concernant la constante de phase et l'angle de rayonnement du faisceau principal.

Chapitre 4 : Présentation du système d'antenne développé, expliquant les étapes suivies dans la conception de l'antenne et les paramètres fondamentaux à observer, avec les résultats de simulation sur le logiciel CST.

Chapitre 5 : Présentation des résultats simulés de l'antenne, la version à balayage de fréquence en analysant les performances obtenues principalement en termes de gain et de plage de balayage, et en soulignant les paramètres influençant le gain maximal et la variation d'angle.

Chapitre 1 Système 5G et Communication par Ondes Millimétriques

1.1.Introduction

La 5G, ou cinquième génération de réseaux mobiles, représente une avancée significative par rapport aux générations précédentes en matière de vitesse, de capacité et de latence. L'une des technologies clés permettant cette évolution est la communication par ondes millimétriques (mmWave). Les ondes millimétriques, situées dans le spectre des fréquences de 30 à 300 GHz, offrent des bandes passantes larges, capables de transporter des quantités de données bien plus importantes que les bandes de fréquences plus basses utilisées par les réseaux 4G et antérieurs. Cette caractéristique fait des mmWave un élément essentiel pour répondre à la demande croissante de données des applications modernes, telles que la réalité augmentée, la réalité virtuelle, l'Internet des objets (IoT), et les véhicules autonomes.

1.2.Aperçu du la cinquième génération

La cinquième génération de technologie sans fil représente le visage changeant de la connectivité, Conçue pour une vitesse et une capacité accrue, la 5G a le potentiel d'étendre considérablement la façon dont les données seront traitées et transportées, et permettra un large éventail de nouveaux cas d'usage, qui vont bien au-delà du Smartphone, déjà visé par les technologies 3G et 4G. La 5G est la 5éme génération de réseaux mobiles spécifiée par l'organisation 3GPP.

Trois grandes catégories d'usages définies par l'UIT (sous le terme IMT-2020), avec leurs exigences respectives (Figure 1.1), sont en train d'émerger et permettraient de répondre aux besoins à venir :

• mMTC – Massive Machine Type Communications : communications avec une grande quantité d'objets, permettant de répondre à l'augmentation exponentielle de la densité d'objets connectés avec des besoins de qualité de service variés ;

• eMBB – Enhanced Mobile Broadband : connexion en ultra haut débit en outdoor et en indoor, avec uniformité de la qualité de service, même en bordure de la couverture radio des cellules ;

• uRLLC – Ultra-reliable and Low Latency Communications : communication ultrafiable pour les besoins critiques avec une très faible latence, pour une réactivité accrue.

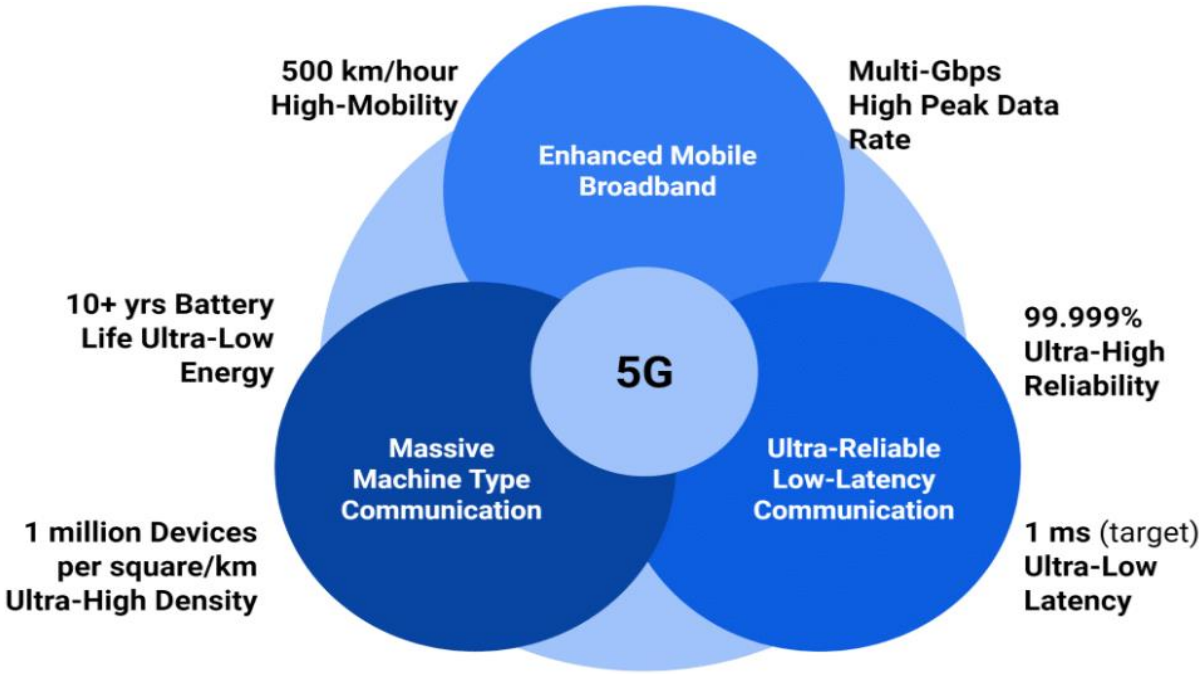


Figure 1.1: Les ambitions de 5G.

Le premier domaine dédié aux objets connectés (mMTC) englobe tous les usages liés à l'Internet des objets. Ces services nécessitent une couverture étendue, une faible consommation énergétique et des débits relativement restreints. L'apport annoncé de la 5G par rapport aux technologies actuelles réside dans sa capacité à connecter des objets répartis de manière très dense sur le territoire.

Le domaine de l'ultra haut débit (eMBB) concerne toutes les applications et services qui nécessitent une connexion toujours plus rapide, pour permettre par exemple de visionner des vidéos en ultra haute définition (8K) ou de « streamer » sans-fil des applications de réalité virtuelle ou augmentée.

Enfin, les communications ultra-fiables à très faible latence (uRLLC) regroupent toutes les applications nécessitant une réactivité extrêmement importante ainsi qu'une garantie de transmission du message. Ces besoins se retrouveront principalement dans les transports (temps de réaction en cas de risque d'accident, par exemple), dans la médecine (permettant des pratiques

radicalement nouvelles, telles que la télé-chirurgie) et dans l'industrie 4.0 (pilotage à distance des outils, assistance à la maintenance via la réalité augmentée, modification en temps réel de l'outil de production, meilleure maîtrise de la « Supply Chain »).

La 5G devra transmettre les données avec un débit accéléré, environ 10 fois supérieur à celui de la génération précédente, avec une latence réduite entre 1 et 10ms, soit 10 fois inférieure à celle de la 4G et avec une fiabilité de 99.999%, désignant le taux de succès de la transmission sans erreur d'un paquet de données dans une fenêtre de 1 ms. En outre, lors de l'usage des équipements, nous pouvons nous attendre également à un doublement de l'efficacité énergétique dès 2021, jusqu'à une amélioration d'un facteur 10, voire 20, en 2025. Cette efficacité énergétique accrue est très attendue par opérateurs télécoms

Par ailleurs, et selon le dernier rapport d'Ericsson sur la mobilité, le trafic mondial de données mobiles dans le monde, qui a atteint environ 51 Exabytes1 (EB) par mois à fin 2020, devrait progresser d'un facteur d'environ 4,5 pour atteindre 226 EB par mois en 2026. Ericsson prévoit que 54% du trafic total de données mobiles seront acheminé par les réseaux 5G,

Cette croissance de trafic sera pour l'essentiel engendrée par le téléchargement des fichiers et de « streaming » vidéo, de taille toujours plus importante, avec des débits pic jusqu'à 100 Gb/s. A terme, et au-delà de la 5G (beyond-5G), ces débits pourront être de l'ordre de 1Tb/s, avec latence extrêmement faible : les scénarios pourront alors inclure des applications avec des distances de transmission allant de quelques centimètres (dispositifs du type « Kiosque » de données) à plusieurs centaines de mètres (liaisons point-à-point) [1-1].

1.3.Principe et objectifs de la 5G

Le principe de la 5G est d'utilise les ondes millimétriques (mmWave) pour améliorer l'expérience utilisateur avec des vitesses Internet multi-Gigabit et une faible latence, en particulier dans les zones Wifi encombrées.

L'objectif de cette nouvelle technologie est basé sur l'augmentation de la capacité et de la vitesse des réseaux par rapport aux générations précédentes et principalement sur l'internet des objets qui nous permet d'avoir un monde complètement connecté [1-2].

Parmi les objectifs de la 5G :

*** Débit de données élevé :** données élevés en 5G est motivé par plusieurs facteurs. Tout d'abord, la prolifération des applications gourmandes en données telles que la vidéo 4K/8K en streaming, la réalité virtuelle/augmentée et les jeux en ligne nécessite des débits de données considérablement plus élevés que ceux fournis par les réseaux 4G/LTE.

Par exemple, la vidéo 4K peut nécessiter un débit d'environ 25 Mbps, tandis que la vidéo 8K peut nécessiter jusqu'à 100 Mbps voire plus, selon le format et la qualité.

De plus, la 5G vise à fournir une expérience utilisateur fluide et sans interruption, même dans les environnements densément peuplés où de nombreux utilisateurs accèdent simultanément au réseau. Cela nécessite une capacité accrue du réseau pour gérer efficacement le trafic et fournir des débits de données élevés à tous les utilisateurs.

En outre, la 5G cherche à soutenir de nouvelles applications émergentes telles que l'Internet des objets (IoT), les véhicules connectés, les villes intelligentes, etc., qui nécessitent également des débits de données élevés pour transmettre et traiter efficacement les données générées par ces dispositifs.

Enfin, les débits de données élevés permettent de soutenir l'innovation continue dans les services et les applications, stimulant ainsi le développement de nouvelles solutions technologiques et économiques qui bénéficient à l'ensemble de l'écosystème des télécommunications. En résumé, le besoin de débits de données élevés en 5G est essentiel pour répondre aux exigences actuelles et futures des utilisateurs et des applications, tout en stimulant l'innovation et la croissance dans le domaine des communications sans fil.

* **Faible latence** : (Environ 1 milliseconde, soit 1 000 fois moins que la latence des réseaux 4G)

La faible latence est un aspect crucial de la 5G car elle vise à réduire le délai entre l'envoi et la réception des données, ce qui permet de prendre en charge des applications en temps réel. En particulier, certaines applications sensibles à la latence, telles que la conduite autonome, la télémédecine, les jeux en ligne et la réalité virtuelle/augmentée, exigent des latences extrêmement faibles pour assurer une expérience utilisateur fluide et sûre.

Par exemple, dans le cas de la conduite autonome, des communications à faible latence sont essentielles pour permettre aux véhicules de communiquer rapidement entre eux et avec l'infrastructure routière afin de prendre des décisions en temps réel et d'éviter les collisions. De même, en télémédecine, une faible latence est cruciale pour assurer des consultations médicales à distance en temps réel et pour permettre le contrôle à distance d'équipements médicaux.

Pour les jeux en ligne et la réalité virtuelle/augmentée, des latences extrêmement faibles sont nécessaires pour garantir une expérience immersive et interactive sans décalage perceptible entre les actions de l'utilisateur et les réponses du système.

En réduisant la latence à quelques millisecondes voire moins, la 5G vise à répondre à ces exigences critiques des applications en temps réel, ouvrant la voie à de nouvelles possibilités d'innovation et d'utilisation dans divers domaines, tout en améliorant l'efficacité et la sécurité des opérations qui en dépendent.

La connectivité massive en 5G fait référence à la capacité du réseau à gérer un nombre très élevé de dispositifs connectés simultanément, allant des appareils mobiles traditionnels tels que les Smartphones et les tablettes aux objets connectés dans l'Internet des objets (IoT). Cette capacité est cruciale pour répondre à la croissance exponentielle des appareils connectés et des applications qui en résultent.

Dans le contexte de l'IoT, la 5G est appelée à soutenir une diversité d'applications telles que la surveillance à distance, les villes intelligentes, la gestion des ressources, la santé connectée, etc. Ces applications exigent une connectivité fiable et évolutive pour un grand nombre d'appareils déployés sur de vastes zones géographiques.

Les estimations indiquent que la 5G devrait être en mesure de prendre en charge jusqu'à un million d'appareils connectés par kilomètre carré, ce qui représente une augmentation significative par rapport aux capacités des réseaux 4G/LTE. Pour y parvenir, la 5G met en œuvre des technologies telles que le réseau d'accès radio massif (M-MIMO), le contrôle d'accès multiple par répartition dans le domaine temporel (TDMA), le contrôle d'accès multiple par répartition dans le domaine spatial (SDMA), ainsi que des améliorations dans les protocoles de communication et la gestion des ressources du réseau.

En permettant une connectivité massive, la 5G ouvre la voie à de nouvelles applications et services innovants dans divers secteurs, tout en offrant une expérience utilisateur améliorée et une efficacité opérationnelle accrue pour les fournisseurs de services de communication et les entreprises.

*** Capacité de connexion :** Jusqu'à 100 fois plus d'appareils connectés par unité de surface par rapport à la 4G LTE.

La capacité de gestion des données est un aspect crucial de la 5G, compte tenu de l'énorme volume de données générées par les appareils connectés et les applications à large bande passante. Pour répondre à cette exigence, la 5G utilise plusieurs techniques et technologies pour gérer et traiter efficacement les grandes quantités de données :

- Virtualisation des fonctions réseau (NFV) : La 5G adopte la virtualisation des fonctions réseau pour déployer et gérer les fonctions réseau sous forme de logiciels sur des serveurs informatiques virtualités, plutôt que sur des matériels spécifiques. Cela permet une gestion plus efficace des ressources réseau, une évolutivité accrue et une réduction des coûts opérationnels.
- Tranchage de réseau (network slicing) : Le tranchage de réseau est une technologie clé de la 5G qui permet de créer des réseaux virtuels dédiés, appelés tranches, à partir d'une infrastructure réseau physique commune. Chaque tranche est configurée pour répondre à des besoins spécifiques en termes de capacité, de latence, de débit et de sécurité, ce qui permet une personnalisation et une allocation efficace des ressources réseau pour différents cas d'utilisation.
- Edge Computing : La 5G intègre également le concept de l'informatique à la périphérie du réseau (Edge Computing), qui consiste à traiter et à analyser les données localement, au niveau des stations de base ou des points de présence du réseau, plutôt que de les transmettre vers des centres de données centralisés. Cela réduit la latence et la charge du réseau en déplaçant le traitement des données plus près de leur source, ce qui est essentiel pour les applications en temps réel et à faible latence.

En combinant ces techniques, la 5G est capable de gérer et de traiter efficacement les grandes quantités de données générées par les utilisateurs et les appareils connectés, tout en offrant une

flexibilité et une personnalisation accrues pour répondre aux besoins diversifiés des applications et des services.

*** Consommation d'énergie réduite** : (90 % de réduction de la consommation d'énergie du réseau)

L'efficacité énergétique est un aspect crucial de la 5G, motivé par des considérations environnementales et économiques croissantes. Pour répondre à ces exigences, la 5G doit être conçue de manière à être plus économe en énergie que ses prédécesseurs, notamment en ce qui concerne les équipements réseau et les appareils mobiles.

Au niveau des équipements réseau, la 5G intègre des techniques et des technologies visant à réduire la consommation d'énergie des infrastructures de télécommunication. Cela inclut l'utilisation de l'efficacité énergétique dans la conception des antennes et des stations de base, l'optimisation des protocoles de communication pour réduire la consommation d'énergie lors de la transmission de données, ainsi que des stratégies de gestion de l'énergie pour mettre en veille ou éteindre les équipements lorsqu'ils ne sont pas utilisés.

En ce qui concerne les appareils mobiles, la 5G introduit des fonctionnalités visant à optimiser la consommation d'énergie des Smartphones, des tablettes et d'autres dispositifs connectés. Cela comprend l'optimisation des processeurs et des circuits pour une consommation d'énergie réduite, la gestion intelligente de la connectivité sans fil pour minimiser la consommation d'énergie lors de la transmission de données, ainsi que des fonctionnalités de veille avancées pour réduire la consommation d'énergie lorsque les appareils ne sont pas activement utilisés.

En combinant ces efforts au niveau des équipements réseau et des appareils mobiles, la 5G vise à améliorer considérablement l'efficacité énergétique de l'ensemble de l'écosystème des communications sans fil. Cela permet non seulement de réduire l'empreinte environnementale des réseaux de télécommunication, mais aussi de réaliser des économies significatives en termes de coûts opérationnels pour les fournisseurs de services de communication et les utilisateurs finaux.

*****Pour répondre à la demande croissante de connectivité dans les zones rurales et éloignées, la 5G doit étendre sa couverture géographique tout en maintenant des performances élevées.

Cela nécessite l'utilisation de technologies telles que les fréquences sub-6 GHz pour une portée étendue et les ondes millimétriques (mmWave) pour des débits élevés dans les zones densément peuplées. De plus, des solutions telles que les antennes massives (M-MIMO) et les réseaux d'accès sans fil hétérogènes (HetNets) sont déployées pour améliorer la couverture et la capacité dans les zones rurales tout en garantissant des performances élevées.

En ce qui concerne la sécurité et la confidentialité, la 5G doit relever plusieurs défis liés à la connectivité accrue et à la prolifération des données échangées. Cela inclut la protection contre les cyber attaques telles que le piratage, l'espionnage et le vol de données, ainsi que la garantie de la confidentialité des informations personnelles des utilisateurs. Pour ce faire, la 5G met en œuvre des protocoles de sécurité améliorés, tels que le chiffrement de bout en bout, l'authentification forte des utilisateurs et des appareils, ainsi que des mécanismes de détection et de prévention des intrusions. De plus, des initiatives de normalisation et de réglementation sont mises en place pour établir des normes de sécurité et de confidentialité strictes à l'échelle mondiale, garantissant ainsi la confiance des utilisateurs dans l'utilisation de la 5G et de ses services.

*** Disponibilité élevée** : 99,999 % de disponibilité

*** Couverture complète :** 100 % de couverture

*** Bande passante accrue** : Jusqu'à 1000 fois plus de bande passante par unité de surface par rapport à la 4G LTE

*** Jusqu'à 10 ans de durée de vie de la batterie pour les appareils IoT à faible**

En résumé, les besoins en termes de communication pour la 5G visent à fournir une connectivité ultrarapide, fiable et omniprésente, tout en répondant aux exigences de diverses applications émergentes et en garantissant la sécurité et la confidentialité des données échangées [1-3].

1.4.Les technologies clés de la 5G

L'innovation technologique joue un rôle crucial dans le développement de la technologie 5G, en introduisant de nouvelles fonctionnalités et en améliorant les performances des réseaux de communication sans fil.

Les avancées technologiques intégrées dans la 5G :

1.4.1. Antennes massives (M-MIMO) :

Les antennes massives, également connues sous le nom de Massive Multiple-Input Multiple-Output, sont une technologie clé de la 5G. Elles permettent d'augmenter considérablement la capacité et l'efficacité spectrale des réseaux sans fil en utilisant un grand nombre d'antennes à la fois du côté de la station de base et du côté de l'utilisateur, ce qui permet une communication simultanée avec plusieurs appareils.

1.4.2. La communication device-to-device (D2D) :

Le D2D est considéré comme une technologie clé utilisée pour établir la connectivité directe entre les équipements utilisateurs (UE). Pour fournir un débit de données plus élevé, offrir un service Peer-to-Peer et améliorer la couverture, la technologie D2D est utilisée et sera mise en œuvre par un réseau cellulaire 5G. La communication D2D offre plusieurs avantages tels que l'expansion de la couverture, la gestion de l'alimentation, l'efficacité du spectre, l'amélioration de la capacité grâce à la réutilisation des ressources radio, ce qui permet aux dispositifs qui fournissent également des services, à savoir la sécurité, le déchargement du trafic et l'emplacement . . . services de proximité basés. La communication D2D est divisée en différents types basés sur l'intervention avec le contrôle de réseau de l'infrastructure telle que D2D autonome, réseau contrôlé et réseau-assisté.

1.4.3. Tranchage de réseau (network slicing) :

Le tranchage de réseau est une fonctionnalité de la 5G qui permet de créer plusieurs réseaux logiques virtuels sur une même infrastructure physique. Chaque tranche de réseau est configurée pour répondre à des besoins spécifiques en termes de performances, de latence, de bande passante et de sécurité, ce qui permet une personnalisation et une allocation efficace des ressources réseau pour différents cas d'utilisation.

1.4.4. Virtualisation des fonctions réseau (NFV) :

La virtualisation des fonctions réseau est une approche qui consiste à déployer et à gérer les fonctions réseau sous forme de logiciels sur des serveurs informatiques virtualisés,

plutôt que sur des matériels spécifiques. Cela permet une gestion plus flexible et dynamique des ressources réseau, ainsi qu'une réduction des coûts opérationnels et une évolutivité accrue.

1.4.5. Communication de machine à machine (M2M)

Pour transmettre une petite taille de données détectées avec des contraintes de temps, la communication M2M est utilisée. Selon les ressources du spectre, deux types de technologies d'accès aléatoire (RAT) à savoir les réseaux étendus à faible puissance (LPWAN) et l'IoT cellulaire sont utilisés. Pour gérer un grand nombre de connexions simultanées dans une grande zone de couverture, la capacité du réseau doit être adéquate. Pour améliorer l'efficacité énergétique et la communication, l'agrégation et le déchargement des données sont utilisés dans la communication M2M.

M2M Communication fournit des machines intelligentes qui effectuent automatiquement toutes les opérations de génération, de traitement et de transfert de données. Le déploiement avec l'utilisation de capteurs d'actionneurs, de machines et d'objets qui fonctionnent de manière indépendante avec de petites ou sans assistance humaine est connu sous le nom de communication M2M. Par exemple, des capteurs sont utilisés pour enregistrer l'occupation des places de stationnement en temps réel. Dans la communication M2M sur 5G, les chercheurs ont fourni divers mécanismes pour soutenir les petites rafales de données afin de réduire la consommation d'énergie et d'éviter la congestion du réseau.

1.4.6. Onde millimétrique (mm-onde)

MmWave dans la 5G émerge comme une technologie clé pour la prochaine génération dans l'industrie mobile qui augmente considérablement la capacité du réseau et l'expérience utilisateur. Les bandes mmWave ont été utilisées pour une large bande passante de 30 à 300 GHz (longueur d'onde de 1 à 10 mm) qui prend en charge les services sans fil Gigabit tels que la télévision ultra haute définition et l'accès Internet très haut débit. L'onde mm souffre de plus de perte de chemin par rapport aux micro-ondes, c'est-à-dire que, en raison d'une augmentation de la fréquence, la puissance reçue est réduite à faible.

Deuxièmement, en raison de la pluie et de l'atmosphère, le signal mmWave souffre de pertes d'absorption élevées.

Ceux-ci sont adaptés pour la communication en ligne de mire et s'il y a de grands obstacles sur leur chemin, les ondes mm sont très vulnérables aux blocages. Pour traiter efficacement les faisceaux étroits, les systèmes mm-Wave contiennent des antennes directionnelles élevées dans un grand nombre de réseaux qui conviennent également à la communication à courte portée. Les systèmes 5G utilisent à la fois le spectre mm-Wave et les micro-ondes en raison de la couverture spatiale limitée de mmWave. Par conséquent, pour gérer les stations de base mmWave et micro-ondes et l'équipement utilisateur utilise des composants de traitement de signal séparés. Les signaux mmWave sont utilisés dans l'accès cellulaire si les stations de base sont densément installées, ce qui permet les débits de données les plus élevés. La nécessité d'un coût élevé d'émetteur et de récepteurs et d'une perte de chemin très élevée est pratiquement limitée. Dans la 5G, de nombreuses petites cellules sont superposées sur des macrocellules, et chaque cellule contient sa station de base interconnectant chacune avec un câble à fibre optique devient beaucoup plus cher. Par conséquent, le réseau peut être organisé avec mmWave qui sera rentable, mmWave est utilisé pour les services WLAN haute vitesse, WPAN intérieur dans les macro cellules.

En intégrant ces avancées technologiques, la 5G vise à améliorer les performances, la flexibilité et la gestion des ressources des réseaux de communication sans fil, ouvrant la voie à de nouvelles possibilités d'innovation et de déploiement d'applications dans divers domaines tels que les communications mobiles, l'Internet des objets, la santé, l'industrie et les villes intelligentes

[1-4], [1-5].

1.5. La norme de la technologie 5G

Les normes et réglementations jouent un rôle essentiel dans la mise en œuvre réussie de la technologie 5G, garantissant son déploiement sûr, efficace et harmonisé à l'échelle mondiale.

1.5.1. Normes internationales :

Les normes techniques pour la technologie 5G sont développées et maintenues par des organisations internationales telles que l'Union internationale des télécommunications (UIT) et le 3rd Génération Partnership Project (3GPP).

Ces normes définissent les spécifications techniques et les exigences de performance pour les réseaux 5G, assurant ainsi l'interopérabilité entre les équipements de différents fabricants et facilitant le déploiement à l'échelle mondiale.

1.5.2. Processus de normalisation :

Le processus de normalisation implique la collaboration de multiples parties prenantes, y compris des fabricants d'équipements, des opérateurs de télécommunications, des organismes de réglementation et des experts techniques. Les normes 5G sont élaborées par le biais de discussions et de contributions au sein de groupes de travail spécialisés, aboutissant à des spécifications techniques approuvées et publiées pour la mise en œuvre.

1.5.3. Réglementations gouvernementales :

Les réglementations gouvernementales jouent un rôle crucial dans le déploiement et l'utilisation de la 5G, en garantissant la conformité aux exigences en matière de sécurité, de santé, d'environnement, de spectre radioélectrique et d'interopérabilité. Les gouvernements élaborent des politiques et des cadres réglementaires pour superviser le déploiement des réseaux 5G, attribuer des licences de spectre, réglementer les antennes et les infrastructures, et garantir la protection des consommateurs et de l'environnement.

1.5.4. Harmonisation internationale :

Pour favoriser le déploiement efficace et harmonisé de la 5G à l'échelle mondiale, les gouvernements et les organismes de réglementation collaborent au niveau international pour coordonner les politiques, aligner les réglementations et favoriser la cohérence des normes. Cela contribue à créer un environnement favorable à l'investissement, à encourager l'innovation et à promouvoir la croissance économique grâce à la technologie 5G.

En résumé, les normes internationales et les réglementations gouvernementales sont des piliers essentiels du développement et du déploiement réussi de la technologie 5G, assurant sa conformité aux normes techniques, sa sécurité, son efficacité et son harmonisation à l'échelle mondiale [1-6].

1.6.Les ondes millimétriques

Les communications et les antennes à ondes millimétriques (mmWave) et à ondes centimétriques (cmWave) jouent un rôle essentiel dans le paysage des réseaux de télécommunications de nouvelle génération, notamment le déploiement et l'évolution des réseaux 5G.

• **Largeurs de bande et débits élevés** : Les fréquences mmWave et cmWave offrent la possibilité d'utiliser des largeurs de bande beaucoup plus importantes que celles des réseaux cellulaires traditionnels. Cela se traduit par des capacités de transmission de données considérablement plus élevées et des débits plus rapides dans les réseaux 5G.

• **Portée de transmission limitée** : Les ondes millimétriques et centimétriques ont des propriétés de propagation différentes de celles des fréquences plus basses. Elles sont plus susceptibles d'être atténuées par les obstacles physiques et ont une portée de transmission plus limitée. Cela signifie que les déploiements nécessitent une densité plus élevée de stations de base et d'antennes pour assurer une couverture adéquate.

• **Technologies d'antennes avancées :** En raison de la portée limitée des ondes mmWave et cmWave, les antennes jouent un rôle crucial dans la fourniture d'une connectivité fiable et à haut débit. Les réseaux 5G exploitent des technologies d'antennes avancées telles que les antennes à faisceau formé (beamforming) et les antennes massives (massive MIMO) pour améliorer la couverture et la capacité.

Défis de déploiement : Le déploiement des réseaux mmWave et cmWave présente des défis uniques, notamment la nécessité d'une planification minutieuse de la densification du réseau pour compenser la portée limitée des ondes et la gestion des interférences dues à la densité élevée d'antennes.

Applications potentielles : Malgré les défis de déploiement, les fréquences mmWave et cmWave offrent un potentiel significatif pour des applications telles que les réseaux haut débit fixes sans fil, les communications véhiculaires avancées, les villes intelligentes et les environnements industriels à haut débit et faible latence.

En résumé, les ondes millimétriques et centimétriques sont essentielles pour répondre à la demande croissante de bande passante et de débit dans les réseaux de télécommunications modernes. Bien qu'elles présentent des défis de déploiement, leur utilisation promet de transformer les communications sans fil en offrant des vitesses de transmission de données plus rapides et des capacités accrues pour les applications émergentes de l'Internet des objets (IoT) et de l'industrie.

Une antenne millimétrique (mmWave) polarisée double avec une réponse de filtrage et une faible polarisation croisée pour les communications mobiles de cinquième génération (5G) est proposée. L'isolation meilleure que 20 dB entre deux ports d'alimentation a été obtenue avec les deux ports dans le même plan. L'antenne est à profil bas avec seulement 1,4 mm d'épaisseur comprenant deux couches diélectriques et une couche de liaison. La bande de fréquence de fonctionnement va de 26,5 GHz à 29,5 GHz, ce qui peut être appliqué à la bande n257 de la 5G mmWave. De plus, un réseau d'antennes 2x2 en séquence de rotation est conçus et mesuré. La même polarisation est alimentée par un réseau d'alimentation différentiel, ce qui réduira encore la polarisation croisée du réseau, la polarisation croisée étant meilleure que 20 dB.

En termes plus techniques, l'antenne mmWave est conçue pour fonctionner dans la plage de fréquences allant de 26,5 GHz à 29,5 GHz, ce qui correspond à la bande n257 de la 5G mmWave. Elle dispose d'une isolation élevée entre ses ports d'alimentation, ce qui est essentiel pour maintenir des performances de communication fiables dans les systèmes à antennes multiples. De plus, l'antenne est conçue avec une faible épaisseur de seulement 1,4 mm, ce qui la rend compacte et adaptée à une intégration dans des appareils mobiles ou d'autres équipements compacts.

Le réseau d'antennes 2x2 en séquence de rotation consiste en quatre antennes individuelles disposées de manière à former un réseau. Ces antennes sont alimentées par un réseau d'alimentation différentiel, ce qui signifie que les signaux sont introduits avec la même polarisation pour réduire la polarisation croisée du réseau. Cette conception permet d'optimiser les performances du réseau d'antennes pour les applications 5G mmWave, en assurant une connectivité stable et rapide tout en minimisant les interférences [1-7].

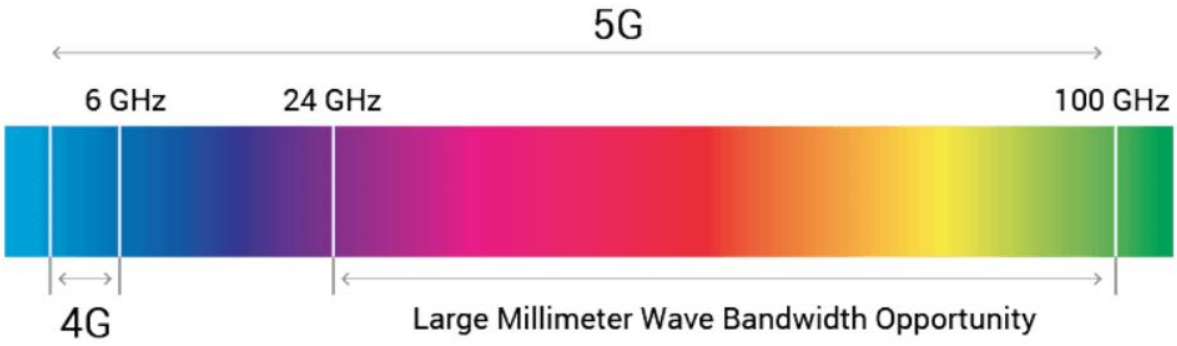


Figure 1.2: Bande de fréquence des ondes millimétriques.

Caractéristique de propagation :

Les caractéristiques de propagation dans les systèmes 5G et les communications millimétriques (mmWave) sont influencées par plusieurs facteurs, notamment la fréquence utilisée, la nature de l'environnement, et les obstacles présents dans le chemin de propagation. Voici quelques-unes des caractéristiques de propagation importantes pour les systèmes 5G et les communications mmWave

- **Fréquence élevée:**
    - Les ondes mmWave ont des fréquences élevées, ce qui signifie qu'elles oscillent à des vitesses plus rapides que les ondes de fréquences plus basses.
    - Cette haute fréquence correspond à des longueurs d'onde plus courtes par rapport aux ondes de fréquence plus basse.
    - La courte longueur d'onde permet d'atteindre des débits de données plus élevés, car elle permet de regrouper davantage d'antennes dans un espace restreint.
    - Les systèmes à antennes massives (MIMO) sont souvent utilisés avec les ondes mmWave pour augmenter la capacité du réseau en exploitant cette caractéristique.
- **Propagation en ligne de vue (LOS)** :
    - Les signaux mmWave se propagent généralement en ligne de vue directe, ce qui signifie que l'émetteur et le récepteur doivent avoir une visibilité directe l'un sur l'autre sans obstruction majeure.

- Les obstacles physiques tels que les bâtiments, les arbres et même les conditions météorologiques peuvent bloquer ou affaiblir significativement le signal mmWave.
- Cela signifie que pour une communication efficace, il est nécessaire de maintenir une ligne de vue directe entre les appareils communicants, ce qui peut poser des défis dans les environnements urbains denses où de nombreux obstacles peuvent être présents.

Les ondes mmWave offrent des débits de données élevés grâce à leur fréquence élevée, mais nécessitent une propagation en ligne de vue directe, ce qui peut être un défi dans certains environnements.

En ce qui concerne l'atténuation du signal dans les communications mmWave, deux facteurs importants sont l'absorption atmosphérique et l'effet de la pluie :

- **Absorptionatmosphérique:**
  - Outre l'absorption par les objets solides, les signaux mmWave sont également absorbés par certaines molécules atmosphériques, en particulier l'oxygène et la vapeur d'eau.
  - Cette absorption atmosphérique peut entraîner une atténuation supplémentaire du signal, réduisant ainsi sa force et sa portée.
  - Les conditions atmosphériques défavorables telles que la pluie ou le brouillard peuvent aggraver ce phénomène, car ces conditions augmentent la quantité de vapeur d'eau dans l'air, ce qui entraîne une absorption accrue des signaux mmWave.
- **Effet de pluie**:
  - Les gouttes de pluie peuvent agir comme des obstacles supplémentaires pour les signaux mmWave.
  - Lorsque les signaux mmWave rencontrent des gouttes de pluie, cela peut augmenter l'atténuation du signal, réduisant ainsi sa portée et sa qualité.

- Cet effet est particulièrement prononcé à des fréquences très élevées, où les gouttes de pluie sont proportionnellement plus grandes par rapport à la longueur d'onde du signal.

L'absorption atmosphérique, en particulier par l'oxygène et la vapeur d'eau, ainsi que l'effet de la pluie, sont des facteurs importants à prendre en compte lors de la planification et du déploiement de systèmes de communication utilisant les ondes mmWave, car ils peuvent entraîner une atténuation significative du signal et affecter la qualité de la communication.

La directivité des systèmes mmWave est un aspect crucial pour assurer une communication efficace, et elle est souvent exploitée à travers deux techniques principales : la formation de faisceau (beam forming) et le suivi de faisceau (beam tracking).

- **Formation de faisceau (Beam forming)** :
  - La formation de faisceau est une technique utilisée pour concentrer la puissance du signal dans une direction spécifique, généralement celle du récepteur.
  - Cette technique permet d'atténuer les effets de propagation, tels que l'atténuation atmosphérique et l'obstruction par des objets, en concentrant la puissance du signal là où elle est nécessaire.
  - En concentrant la puissance du signal dans une direction spécifique, la formation de faisceau permet d'augmenter la portée utile du signal et d'améliorer la qualité de la communication.
- **Suivi de faisceau (Beam Tracking)** :
  - Dans les environnements mobiles, où les obstacles peuvent bloquer le signal ou où les appareils se déplacent, le suivi de faisceau est utilisé pour maintenir un alignement précis entre l'émetteur et le récepteur.
  - Cette technique implique d’ajuster dynamiquement la direction du faisceau émis pour suivre les mouvements du récepteur ou pour compenser les changements dans l'environnement de propagation.

- En maintenant un alignement précis entre l'émetteur et le récepteur, le suivi de faisceau assure une connectivité stable même dans des environnements mobiles ou dynamiques.

La formation de faisceau et le suivi de faisceau sont des techniques essentielles utilisées dans les systèmes mmWave pour maximiser la puissance du signal dans la direction du récepteur, atténuer les effets de propagation et assurer une connectivité stable dans des environnements variés, contribuant ainsi à une communication efficace.

La propagation non linéaire des ondes électromagnétiques, en particulier à des fréquences très élevées telles que celles des ondes millimétriques (mmWave), peut être influencée par des phénomènes tels que la réfraction atmosphérique et la dispersion

- **Réfraction atmosphérique**:
  - À des fréquences très élevées, les ondes électromagnétiques peuvent subir une réfraction atmosphérique significative. La réfraction est le phénomène par lequel la direction de propagation d'une onde est déviée lorsqu'elle traverse des milieux de différentes densités.
  - Dans l'atmosphère, cette réfraction peut être causée par des variations de densité dues à des différences de température, d'humidité ou de pression.
  - Cette déviation de la trajectoire prévue du signal peut entraîner des fluctuations dans la qualité de la transmission, en particulier dans des conditions météorologiques changeantes où les gradients de densité atmosphérique sont plus prononcés.
- **Dispersionatmosphérique:**
  - La dispersion atmosphérique se réfère à la variation de la vitesse de propagation des différentes composantes spectrales d'un signal en raison de leur interaction avec l'atmosphère.
  - À des fréquences très élevées, la dispersion peut se manifester sous forme de dispersion temporelle, où différentes parties du signal arrivent à des moments différents en raison de variations dans la vitesse de propagation.

- Cette dispersion temporelle peut compliquer la récupération du signal à destination et affecter la qualité de la transmission, en particulier dans des systèmes où la synchronisation précise du signal est nécessaire.

La réfraction atmosphérique et la dispersion sont deux aspects de la propagation non linéaire des ondes électromagnétiques à des fréquences très élevées, tels que les mmWave, qui peuvent avoir un impact significatif sur la qualité et la fiabilité des communications, en particulier dans des environnements où les conditions atmosphériques sont variables.

Réflexion et diffusion sont des phénomènes courants qui se produisent lorsque les signaux mmWave interagissent avec leur environnement. Ces interactions peuvent entraîner des effets de fading multipathes, ce qui nécessite l'utilisation de techniques de traitement du signal avancées pour garantir une communication fiable et efficace.

- **Multipath Fading**:
  - En raison de la réflexion et de la diffusion des signaux mmWave, plusieurs chemins de propagation peuvent être empruntés par les ondes.
  - Lorsque ces signaux se propagent le long de multiples trajets, des interférences peuvent se produire entre les différentes versions du signal qui atteignent le récepteur à des moments légèrement différents.
  - Ces interférences peuvent entraîner des variations rapides et imprévisibles de l'intensité du signal reçu, phénomène connu sous le nom de fading multipathes.
  - Le fading multipathes peut affecter la qualité de la communication, en particulier en introduisant des périodes de faible réception ou de perte de signal.
- **Techniques de Traitement du Signal** :
  - Pour atténuer les effets du fading multipathes et améliorer la fiabilité de la transmission, des techniques de traitement du signal avancées sont utilisées.
  - La réception cohérente et les égalisations adaptatives sont des exemples de telles techniques. La réception cohérente vise à exploiter la cohérence du signal sur

différents trajets pour améliorer sa réception, tandis que les égalisations adaptatives ajustent les caractéristiques du récepteur pour compenser les distorsions introduites par le canal de propagation.

- En utilisant ces techniques, les systèmes de communication mmWave peuvent atténuer les effets du fading multipathes et maintenir une connectivité stable et fiable.

En conclusion, en combinant des techniques de traitement du signal avancées avec une compréhension des phénomènes de réflexion, de diffusion et de fading multipathes associés aux signaux mmWave, les opérateurs de réseaux 5G peuvent concevoir des systèmes robustes et efficaces pour répondre aux exigences croissantes en matière de connectivité à haut débit et à faible latence[1-8].

1.7 Conclusion

En conclusion, la 5G et les communications mmWave ouvrent la voie à une nouvelle ère de connectivité mobile, transformant non seulement la manière dont nous utilisons nos dispositifs connectés, mais également de nombreux secteurs industriels. Malgré les défis techniques et les besoins en infrastructure, les avantages en termes de vitesse, de capacité et de latence placent la 5G mmWave au cœur de l'innovation numérique future. Cette révolution technologique promet d'améliorer considérablement notre expérience numérique et de permettre des avancées significatives dans divers domaines, renforçant ainsi notre société connectée.

Chapitre 2 Etude des guides d’onde intégrée au substrat (SIW) et Métamatériaux

2.1 Introduction

Le Guide d'Ondes Intégré au Substrat (SIW) est une structure de guide d'ondes qui a émergé comme une alternative prometteuse pour la conception de composants RF intégrés sur des substrats à couches multiples. Contrairement aux guides d'ondes classiques qui nécessitent des composants distincts et souvent encombrants, le SIW permet une intégration plus étroite des composants directement sur le substrat, offrant ainsi des avantages significatifs en termes de compacité, de performances et de coûts.

Historiquement, le concept de SIW remonte aux travaux de Helszajn en 1962, mais il a gagné en popularité et en développement au cours des dernières décennies grâce aux avancées dans les techniques de fabrication de circuits intégrés, de matériaux diélectriques et de simulations électromagnétiques. Les chercheurs ont exploré diverses configurations de guides d'ondes intégrés au substrat, telles que les guides d'ondes rectangulaires, circulaires et hybrides, chacune offrant des avantages spécifiques en fonction des applications et des contraintes de conception.

Les principales caractéristiques et avantages du SIW incluent sa capacité à supporter des fréquences élevées, sa compacité, sa facilité d'intégration avec d'autres composants RF et son potentiel pour la miniaturisation des systèmes RF. De plus, le SIW permet une intégration multi-fonctionnelle, où plusieurs composants tels que des filtres, des coupleurs, des diviseurs de puissance, et des antennes peuvent être intégrés dans une seule structure, réduisant ainsi la complexité du système global.

Le SIW représente une approche innovante et efficace pour la conception de composants RF haute fréquence, offrant des avantages significatifs en termes de compacité, de performances et de coûts, et ouvrant de nouvelles perspectives pour la conception de systèmes RF intégrés et miniaturisés.

Dans l'univers en constante évolution des technologies de communication sans fil, des radars, et des applications à haute fréquence, la demande de composants RF hautement performants et efficaces n'a jamais été aussi pressante. Ces composants jouent un rôle crucial dans la transmission et la réception des signaux électromagnétiques, formant ainsi le fondement même des systèmes de communication modernes.

Le Guide d'Ondes Intégré au Substrat (SIW) s'est avéré être une solution révolutionnaire répondant à ces exigences de manière remarquable. En combinant des performances exceptionnelles avec une intégration aisée et une compatibilité accrue avec les procédés de fabrication à grande échelle, le SIW est devenu un choix privilégié pour les ingénieurs et les chercheurs travaillant dans le domaine des micro-ondes et des hautes fréquences.

Dans cette exploration approfondie du SIW, nous plongerons dans son fonctionnement, son historique de développement, ses applications actuelles et potentielles, ainsi que les défis et les avancées récentes dans ce domaine passionnant. En comprenant pleinement les capacités et les limites de cette technologie, nous pourrons mieux apprécier son rôle crucial dans le façonnement de notre monde sans fil moderne.

2.2 Guide d'ondes intégré au substrat (SIW)

2.2.1 Introduction

Dans la réalisation des circuits micro-ondes et des systèmes millimétriques, les lignes micro rubans, servant à la transmission du signal micro-ondes, constituent l'élément central de ces circuits planaires. Les circuits planaires sont connus pour être peu couteux, se combinant aisément avec les circuits intégrés mais également pour leur forte sensibilité aux éventuelles perturbations électromagnétiques des lignes environnantes (diaphonie) et leurs caractéristiques dispersives dans la propagation du signal.

Les guides d'ondes rectangulaires ont longtemps été présentés comme étant l'une des meilleures solutions pour pallier ces difficultés. Cependant, avec la constante augmentation des demandes d'utilisation d'interconnexions large bande et de systèmes électroniques compacts, ces derniers ont vu leur intérêt décroître progressivement, dû à leurs caractères encombrants, très couteux et ne convenant pas à la production de masse.

C'est ainsi, qu'a vu le jour, une alternative dénommée les guides d'ondes intégrés dans un substrat (SIW), considéré comme étant des guides d'ondes, qui peuvent être facilement mis en œuvre en utilisant les méthodes communes de fabrication de circuit imprimé (PCB), capables d'intégrer les futures applications radiofréquence (RF) et ultra - haute fréquence (UHF),

présentant de bons facteurs de qualité avec une bonne isolation et résistance aux 19 perturbations électromagnétiques externes.

Depuis l'introduction des SIWs aux systèmes hautement intégrés, de nombreux composants RF ont été remaniés, entre autres des diviseurs de puissance, des coupleurs, duplexeurs, les filtres ou encore cavités résonantes qui auparavant étaient développés en utilisant des microstrips (micro rubans), strip-lines, etc.

Les guides d'ondes intégrés au substrat sont souvent réalisés à partir des substrats classiques (ROGERS, FR4 ...) et sont formés par deux plans conducteurs, séparés par un substrat diélectrique, avec des parois latérales constituées chacune d'une rangée de cylindres métallisés espacés avec une certaine périodicité. Figure 2.1 montre la géométrie d'une structure SIW. Les cylindres métalliques ou vias des parois latérales sont placés avec un diamètre et une périodicité contrôlée afin de soutenir convenablement la propagation des ondes guidées avec un minimum de pertes par rayonnement. En effet, un espace trop large risque de compromettre la propriété d'isolement de la structure SIW.

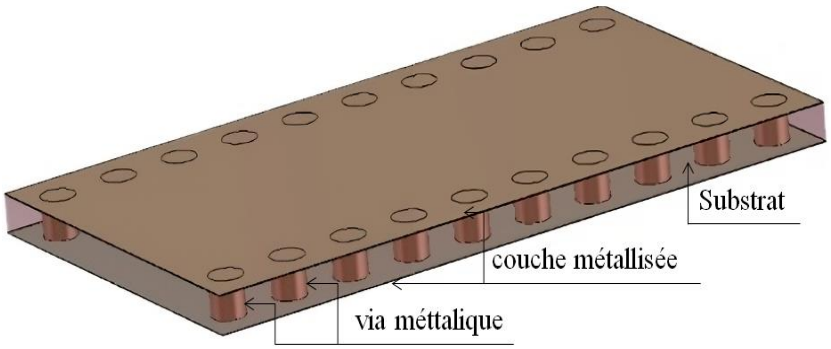


Figure 2.1:Géométrie de guide onde intégré au substrat SIW.

2.2.2 Historique

Le concept de SIW trouve ses origines dans les travaux sur les guides d'ondes et les structures à micro-ondes, remontant aux premières recherches sur les ondes électromagnétiques. Cependant, la formalisation du SIW en tant que structure spécifique et son application dans les circuits intégrés modernes ont émergé plus récemment, principalement au début du 21e siècle.

Des chercheurs et des ingénieurs ont exploré différentes approches pour concevoir et optimiser les SIW afin de répondre aux besoins croissants en matière de performances RF. Cette évolution a été alimentée par les progrès technologiques dans la fabrication de substrats à couches multiples, ainsi que par les demandes croissantes en termes de miniaturisation, de large bande passante et de faible perte dans les systèmes RF.

Au fil des ans, le SIW est devenu une technique bien établie dans la conception de composants RF, avec des applications dans une gamme diversifiée de domaines tels que les antennes intégrées, les filtres, les coupleurs, les diviseurs de puissance, et bien plus encore.

2.2.3 Facteurs clés dans le développement du SIW

Le développement du concept de SIW a été soutenu par plusieurs facteurs clés dans le domaine des hautes fréquences et des micro-ondes.

*Les progrès dans la fabrication des substrats à couches multiples ont joué un rôle crucial dans le développement et l'amélioration des structures telles que le Guide d'Ondes Intégré au Substrat (SIW).

- **Fabrication de substrats à couches multiples** : Les substrats à couches multiples sont des matériaux composites qui comprennent plusieurs couches de matériaux diélectriques et conducteurs. Ces substrats offrent une plateforme idéale pour la réalisation de structures complexes telles que le SIW en permettant la manipulation précise des propriétés électromagnétiques et la création de structures à haute densité d'intégration.

- **Techniques de fabrication avancées** : Les avancées dans les techniques de fabrication telles que la lithographie avancée, la gravure chimique, le dépôt de couches minces, et la microfabrication ont permis de réaliser des structures SIW avec une précision accrue et des dimensions réduites. Ces techniques permettent la fabrication de guides d'ondes et de composants intégrés sur les substrats avec des géométries complexes et des tolérances dimensionnelles très fines.

- **Matériaux diélectriques haute performance** : Les progrès dans le développement de matériaux diélectriques haute performance ont également contribué à l'amélioration des performances des structures SIW. Des matériaux diélectriques à faible perte et à permittivité

élevée sont utilisés pour les substrats à couches multiples, ce qui permet d'atteindre des performances RF optimales avec une efficacité accrue.

- **Intégration de technologies de fabrication avancées** : L'intégration de technologies de fabrication avancées telles que la technologie CMOS (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor) et la technologie MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) dans le processus de fabrication des substrats à couches multiples permet d'ajouter des fonctionnalités supplémentaires et de créer des dispositifs SIW encore plus sophistiqués et multifonctionnels.

2.2.4 Facteurs clés dans le développement du SIW

Les progrès dans la fabrication des substrats à couches multiples ont été essentiels pour permettre la réalisation de structures complexes telles que le SIW, en offrant une précision accrue, des performances améliorées et une intégration plus étroite des composants RF. Ces avancées technologiques continuent de jouer un rôle crucial dans le développement de solutions RF innovantes et haute performance.

*Les demandes croissantes en performances RF ont été un moteur majeur du développement et de l'adoption du SIW comme solution attractive

- **Bande passante élevée** : Avec l'émergence de technologies de communication haut débit telles que la 5G et les réseaux sans fil à large bande passante, il y a eu une demande croissante pour des composants RF capables de traiter des signaux à des fréquences de plus en plus élevées. Le SIW, grâce à sa structure intégrée et à sa conception optimisée, peut offrir une bande passante élevée tout en conservant des performances élevées.

- **Faible perte** : Dans de nombreuses applications RF telles que les communications sans fil et les réseaux de capteurs, la minimisation des pertes de signal est cruciale pour assurer une transmission efficace et fiable des données. Le SIW, en utilisant des matériaux diélectriques à faible perte et en minimisant les perturbations de propagation, peut offrir des performances avec des pertes réduites.

- **Miniaturisation** : Avec la demande croissante pour des dispositifs et des systèmes compacts, la miniaturisation des composants RF est devenue une priorité. Le SIW permet une intégration plus étroite des composants RF sur des substrats à couches multiples, réduisant

ainsi l'encombrement et permettant la conception de dispositifs plus compacts sans compromettre les performances.

- **Intégration multifonctionnelle** : En plus de répondre à des exigences spécifiques telles que la bande passante élevée et la faible perte, le SIW offre également la possibilité d'intégrer plusieurs fonctions dans une seule structure, réduisant ainsi le nombre de composants individuels nécessaires dans un système RF et contribuant à sa miniaturisation et à sa simplification.

Le SIW répond de manière efficace aux demandes croissantes en performances RF en offrant une combinaison optimale de bande passante élevée, de faible perte, de miniaturisation et d'intégration multifonctionnelle, ce qui en fait une solution attrayante pour une gamme variée d'applications RF.

2.2.5 Rôle crucial des simulations électromagnétiques avancées dans le développement du SIW

*Les simulations électromagnétiques avancées jouent un rôle crucial dans la conception et l'optimisation des structures SIW.

- **Modélisation précise** : Les logiciels de simulation électromagnétique avancés permettent aux ingénieurs de modéliser avec précision les propriétés électromagnétiques des structures SIW, y compris les interactions des ondes électromagnétiques avec les composants intégrés et les substrats à couches multiples. Cela permet une compréhension approfondie du comportement des dispositifs SIW dans divers scénarios.

- **Analyse des performances** : Les simulations électromagnétiques avancées permettent aux ingénieurs d'analyser les performances des structures SIW sous différentes conditions de fonctionnement, telles que les variations de fréquence, de température, et d'excitation électrique. Cela permet d'optimiser les performances des dispositifs SIW pour répondre aux exigences spécifiques de chaque application.

- **Optimisation de la conception** : Les outils de simulation électromagnétique avancés offrent des fonctionnalités d'optimisation qui permettent aux ingénieurs d'explorer efficacement un large espace de conception pour trouver la configuration optimale des

structures SIW en fonction des objectifs de performance donnés, tels que la minimisation des pertes, l'amélioration de la bande passante, ou la réduction de l'encombrement.

- **Réduction des coûts et des délais** : En utilisant des simulations électromagnétiques avancées, les ingénieurs peuvent évaluer et affiner les conceptions de structures SIW virtuellement, ce qui réduit la nécessité de construire et de tester des prototypes physiques coûteux. Cela permet de réduire les coûts de développement et les délais de mise sur le marché des produits RF.

2.2.6 Applications du SIW dans divers domaines

L'utilisation de simulations électromagnétiques avancées dans la conception et l'optimisation des structures SIW permet aux ingénieurs d'obtenir des résultats précis, d'analyser les performances dans divers scénarios, d'optimiser la conception pour répondre aux exigences spécifiques et de réduire les coûts et les délais de développement.

Effectivement, le SIW a trouvé des applications dans une large gamme de domaines, démontrant sa polyvalence et son potentiel pour répondre à divers besoins en matière de systèmes RF.

- **Communications sans fil** : Le SIW est largement utilisé dans les systèmes de communication sans fil, tels que les antennes intégrées, les filtres RF et les diviseurs de puissance. Il offre une solution compacte et efficace pour les applications telles que les réseaux cellulaires, le Wi-Fi, le Bluetooth, et d'autres normes de communication sans fil.
- **Technologie radar** : Dans les systèmes radar, le SIW est utilisé pour la conception d'antennes radar, de filtres et de dispositifs de commutation RF. Il permet une intégration étroite des composants RF dans les systèmes radar tout en offrant des performances élevées en termes de bande passante, de gain et de directivité.
- **Technologie médicale** : Le SIW est également utilisé dans diverses applications médicales telles que l'imagerie médicale par résonance magnétique (IRM) et les thérapies basées sur les micro-ondes. Dans ces applications, le SIW est utilisé pour la conception d'antennes RF et de circuits RF pour la transmission et la réception de signaux RF à des fréquences spécifiques.

- **Systèmes de détection et de surveillance** : Le SIW est utilisé dans les systèmes de détection et de surveillance pour diverses applications telles que la surveillance de l'environnement, la sécurité et la défense. Il est utilisé pour la conception d'antennes, de filtres et de circuits RF pour la détection et la transmission de signaux RF dans des environnements variés.
- **Applications spatiales et aérospatiales** : Le SIW est également utilisé dans les applications spatiales et aérospatiales pour la conception de systèmes RF compacts et légers.

Il offre une solution efficace pour les applications telles que les communications satellites, les radars embarqués et les systèmes de navigation.

2.2.7 Perspectives futures et recherche continue sur le SIW

Le SIW est utilisé dans une multitude de domaines, allant des communications sans fil aux applications médicales en passant par les systèmes radar, démontrant sa polyvalence et son potentiel pour répondre à une grande variété de besoins en matière de systèmes RF dans diverses industries et applications.

La recherche et le développement dans le domaine du SIW continuent d'évoluer, avec des chercheurs explorant constamment de nouvelles configurations, matériaux et techniques de fabrication pour améliorer les performances et l'efficacité de cette technologie.

- **Nouvelles configurations et topologies** : Les chercheurs explorent de nouvelles configurations de structures SIW, telles que les guides d'ondes hybrides, les structures multicouches et les guides d'ondes à structures périodiques. Ces nouvelles configurations visent à améliorer les performances en termes de bande passante, de directivité et de pertes.
- **Matériaux avancés** : La recherche se concentre sur l'utilisation de matériaux diélectriques avancés pour améliorer les performances des structures SIW. Les matériaux à faible perte et à haute permittivité sont étudiés pour réduire les pertes et améliorer l'efficacité des composants SIW.
- **Techniques de fabrication innovantes** : Les chercheurs explorent de nouvelles techniques de fabrication pour réaliser des structures SIW plus complexes et précises. Cela inclut

l'utilisation de technologies telles que l'impression 3D, la lithographie avancée et les techniques de dépôt de films minces pour créer des structures SIW avec des caractéristiques géométriques précises.

- **Optimisation des performances** : La recherche vise à optimiser les performances des structures SIW en termes de bande passante, de directivité, de pertes et de compacité. Cela comprend l'optimisation des dimensions géométriques, des matériaux et des configurations pour répondre aux exigences spécifiques des différentes applications.
- **Intégration multifonctionnelle** : Les chercheurs explorent également des moyens d'intégrer plusieurs fonctions dans une seule structure SIW, ce qui permet de réduire la complexité des systèmes RF et d'améliorer leur efficacité.

La recherche continue dans le domaine du SIW se concentre sur l'exploration de nouvelles configurations, matériaux et techniques de fabrication pour améliorer les performances et l'efficacité de cette technologie, ouvrant ainsi la voie à de nouvelles applications et avancées dans le domaine des systèmes RF.

Le SIW représente une convergence de progrès technologiques et de recherche continue, répondant à une demande croissante en performances RF. Cette structure offre une combinaison unique de performances élevées et d'intégration facilitée, ce qui en fait une solution robuste, adaptable et attrayante pour les applications à haute fréquence et micro-ondes dans le domaine de la conception de circuits RF intégrés.

2.2.8 Structure et dimensionnement

Les guides d'ondes intégrés au substrat sont fabriqués en utilisant deux rangées de cylindres conducteurs ou de fentes intégrées dans un substrat diélectrique qui relie deux plaques métalliques parallèles. Il s'agit essentiellement d'une structure de type RWG, où les parois latérales du conducteur sont remplacées par deux rangées de vias métallisés, et qui présente donc de nombreuses affinités avec un guide d'ondes rectangulaire rempli de diélectrique. La ligne de transmission formée par le SIW présente non seulement les caractéristiques physiques favorables des lignes de transmission imprimées planaires, mais aussi les excellentes performances de guidage d'un guide d'ondes rectangulaire volumineux.

En adoptant la méthode de fabrication des circuits imprimés (PCB), le SIW réduit la hauteur de la RWG à l'épaisseur du substrat du PCB, qui peut être considéré comme le diélectrique interne d'un guide d'ondes. En effet, l'un des principaux avantages de la technologie SIW est qu'elle peut être facilement mise en œuvre à l'aide d'un processus de fabrication de circuits imprimés courant (La figure2.2).

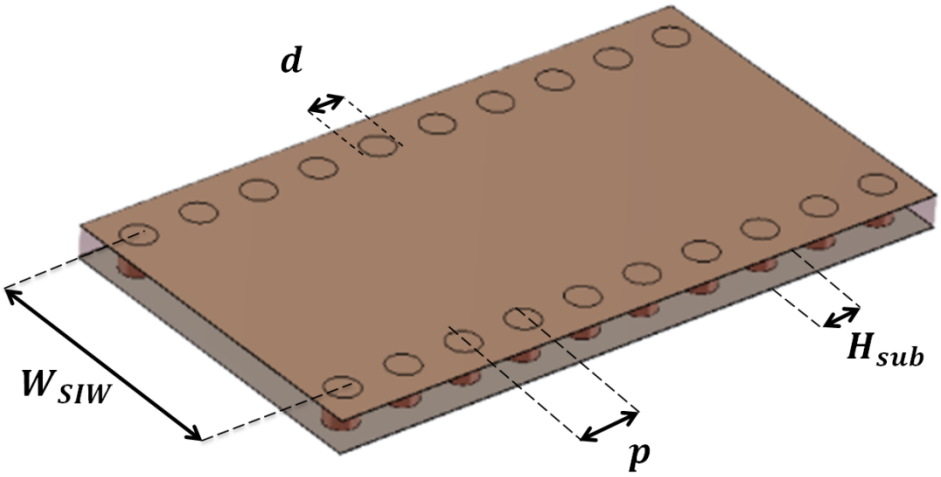


Figure 2.2:les dimensions de SIW.

Les études théoriquesde F. Xu et Ke Wu**[2-1]** montrent que les caractéristiques de propagation dans une structure SIW sont similaires à celles d'un guide d'ondes rectangulaire. Plus précisément, si on néglige les pertes de rayonnement entre les trous métalliques, les modes SIW coïncident exactement avec les modes de propagation d'un guide d'ondes rectangulaire transverse électrique "TE_{mn}" mais pas les modes transverses magnétiques TEM.

Le mode transverse magnétique nécessite des courants surfaciques sur les deux plans conducteurs horizontaux d'un guide d'onde rectangulaire, mais dans notre cas, à cause de l'espace créé par les trous métalliques, ces courants horizontaux ont des difficultés à circuler **[2-1].** Donc pour la technologie SIW le mode fondamental (dominant) est le mode TE_{10} (Figure 3-1), avec un courant électrique sur les deux plans métalliques en haut et en bas ce qui explique la similarité entre un guide d'onde rectangulaire et la technologie SIW.

Les paramètres de conception fondamentaux sont les suivants : W_{SIW}la largeur du SIW (distance centre à centre entre les rangées de vias), liée à a_{RWG} la largeur du RWG équivalent, p le pas des trous de via, c'est-à-dire la distance longitudinale centre à centre entre les trous

métallique, d, le diamètre des vias, H_{sub} la hauteur diélectrique, généralement fixée par les dimensions standard du substrat

La longueur d'onde λ_{cut} de la fréquence de coupure est proportionnelle à la largeur du SIW. Pour une RWG standard avec des dimensions latérales a_{RWG} et b_{RWG}, remplie d'un diélectrique de constante diélectrique relativeε_r,

La fréquence de coupure du mode (m, n) est **[2-2]** :

$$f_{m,n} = \frac{c}{2\sqrt{\varepsilon_r}}\sqrt{\left(\frac{m}{a_{RWG}}\right)^2 + \left(\frac{n}{b_{RWG}}\right)^2} \quad (2.\ 1)$$

Et Considérant quela technologie travail dans le mode TE10 (m=1 et n=0), ce qui donne :

$$f_{1,0} = f_{cut} = \frac{c}{2a_{RWG}\sqrt{\varepsilon_r}} \quad (2.\ 2)$$

Par conséquent, la première étape de la conception d'un SIW consiste à dimensionner le guide d'ondes rectangulaire équivalent, à choisir le matériau diélectrique et la f_{cut}, et à obtenir a_{RWG} :

$$a_{RWG} = \frac{c}{2f_{cut}\sqrt{\varepsilon_r}} \quad (2.\ 3)$$

La relation entre RWG et SIW est donner par :

$$W_{SIW} = 0.5\left[a_{RWG} + \sqrt{(a_{RWG} + 0.54d)^2_0.4d^2}\right] + 0.27d \quad (2.\ 4)$$

Cette formule peut être utilisée pour obtenir une valeur approximative de WSIW, pour fixer une gamme de fréquences dans laquelle le guide d'ondes peut fonctionner, une équation plus simple suffit également pour obtenir une bonne approximation de la largeur du SIW, étant donné a_{RWG}, d et p [2-1],[2-3]:

$$W_{SIW} = a_{RWG} + \frac{d^2}{0.95p} \quad (2.\ 5)$$

La fabrication nécessite que tous les cylindres soient identiques, c'est-à-dire qu'ils ont le même diamètre et la même distance. Afin de diminuer les pertes de rayonnement et gérer le champ, il est essentiel de préciser la distance P. Sinon, si la distance est élevée, cela peut entraîner une fuite dans le champ et entraîner des problèmes. Les caractéristiques de structure ne

seront pas compromises, ce qui entraînera une augmentation des modes de propagation. Il est important de noter que la distance entre les cylindres latéraux est influencée par la fréquence de coupure du mode dominant.

Nous observons que les équations (2.4) et (2.5) dépendent de p (la taille du pas) et de d (diamètre). Il n'existe pas d'expressions de forme fermée pour leurs valeurs,

Mais nous pouvons trouver certaines contraintes pour garantir une bonne propagation et de faibles pertes **[2-4] :**

$$d \leq \frac{\lambda_g}{5}$$
$$p \leq 2d \qquad (2.\ 6)$$

Dont :

- d : diamètre de via
- p : la distance entre les vias métallique
- λ_g : la longueur d'onde guidée

Avec :

$$\lambda_g = \frac{\lambda_0}{\sqrt{1 - \frac{(f_{cut})^2}{f}^{-1}}} \qquad (2.\ 7)$$

λ_gEst la longueur d'onde guidée, $\lambda 0 = c/f$est la longueur d'onde de l'espace libre. Pour réduire les coûts de fabrication et les problèmes liés à la précision du fraisage, p et d doivent être choisis aussi grands que possible, et nous utiliserons donc leurs limites supérieures.

Les structures SIW présentent des limitations en termes de compacité et de largeur de bande, tout comme les RWG. La fréquence de coupure f_c du mode fondamental est déterminée par la largeur W_{SIW} du SIW.La largeur de bande de fonctionnement, correspondant à la largeur de bande monomode du guide d'ondes, est donc théoriquement limitée à une octave : de la fréquence de coupure f_c du modeTE_{10}. À la fréquence de coupure $f_{2,0} = 2\, f_c$ du modeTE_{20}.Nous

disposons donc d'une gamme de fréquences utile de largeurf_c, qui donnera un spectre assez large d'environ 20 GHz, en choisissant fc dans ces valeurs.

Les dimensions et les matériaux choisis pour le guide d'ondes sont également liés aux mécanismes de perte du SIW [2-5]. La minimisation des pertes est particulièrement critique lorsqu'on opère à des fréquences d'ondes millimétriques.

Il existe trois sources principales de pertes : les pertes conductrices (dues à la conductivité finie des parois métalliques), les pertes diélectriques (dues au matériau diélectrique à pertes) et les pertes par rayonnement (dues à la fuite d'énergie à travers les interstices).

La propagation s'effectuant à la manière d'un RWG, les pertes par conducteur ne sont pas dominantes et peuvent être considérablement réduites en augmentant l'épaisseur du substrat (H_{sub}). Inversement, les pertes diélectriques ne dépendent que du matériau diélectrique et non de la géométrie de la structure SIW ; elles ne peuvent donc être réduites qu'en utilisant un substrat diélectrique de meilleure qualité. L'atténuation due aux pertes diélectriques est liée au tan δ du matériau. D'une manière générale, la contribution des pertes diélectriques est dominante aux fréquences des ondes millimétriques, lorsque l'on utilise des épaisseurs de substrat typiques et des matériaux diélectriques commerciaux. Il convient d'être attentif au choix du matériau du substrat, car aux ondes millimétriques, il est nécessaire de parvenir à un compromis entre les coûts de fabrication et les pertes diélectriques. Enfin, les pertes par rayonnement peuvent être maintenues à un niveau raisonnablement bas si$p/d < 2{,}5$, en fixant généralement $p = 2d$. En fait, si le pas p est petit et le diamètre d des vias métalliques est grand, l'espace entre les vias métalliques est petit, ce qui permet de se rapprocher de la condition de paroi métallique continue et de minimiser les fuites par rayonnement. En conclusion, l'objectif est de choisir les dimensions du SIW de manière à obtenir une structure réalisable (compte tenu de l'application pratique) tout en maintenant de faibles pertes.

Le choix de ce type de guide d'onde comme base de notre système d'antenne est justifié par son bon comportement aux hautes fréquences. La technologie SIW a déjà connu un développement rapide sur plus d'une décennie, qui a permis la démonstration et l'application de systèmes innovants, en particulier aux fréquences d'ondes millimétriques, couvrant une très large gamme de fréquences allant de l'infra-GHz (sub-GHz) à l'infra-THz (sub-THz).

Le SIW s'est avéré bien adapté à la gamme des ondes millimétriques, car la technologie des lignes de transmission est essentielle pour le développement de matériel électromagnétique à haute fréquence. La ligne de transmission devrait permettre une intégration à haute densité et un schéma de production de masse à faible coût. À mesure que les fréquences d'horloge et les densités de circuits continuent d'augmenter, les interconnexions microruban et stripline étroitement espacées ne seront plus des options viables pour l'interconnexion des modules du système, en raison de leur structure ouverte et de leur susceptibilité à la diaphonie et aux interférences électromagnétiques (EMI).

Ces facteurs induiront l'utilisation de la technologie SIW dans les futures applications à ultra-haute fréquence et à large bande et dans les systèmes hautement intégrés. Il a été démontré [2-5] que les interconnexions SIW, en raison de leur structure fermée, confinent efficacement les champs électromagnétiques et peuvent être exploitées pour réduire la diaphonie. Il est essentiel de disposer d'un support de signalisation blindé pour réduire les bruits indésirables et les interférences électromagnétiques dans les circuits denses. Une stratégie de conception hybride facile à manier et peu coûteuse est d'une importance cruciale pour le développement de circuits intégrés et de systèmes à ondes millimétriques.

2.2.9 Transition du micro ruban à SIW

La particularité de cette nouvelle ligne de transmission(SIW) est qu'elle comble le fossé entre les lignes micro-ruban et les guides d'ondes métalliques[2-6]. Les lignes micro-ruban sont très compactes, faciles à intégrer et peu coûteuses, mais elles présentent un facteur de qualité relativement faible, compris entre 50 et 100. Les guides d'ondes métalliques sont, en comparaison, encombrants et coûteux, mais ils offrent un facteur de qualité élevé, compris entre 5 000 et 10 000. Le SIW est une structure intermédiaire. Il bénéficie du coût de production très faible du procédé PCB et est relativement compact. Il permet également d'atteindre un facteur de qualité élevé, de l'ordre de 500 à 1 000. Le SIW est donc un excellent candidat pour l'intégration de circuits à ondes millimétriques de haute densité qui nécessitent un bon facteur de qualité.

La conception et la mise en œuvre de structures de transition entre des guides d'ondes rectangulaires conventionnels et des circuits planaires ont été largement étudiées [2-7] - [2-8]. Beaucoup de ces structures peuvent être adoptées pour la transition entre les structures SIW et les

circuits planaires directement ou avec peu de modifications, mais avec un coût inférieur et un processus de fabrication plus fiable.

D'autre part, depuis que les composants SIW et les circuits planaires ont pu être intégrés sur le même substrat, déférentes transitions efficaces ont été proposées pour adapter des guides d'ondes avec les circuits planaires. D'après ces transitions, en particulier la transition micro-ruban conique (taper) coplanaires au guide d'ondes intégré au substrat(SIW), facilement réalisable [2-9], [2-10]. La transition peut être décomposée en deux parties : la ligne micro-ruban conique(taper) et la marche entre le micro-ruban et le guide d'ondes rectangulaire. La combinaison de ces deux parties doit fournir une bonne adaptation sur toute la largeur de bande du SIW.

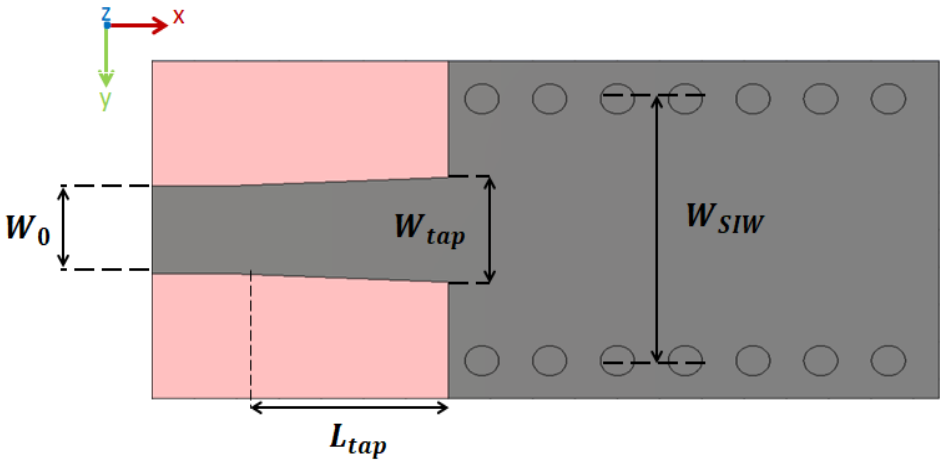


Figure 2.3: Transition d'un SIW vers un micro ruban avec ses paramètres.

Comme le montre la figure 2.3, cette transition contint trois paramètres géométriques principaux qui doivent être calculés :

- ✓ La largeur initiale de la ligne micro-ruban W_0 qui est généralement choisie pour obtenir une impédance caractéristique de 50Ω qui doit être calculée pour obtenir l'impédance caractéristique désirée.
- ✓ La largeur du taper ou la largeur finale W_{tap}.
- ✓ La longueur du taperL_{tap}.

En partant de la fréquence de travail f et du substrat choisi avec la constante diélectrique ε_r, la première étape consiste à dimensionner la ligne microruban, en imposant une impédance caractéristique standard Z_0 de 50 Ω. D'après on calcule le ratio W_0/H par la formule suivante [2-11]:

$$\frac{W_0}{H} = \begin{cases} \dfrac{8e^A}{e^{2A}-2} & for\ \dfrac{W_0}{H} < 2 \\ \dfrac{2}{\pi}\left[B - 1 - ln(2B-1) + \dfrac{\varepsilon_r - 1}{2\varepsilon_r}\left(ln(B-1) + 0.39 - \dfrac{0.61}{\varepsilon_r}\right)\right] & for\ \dfrac{W_0}{H} < 2 \end{cases} \quad \textbf{(2. 8)}$$

Où :

$$A = \frac{Z_0}{60}\sqrt{\frac{\varepsilon_r + 1}{2}} + \frac{\varepsilon_r - 1}{\varepsilon_r + 1}\left(0.23 + \frac{0.11}{\varepsilon_r}\right) \quad (2.\ 9)$$

$$B = \frac{377\pi}{2Z_0\sqrt{\varepsilon_r}}$$

Avec:Z_0: est l'impédance caractéristique de la ligne micro-ruban.

ε_r: est la permittivité relative du substrat.

H: est l'épaisseur du substrat.

Lorsque les composantes longitudinales des champs pour le mode dominant d'une ligne micro ruban restent beaucoup plus petites que les composantes transversales et elles peuvent être négligées. Dans ce cas, le mode dominant se comporte comme un mode TEM et la théorie des lignes de transmission TEM est applicable pour la ligne micro ruban. C'est ce qu'on appelle l'approximation quasi-TEM et elle est valable sur la plupart des gammes de fréquences de fonctionnement de la ligne micro ruban.

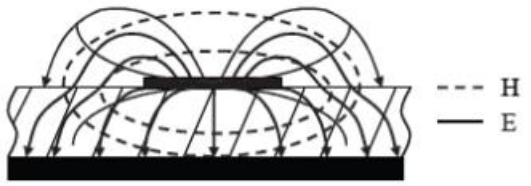


Figure 2.4: distribution des champs électrique et champs magnétique d'une ligne micro ruban.

La transition micro ruban vers SIW est essentiellement une ligne micro ruban effilée reliant la section micro ruban de largeur W_0 au guide d'ondes de largeur WSIW, comme le montre la **figure 2.4.** En utilisant les formules extraites de [2-11], nous obtenons une indication sur les deux principaux paramètres de conception : la longueur L_{tap} et la largeur W_{tap} de la section conique reliant la ligne micro ruban à la plaque métallique supérieure de la structure SIW :

$$\frac{W_{tap}}{\lambda_{g,micro}} \simeq 0.4$$
$$\frac{\lambda_{g,micro}}{2} < L_{tap} < \lambda_{g,micro} \quad (2.\ 10)$$

Avec$\lambda_{g,micro} = \lambda_0/\sqrt{\varepsilon_r}$ est la longueur d'onde du mode quasi-TEM (électromagnétique transverse) se propageant dans la ligne microruban.

Pour assurer une bonne transition entre le micro ruban et le SIW, il est nécessaire de calculer l'impédance de guidage de SIW, qui est donnée par [2-12] :

$$Z_{PI} = Z_{TE}\frac{H\pi^2}{8a_{RWG}} \quad (2.\ 11)$$

Nous calculer l'impédance de guidage, il est également nécessaire de calculer l'impédance d'onde de mode TE, qui est donnée par :

$$Z_{TE} = \frac{\eta}{\sqrt{1-\left(\frac{f_{cut}}{f}\right)^2}} \quad (2.\ 12)$$

Avec :

$$\eta = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \simeq \frac{120\pi}{\sqrt{\varepsilon_r}} \quad \textbf{(2. 13)}$$

2.3Métamatériaux électromagnétiques

2.3.1 Introduction

Les matériaux jouent un rôle fondamental dans tous les domaines de l'ingénierie et de la technologie, offrant des possibilités infinies d'innovation et de développement.

Leur utilisation s'étend à une multitude d'applications, qu'il s'agisse de constructions de génie civil nécessitant des matériaux robustes et durables, de composants électroniques exploitant les propriétés spécifiques des semi-conducteurs, de dispositifs biomédicaux exigeant des matériaux biocompatibles, ou encore de matériaux composites pour l'aérospatiale alliant légèreté et résistance.

Comprendre les propriétés intrinsèques des matériaux et choisir le matériau optimal pour une application spécifique revêt une importance capitale pour garantir des performances optimales, une fiabilité à long terme et des coûts maîtrisés. Que ce soit la conductivité électrique, la résistance mécanique, la résistance à la corrosion, la flexibilité, la conductivité thermique ou d'autres caractéristiques, chaque propriété des matériaux influence directement leur capacité à remplir leur fonction dans un contexte donné.

Dans cette exploration approfondie du rôle des matériaux dans l'ingénierie et la technologie, nous plongerons dans les différents types de matériaux, leurs propriétés remarquables, leurs méthodes de fabrication, ainsi que leurs applications spécifiques dans divers secteurs industriels. En comprenant pleinement la science derrière les matériaux et leur impact sur notre quotidien, nous pourrons mieux apprécier l'ingéniosité et l'ingénierie nécessaires pour façonner le monde qui nous entoure.

Les matériaux peuvent être classés en plusieurs catégories, notamment les métaux, les polymères, les céramiques, les semi-conducteurs, les composites et les matériaux biomédicaux. Chacune de ces catégories présente des propriétés uniques qui les rendent adaptées à des applications spécifiques.

Chaque type de matériau possède des propriétés spécifiques qui lui sont propres. Par exemple, les métaux sont connus pour leur bonne conductivité électrique et thermique, les polymères pour leur légèreté et leur flexibilité, les céramiques pour leur résistance à la chaleur et à la corrosion, et ainsi de suite. Comprendre ces propriétés est essentiel pour choisir le matériau le plus approprié pour une application donnée.

Les méthodes de fabrication des matériaux varient en fonction du type de matériau et de l'application visée.

Elles peuvent inclure des techniques telles que la fusion, la métallurgie des poudres, la polymérisation, le formage, le moulage, le dépôt de couches minces, et bien d'autres encore. Chaque méthode de fabrication influence les propriétés finales du matériau et peut avoir un impact sur sa performance dans son application finale.

Les matériaux sont largement utilisés dans une multitude de secteurs industriels, notamment l'automobile, l'aérospatiale, l'électronique, la construction, la médecine, l'énergie, et bien d'autres. Par exemple, les alliages métalliques sont utilisés dans la construction d'avions pour leur légèreté et leur résistance, les polymères sont utilisés dans la fabrication de pièces automobiles pour leur faible poids et leur flexibilité, et les semi-conducteurs sont utilisés dans les dispositifs électroniques pour leur conductivité contrôlée.

En comprenant pleinement la science derrière les matériaux, leurs propriétés et leurs méthodes de fabrication, nous pouvons apprécier l'ingéniosité et l'ingénierie nécessaires pour sélectionner et manipuler ces matériaux afin de façonner le monde qui nous entoure. Ces matériaux jouent un rôle essentiel dans la conception et la fabrication de produits innovants qui impactent notre vie quotidienne de manière significative

2.3.2 Définition de métamatériaux

Le terme « métamatériau » a été proposé par Rodger M. Wosler (university of texas) en 2001 avec la définition suivante : « macroscopic composite having manmade, three-dimensional, periodic cellular architecture designed to produce an optimized combination, not available in nature, of two or more responses to specific excitation ». La traduction littérale peut être comme suit : « matériau composite macroscopique présentant une architecture cellulaire périodique tridimensionnelle façonnée par l'Homme en vue de produire une combinaison, non rencontrée dans la nature, de deux ou trois réponses à une sollicitation spécifique ».

Les métamatériaux sont des matériaux composites artificiels spécifiquement conçu pour présenter des propriétés électromagnétiques qu'on ne retrouve pas aisément dans la nature. Récemment, les métamatériaux présentant simultanément une permittivité (ε) et une perméabilité (μ) négatives (métamatériaux à indice de réfraction négatif (NRI))$n = \pm\sqrt{\varepsilon_r \mu_r}$, plus communément appelés matériaux main gauche (LH), ont fait l'objet d'une attention particulière de la part des communautés scientifiques et techniques.

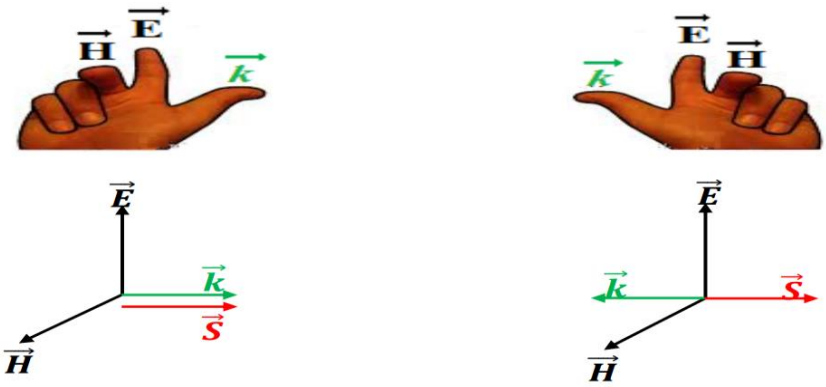
Le magazine Science a même classé les matériaux LH (LHM) parmi les dix plus grandes découvertes scientifiques de l'année 2003 [2.13].

En 1968, Veselago a été le premier à examiner les milieux ayant des paramètres constitutifs diélectriques et magnétiques négatifs. Dans son article, Veselago a appelé ces "substances" Left Handed (LH), pour exprimer le fait que le champ électrique E, le champ magnétique H et le vecteur de la constante de phase β forment une triade gauchère, contrairement aux matériaux conventionnels où cette triade est droitière (RH) (figure 2.5).

En particulier, ce type de métamatériel a été appliqué aux applications d'antenne. Parmi les nouvelles antennes réalisées à l'aide des propriétés uniques des métamatériaux (LH) à permittivité et perméabilité négatives, telles que l'indice de réfraction négatif, on peut citer : les petites antennes résonantes à onde arrièrent et les antennes à onde de fuite en mode fondamental capables d'un balayage continu d'un feu arrière à un feu final.

Il existe trois méthodes principales pour réaliser la structure des métamatériaux [2-14] : i) l'approche résonante, basée sur l'appariement de résonateurs à anneau fendu (SRR) avec des fils métalliques pour fournir une perméabilité et une permittivité négatives effectives, respectivement ;

ii)l'approche par mode évanescent, qui utilise des résonateurs diélectriques placés à l'intérieur d'un fond de coupure ; iii) l'approche de la ligne de transmission, basée sur la réalisation d'une cellule unitaire LH TL, qui consiste en une capacité en série et une inductance en dérivation. Étant donné que les effets RH naturels sont inévitables, une ligne de transmission composite droite-gauche (CRLH) est une réalisation pratique d'une ligne de transmission LH (LH TL). Nous nous intéresserons à cette dernière approche. La TL CRLH peut supporter des ondes avant et arrière, ainsi que des ondes stationnaires avec une constante de propagation nulle : ces caractéristiques sont à la base de leur utilisation dans de nombreuses applications d'antennes, comme les antennes à ondes de fuite, les antennes résonnantes compactes et les antennes multibandes.



(a) **(b)**

Figure 2.5:Représentation vectorielle d'une onde planeavec trièdre direct et indirect caractérisé par la règle de la main droite et main gauche respectivement : (a) milieu main droite, (b) milieu main gauche.

2.3.3 Classification des métamatériaux

Les matériaux peuvent être classés en différentes catégories en fonction de leurs propriétés, de leur structure, de leur origine et de leur utilisation finale. Ils comprennent les métaux, les polymères, les céramiques, les composites, les semi-conducteurs, les matériaux magnétiques, les matériaux fonctionnels, et bien d'autres.

Chaque type de matériau présente des caractéristiques uniques qui déterminent son comportement dans différentes conditions environnementales et d'exploitation. Ces caractéristiques comprennent des propriétés physiques telles que la densité, la conductivité, la transparence, la dureté, et la flexibilité, ainsi que des propriétés chimiques telles que la réactivité, la corrosion, et la stabilité thermique.

Les propriétés des matériaux jouent un rôle essentiel dans la sélection du matériau le mieux adapté à une application spécifique, en tenant compte des exigences de performance, de durabilité, de coût, et d'autres facteurs. Les avancées dans les domaines de la science des matériaux, de la nanotechnologie, et de la fabrication de pointe continuent d'ouvrir de nouvelles possibilités pour le développement de matériaux aux propriétés améliorées et aux performances optimisées.

Les matériaux sont des éléments fondamentaux de l'ingénierie moderne et de l'innovation technologique, jouant un rôle crucial dans le développement de produits et de systèmes avancés qui répondent aux besoins de la société contemporaine et contribuent au progrès scientifique et industriel.

En électromagnétisme, tout matériau homogène peut être décrit par ses paramètres constitutifs que sont la permittivité et la perméabilité. Ces deux paramètres permettent de déterminer la réponse du matériau à un champ électromagnétique. En règle générale Ɛ et μ sont à la fois positifs dans des matériaux ordinaires, cela signifie que l'indice de réfraction est positif. Les différentes possibilités du couple (Ɛ,μ) sont (+, +), (+, −), (−, +) et (−, −). Une représentation de ces paramètres dans un plan comprenant quatre cadrans afin d'inscrire les métamatériaux dans le prolongement des matériaux disponibles à l'état naturel est illustrée dans lafigure 2.6qui résume toutes les configurations possibles.

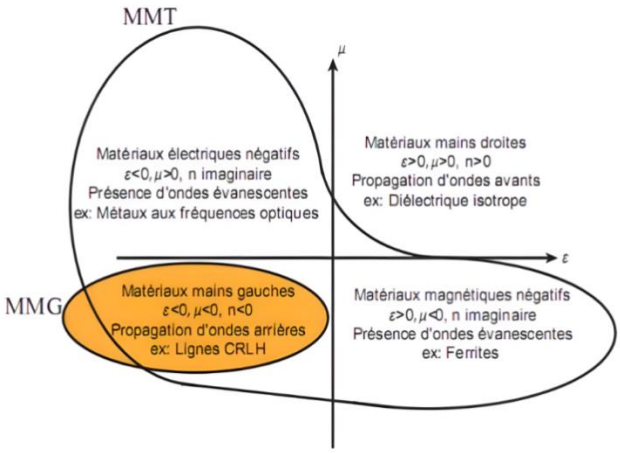


Figure 2.6: Classement des matériaux en fonction du signe de leur permittivité Ɛ et de leur perméabilité μ.

2.3.3.1 Les matériaux doublement positifs (DPS)

Les matériaux doublement positifs sont une classe de matériaux fascinants qui combinent à la fois une conductivité électrique élevée et une perméabilité magnétique élevée, ainsi qu'une réponse optique avancée. Leur composition variée, pouvant inclure des métaux, des oxydes et des semi-conducteurs, offre un potentiel considérable dans des domaines tels que l'électronique, le magnétisme et l'optique.

Ces matériaux uniques permettent une transmission efficace de l'électricité et du magnétisme, essentielle pour de nombreuses applications technologiques. Leur conductivité électrique élevée ouvre la voie à des avancées dans le domaine de l'électronique, tandis que leur perméabilité magnétique élevée offre des possibilités passionnantes dans la création de dispositifs magnétiques et de matériaux pour le stockage de l'information.

En outre, les matériaux DPS présentent des réponses optiques avancées qui peuvent être exploitées dans diverses applications en optique. Leur capacité à présenter des réponses électromagnétiques inhabituelles, telles que la réfraction négative et l'absorption sélective de la lumière, ouvre la porte à des dispositifs optoélectroniques innovants.

La recherche sur les matériaux DPS est en constante évolution, car ils offrent un potentiel significatif pour le développement de nouvelles technologies dans des domaines tels que la communication sans fil, l'imagerie médicale, la sécurité et la défense. Cependant, malgré les progrès réalisés, la conception et la fabrication de ces matériaux restent un défi en raison de la nécessité de contrôler précisément leurs propriétés électromagnétiques à l'échelle nanométrique ou microscopique.

En somme, les matériaux DPS ouvrent de nouvelles perspectives passionnantes en électronique, magnétisme et optique, offrant ainsi un potentiel pour le développement de technologies avancées et de nouvelles applications qui pourraient façonner le monde de demain.

2.3.3.2 Les matériaux à perméabilité négative (MNG)

Également connus sous le nom de métamatériaux à perméabilité négative, constituent une classe de matériaux fascinants étudiés pour leurs propriétés magnétiques inhabituelles et leur potentiel d'application dans divers domaines de recherche et d'ingénierie. Ces matériaux présentent une perméabilité magnétique négative dans certaines gammes de fréquences électromagnétiques, ce qui les distingue des matériaux conventionnels.

Leur perméabilité magnétique négative permet aux MNG de présenter des réponses électromagnétiques uniques, telles que la réflexion négative, l'inversion de phase et la focalisation sub-diffraction, ouvrant ainsi la voie à de nombreuses applications novatrices dans des domaines tels que l'optique, la télécommunication, l'énergie, l'électronique et la métamatière.

Dans le domaine de l'optique, les MNG offrent des possibilités passionnantes pour la création de lentilles planaires ultra-minces capables de focaliser la lumière en dessous de la limite de diffraction, ce qui pourrait révolutionner les domaines de la microscopie et de l'imagerie. En électronique, les MNG ouvrent de nouvelles perspectives pour la conception de composants plus rapides et plus compacts, stimulant ainsi l'innovation dans le domaine des dispositifs électroniques.

La fabrication des MNG implique souvent l'utilisation de structures périodiques ou de nanostructures soigneusement conçues, nécessitant un contrôle précis des propriétés magnétiques à l'échelle nanométrique ou microscopique.

Malgré les défis associés à leur conception et leur fabrication, la recherche sur les MNG progresse dans plusieurs laboratoires à travers le monde, offrant un potentiel significatif pour le développement de nouvelles technologies dans des domaines tels que la communication sans fil, l'imagerie médicale, la sécurité et la défense.

En somme, les matériaux à perméabilité négative représentent un domaine de recherche dynamique et prometteur, offrant des opportunités passionnantes pour repousser les limites de la science et de la technologie, et contribuant ainsi à façonner le paysage des technologies futures.

2.3.3.3 Les matériaux à permittivité négative (MPN)

Également connus sous le nom d'ENG (pour "Negative Permittivity Materials" en anglais), représentent une classe fascinante de matériaux artificiels qui ont attiré l'attention des chercheurs en raison de leurs propriétés électromagnétiques uniques. Ces matériaux se distinguent par leur capacité à présenter une permittivité diélectrique négative dans certaines gammes de fréquences électromagnétiques, ce qui ouvre la voie à une multitude d'applications innovantes dans des domaines tels que l'optique, les télécommunications et l'électronique.

La permittivité négative des MPN donne lieu à des effets électromagnétiques uniques, tels que la réfraction négative, où la lumière se propage dans une direction opposée à celle prédite par les lois de l'optique classique. Ces propriétés uniques ouvrent la voie à des applications novatrices dans des domaines aussi variés que les antennes miniatures, les dispositifs d'invisibilité et de camouflage, les dispositifs de focalisation d'énergie, et bien d'autres encore.

La recherche sur les MPN remonte aux années 1960, mais c'est à la fin des années 1990 et au début des années 2000 que des progrès significatifs ont été réalisés grâce aux avancées technologiques dans les domaines de la nano fabrication et de la métamorphose des matériaux. Depuis lors, de nombreuses équipes de recherche se sont engagées dans cette voie pour développer et optimiser les performances de ces matériaux, offrant ainsi de nouvelles perspectives pour l'ingénierie des dispositifs électromagnétiques et photoniques.

Malgré les défis associés à la fabrication et au contrôle des propriétés des MPN, leur potentiel à manipuler les ondes électromagnétiques ouvre la voie à de nouvelles avancées technologiques dans divers domaines de l'ingénierie et des sciences appliquées. En somme, les MPN représentent une classe de matériaux prometteurs offrant des possibilités passionnantes pour repousser les limites de la science et de la technologie, et contribuer ainsi à façonner le paysage des technologies futures.

2.3.3.4 Les matériaux à double négativité (DNG)

Également appelés matériaux doublement négative (DNG), représentent une classe remarquable de matériaux artificiels qui ont captivé l'attention des chercheurs en raison de leurs propriétés électromagnétiques uniques. Ces matériaux affichent à la fois une permittivité diélectrique et une perméabilité magnétique négatives dans certaines gammes de fréquences électromagnétiques, ouvrant ainsi la voie à une multitude d'applications novatrices.

Les DNG ont la capacité de présenter à la fois une réfraction et une réflexion négatives pour les ondes électromagnétiques, offrant ainsi des perspectives passionnantes pour des applications dans les domaines de l'optique et des télécommunications. Leur capacité d'absorption négative, qui leur permet d'absorber l'énergie des ondes plutôt que de la réfléchir, représente un avantage significatif pour la conception de dispositifs et de systèmes innovants.

Dans le domaine des antennes, les DNG permettent la création d'antennes à réfraction négative offrant des performances améliorées en termes de directivité et de gain. En optique, ces matériaux sont utilisés pour fabriquer des lentilles à réflexion négative, permettant de focaliser la lumière sur de petites tailles avec une grande précision. De plus, les DNG sont également utilisés dans la conception de capteurs à absorption négative, facilitant la détection de faibles niveaux d'énergie électromagnétique.

Cependant, la conception et la fabrication de matériaux à double négativité restent un défi en raison de la nécessité de contrôler précisément les propriétés électromagnétiques à l'échelle nanométrique ou microscopique. Malgré ces défis, les DNG offrent un potentiel prometteur pour développer de nouvelles technologies dans divers secteurs de l'ingénierie et de la recherche scientifique, notamment dans les domaines de la communication sans fil, de l'imagerie médicale, de la sécurité et de la défense.

En somme, les matériaux à double négativité représentent une classe fascinante de matériaux artificiels qui exploitent des propriétés électromagnétiques uniques pour ouvrir de nouvelles voies dans le développement de technologies innovantes et de systèmes avancés.

2.3.4 Ligne de transmission composite main droite/main gauche (CRLH TL)

Les lignes de transmission sont utilisées pour transférer de l'énergie électrique entre deux points. Une ligne de transmission arbitraire peut être décrite en termes de modèle de circuit équivalent (des résistances, des condensateurs et des inductances). Dans le cas idéale (sans pertes) le modèle comprend une inductance sérieL_R, induite par les champs magnétiques autour des conducteurs, et une capacité parallèle C_R, résultant de l'espacement des conducteurs. C'est le cas d'une TL RH classique. L'approche TL vers les métamatériaux LH est basée sur la réalisation d'une TL qui supporte une onde arrière, c'est-à-dire qui a une vitesse de phase v_p qui est dans la direction opposée à sa vitesse de groupe v_g.Par conséquent, l'indice de réfraction n d'une telle structure est négatif.

Une TL LH est composée d'une séquence de cellules unitaires, qui sont représentées par une capacité en série C_L et une inductance en dérivation L_L. Cependant, la TL LH pure n'est pas physiquement possible car, théoriquement, la vitesse de groupe de l'onde supportée dépasse la vitesse de la lumière dans le vide lorsque la fréquence opérationnelle augmente. En outre, une structure LH pure n'est pas réalisable en raison de la présence d'effets parasites RH d'inductance série L_R et de capacité shuntC_R, respectivement dus à la circulation du courant le long de la métallisation et au développement de gradients de tension entre les motifs métalliques de la trace et le plan de masse.

La TL CRLH est donc une réalisation pratique d'une TL LH qui inclut les effets parasites RH qui se produisent naturellement avec toute implémentation physique d'une TL LH. Pour des raisons de simplicité, nous ne considérons que le cas sans perte.

Les éléments C_L en série et L_L shunt sont responsables de la propagation LH, tandis que les éléments C_R shunt et L_R en série provoquent la propagation RH à des fréquences plus élevées. En effet, les propriétés de propagation LH et RH peuvent être accordées sur une plage de fréquences souhaitée en contrôlant les paramètres de la cellule unitaire. La figure 2.7 présente le modèle de circuit équivalent d'une TL RH, d'une TL LH et d'une TL CRLH sans perte.

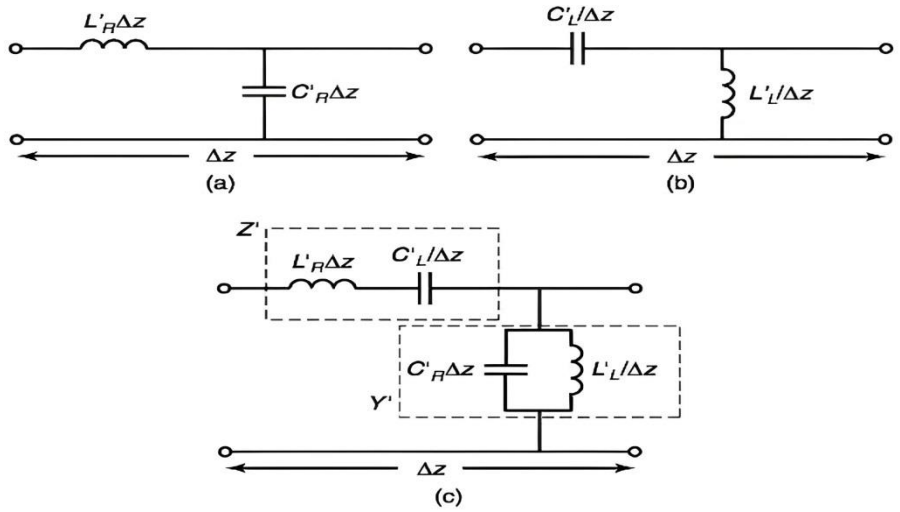


Figure 2.7: Modèle de circuit équivalent pour une TL sans perte a) TL RH pure, b) TL LH pure, c) CRLH TL, d'après [2-15].

Les considérations ci-dessus concernant les TL LH et CRLH sont valables à condition que la structure soit effectivement homogène (effectively homogeneous). Cela signifie que la taille moyenne des cellules $\Delta_z$est beaucoup plus petite que la longueur d'onde guidée λ_g dans la structure considérée ($\Delta z \ll \lambda_g$, au moins $\Delta z < \lambda_g/4$) [2-15]. Si cela pouvait être réalisé, on obtiendrait un milieu LH non résonant et la conception serait parfaitement réalisable.

Dans notre travail, les nombres premiers sont utilisés pour représenter les quantités par unité de longueur :C'_R [F/m], L'_R [H/m],C'_L [F.m],L'_L [H.m]

Inductance série $L'_R = L_R \Delta z$ [H] et capacité shunt (dérivation)$C'_R = C_R \Delta z$ [F];

Capacité séries$C'_L = C_L/\Delta z$ [F] Inductance shunt $L'_L = L_L/\Delta z$ [H];

Impédance par unité de longueur $Z'(\omega) = j\left(\omega L'_R - \frac{1}{\omega C'_L}\right)$ [Ω/m];

admittance par unité de longueur $Y'(\omega) = j\left(\omega C'_R - \frac{1}{\omega L'_L}\right)$ [Ω/m].

La constante de propagation d'une ligne de transmission est donnée par :

$$\gamma(\omega) = \alpha(\omega) + j\beta(\omega) = \pm\sqrt{Z'(\omega)Y'(\omega)} \tag{2. 14}$$

Avec α : est la constante d'atténuation.

β : est la constante de phase.

L'impédancecaractéristiqueZ_c est :

$$Z_c = \sqrt{Z'/Y'} \tag{2. 15}$$

Tout d'abord, pour plus de commodité, on peut introduire des variables :

$$\omega'_R = \frac{1}{\sqrt{L'_R C'_R}}[(\text{Rad.m})/\text{s}]$$

$$\omega'_L = \frac{1}{\sqrt{L'_L C'_L}}[\text{Rad/m. s}], \tag{2. 16}$$

$$\kappa = L'_R C'_L + L'_L C'_R[(\text{S/rad})^2],$$

Les fréquences de résonance en série et shunt sont les suivantes :

$$\omega_{se} = \frac{1}{\sqrt{L'_R C'_L}}[(\text{Rad/s})],$$

$$\omega_{sh} = \frac{1}{\sqrt{L'_L C'_R}}[(\text{Rad/s})]. \tag{2. 17}$$

En insérant équation (2.16) dans l'équation (2.14) et en tenant compte du changement de signe de la vitesse de phase pour le matériau main-gauche, l'expression de la constante de propagation complexe peut être exprimée comme suit :

$$\gamma(\omega) = js(\omega)\sqrt{\left(\frac{\omega}{\omega_R'}\right)^2 + \left(\frac{\omega_L'}{\omega}\right)^2 + \kappa\omega_L'^2}, \qquad (2.\ 18)$$

Selon la racine carrée, la constante γ peut être purement réelle ou imaginaire, la fonction signe (ω) est donnée par :

$$s(\omega) = \begin{cases} -1 & si \quad \omega < \min(\omega_{se};\ \omega_{sh}) \quad lagammeLH\,, \\ +1 & si \quad \omega > max(\omega_{se};\ \omega_{sh})\ la\ gamme\ RH. \end{cases} \qquad (2.\ 19)$$

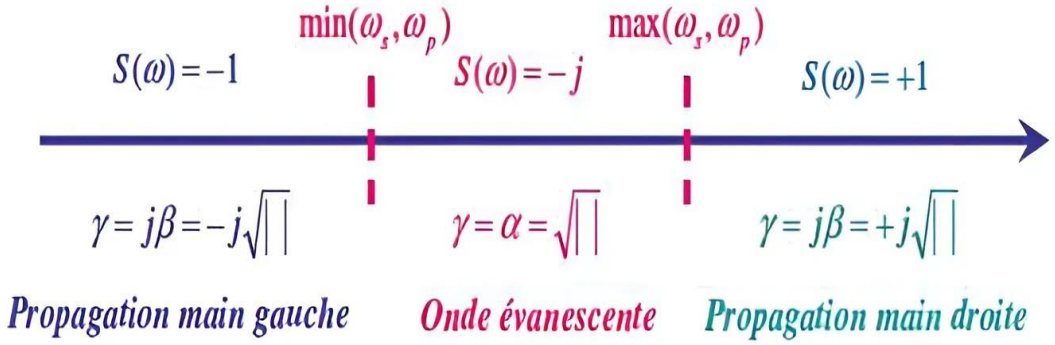


Figure 2.8: Les différents intervalles de propagation.

Lorsque la fréquence angulaire satisfait $min(\omega_{se};\ \omega_{sh}) < \omega < max(\omega_{se};\ \omega_{sh})$, la constante de propagation est purement réelle, c'est-à-dire $\gamma = \alpha$, qui correspond à une bande d'arrêt dans la gamme de fréquences malgré le fait que la ligne de transmission CRLH est sans perte. Dans le cas que $\omega < min(\omega_{se};\ \omega_{sh})$ ou $\omega > max(\omega_{se};\ \omega_{sh})$, on a $\gamma = j\beta$purement imaginaire, et une bande passante est présente (figure 2.8).Dans ce dernier cas, nous distinguons les plages LH et RH, bandes de fréquences dans lesquelles la TL présente des comportements différents, et nous indiquons la constante de propagation comme βLH et βRH, respectivement. Le diagramme de dispersion/atténuation de la ligne CRLH est représenté sur la figure 2.9 avec les courbes correspondant à la ligne de RH et ligne LH.

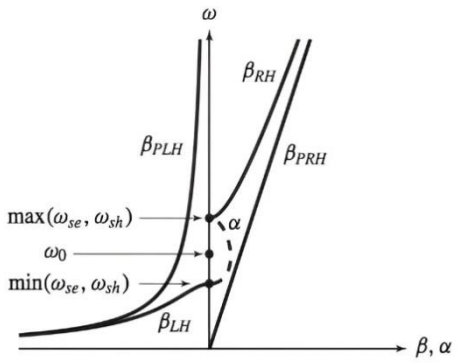


Figure 2.9: Diagramme de dispersion/atténuation d'une CRLH TL, d'après l'équationγ(ω),en comparaison avec une TL RH pure (β_{PRH}) et une TL LH pure (β_{PLH}), d'après [2-15].

$$v_p = \frac{\omega}{\beta} \; ; v_g = \left(\frac{d\beta}{d\omega}\right) \tag{2. 20}$$

La signification des symboles est la suivante :

β_{RH} : La constante de phase de la gamme main-droite de la ligne de transmission CRLH ;

β_{LH} : La constante de phase de la gamme main-gauche de la ligne de transmission CRLH ;

β_{PRH} : La constante de phase pure de la ligne main-droite ;

β_{PLH} : La constante de phase pure de la ligne main-gauche.

La ligne de transmission composite droite-gauche incarne l'essence même de l'ingéniosité dans le domaine des circuits RF et des micro-ondes. Sa conception complexe, fruit d'une recherche approfondie, combine habilement des segments droits et gauches avec des propriétés électromagnétiques distinctes pour optimiser la transmission des signaux électromagnétiques dans les systèmes de communication modernes.

Grâce à cette conception innovante, la ligne de transmission composite droite-gauche offre une connectivité optimale entre les composants des réseaux de télécommunications, de l'industrie de l'énergie et des systèmes de transport.

En assurant une transmission efficace et fiable des signaux électriques et optiques sur de longues distances, elle joue un rôle crucial dans le fonctionnement fluide des communications modernes.

Les applications de la ligne de transmission composite droite-gauche s'étendent à divers domaines, de la conception de filtres RF à celle de diviseurs de puissance, où ses caractéristiques électromagnétiques spécifiques sont exploitées pour répondre aux exigences de performance des circuits. Son utilisation dans la conception de guides d'ondes et de dispositifs RF à haute fréquence ouvre de nouvelles perspectives pour améliorer les performances et l'efficacité des systèmes de communication.

En résumé, la ligne de transmission composite droite-gauche représente une avancée majeure dans les technologies de transmission de signaux électromagnétiques, offrant des performances optimales et ouvrant de nouvelles possibilités dans les domaines de l'ingénierie des circuits RF et des micro-ondes. Son rôle central dans la connectivité et la fiabilité des réseaux témoigne de son importance dans le paysage technologique contemporain.

2.3.5 CRLH TL équilibré

Le CRLH TL équilibré, abréviation pour Circuits Left-Right Handed Transmission Line équilibrée, incarne l'alliance harmonieuse entre théorie et pratique dans le domaine de la transmission des signaux et de la conception de circuits. Il se distingue par son équilibre subtil entre la composante capacitance (C), la composante résistance (R) et la composante inductance (L), offrant ainsi des propriétés uniques qui ont captivé l'intérêt de nombreux chercheurs et ingénieurs.

Ce concept novateur, caractérisé par une transmission linéaire équilibrée, a suscité un vif intérêt dans le domaine de la conception de circuits et de la transmission des signaux en raison de ses propriétés uniques. Grâce à son équilibre entre C, R et L, le CRLH TL équilibré présente des avantages significatifs tels qu'une meilleure suppression des réflexions, une adaptation d'impédance plus précise et une amplification efficace du signal.

La combinaison de composants LH et RH dans une même structure permet d'obtenir des propriétés électriques uniques, telles que des propriétés de dispersion négative, qui peuvent être

exploitées dans diverses applications, y compris les filtres, les amplificateurs, les antennes et d'autres dispositifs RF et micro-ondes.

La précision de la définition du CRLH TL équilibré est essentielle pour une compréhension approfondie de ses caractéristiques et de ses applications potentielles.

En somme, le CRLH TL équilibré représente une avancée significative dans les technologies de transmission des signaux, offrant des solutions innovantes pour répondre aux défis de la conception de circuits et de la transmission des signaux dans les systèmes de communication modernes. Son équilibre subtil entre composantes électriques ouvre de nouvelles voies pour améliorer les performances et l'efficacité des dispositifs RF et micro-ondes, témoignant ainsi de son importance dans le paysage technologique contemporain.

Le principe de l'équilibrage des CRLH TL consiste à ajuster les paramètres et les composants de manière à obtenir une répartition équilibrée entre les propriétés à main droite (RH) et à main gauche (LH) de la ligne de transmission. Cela permet de maximiser les avantages des CRLH TL, tels que la réduction des pertes d'énergie, l'amélioration de la linéarité et l'augmentation de la bande passante. Différentes méthodes de conception, telles que l'approche basée sur la théorie des circuits et la méthode basée sur les paramètres S, peuvent être utilisées pour réaliser cet équilibrage.

La bande d'arrêt $min(\omega_{se};\ \omega_{sh}) < \omega < max(\omega_{se};\ \omega_{sh})$est une caractéristique unique de la CRLH TL, qui n'est pas présente dans les cas PRH ou PLH pur. Cet écart est dû aux différentes résonances série et shunt ω_{se} et ω_{sh}: lorsque cela se produit, on dit que la CRLH TL est déséquilibrée (unbalanced) [2-16].

Lorsque ces deux fréquences sont égales $\omega_{se} = \omega_{sh}$, la ligne est dite équilibrée et l'écart CRLH se referme donc la bande interdite n'existe pas (β est egale à zero).

Pour obtenir $\omega_{se} = \omega_{sh}$, à partir de l'equ (2.17), il faut :

$$L'_R C'_L = L'_L C'_R \qquad (2.\ 21)$$

$$\beta = \beta^{PRH} + \beta^{PLH} = \frac{\omega}{\omega_R'} - \frac{\omega_L'}{\omega} = \omega\sqrt{L_R' C_R'} - \frac{1}{\omega\sqrt{L_L' C_L'}} \quad (2.\ 22)$$

$$\beta(\omega) = \frac{1}{\Delta z}\left(\omega\sqrt{L_R C_R} - \frac{1}{\omega\sqrt{L_L C_L}}\right) \quad (2.\ 23)$$

$$\omega_0 = \sqrt{\omega_R' \omega_L'} = \frac{1}{\sqrt[4]{L_R' C_R' L_L' C_L'}} = \frac{1}{\sqrt{L_R' C_L'}} = \frac{1}{\sqrt{L_L' C_R'}} \quad (2.\ 24)$$

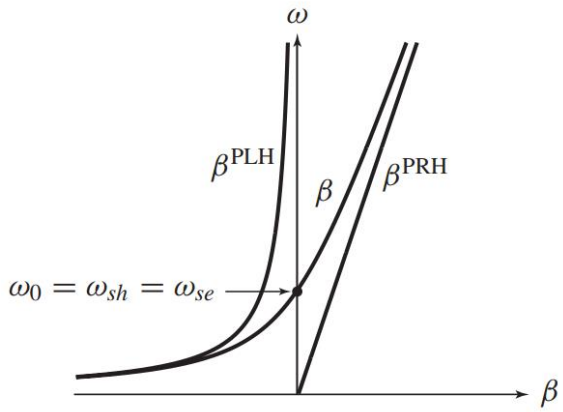


Figure 2.10: Diagramme de dispersion d'une TL CRLH équilibrée, d'après l'équation (2.19), en comparaison avec une TL RH pure (β^{PRH}) et une TL LH pure (β^{PLH}), d'après [2-15].

$$Z_C = \sqrt{\frac{L_L'}{C_L'}} = \sqrt{\frac{L_R'}{C_R'}} \quad (2.\ 25)$$

$$n = \frac{c\beta}{\omega} = c\left(\frac{1}{\omega_R'} - \frac{\omega_L'}{\omega^2}\right) \quad (2.\ 26)$$

$$v_g = \frac{\omega^2 \omega'_R}{\omega^2 + \omega'_R \omega'_L} \tag{2. 27}$$

$$\lambda_g = \frac{2\pi}{|\beta|} = \frac{2\pi}{\left|\frac{\omega}{\omega'_R} - \frac{\omega'_L}{\omega}\right|} \tag{2. 28}$$

2.3.6 Application des CRLH TL

Les lignes de transmission (TL) équilibrées à constantes réparties gauche-droite (CRLH) sont des structures de transmission électromagnétique qui présentent des propriétés intéressantes pour plusieurs applications.

- Antennes à Double Polarisation : Les CRLH TL équilibrés peuvent être utilisés dans la conception d'antennes à double polarisation. En exploitant les propriétés uniques de ces lignes de transmission, il est possible de concevoir des antennes qui émettent ou reçoivent des signaux avec une polarisation verticale et horizontale simultanée. Cela permet d'améliorer la flexibilité et les performances des antennes dans diverses applications de communication sans fil, notamment dans les systèmes de communication à polarisation diversifiée

- Filtres à Bande Passante Large : Les CRLH TL équilibrés peuvent également être utilisés dans la conception de filtres à bande passante large. En ajustant les paramètres de conception des CRLH TL, il est possible de réaliser des filtres qui présentent une large bande passante tout en maintenant des performances élevées en termes de sélectivité et de réjection des fréquences indésirables. Ces filtres sont utiles dans les systèmes de communication à large bande passante, tels que les réseaux sans fil haut débit et les systèmes de transmission haute performance.

- Amplificateurs de Puissance : Les CRLH TL équilibrés peuvent être utilisés dans la conception d'amplificateurs de puissance pour les signaux RF et micro-ondes.

En utilisant des CRLH TL comme composants actifs ou comme circuits de couplage, il est possible de concevoir des amplificateurs qui présentent une large bande passante, une efficacité élevée et une linéarité améliorée. Ces amplificateurs sont utilisés dans une gamme d'applications, y compris les télécommunications, les radars, les systèmes de surveillance et les équipements de transmission sans fil.

Les CRLH TL équilibrés sont des structures de transmission électromagnétique polyvalentes qui peuvent être utilisées dans une variété d'applications,

y compris les antennes double polarisation, les filtres à bande passante large et les amplificateurs de puissance. Ils offrent des avantages en termes de performances, de flexibilité et de large bande passante, ce qui les rend attrayants pour les ingénieurs travaillant dans les domaines des communications sans fil, des télécommunications et de l'électronique RF et micro-ondes.

Conclusion

En conclusion, le guide d'ondes intégré au substrat (SIW) représente une innovation significative dans le domaine des hautes fréquences et des micro-ondes, offrant une solution efficace pour guider et manipuler les ondes électromagnétiques à travers un substrat diélectrique. Son importance réside dans sa capacité à permettre une intégration compacte des composants micro-ondes, améliorant ainsi les performances des systèmes tout en réduisant leur taille et leur poids. Les objectifs du SIW, tels que l'acheminement précis des ondes, la minimisation des pertes de signal et la facilitation de l'intégration des composants, contribuent à son adoption généralisée dans diverses applications, notamment les circuits intégrés, les antennes et les systèmes de communication sans fil. En continuant à explorer de nouvelles configurations, matériaux et techniques de fabrication, le SIW ouvre la voie à des avancées continues dans le domaine des systèmes RF, répondant ainsi aux demandes croissantes en performances et en efficacité.

Chapitre 3 Antenne à onde de fuites

3.1Antennes à Onde Fuyante :

3.1.1 Définition et Principes

Dans le domaine de la théorie des antennes, une antenne à onde fuyante est définie comme une antenne à onde progressive où l'onde émerge sans interruption de l'antenne, avec une directivité le long de la direction de propagation. Initialement, ces antennes étaient peu utilisées, mais avec l'avènement des systèmes de communication numérique, leur attrait a considérablement augmenté. La capacité des antennes à onde fuyante à offrir un balayage à grand angle est particulièrement remarquable, permettant un balayage sur une large gamme angulaire, des régions de largeur de bande aux régions de l'endfire.

Il existe deux formes principales d'antennes à onde fuyante : à onde lente et à onde rapide. Les ondes lentes présentent une vitesse de phase inférieure à celle de la lumière, généralement obtenue soit par la charge périodique de la ligne de transmission avec des condensateurs ou des inductances, soit par certains types de lignes de transmission. Les ondes rapides, quant à elles, se produisent lorsque la vitesse de phase est supérieure à celle de la lumière. Cependant, dans la plupart des antennes à onde fuyante, la propagation à onde lente prédomine, offrant ainsi la possibilité d'un balayage à grand angle du faisceau principal.

La longueur caractéristique d'une antenne à onde fuyante est souvent désignée comme la 'longueur de régulateur'. Cette valeur est déterminée par une équation spécifique qui dicte à partir de quelle longueur l'antenne commencera à rayonner. Lorsque l'antenne est en ses débuts (pour de faibles valeurs de λ), elle se comporte en mode normal sans rayonnement [3-1].

3.1.2 Introduction aux Antennes à Onde Fuyante

Le concept d'onde fuyante est central dans les antennes à onde fuyante. Ce terme fait référence à la dissipation de puissance de la direction principale du rayonnement vers l'espace libre. Les antennes à onde fuyante exploitent ce principe, où le rayonnement commence à une extrémité de l'ouverture de l'antenne et est guidé le long de sa longueur, mais s'échappe progressivement dans l'espace. Cette caractéristique signifie que la direction de la puissance émise varie en fonction de l'angle, contrairement à une antenne conventionnelle.

Les antennes à onde fuyante présentent généralement des propriétés de retard temporel, avec des variations de tension et de courant le long de l'antenne qui ne sont pas en phase les unes avec les autres. Ce phénomène est dû aux variations de tension et de courant le long de l'antenne en fonction de la distance. Ces antennes émettent une onde avant (dans la direction du lobe principal) et une onde arrière (dans la direction opposée du lobe principal), résultant de la fuite de puissance de l'onde avant vers l'antenne.

La direction de l'antenne à onde fuyante peut être contrôlée en ajustant le courant le long de l'antenne ou en modifiant la fréquence du signal d'entrée. Cette flexibilité est exploitée dans certains systèmes radar et satellites nécessitant un balayage étendu de l'espace [3-2].

3.1.3 Principes de Fonctionnement des Antennes à Onde Fuyante

Les antennes à onde fuyante fonctionnent sur le principe de l'émission d'une onde avant, qui se propage loin du point d'alimentation pour transférer de l'énergie dans l'espace. Ce rayonnement commence à l'ouverture de l'antenne, région où le rayonnement se produit. Le rayonnement lointain peut être conceptualisé en considérant les composantes du champ électrique et magnétique, perpendiculaires à la direction de propagation de l'onde.

Un vecteur de flux de puissance est également défini pour comprendre la direction du rayonnement électromagnétique. Il représente la quantité de puissance traversant une zone unitaire perpendiculaire au flux de puissance, offrant ainsi une mesure de la direction du flux. L'onde avant est confinée jusqu'à ce qu'elle atteigne la région à onde fuyante, où elle se propage dans l'espace libre.

3.1.4 Définition du Principe de Rayonnement de Fuite

Le rayonnement de fuite se réfère à l'émission involontaire d'énergie, de particules ou d'ondes par une source ou un objet. Ce rayonnement peut être de nature électromagnétique, acoustique ou thermique, et est généré par différents mécanismes. Comprendre ce principe est essentiel pour évaluer les risques associés et mettre en place des mesures de prévention appropriées.

3.1.5 Importance du Principe de Rayonnement de Fuite

Le principe de rayonnement de fuite revêt une importance majeure en raison de ses multiples implications. Il est crucial pour évaluer les risques pour la santé humaine, les interférences avec les équipements électroniques et l'impact sur l'environnement. Comprendre ce principe est essentiel pour mettre en œuvre des mesures de prévention et de protection adéquates.

3.1.6 Mécanismes du Rayonnement de Fuite

Le rayonnement de fuite est un phénomène complexe avec des conséquences significatives sur la santé humaine, les équipements électroniques et l'environnement. Comprendre ses mécanismes est essentiel pour le prévenir et le contrôler efficacement [3-3].

3.2 Classification de LWAs

Trois types différents d'antennes à onde fuyante sont couramment utilisés dans la pratique : l'antenne à onde progressive, l'antenne à onde fuyante résonante et l'antenne à onde fuyante non résonante.

Dans une antenne à onde progressive, la structure peut être considérée comme une cavité qui est excitée à une résonance, et le champ rayonne le long de la structure ; il semble glisser le long de celle-ci. Elle remplit la fonction d'une antenne à onde progressive si elle est excitée de telle sorte que la résonance semble se déplacer le long de la structure, par rapport à la longueur de l'antenne. Typiquement, les antennes à onde progressive sont utilisées dans les bandes de fréquences micro-ondes et millimétriques. Contrairement à l'antenne à onde progressive, qui est excitée à une résonance, l'antenne à onde fuyante non résonante a simplement l'onde lancée sur la structure. Dans ce cas, le rayonnement est dû à la périodicité de la structure, plutôt qu'à une forte résonance. Ce type d'antenne est généralement à large bande et ne nécessite normalement pas l'utilisation d'une alimentation et est largement utilisé comme antenne à profil bas.

L'antenne à onde fuyante résonante, comme son nom l'indique, est excitée à une résonance forte. Le principal avantage de cette antenne est que la direction du faisceau peut généralement être dirigée en changeant la fréquence de l'entrée, ce qui la rend attrayante pour les applications nécessitant une orientation ou un balayage du faisceau dans l'espace.

Cependant, les inconvénients de l'antenne à onde fuyante résonante sont qu'elle a généralement une largeur de bande étroite et qu'elle est généralement plus grande en taille ; elle est plus susceptible d'être utilisée dans des applications à basse fréquence.

D'autre part, les antennes à onde fuyante non résonantes sont utilisées lorsque des performances à large bande et une structure à faible profil sont souhaitées. Federico Vismara a suggéré dans son livre que l'antenne à onde progressive à faisceau en direction de la largeur habituellement donne une meilleure efficacité et une forme de faisceau plus unidirectionnelle, ainsi qu'un profil plus bas et un fonctionnement à bande plus large par rapport aux antennes à onde fuyante non résonantes.

Cependant, il a également été noté que la plupart des antennes à onde fuyante appliquées dans les systèmes réels, en particulier dans les systèmes radar, ne sont pas les antennes à onde progressive à faisceau en direction de la largeur optimisée proposées par la théorie [3-4,3-5].

3.3Le rôle des antennes à onde fuyante dans la technologie des ondes millimétriques

Principes des antennes à onde fuyante Les antennes à onde fuyante prennent en charge la propagation d'ondes progressives à la surface d'une structure de guidage, telle qu'une bande métallique. En raison des perturbations périodiques le long de la structure de guidage, qui induisent des ondes de surface avec des vecteurs d'onde qui rayonnent le long de la direction de la propagation de l'onde, une onde fuyante est produite. Ces types d'antennes sont particulièrement utiles car elles produisent un rayonnement dirigé vers l'avant dans les applications de balayage de faisceau. L'onde se propageant le long de la structure de guidage excite des modes d'ordre supérieur, qui à leur tour produisent le rayonnement du faisceau à balayage avant. Ce phénomène, connu sous le nom d'onde fuyante, permet de modifier la direction du faisceau en changeant la fréquence sans avoir besoin de repositionner physiquement l'antenne. Ce concept d'exploitation convient bien aux antennes à onde fuyante à balayage continu. La fréquence à laquelle une antenne à onde fuyante rayonne et la direction dans laquelle le rayonnement est observé peuvent toutes deux dépendre de la fréquence d'excitation. Cela est dû au fait que la vitesse de phase de l'onde progressive le long de la structure de guidage et le vecteur d'onde de rayonnement, qui est lié au mode excité, dépendent tous deux de la fréquence.

En plus de soutenir la propagation du mode fondamental, des modes d'ordre supérieur peuvent être excités à des fréquences plus élevées. Étant donné que la vitesse de phase de ces modes et leur longueur d'onde sur la structure de guidage sont toutes deux supérieures à celles du mode fondamental, la fréquence à laquelle une onde fuyante est observée dans le rayonnement lointain pourrait diminuer. De plus, la direction du rayonnement du faisceau à balayage avant peut également changer. Cette capacité à modifier la direction du faisceau en changeant la fréquence est connue sous le nom de balayage en fréquence.

3.3.1 Mécanisme de propagation des ondes

En général, une antenne à onde fuyante avec une section transversale en forme de coin est plus adaptée pour fonctionner à haute fréquence, tels que les bandes de fréquences micro-ondes et millimétriques. D'autre part, une antenne à onde fuyante avec une géométrie plane est normalement utilisée dans les gammes de fréquences VHF et ultra-hautes fréquences (UHF).

Enfin, il convient de mentionner que toutes les antennes à onde fuyante n'opèrent pas à des fréquences micro-ondes ou millimétriques en pratique. Par exemple, l'antenne à onde de surface qui fonctionne à très haute fréquence (VHF) est également un type de structure à onde fuyante. Cependant, en raison des différentes formes de la structure rayonnante, des différentes façons d'exciter l'onde fuyante et des différents mécanismes de propagation des ondes, les bandes de fréquences de fonctionnement de ces antennes sont différentes.

En ajoutant une couche diélectrique entre le métal et le guide d'onde, une onde fuyante sera excitée car la vitesse de propagation de l'onde à l'intérieur du diélectrique est inférieure à la vitesse de la lumière. Ainsi, la vitesse de phase et la vitesse de groupe sont différentes dans ce cas. En choisissant correctement la constante diélectrique du matériau afin de changer la vitesse de l'onde, une onde fuyante dans une bande de fréquences désirée peut être obtenue.

Du front d'onde, il est facile de constater que la vitesse de phase (c'est-à-dire la vitesse à laquelle la phase de l'onde se déplace dans l'espace) de l'onde est la même que la vitesse de groupe (c'est-à-dire la vitesse à laquelle l'énergie se déplace dans l'espace). Ce type de rayonnement est bien connu sous le nom d'onde plane.Imaginez un coin en métal parfaitement conducteur (PEC) infini placé dans l'espace libre. Il est bien connu en théorie électromagnétique qu'un champ électrique tangentiel appliqué à la surface d'un métal provoquera un courant électrique à circuler dans la direction du champ électrique.

De même, un champ magnétique tangentiel induira un courant de surface perpendiculaire au champ magnétique. Au fil du temps, une onde électromagnétique sera émise à partir de la région où le courant de surface circule et rayonne dans l'espace.

Bien que l'analogie de la ligne de transmission fournisse une méthode pour prédire le diagramme de rayonnement résultant possible d'une antenne à onde fuyante, elle ne fournit pas beaucoup d'informations sur la manière dont l'énergie de l'onde se déplace de l'entrée à la sortie le long de la structure de l'antenne à onde fuyante. Pour remédier à cela, un mécanisme de propagation des ondes d'une antenne à onde fuyante doit être pris en compte. Ce concept peut être expliqué en utilisant un coin en métal.

*****Capacités de direction de faisceau À partir du travail analytique ou numérique, il offre les connaissances nécessaires et l'expérience de conception sur les technologies d'antennes avancées telles que le travail de développement sur le réseau à commande de phase active dans lequel la puissance est distribuée et amplifiée sur la face du réseau produisant une puissance rayonnée totale élevée et des niveaux de lobes secondaires faibles qui sont très recherchés et bénéfiques dans les systèmes modernes de radar et de communication par satellite. D'autre part, le balayage de faisceau peut également être réalisé en utilisant des antennes à onde fuyante 1D mécaniquement mobiles. Étant donné certains tests initiaux et le succès des antennes à onde fuyante à balayage de faisceau, cela montre des promesses pour la conception et la réalisation de réseaux d'antennes à balayage de fréquence. Ces réseaux d'antennes sont utilisés dans les systèmes de communication et de radar pour mettre en œuvre et optimiser la transmission et la réception de puissance.

Tout d'abord, considérons une antenne à onde fuyante à balayage dans la forme microbande. Intuitivement, si nous utilisons une ligne de transmission pour alimenter une antenne à onde fuyante en microbande, telle qu'une antenne patch en microbande proche de son bord de sorte que l'onde de surface de la microbande soit excitée, le faisceau principal balayera entre le zénith et l'axifuge à mesure que la fréquence augmente. Des résultats numériques sont donnés à partir d'une analyse harmonique spatiale 1D montrant qu'un gain zénithal pouvant atteindre environ 8 dBi peut être maintenu sur une plage de balayage de 2 :1.

De plus, en utilisant un modèle de circuit avec des caractéristiques de dispersion appropriées, l'analyse en ondes complètes capturée par le solveur électromagnétique peut être

vérifiée. Prendre le spectre de puissance de la forme d'onde d'entrée et considérer ses composantes de fréquence et sa distribution de phase donneraient une explication claire sur le balayage continu du faisceau. Les composantes harmoniques supérieures dans la sortie du formeur de faisceau, en raison des différences de phase entre les déphaseurs consécutifs, sont éliminées en utilisant une approche de fenêtrage différente pour la sortie du formeur de faisceau. De tels résultats sont importants en ce qui concerne la conception pratique des réseaux de formation de faisceau pour les antennes à onde fuyante.

Comme nous l'avons discuté dans la section précédente, les antennes à onde fuyante prennent en charge des capacités de balayage de faisceau continu, ce qui les distingue des autres types d'antennes avec un balayage de faisceau discret. Il est bien connu qu'une excitation d'onde progressive introduite dans une antenne à onde fuyante rayonne, et que la direction du faisceau principal oscille avec la fréquence de manière continue. La plage de fréquences sur laquelle le faisceau principal émerge de l'antenne à onde fuyante à différents angles est appelée plage de balayage. Ce phénomène unique a été minutieusement étudié au cours des dernières décennies.

***** Propriétés de la bande passante

Les antennes à onde fuyante présentent des propriétés de bande passante particulières en raison de leur mécanisme de propagation des ondes. Comme les ondes fuyantes se propagent le long de la structure de guidage, une partie de la puissance des ondes est émise de la surface de la structure dans l'espace. Cette direction de rayonnement est déterminée par la condition d'excitation de l'onde fuyante. En raison des changements de constante de phase le long de la direction de propagation, différentes composantes de fréquence des ondes fuyantes sont successivement rayonnées dans l'espace. Par conséquent, le diagramme de puissance lointaine des antennes à onde fuyante est modifié par rapport à la propagation dans l'espace libre, ce qui entraîne la capacité de balayage du faisceau rayonné. En modifiant la fréquence du signal d'entrée, la constante de phase variera en conséquence en raison des différences de longueur d'onde. Par conséquent, la direction du faisceau sera modifiée à mesure que la fréquence de fonctionnement change, fournissant ainsi la capacité de balayage en fréquence basée sur différentes composantes de fréquence pour le diagramme de puissance de l'onde fuyante. Ces propriétés de la bande passante permettent aux antennes à onde fuyante de s'adapter à un large éventail de fréquences et de fournir des performances de balayage de faisceau continues [3-7].

3.4Caractéristiques et avantages des antennes à onde fuyante :

3.4.1 Large bande passante :

Les antennes à onde fuyante ont la capacité de fonctionner sur une large plage de fréquences, ce qui signifie qu'une seule excitation d'alimentation peut exciter différents modes de l'antenne. Par conséquent, cela confère un avantage significatif aux antennes à onde fuyante par rapport aux autres types d'antennes.

En effet, les utilisateurs tels que les concepteurs de systèmes de communication ou les chercheurs n'ont pas besoin de régler la fréquence des antennes de manière occasionnelle, chaque fois que la fréquence de fonctionnement doit être modifiée. L'utilisation d'antennes à large bande est essentielle dans la communication sans fil, car la bande de fréquence disponible dans les spectres sans fil est extrêmement encombrée. Par conséquent, il est très souhaitable que quelques antennes puissent couvrir une large gamme de bandes de fréquences pour faciliter la planification des fréquences et minimiser également le coût et la taille du système d'antenne. Dans un environnement mobile, la bande de fréquence pour mettre en place différents systèmes cellulaires se situe généralement dans la plage de 800 MHz à 2,5 GHz, ce qui est une large plage de fréquences. Des antennes innovantes et à la pointe de la technologie qui peuvent couvrir une telle large bande de fréquences seraient très attractives pour tous les concepteurs de téléphones portables. Avec l'effort pour augmenter la largeur de bande des antennes, le Professeur Carlos travaille sur quelques modèles différents d'antennes à onde fuyante et essaie également d'augmenter la largeur de bande des antennes. Il examine également les propriétés dispersives des antennes. Toutes les explications détaillées et discussions sur le terme "dispersion" peuvent être trouvées dans la littérature sur les théories des antennes ou de la propagation, mais en termes simples, le terme "dispersion" dans les antennes peut être expliqué comme suit : La vitesse de propagation des ondes dans l'antenne dépend de la fréquence angulaire, donc la constante de phase est une fonction de la fréquence angulaire. Cela signifie que les différentes composantes de fréquence du signal se déplaceront à des vitesses différentes le long de l'antenne à onde fuyante car les vitesses de phase sont différentes. La plupart des antennes à onde fuyante étudiées sont de type onde voyageuse. Dans les antennes à onde voyageuse, le faisceau scanne à mesure que la constante de phase varie avec la distance le long de l'antenne.

À différentes distances, le faisceau atteint des angles différents. De telles caractéristiques font que les antennes à onde fuyante sont adaptées aux applications de balayage continu ou de radar, et ainsi de suite. Cela signifie également que la fréquence de la puissance rayonnée sera une fonction de la distance de l'alimentation dans la direction de la propagation des ondes.

En général, une antenne à onde fuyante produira un diagramme de rayonnement avec un maximum dans la direction de la puissance maximale. Le balayage de fréquence signifie que l'angle de rayonnement maximal peut être varié et peut être contrôlé par la puissance d'alimentation ou par le suivi de fréquence de la sortie de puissance d'alimentation, ce qui est censé être cohérent avec la littérature sur les antennes. Ainsi, le Professeur Carlos estime que de telles antennes ont la capacité de produire un effet de balayage de fréquence.

3.4.2 Conception à faible profil :

Les antennes à onde fuyante possèdent une conception à faible profil, ce qui leur permet d'être facilement intégrées dans divers systèmes et structures, et offrent une gamme d'avantages pour différentes applications. Leurs conceptions peuvent être classées en deux principaux types, à savoir l'antenne à onde fuyante avec mise à la terre et l'antenne à onde fuyante sans mise à la terre.

- Antenne à onde fuyante avec mise à la terre : Comme son nom l'indique, l'antenne à onde fuyante avec mise à la terre a l'un de ses conducteurs connectés à la terre. Le mécanisme de rayonnement de l'antenne à onde fuyante avec mise à la terre est associé à l'onde de surface qui est générée entre les deux conducteurs, qui sont généralement l'élément rayonnant et le plan de masse. Ces ondes de surface, avec une constante de phase appropriée, peuvent entraîner la formation d'une onde voyageuse le long de la structure guidée, et par conséquent, l'énergie est rayonnée dans l'espace. La plupart des antennes à onde fuyante en micro-ruban qui ont une caractéristique de faible profil et de large bande passante peuvent généralement être catégorisées dans le type d'antenne à onde fuyante avec mise à la terre.

- Antenne à onde fuyante sans mise à la terre : Contrairement à son homologue avec mise à la terre, le mécanisme de rayonnement de l'antenne à onde fuyante sans mise à la terre est lié à l'excitation des modes de propagation de l'espace, souvent guidés par le diélectrique rempli dans l'espace libre entre les conducteurs. La distribution de puissance de

rayonnement d'une antenne à onde fuyante sans mise à la terre varie le long de la direction de propagation de l'onde, ce qui forme efficacement un faisceau de balayage qui intercepte un certain angle par rapport à la direction de l'onde. De plus, les performances seraient également affectées par la sélection du constant diélectrique, de la largeur de l'espace libre et de la constante de phase de l'antenne. Ces caractéristiques et considérations de conception de l'antenne à onde fuyante sans mise à la terre fournissent des connaissances essentielles aux nouveaux venus dans le domaine de la recherche sur les antennes intelligentes lorsqu'ils décident d'utiliser ce type d'antennes à onde fuyante.

3.4.3 Réduction des interférences :

Les antennes à onde fuyante possèdent également la capacité de balayer continuellement le faisceau, offrant ainsi une flexibilité dans la direction du diagramme de rayonnement. De plus, elles ont l'avantage d'une réduction des interférences, permettant une meilleure qualité de signal dans des environnements électromagnétiques encombrés. Cela est dû à une propriété unique des antennes à onde fuyante, où le lobe principal du diagramme de rayonnement reste aligné dans la direction de l'antenne, tandis que le lobe arrière est autorisé à se propager. Cela aide à réduire toute interférence qui peut être reçue de la même direction vers laquelle l'antenne est orientée, ce qui se traduit par une amélioration de la qualité du signal. En outre, cette propriété permet également aux antennes à onde fuyante d'être utilisées pour des traitements sensibles à l'angle tels que le traitement hyperthermique des tumeurs dans l'industrie médicale.

Ce traitement nécessite un contrôle précis du rayonnement pour se concentrer uniquement sur des zones spécifiques en fonction de l'angle du patient et des positions relatives entre le patient et l'antenne. Avec la capacité de balayage continu et la fonction de réduction des interférences, l'antenne à onde fuyante peut s'adapter efficacement au changement de zone de rayonnement et réduire les effets secondaires sur d'autres parties saines du corps. Et bien sûr, l'amélioration de la qualité du signal permet un traitement plus précis et efficace. Il existe une variété de domaines qui ont bénéficié de la propriété de réduction des interférences des antennes à onde fuyante. Par exemple, dans le domaine des systèmes d'assistance avancée à la conduite dans l'industrie automobile, une qualité de signal fiable est essentielle pour une expérience de conduite sûre. En utilisant la capacité de balayage continu avec la fonction de réduction des interférences, les antennes à onde fuyante peuvent fournir une détection stable et précise des

obstacles autour du véhicule en changeant rapidement la direction du faisceau. Cela aide le système à identifier les emplacements exacts et les risques potentiels de différents obstacles, permettant une protection avancée et efficace des passagers. Cet avantage de réduction des interférences a non seulement amélioré les performances du système lui-même, mais a également maximisé la sécurité de l'utilisation de ce type de technologie. Cela a justifié la popularité croissante des antennes à onde fuyante dans ces applications. Et sans aucun doute, la possibilité infinie des antennes à onde fuyante en fait l'un des types d'antennes les plus prometteurs pour l'avenir.

- Les antennes à onde fuyante constituent donc une technologie émergente avec un certain nombre de propriétés et de capacités uniques qui se prêtent à une grande variété d'applications actuelles et futures. Cette section a fourni une introduction au fonctionnement des antennes à onde fuyante et une discussion des principales caractéristiques et avantages de ce type d'antennes, notamment l'opération sur une large bande passante, la conception à faible profil, la capacité de balayage continu et la réduction des interférences.

3.5Antenne à onde de fuites basées sur les métamatériaux

Une onde fuyante est une onde progressive qui perd progressivement de la puissance en se propageant le long d'une structure de guidage d'onde. Une antenne à onde fuyante (LWA) prend en charge des ondes fuyantes où le phénomène de fuite est généralement associé à une directivité élevée [3-7].

Les LWA sont différentes des antennes résonantes, car elles sont basées sur des ondes progressives plutôt que sur un mécanisme d'onde résonante. Par conséquent, leur taille n'est pas liée à la fréquence de fonctionnement, mais à la directivité [3-8]. Un schéma d'une LWA est représenté dans la Figure 3.1.

Si l'onde se propage plus rapidement que la vitesse de la lumière ($\beta<k_0$, k_y est réel et le rayonnement de fuite se produit. Cette onde est appelée onde rapide. Dans ce cas, β détermine l'angle θ_{mb}de rayonnement du faisceau principal et comme illustré dans la Figure 3.1, suit la relation simple entre l'angle et la fréquence [3-7].

$$\theta_{mb} = sin^{-1}(\beta / k_0) \quad (3.1) \qquad (3.\ 1)$$

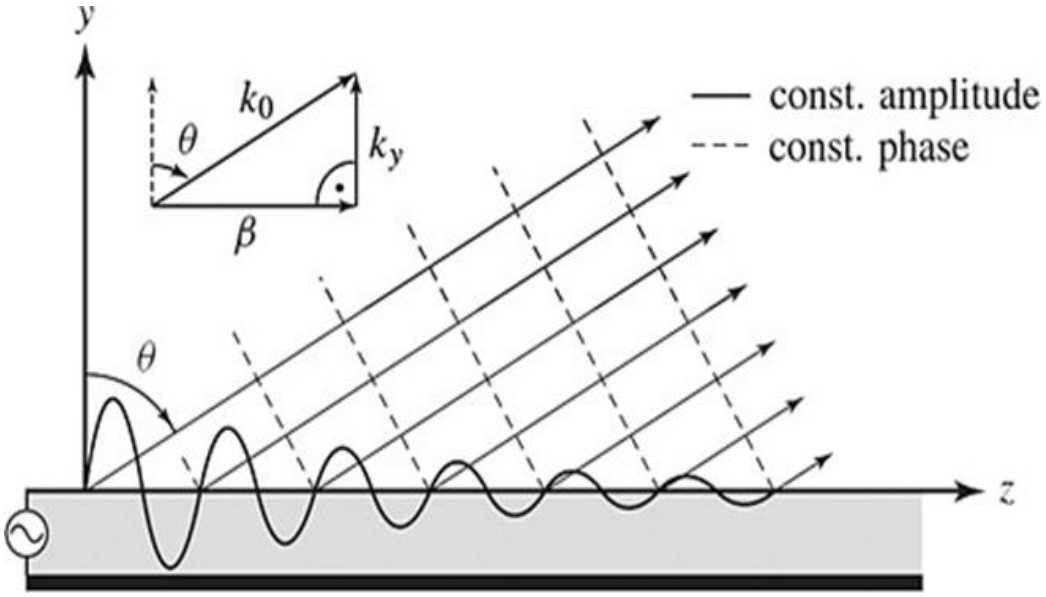


Figure 3.1 : Un schéma général d'une antenne à onde fuyante. Les lignes pleines et en pointillés représentent respectivement les plans d'amplitude constante et de phase constante [3-9].

Les valeurs $\beta < 0$, $\beta = 0$ et $\beta > 0$ correspondent respectivement aux angles arrière, axial et avant. Si le guide d'ondes est dispersif (β est une fonction non linéaire de ω), l'angle principal du faisceau est modifié en fonction de la fréquence, $\theta_{MB} = \theta_{MB}(\omega)$. Ce phénomène est appelé balayage en fréquence. L'équation (3.1) révèle également que le rayonnement dans n'importe quel angle, de la rétrodiffusion (θ_{MB} = -90°) à la directivité frontale (θ_{MB} = +90°), peut potentiellement être réalisé si β varie de $-k_0$ à $+k_0$.

Les structures à polarisation droite (RH) présentent des limitations dans le balayage spatial. Dans les LWA RH non périodiques, $\beta > 0$ à toutes les fréquences et donc, seuls des angles avant peuvent être obtenus. Dans les LWA RH périodiques, il existe un nombre infini d'harmoniques spatiales β_n, dont certaines sont des ondes rapides. Les harmoniques peuvent prendre en charge à la fois des ondes arrière ($\beta_n < 0$) et des ondes avant ($\beta_n > 0$). Cependant, la présence systématique d'un intervalle à $\beta = 0$ empêche le rayonnement axial. Une antenne à onde fuyante à main gauche (LH) ou MTM ne rencontre pas les contraintes mentionnées ci-dessus et prend en charge un balayage de fréquence continu de l'arrière vers l'avant. De plus, puisque son

mode fondamental est une onde fuyante, aucun mode de guidage d'ordre inférieur ne doit être supprimé et donc aucune structure d'alimentation complexe n'est nécessaire [3-10].

Les structures purement LH n'existent pas dans la nature car il existe également des effets parasites RH. De telles structures sont connues sous le nom de milieux composites droite/gauche (CRLH), dont le modèle de ligne de transmission (LT) typique est représenté dans la Figure 3.2(a). Après des manipulations simples, la constante de propagation γ d'une structure CRLH peut être obtenue comme :

$$\gamma = 1(\alpha + j\beta) = \pm \mathrm{j}\sqrt{\left(\omega L_R - \frac{1}{\omega\, C_L}\right)\left(\omega C_R - \frac{1}{\omega L_L}\right)} \qquad (3.\ 2)$$

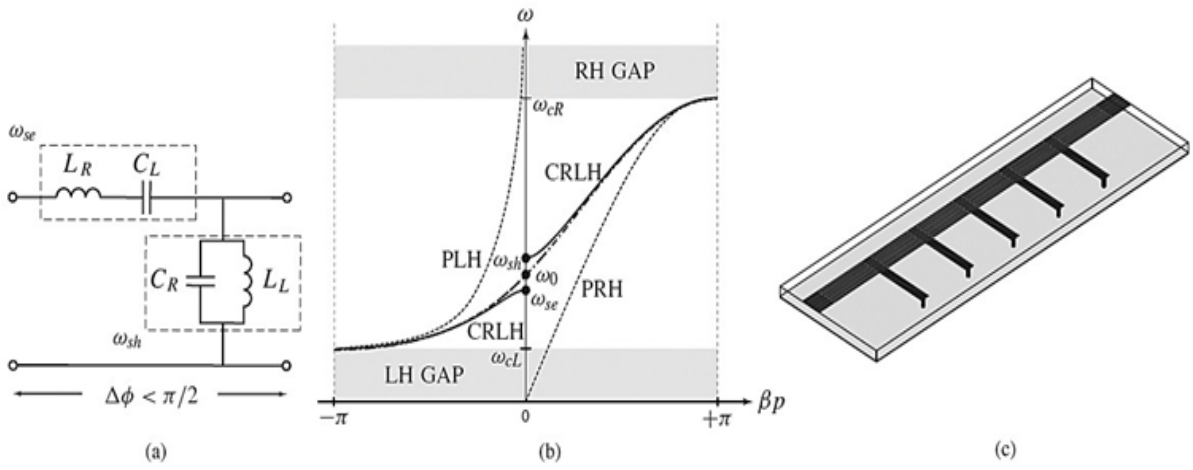


Figure 3.2: Cellule unitaire CRLH, (a) modèle de LT typique.

Les paires (L_R,C_R) et (L_L,C_L) représentent les natures RH et LH du milieu, respectivement, (b) diagramme de dispersion pour le cas déséquilibré, et (c) mise en œuvre de la cellule unitaire CRLH avec un condensateur interdigité et une tige shunt [3-10].

La Figure 3.2(b) montre le diagramme de dispersion d'une cellule unitaire CRLH. Dans les régions LH et RH, la constante de phase β est négative et positive, respectivement. Les fréquences ωse et ωsh sont les fréquences de résonance des branches traversantes et shunt, respectivement. Dans une LT CRLH équilibrée, $\omega_{se} = \omega_{sh}$. Dans ce cas, la fréquence de transition ω0 est égale à l'une des fréquences de résonance et il existe un rayonnement axial s'il y a une onde de fuite. Dans une LT CRLH déséquilibrée, ωse ≠ ωsh, et il existe une bande d'arrêt dans cette plage de fréquences. Dans le diagramme de dispersion, la région de rayonnement de

fuite ($\beta<k_0$), correspond à la région intérieure d'un cône (cône de rayonnement). Pour concevoir une LWA, la fréquence de fonctionnement est choisie pour se situer dans le cône de rayonnement. Les fréquencesω_{C_L} et ω_{C_R}sont les fréquences de coupure pour les régions LH et RH, respectivement. Notez que dans les bandes d'arrêt, β = 0 et d'après l'équation (3.2), γ = α.

En raison de leur nature non résonante, les structures CRLH peuvent être conçues pour présenter simultanément une faible perte et une large bande passante. Une faible perte est obtenue par une conception équilibrée ($L_R C_L = L_L C_R$) de la structure et une bonne adaptation aux ports d'excitation, tandis qu'une large bande passante est une conséquence directe de la nature de LT de la structure. Un autre avantage des MTM CRLH est qu'ils peuvent être conçus dans des configurations planes, compatibles avec les circuits intégrés hyperfréquences modernes [3-11]. Une mise en œuvre pratique plane de la cellule unitaire CRLH est illustrée dans la Figure 3.2(c). Elle se compose d'un condensateur interdigité en série comme condensateur LH et d'une courte tige shunt en court-circuit comme inductance LH shunt. De toute évidence, il y a toujours des capacités et des inductances RH parasites dues au couplage entre la piste métallique et le plan de masse. Cela forme une cellule unitaire CRLH.

3.5.1 Antenne à Onde Fuyante à Commande Électronique du Balayage du Faisceau

Le contrôle électronique de l'angle de rayonnement peut être expliqué en termes de l'équation (3.2). À partir du circuit équivalent de la Figure 3.2, le diagramme de dispersion est obtenu. Ainsi, à partir de l'équation (3.1), les capacités et les inductances déterminent l'angle de balayage. Si l'on peut contrôler les capacités par la tension, l'angle de rayonnement est contrôlé en conséquence par la tension de polarisation. Ce fait est illustré dans la Figure 3.3.

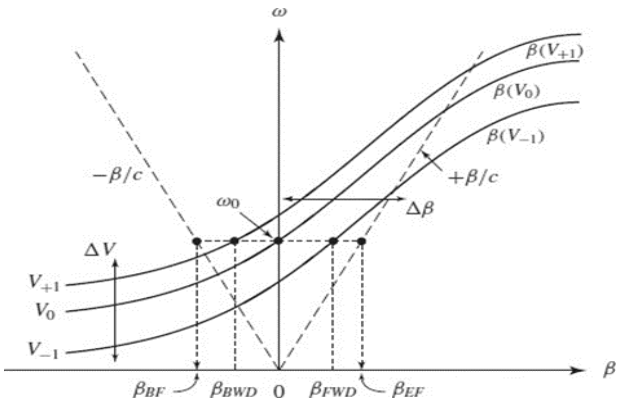


Figure 3.3: Principe du balayage électronique du faisceau. Les courbes de dispersion sont décalées verticalement lorsque les tensions de polarisation sont modifiées [3-12].

À une fréquence fixe, les diodes varactor peuvent contrôler le fonctionnement de l'antenne par un réglage approprié de la tension de polarisation. La capacité de ces diodes varie en ajustant la tension de polarisation inverse et donc, β se comporte comme une fonction de la polarisation inverse. À partir de la Figure 3.3, en ajustant la tension de polarisation à une fréquence fixe, un décalage vertical se produit dans le diagramme de dispersion.

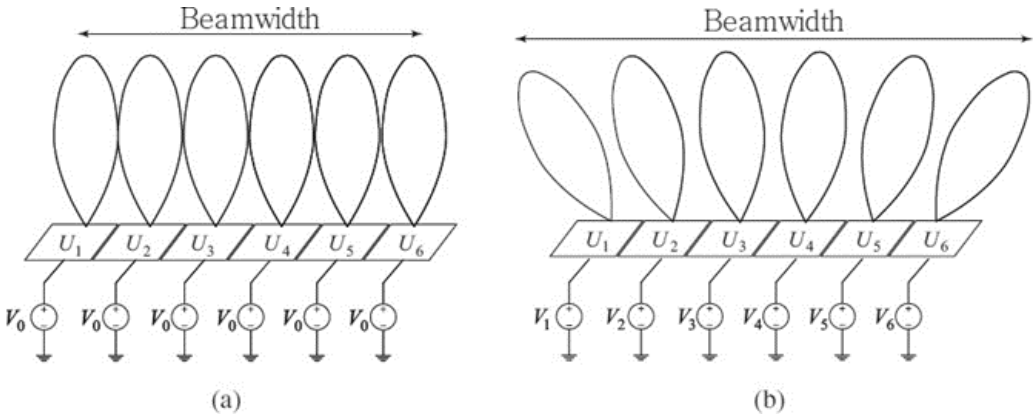


Figure 3.4: Principe de réglage électronique de la largeur du faisceau dans des conditions de polarisation non uniforme, (a) Largeur de faisceau étroite par introduction d'une polarisation uniforme (V1 = V2 = … = V0), et (b) largeur de faisceau large par introduction d'une polarisation non uniforme (V1 ≠ V2 ≠ … ≠ V0) [3-12].

Une distribution uniforme de polarisation le long de la ligne de transmission résulte en un β constant et donc le motif de rayonnement de la LWA à une directivité maximale. En pratique, la modification de β est difficile.

Via une polarisation non uniforme, le facteur β des cellules unitaires peut être ajusté en utilisant des diodes varactor. Le concept est décrit dans la Figure 3.4. Lorsque la distribution de polarisation est uniforme (Figure 3.4(a)), chaque cellule unitaire rayonne vers le même angle et la structure fonctionne comme une LWA commune contrôlant l'angle de rayonnement. Dans le cas d'une LT périodique non uniforme, c'est-à-dire la Figure 3.4(b), il existe différents angles de rayonnement correspondant à chaque cellule et la largeur de faisceau de la LWA peut être contrôlée.

3.5.2 LWA sur le guide d'onde intégré au substrat

Les applications sans fil représentent un marché en pleine expansion à l'échelle mondiale, incitant les chercheurs à développer de nouvelles technologies offrant des performances

optimales. Le Guide d'Ondes Intégré au Substrat (GIS) émerge comme une plateforme d'intégration complète, capable de réaliser tous les composants passifs et d'assembler les composants actifs sur un même support. Ce concept a conduit à une nouvelle génération de circuits, dispositifs et systèmes intégrés, couvrant des fréquences allant des micro-ondes aux ondes millimétriques.

Récemment, un commutateur RF innovant utilisant le GIS et des diodes PIN (Positive Intrinsic Negative) a été proposé. Ce commutateur réduit considérablement les coûts de fabrication, présente une faible perte d'insertion et peut être utilisé dans les bandes millimétriques et au-delà. En utilisant un guide d'ondes radial, un nouveau dispositif d'antenne intelligente a été développé pour les systèmes de communication de cinquième génération (5G) dans les bandes millimétriques.

Ces dispositifs (commutateur et antenne intelligente) permettent de contrôler la direction de propagation de l'onde électromagnétique ou la direction du rayonnement électromagnétique. Les éléments accordables, tels que les diodes, sont commutés en groupe et de manière séquentielle. La commutation n'a donc pas d'influence directe sur les propriétés de l'onde électromagnétique transmise. En optimisant ces technologies, il est possible de développer des dispositifs offrant des performances améliorées, des coûts réduits, une faible consommation d'énergie et des dimensions compactes.

Dans cette perspective, de nouveaux circuits seront analysés en utilisant des GIS pour réaliser des dispositifs avancés tels que des circulateurs sans aimant, des mélangeurs sans harmonique et de nouvelles antennes intelligentes. L'objectif est de développer des schémas d'analyse et de conception innovants pour les systèmes proposés, répondant aux exigences des technologies modernes telles que les émetteurs/récepteurs pour les communications sans fil, les systèmes radar et les capteurs RF. Ces développements visent à offrir de meilleures performances globales dans des applications variées, allant des communications sans fil aux systèmes de détection de haute précision.

Chapitre 4 Conception d’une antenne LWA

4.1Introduction

Dans ce chapitre, nous aborderons la conception d'une antenne utilisant la technologie des ondes fuyantes, spécialement adaptée pour les applications de communication sans fil à haute fréquence, telles que la 5G. Nous commencerons par comprendre les principes fondamentaux sur lesquels repose cette technologie, en nous appuyant sur des preuves théoriques et des études antérieures concernant les guides d'ondes intégrés au substrat (SIW) et les lignes de transmission composites droitières/gauches (CRLH TL).

Notre conception sera centrée sur l'utilisation d'un guide d'ondes intégré au substrat (SIW) avec une transition de type micro-ruban. Nous travaillerons sur une antenne à onde fuyante composée de cellules affichant un comportement composite droitier/gaucher (CRLH), opérant dans une gamme de fréquences allant de 26 à 30 GHz. Le système sera configuré de manière à pouvoir diriger le faisceau efficacement, optimisant ainsi les performances pour les applications ciblées.

4.2Conception d'une Antenne à Onde de Fuite

Après avoir effectué une analyse approfondie des recherches récentes sur les guides d'ondes intégrés dans le substrat (SIW), les lignes de transmission composites main droite/main gauche (CRLH TL) et les antennes à onde de fuite (LWA), et après avoir étudié les bases théoriques nécessaires, nous passons à la description du système d'antenne développé. Comme discuté précédemment, le concept repose sur le SIW avec une transition micro-ruban, et le type d'antenne est une antenne à onde de fuite fonctionnant dans la gamme de fréquences de 26 à 30 GHz, composée d'une série de cellules présentant un comportement CRLH. Toutes les simulations ont été réalisées à l'aide du logiciel de simulation CST STUDIO SUITE.

Le LWA n'a pas de fréquence de fonctionnement prédéfinie, comme nous l'avons observé, puisque l'angle principal de rayonnement varie avec la fréquence. Cependant, nous avons réglé l'antenne pour rayonner à un angle large à 28 GHz. Le système a été conçu pour obtenir une orientation du faisceau dans le plan vertical, en partant de quelques concepts fondamentaux et courants concernant les exigences des antennes 5G existantes, avec certaines contraintes liées au gain de crête, à la bande passante, à la plage de balayage et à la largeur du faisceau.

Ces indicateurs sont les suivants :

Plage de fréquence de fonctionnement : 24,25 - 27,5 GHz ou 27,5 - 28,35 GHz ;

Gain obtenu : environ 15 dBi ;

Bande passante instantanée : 0,8 - 1 GHz ;

Largeur du faisceau à mi-puissance (HPBW) : environ 5 degrés ;

Plage d'angle de balayage vertical : au moins 30 - 40 degrés.

L'antenne conçue est adaptée pour les applications de petites cellules 5G extérieures, où la portée de communication est limitée à des centaines de mètres et nécessite la capacité de former et diriger le faisceau, un faisceau hautement directionnel, et la possibilité de MU-MIMO. Ce sont les capacités qui peuvent être réalisées à l'aide du LWA développé, étant donné que l'étude menée est la première étape d'un projet qui doit être amélioré pour atteindre un système pleinement fonctionnel.

En outre, un LWA unique peut être utilisé avec d'autres antennes similaires dans une configuration en réseau : cette configuration peut améliorer le gain de crête et permettre une orientation du faisceau dans les plans horizontal et vertical, le premier grâce au contrôle numérique du changement de phase appliqué aux LWAs individuels, et le second grâce au contrôle analogique. De cette manière, le système peut obtenir un faisceau plus étroit, orientable dans une large plage d'angles, capable de desservir différentes zones et plusieurs utilisateurs dans une même zone en même temps, avec des temps de reconfiguration de l'ordre de centaines de nano secondes.Comme illustré dans la figure 4.1, une orientation du faisceau à double plan est nécessaire pour :

- Fournir une connexion à haut débit aux utilisateurs répartis à différents niveaux de hauteur, comme les différents étages d'un bâtiment.
- Desservir les utilisateurs répartis dans une zone de niveau constant dans différentes directions horizontales.

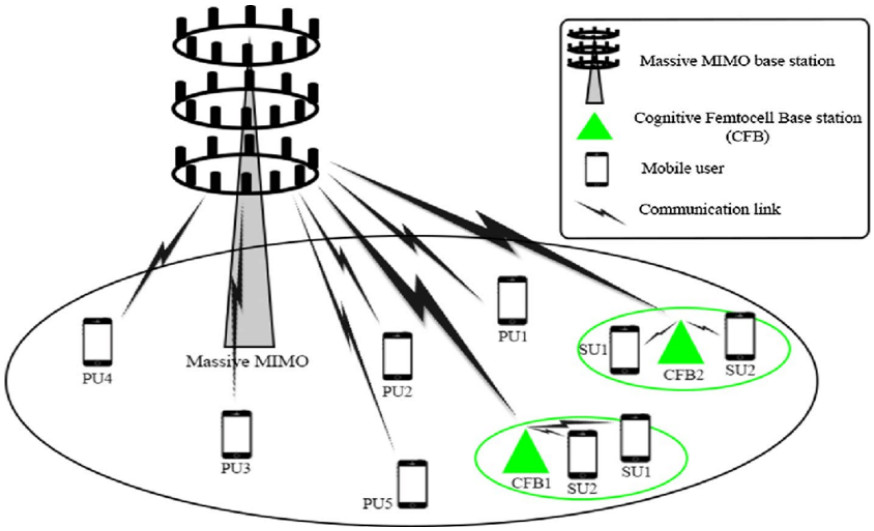


Figure 4.1: Small cell use case with dual plane beam steering characteristic.

L'antenne fonctionnelle a été conçue, simulée et modélisée principalement en utilisant le logiciel de simulation CST STUDIO SUITE, en se basant sur des études similaires mentionnées précédemment. Le concept reste limité aux résultats simulés : aucun prototype n'a été réalisé en raison de problèmes mécaniques liés à la réalisation de ces caractéristiques miniaturisées, et à la disponibilité en temps voulu des composants nécessaires. Cependant, bien que les simulations ne soient pas aussi fiables que les tests sur un modèle concret, elles nous donnent une idée des performances possibles du système d'antenne développé.

Le travail accompli doit être considéré comme une étude de faisabilité, où le système conçu est analysé en termes de points forts et de faiblesses et de compromis, du point de vue d'une entreprise souhaitant créer un produit évolutif et commercialisable.

Dans le chapitre suivant, la conception de deux versions de l'antenne sera présentée, en commençant par le guide d'ondes utilisé comme structure de base, en définissant ses dimensions et les performances de la transition micro-ruban. Ensuite, les étapes de conception et d'analyse seront rapportées, expliquant comment les LWAs ont été développés.

4.3Conception du Guide d'Ondes Intégré au Substrat

La première étape de la conception consiste à développer un guide d'ondes intégré au substrat (SIW) qui sert de structure de base pour notre antenne. Le SIW est choisi en raison de ses avantages en termes de faible perte de conduction et d'onde évanescente, ainsi que de sa compatibilité avec les techniques de fabrication de circuits imprimés.

La première étape de notre travail est la conception et le réglage du SIW et de la transition micro ruban, afin de les rendre adaptés à une application LWA. Comme nous l'avons vu à la section 2.2.7, il existe quelques lignes directrices (2.3), (2.5), (2.6), pour concevoir un SIW avec une fréquence de coupure indicative (f_{cut}), donc optimisé dans une certaine bande de fréquence.

Tout d'abord, il est nécessaire de choisir le matériau du substrat. Puisque le diélectrique est la principale source de pertes de puissance dans un SIW en ondes millimétriques, le matériau choisi doit garantir une bonne propagation des ondes électromagnétiques, en minimisant les fuites. Nous avons donc besoin d'un matériau à faible constante diélectrique (ε_r) et à faible tangente de perte tanδ, puisque les pertes sont directement proportionnelles à cette quantité.

Ces exigences étant fixées, le RT/duroïde 5880 de Rogers à base de PTFE (poly tétra fluoro éthylène) a été sélectionné, compte tenu également de son choix répandu dans de nombreux articles et prototypes d'antennes à ondes millimétriques pour l'application 5G.

Ce matériau présente les caractéristiques suivantes :

- Constante diélectrique relative $\varepsilon_r = 2{,}2$, tangente de perte $\tan\delta = 0{,}0009$;

- Épaisseur standard du substrat $H_{sub} = 0{,}787$ mm ;

- Épaisseur standard de la gaine de cuivre $H_{cop} = 18$ µm.

Après choisir le diélectrique, H_{sub}et ε_r étant fixer et nous pouvons fixer montrer les démentions du SIW. Nous fixons une fréquence de coupure initiale$f_{cut} = 20$ GHz et une fréquence de travail $f = 28$ GHz. Comme nous l'avons vu au chapitre 2, les paramètres nécessaires pour le guide d'ondes et la transition micro ruban sont les suivants : largeur du SIW W_{SIW} ; diamètre de l'interface d ; pas de l'interface p ; largeur et longueur de la section conique W_{tap} et L_{tap} ; largeur de la ligne micro ruban W_0 (figure 2.3), les valeurs sont situé dans le tableau. 4.1.

Ainsi, ces paramètres permettent de garantir une transition efficace et de minimiser les pertes par réflexion et par rayonnement. La conception de cette structure de base est cruciale pour assurer des performances optimales de l'antenne LWA dans la bande de fréquence cible.

Tableau 4.1 : Dimensions du SIW et de la transition micro ruban (les mesures sont en mm).

W_{SIW}	p	d	H_{sub}	W_0	L_{tap}	W_{tap}
7	1.6	0.8	0.787	2.36	5	2.8

L'étape suivante est la conception de la transition micro-ruban (Section 2.2.9), afin de permettre la connexion avec une ligne micro-ruban d'alimentation standard.

En fixant l'impédance caractéristique à $Z_0 = 50\ \Omega$ et en suivant les formules citées (2.9) et (2.10), nous obtenons une largeur de micro-ruban de $W_0 = 2{,}36\ mm$. Ensuite, en utilisant les indications (2.11) trouvées dans la littérature scientifique pertinente, nous définissons la largeur et la longueur de la section effilée : W_{tap} = 2,8 mm et L_{tap} = 5 mm. Grâce à des simulations en onde complète, les paramètres ont été ajustés pour minimiser les réflexions à l'interface entre le SIW et le micro-ruban, afin de réduire les pertes de puissance. Enfin, les dimensions de la transition SIW et micro-ruban sont reportées dans le tableau 4.1.

Les dimensions du SIW sont cruciales pour déterminer la fréquence de coupure et les performances globales de l'antenne. Les paramètres principaux incluent la largeur (w) du guide d'ondes, la distance (p) entre les via métalliques, et le diamètre (d) des via. Ces paramètres doivent être choisis de manière à garantir une propagation efficace de l'onde tout en minimisant les pertes. Les formules utilisées pour calculer ces dimensions sont basées sur les relations standards des guides d'ondes rectangulaires, adaptées pour les structures SIW.

La largeur effective (W_{eff}) du SIW peut être approximée par :

$$W_{eff} = W - 2(0.412H_{sub} + 0.236H_{sub}\left(\frac{p}{W}0.304H_{sub}\left(\frac{H_{sub}}{W}\right) + 0.17\frac{p^2}{W^2}\right) \qquad (4.\ 1)$$

Cette équation permet de calculer la largeur effective du SIW, qui est un paramètre crucial pour déterminer la fréquence de coupure et les performances globales de l'antenne. En ajustant les dimensions du SIW, il est possible d'optimiser ses performances pour répondre aux spécifications de conception de l'antenne à onde de fuite.

Après avoir calculé la largeur effective du guide d'ondes intégré au substrat (SIW) à l'aide de l'équation donnée précédemment, il est nécessaire de choisir des valeurs appropriées pour les autres paramètres du SIW, tels que la distance entre les vias métalliques (p) et le diamètre des vias (d). Ces paramètres doivent être sélectionnés en fonction des spécifications de conception de l'antenne, telles que la fréquence de fonctionnement et les performances requises.

Une fois que toutes les dimensions du SIW ont été déterminées, la structure du guide d'ondes peut être construite conformément à ces spécifications. Cela comprend la disposition des vias métalliques et la définition des couches de substrat nécessaires pour former le guide d'ondes.

La conception du SIW constitue la première étape cruciale dans le processus de développement de l'antenne à onde de fuite. Une fois que le guide d'ondes SIW est correctement conçu, il servira de base pour la construction de l'antenne.

Une transition efficace entre le guide d'ondes SIW et le micro-ruban est essentielle pour minimiser les pertes et assurer une transmission maximale du signal. Les dimensions de la transition doivent être soigneusement optimisées pour garantir une adaptation d'impédance correcte et réduire les réflexions. Des techniques telles que l'utilisation de lignes d'adaptation et de réseaux de correspondance peuvent être employées pour améliorer les performances de la transition.

Ces étapes permettent d'assurer que le SIW et la transition micro-ruban fonctionnent ensemble de manière optimale, offrant ainsi une base solide pour le développement ultérieur de l'antenne à onde de fuite.

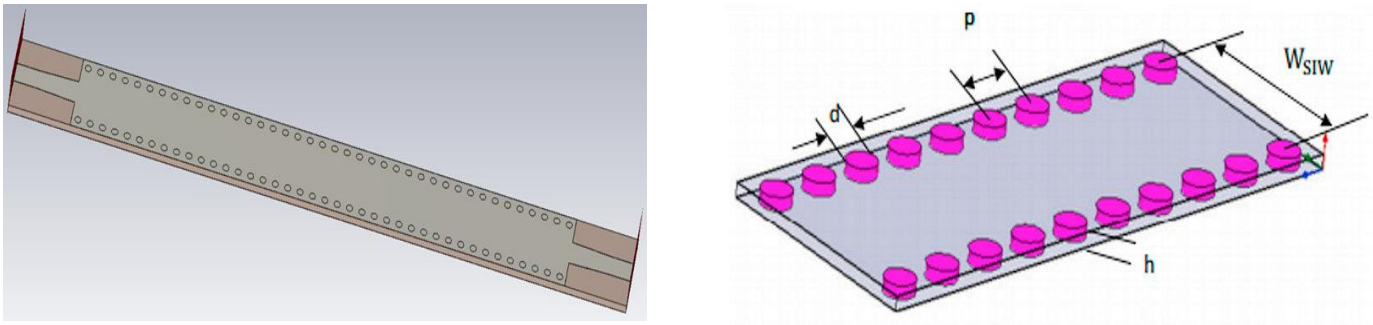


Figure 4.2 : Transition microruban vers SIW.

Cette figure illustre le passage de la ligne de transmission micro-ruban au guide d'ondes intégré au substrat (SIW)

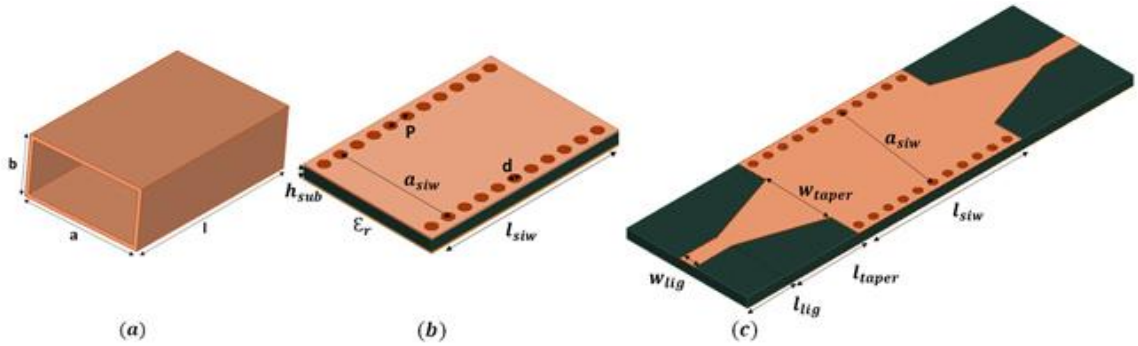


Figure 4.3 :Évolution du design de la ligne de transmission : de la microbande au guide d'ondes intégré au substrat (SIW).

- Image "a" représente une ligne microstrip.
- Image "b" représente le guide d'ondes intégré au substrat (SIW) entièrement formé, avec des vias métalliques le long de ses bords pour confiner les ondes électromagnétiques, maintenant une largeur effective optimisée pour les performances et la coupure de fréquence.
- Image "c" illustre la transition graduelle de la ligne en microbande vers le guide d'ondes intégré au substrat (SIW), avec une section conique assurant un raccordement d'impédance fluide et minimisant les réflexions de signal.

Dans cette étude, nous analysons les paramètres de dispersion S11 et S21 pour un dispositif micro-ondes fonctionnant dans la gamme de fréquences de 26 à 30 GHz. Le paramètre S11 représente le coefficient de réflexion, indiquant la quantité d'onde électromagnétique réfléchie par le dispositif, tandis que le paramètre S21 représente le coefficient de transmission, indiquant la quantité d'onde électromagnétique transmise à travers le dispositif. Les graphiques ci-dessous illustrent la variation de ces paramètres en fonction de la fréquence.

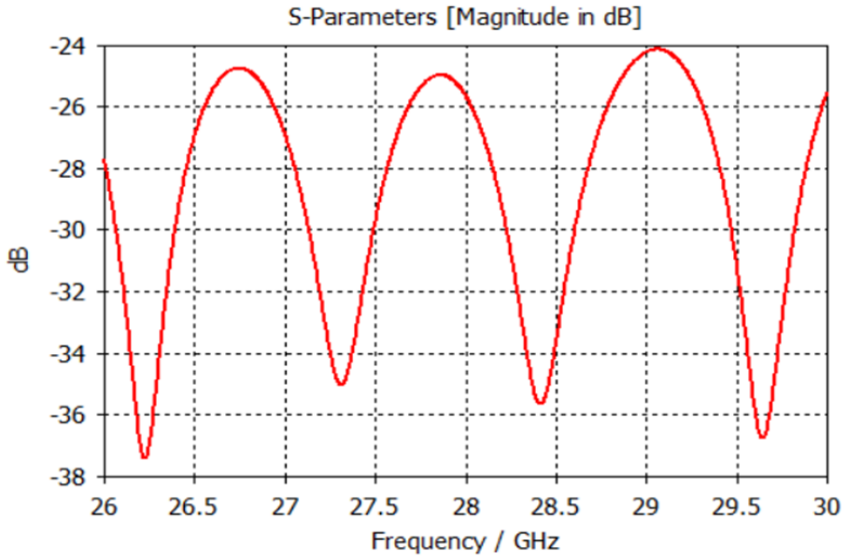


Figure 4.4: Simulation du coefficient de réflexion |S11| de SIW.

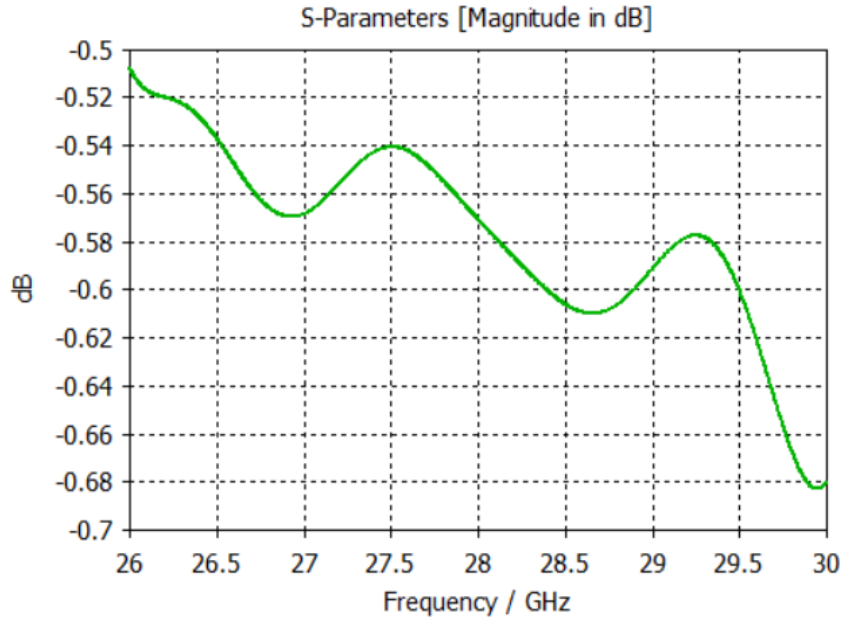


Figure 4.5: Simulation du coefficient de transmission |S21| de SIW.

Dans la première figure, nous observons un graphique du paramètre *S*11 qui illustre le coefficient de réflexion en fonction de la fréquence. On remarque qu'à une fréquence d'environ 27.5 GHz, le paramètre *S*111atteint son minimum, indiquant une très faible réflexion à cette fréquence. Cela signifie qu'il y a une bonne adaptation d'impédance à cette fréquence spécifique.

Un faible niveau de *S*11suggère que la majeure partie de l'énergie envoyée est reçue par la charge ou le dispositif connecté, avec très peu d'énergie réfléchie vers la source.

Dans la deuxième figure, nous voyons un graphique du paramètre $S21$qui montre le coefficient de transmission en fonction de la fréquence.

Le graphique montre que la transmission atteint sa valeur maximale à une fréquence d'environ 28.5 GHz, ce qui indique une très bonne transmission à cette fréquence. Cela signifie que la plupart de l'énergie transmise passe à travers le dispositif sans trop de perte.

Les paramètres $S11$et $S21$ influencent considérablement la performance d'une antenne à onde de fuite en SIW (Substrate Integrated Waveguide).

- S11 (Coefficient de réflexion) :

Le paramètre $S11$indique le degré d'adaptation de l'antenne avec le système auquel elle est connectée. Un $S11$ faible (généralement inférieur à -10 dB) signifie que l'antenne rayonne la majeure partie de l'énergie qui lui est transmise et que les réflexions sont minimales. Pour une antenne à onde de fuite en SIW, un $S11$ faible à une fréquence spécifique indique que l'antenne est très efficace à cette fréquence et qu'elle rayonne l'énergie de manière efficace.

- S21 (Coefficient de transmission) :

Le paramètre $S21$ indique le niveau de transmission du signal de l'entrée à la sortie à travers l'antenne. Dans le cas d'une antenne à onde de fuite en SIW, un $S21$ élevé signifie qu'il y a peu de perte de signal et que la majeure partie de l'énergie est transmise et rayonnée. Si le $S21$ est élevé à une certaine fréquence, cela signifie que l'antenne rayonne efficacement à cette fréquence.

Impact sur l'antenne à onde de fuite en SIW :

- Efficacité de Rayonnement :

Un $S11$ faible et un $S21$ élevé indiquent que l'antenne à onde de fuite en SIW est bien adaptée et efficace à certaines fréquences. Cela signifie qu'elle peut transmettre et rayonner l'énergie avec un minimum de pertes et de réflexions.

- Bande de Fréquence :

Les fréquences où $S11$est faible et $S21$ est élevé définissent les bandes de fréquence où l'antenne fonctionne le mieux. Cela permet de déterminer les plages de fréquences optimales pour l'utilisation de l'antenne.

- Performance Globale :

Une antenne à onde de fuite en SIW avec de bons paramètres *S*11 et *S*21 offre une meilleure performance globale, incluant un gain plus élevé, une meilleure directivité et une plus grande efficacité de rayonnement.

En résumé, les paramètres *S*11 et *S*21sont cruciaux pour évaluer et optimiser la performance des antennes à onde de fuite en SIW, garantissant une transmission efficace et une radiation optimale des ondes électromagnétiques.

Remarquez comment la transition transforme et guide progressivement le champ électromagnétique, en excitant le mode TE10.

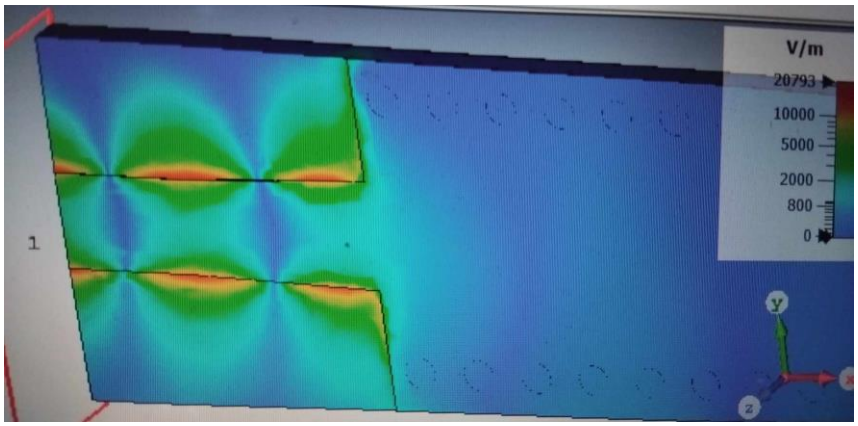


Fig. 4.6: Simulation du champ électrique à la fréquence f = 28 GHz.

La figure montre la magnitude du champ électrique simulé dans la région de transition du microstrip. On observe comment la transition transforme et guide progressivement le champ électromagnétique en excitant le mode TE10.

- Les zones rouges indiquent des intensités élevées du champ électrique, tandis que les zones bleues et vertes représentent des intensités plus faibles.

- Efficacité de la transition :

La transition efficace du microstrip au guide d'onde SIW, montrée par la distribution progressive du champ, indique que l'antenne peut convertir et transmettre l'énergie de manière efficace. Cela réduit les pertes par réflexion et améliore l'adaptation d'impédance.

- Adaptation d'impédance :

Une bonne adaptation d'impédance, visible par une faible réflexion dans la transition, signifie que l'antenne peut fonctionner efficacement à la fréquence de 28 GHz. Cela permet une meilleure transmission et rayonnement de l'énergie.

- Excitation du mode TE10 :

L'excitation du mode TE_{10} est cruciale pour les antennes à onde de fuite en SIW, car elle permet de guider et de rayonner les ondes de manière directionnelle. Le mode TE_{10}montre une distribution du champ qui facilite le rayonnement efficace le long de l'antenne.

- Performance globale de l'antenne:

La transition douce et bien guidée des champs électromagnétiques signifie que l'antenne peut offrir une performance supérieure en termes de gain et de directivité. Cela est essentiel pour des applications où la précision du faisceau et l'efficacité de rayonnement sont importantes.

En résumé, la figure montre une transition bien conçue et efficace du microstrip au guide d'onde SIW, ce qui est crucial pour assurer la haute performance de l'antenne à onde de fuite en termes de transmission, rayonnement et adaptation d'impédance.

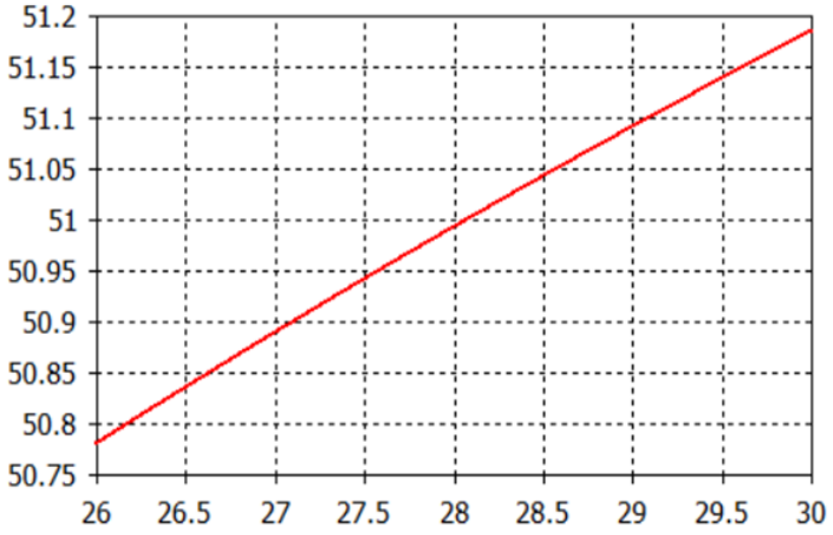


Figure 4.7: L'impédance caractéristique du SIW.

La figure présente un graphique montrant l'impédance caractéristique du guide d'onde intégré au substrat (SIW) en fonction de la fréquence, allant de 26 GHz à 30 GHz. On observe que l'impédance commence à environ 50.75 ohms à 26 GHz et augmente progressivement jusqu'à environ 51.2 ohms à 30 GHz.

Le graphique montre une augmentation presque linéaire de l'impédance caractéristique avec l'augmentation de la fréquence.

Cette variation est normale pour les structures guidantes comme le SIW, car les propriétés électromagnétiques du guide d'onde changent avec la fréquence.

- Adaptation aux différentes fréquences :

L'augmentation de l'impédance caractéristique avec la fréquence peut affecter l'adaptation de l'antenne avec le système connecté. Si l'impédance caractéristique diffère significativement de l'impédance du système, cela peut entraîner des réflexions et des pertes d'énergie.

- Efficacité de performance :

Pour garantir une performance efficace de l'antenne sur toute la bande de fréquences, l'antenne doit être conçue pour gérer les variations d'impédance. Cela peut nécessiter des conceptions spécifiques pour minimiser l'impact de ces variations, telles que l'utilisation de composants d'adaptation d'impédance ou de techniques d'adaptation d'impédance dynamique.

- Bande de fréquences opérationnelle :

Comprendre comment l'impédance caractéristique varie aide à déterminer la bande de fréquences dans laquelle l'antenne fonctionne le mieux. L'antenne peut être plus efficace dans une plage de fréquences spécifique où l'impédance caractéristique est bien adaptée au système.

La variation de l'impédance caractéristique avec la fréquence a un impact direct sur la performance de l'antenne à onde de fuite en SIW.

Pour garantir une performance optimale, il est essentiel de concevoir l'antenne de manière à gérer ces variations et à fournir une bonne adaptation avec le système connecté sur toute la bande de fréquences utilisée.

4.4Conception de l'Antenne à Onde de Fuite (cellule unitaire)

Après avoir établi le guide d'ondes SIW, la conception de l'antenne à onde de fuite (LWA) peut commencer. La structure de base de l'antenne est constituée d'une série de cellules CRLH, qui sont conçues pour présenter des propriétés électromagnétiques spécifiques, telles que des résonances de cavité et des modes d'onde de fuite. Ces cellules sont disposées le long du guide d'ondes SIW, permettant à l'antenne de rayonner efficacement dans la bande de fréquences désirée.

4.4.1 Sélection des Paramètres de la Cellule CRLH

Après avoir établi la structure de base du guide d'ondes SIW, nous passons à la conception des cellules CRLH qui constituent les éléments actifs de l'antenne à onde de fuite. Les cellules CRLH sont des composants clés qui confèrent à l'antenne ses caractéristiques de rayonnement.

La conception des cellules CRLH implique la définition des paramètres tels que les dimensions physiques, les propriétés électriques et la configuration des composants. Ces paramètres sont choisis en fonction des spécifications de l'antenne, telles que la gamme de fréquences de fonctionnement, le gain, la bande passante et la plage de balayage du faisceau.

Une fois les cellules CRLH conçues, elles sont intégrées dans la structure du guide d'ondes SIW, en tenant compte des exigences de placement et de couplage pour assurer un fonctionnement optimal de l'antenne.

L'analyse des antennes développées a été effectuée selon les étapes suivantes :

4.4.1.1 Conception de la cellule unitaire :

Détermination et test de la géométrie des fentes, leur position et leurs dimensions. Ajustement de la taille de la cellule et des fentes à travers des balayages paramétriques, en observant les effets sur les paramètres de diffusion simulés et la constante de phase $\beta(\omega)$.

Rappel : La cellule unitaire et l'ensemble de l'antenne LWA sont toutes deux traitées comme un réseau à 2 ports, analysées comme une structure de métamatériau, c'est-à-dire une ligne de transmission CRLH, avec un port d'entrée et un port de sortie.

4.4.1.2 Calcul de la constante de phase β(ω) :

Le paramètre important à considérer est la constante de phase β(ω), tracée dans le diagramme de dispersion.Cela peut être obtenu à partir des paramètres de diffusion S11 et S21, et sera examiné pour vérifier le comportement CRLH de la structure, l'équilibrage de la cellule, et pour distinguer entre les plages RH et LH.

La quantité β(ω) est calculée à partir des éléments de la matrice ABCD comme suit :

$$\cos[\beta(w)L_{cell}] = \frac{A+D}{2} \quad \Rightarrow \beta_L = \beta(w)L_{cell} = cos^{-1}\left(\frac{A+D}{2}\right) \tag{4. 2}$$

Où L_{cell}est la longueur de la cellule unitaire. Cette expression est dérivée de la théorie des filtres périodiques micro-ondes et est également utilisée dans de nombreux autres articles scientifiques sur ce sujet.

En substituant A et D par les paramètres S, en utilisant des formules de conversion bien connues, nous obtenons :

$$\beta_L = cos^{-1}\left(\frac{1 - S_{11}S_{22} + S_{12}S_{21}}{2S_{21}}\right) \tag{4. 3}$$

4.4.1.3 Simulation et diagramme de dispersion :

Dans les simulations réalisées, le diagramme de dispersion a été calculé grâce à cette expression, en partant des paramètres S simulés et en prenant la partie réelle de (4.3). Notez que (4.3) dépend de la longueur de la cellule uniquement comme un facteur d'échelle, qui influence fortement les résultats.

Réplique et assemblage :

Une fois la cellule unitaire étudiée et simulée, elle est répliquée N_{cell}fois, composant une ligne de transmission CRLH avec une périodicité L_{cell}.La structure, complétée par la transition microstrip et 2 ports d'entrée, fonctionne dans la gamme de fréquences rayonnées, constituant ainsi notre antenne LWA.Si la cellule unitaire est équilibrée et montre un comportement CRLH concret, on observe un fonctionnement cohérent de l'antenne LWA : cela signifie que l'angle du faisceau principal de rayonnement $\theta_{MB}(f)$ dépend de la fréquence et suivra la relation :

$$\theta_{MB}(f) = sin^{-1}\left[\frac{\beta(f)}{k_0}\right] = sin^{-1}\left[\frac{c\beta_L(f)}{2\pi f\, L_{cell}}\right] \tag{4. 4}$$

Avec cette relation, nous pouvons avoir une idée de la plage de balayage réalisable directement à partir de la cellule unitaire, sans avoir besoin de la simulation de toute la structure LWA. En effet, $\theta_{MB}(f)$peut être étudié à partir de la cellule élémentaire puis confirmé avec la simulation de l'antenne.

En résumé, la conception d'une antenne à onde de fuite implique une étude approfondie de la cellule unitaire, qui est la partie fondamentale. La constante de phase est ajustée en fonction de notre objectif, en modifiant la cellule et en observant les effets sur (β_L). Par la suite, l'ensemble de l'antenne LWA est composé et simulé pour obtenir le diagramme de rayonnement.

L'avantage de la phase initiale de conception, en termes d'efforts et de gestion du temps, est qu'il n'est pas nécessaire de simuler toute la structure à chaque fois, mais l'analyse peut se concentrer sur la cellule élémentaire, sachant que son comportement influencera l'antenne LWA complète.

4.5 Simulations et Évaluation des Performances

Une fois la conception de l'antenne achevée, des simulations électromagnétiques peut être réalisées pour évaluer ses performances. Ces simulations permettent d'analyser plusieurs paramètres clés, notamment :

- Gain : Le gain de l'antenne mesure la capacité de l'antenne à concentrer l'énergie rayonnée dans une direction donnée par rapport à une antenne de référence. Un gain élevé est souhaitable pour augmenter la portée de communication.
- Directivité : La directivité d'une antenne est la mesure de sa capacité à concentrer l'énergie rayonnée dans une direction particulière. Une directivité plus élevée signifie que l'énergie est concentrée dans une direction spécifique plutôt que d'être dispersée dans toutes les directions.
- Bande passante : La bande passante de l'antenne fait référence à la plage de fréquences sur laquelle elle peut fonctionner efficacement. Une bande passante plus large permet à l'antenne de couvrir un plus large éventail de fréquences, ce qui peut être important pour s'adapter à différents standards de communication ou à des environnements où les conditions de propagation varient.

- Diagramme de rayonnement : Le diagramme de rayonnement représente la manière dont l'énergie est distribuée dans l'espace autour de l'antenne. Il fournit des informations sur la direction et l'intensité du faisceau rayonné par l'antenne. Un diagramme de rayonnement étroit indique un faisceau plus directionnel, ce qui peut être souhaitable pour cibler spécifiquement des utilisateurs ou des zones de couverture.

Les simulations électromagnétiques permettent de visualiser ces paramètres et de les analyser dans différentes conditions de fonctionnement. Elles permettent également de détecter d'éventuels problèmes de conception et d'optimiser les performances de l'antenne avant la fabrication d'un prototype physique.

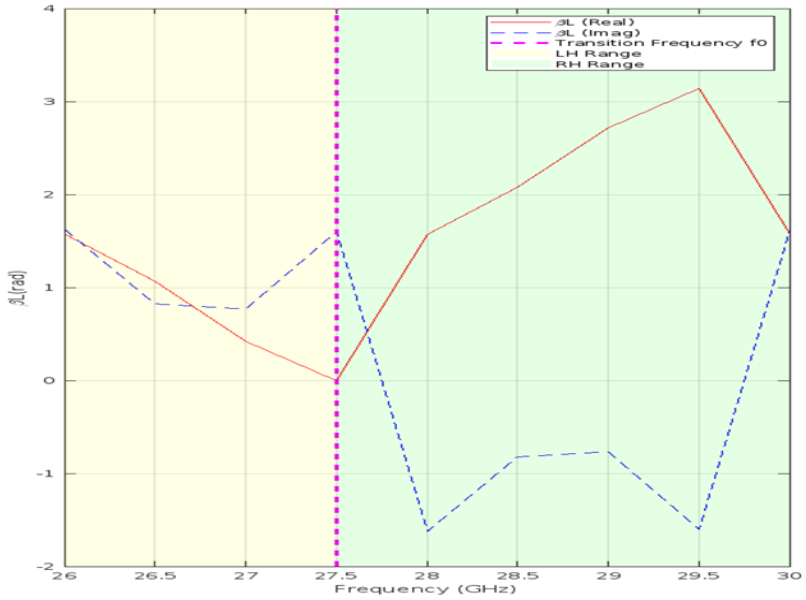


Figure 4.8: diagramme de dispersion, avec transition mise en évidence entre la fréquence f_0 et de la plage RH – LH.

La figure montre un diagramme de dispersion mettant en évidence la transition entre la fréquence (f_0) et les plages RH et LH. Voici les points principaux à noter, avec leur interprétation et leur impact sur l'antenne à onde de fuite (SIW) :

* Fréquence (f_0) : Cette fréquence représente un point de transition dans les propriétés des ondes.

* Plages RH et LH : RH (Right-Handed) et LH (Left-Handed) se réfèrent à la polarisation circulaire des ondes. Les ondes peuvent avoir une polarisation circulaire droite (RH) ou gauche (LH).

* Courbes du diagramme : Plusieurs courbes sont présentes, ce qui indique différents types d'ondes ou de modes dans le milieu considéré. Par exemple, les "KH WAVES" mentionnées peuvent se référer aux ondes de Kelvin-Helmholtz, une instabilité fluidique.

Transition entre la fréquence (f_0) et les plages RH et LH : Cette transition indique un changement dans les propriétés de propagation des ondes à cette fréquence spécifique. Cela peut être dû à un changement de polarisation ou aux propriétés du milieu de propagation.

Les antennes à onde de fuite dépendent de la propagation dirigée des ondes à travers des fentes dans un guide d'ondes. Si les propriétés des ondes changent à une fréquence donnée, cela peut affecter l'efficacité de propagation et de rayonnement de l'antenne. Par exemple, un changement de polarisation à la fréquence (f_0) pourrait altérer la capacité de l'antenne à rayonner efficacement les ondes dans la direction souhaitée. Si des ondes de Kelvin-Helmholtz sont présentes, elles pourraient introduire de l'instabilité dans le motif de rayonnement, nuisant à la performance globale de l'antenne. Les changements à la fréquence (f_0) et la polarisation entre les plages RH et LH peuvent influencer significativement les propriétés de propagation des ondes et l'utilisation de l'antenne à onde de fuite (SIW). Il est crucial de bien comprendre ces effets pour optimiser les performances de l'antenne dans des applications pratiques.

4.6Conception d'une antenne à balayage en fréquence (LWA)

Pour développer une antenne à onde de fuite (LWA), l'élément fondamental réside dans la conception de sa cellule unitaire. Ce composant singulier, par sa géométrie et ses dimensions, exerce une influence significative sur les fonctionnalités globales de l'antenne. Aux premières étapes de la conception de la LWA, l'inspiration a été puisée dans les antennes précédemment explorées dans la littérature, fournissant des informations sur la forme des fentes.

Après expérimentation avec différentes configurations, des fentes rectangulaires ont été choisies, alignées longitudinalement le long de la cellule de manière symétrique par rapport au centre de la cellule. La conception proposée de la LWA a subi des adaptations pour fonctionner dans la bande de fréquence souhaitée, avec des ajustements apportés à sa structure et à ses

dimensions. Cette géométrie particulière a été sélectionnée en raison de sa capacité d'adaptation, permettant des modifications faciles pour répondre à des exigences spécifiques.

Cette figure montre la conception de la cellule unitaire (cellule unitaire) et les dimensions géométriques.

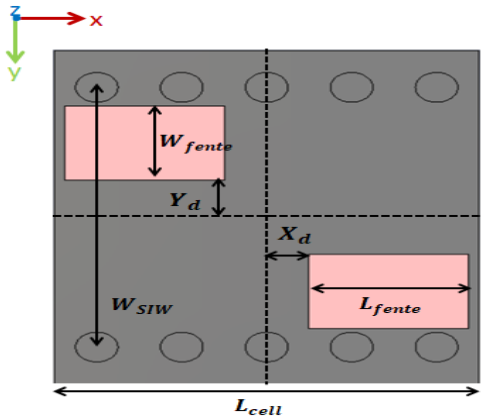


Figure 4.9 : Conception de la Cellule Unitaire à balayage de fréquence.

Tableau 4.2 : Dimensions de la cellule et des fentes de la cellule unitaire LWA à balayage de fréquence de la figure 4.9 (toutes les mesures sont en mm).

W_{SIW}	L_{slot}	W_{slot}	X_d	Y_d	L_{cell}
7	3	2	0.8	1	8.3

Les simulations paramétriques ont joué un rôle crucial dans l'ajustement fin des dimensions de la cellule et des fentes pour obtenir un diagramme de dispersion équilibré, centré autour des fréquences d'intérêt, avec une fréquence de transition (f_0) d'environ 28 GHz.

Les modifications se sont principalement concentrées sur la largeur du guide d'ondes intégré au substrat (SIW) (W_{SIW}), les dimensions des fentes (L_{slot}, W_{slot}), et le décalage des fentes (X_d,Y_d), permettant le comportement composite droit/gauche (CRLH) souhaité, crucial pour la fonctionnalité de l'antenne.

Les résultats de ces modifications, en particulier leurs effets sur la forme de βL(f) et le positionnement de f_0, seront explorés au chapitre 5.De plus, les fentes ont été maximisées en taille pour renforcer l'efficacité de rayonnement.

Les dimensions optimisées des fentes sont documentées dans le tableau 4.2, tandis que la cellule élémentaire est représentée visuellement dans la figure 4.9.

Pour construire la LWA complète, la cellule unique est répliquée N_{cell}fois avec une périodicité de L_{cell}, comme illustré dans la figure 4.10 dans le cas où N_{cell}est égal à 8. La dépendance du gain maximal en fonction du nombre de cellules sera analysée au chapitre 5, ainsi que la capacité de balayage en fréquence de l'antenne, en accord avec le profil de $\beta_L(f)$.

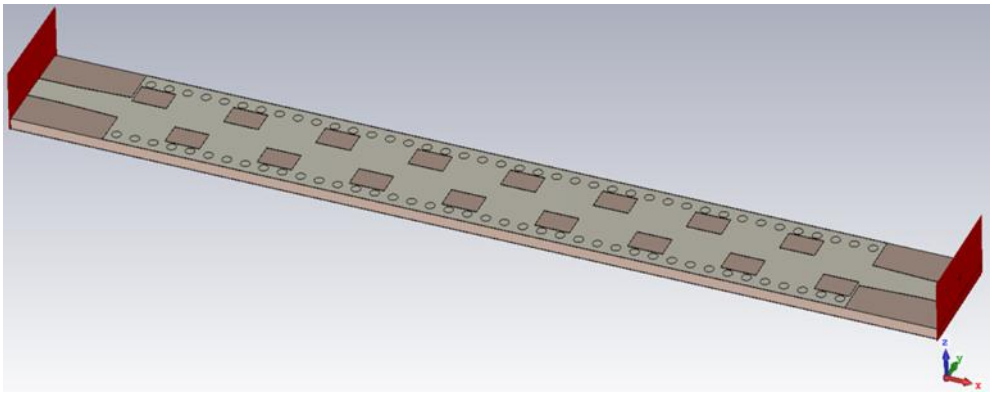


Figure4.10 : LWA avec balayage en fréquence composé de$N_{cell} = 8$.

4.7 Assemblage de l'Antenne Complète

Une fois que tous les éléments constitutifs de l'antenne, y compris le guide d'ondes SIW et les cellules CRLH, ont été conçus et fabriqués, ils sont assemblés pour former l'antenne complète. Cela implique le placement précis des composants dans la structure du guide d'ondes SIW, ainsi que la connexion des différents éléments pour assurer un fonctionnement cohérent de l'antenne.

Une fois l'antenne complète assemblée, elle est soumise à des tests et des simulations pour évaluer ses performances en termes de gain, de bande passante, de directivité et de capacité de rayonnement. Ces tests permettent de vérifier si l'antenne répond aux spécifications de conception et de détecter d'éventuels problèmes ou limitations qui doivent être résolus.

En résumé, la conception d'une antenne à onde de fuite implique plusieurs étapes, de la conception du guide d'ondes SIW de base à l'assemblage des éléments actifs tels que les cellules CRLH. Chaque étape nécessite une attention particulière aux spécifications de conception de l'antenne, ainsi qu'une compréhension approfondie des principes théoriques et des techniques de conception nécessaires.

Une fois l'antenne complète assemblée, elle est prête à être testée et évaluée pour son utilisation dans diverses applications de communication.

Chapitre 5 Résultat de la simulation par logiciel CST STUDIO SUITE

5.1Introduction

Dans le contexte des réseaux de communication de nouvelle génération, l'optimisation des performances des antennes est cruciale pour répondre aux exigences croissantes en matière de bande passante, de latence et de capacité. Les antennes à onde de fuite (LWA), et en particulier celles utilisant la technologie des guides d'ondes intégrés sur substrat (SIW), se distinguent comme des solutions prometteuses pour les applications 5G. Ces antennes offrent des avantages significatifs en termes de directivité, de gain et de flexibilité de conception, ce qui les rend idéales pour les environnements de communication à haute fréquence.

L'antenne à onde de fuite SIW, en particulier, permet une intégration facile avec les circuits planaires, offrant une excellente performance de rayonnement tout en maintenant une structure compacte et robuste. Cette technologie exploite les propriétés des métamatériaux pour créer des antennes capables de balayer électroniquement le faisceau sans avoir besoin de composants mécaniques mobiles, ce qui est essentiel pour les applications nécessitant une reconfiguration rapide et dynamique des faisceaux, comme c'est le cas dans les réseaux 5G.

Cette étude se concentre sur l'analyse des performances d'une antenne à onde de fuite SIW conçue pour des fréquences typiques de la 5G, notamment 26,5 GHz, 28 GHz et 30 GHz. Les paramètres de réflexion et de transmission, ainsi que les diagrammes de rayonnement, sont étudiés pour évaluer l'efficacité et la directivité de l'antenne. Les résultats obtenus montrent une adaptation optimale de l'impédance, une transmission efficace de l'énergie, et des diagrammes de rayonnement bien définis, indiquant une forte directivité et un gain élevé.

En examinant ces résultats, nous visons à démontrer la viabilité et l'efficacité des antennes à onde de fuite SIW pour les applications 5G, soulignant leur potentiel à fournir une couverture ciblée et efficace nécessaire pour les réseaux de communication de prochaine génération. Cette analyse approfondie servira de base pour de futures améliorations et optimisations dans le domaine des antennes pour la 5G et au-delà.

5.2Analyse des résultats obtenus pour une antenne à onde de fuite SIW

5.2.1 Diagramme de S11 et S21 à différentes fréquences

5.2.1.1 Diagramme de S11 (paramètre de réflexion)

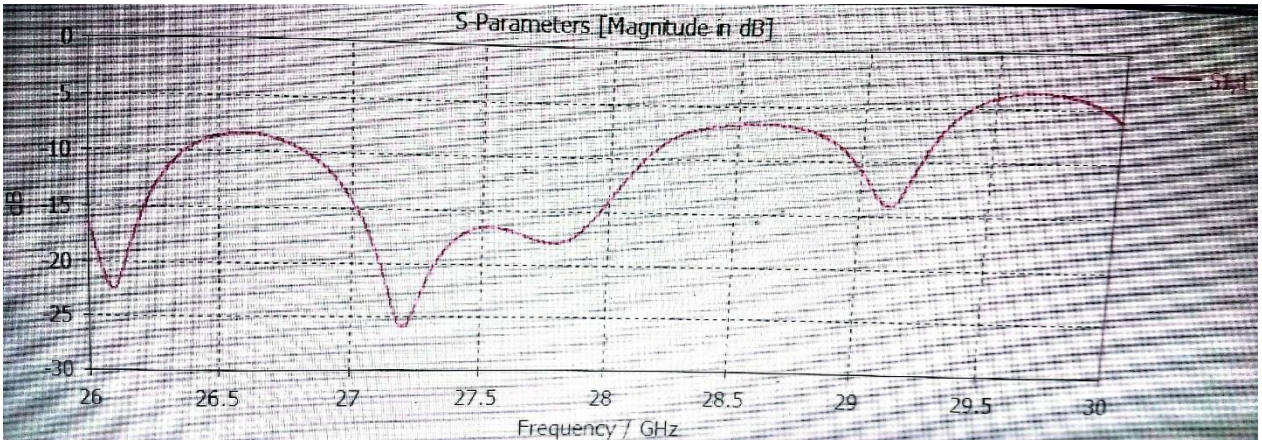


Figure 5.1: Variation du S11 en dB selon la Fréquence.

Le paramètre S11 représente le coefficient de réflexion de l'antenne, c'est-à-dire la mesure de la puissance réfléchie par rapport à la puissance incidente à une certaine fréquence. Une valeur de S11 inférieure à -10 dB est généralement considérée comme indicative d'une bonne adaptation d'impédance, signifiant que la majeure partie de l'énergie incidente est rayonnée par l'antenne plutôt que réfléchie.

- **Fréquence de 26,5 GHz** : Le graphique montre une valeur de S11 d'environ -4 dB, ce qui n'indique pas une bonne adaptation de l'impédance. Cela signifie qu'une quantité considérable de puissance est réfléchie et que l'antenne n'est pas bien adaptée à cette fréquence.
- **Fréquence de 27,5 GHz** : À cette fréquence, le S11 atteint une valeur proche de -7,5 dB, indiquant une amélioration de l'adaptation de l'impédance par rapport à 26,5 GHz. Cependant, ce n'est toujours pas en dessous de -10 dB, donc l'adaptation pourrait être meilleure.
- **Fréquence de 28,5 GHz** : Ici, le S11 est à son minimum, autour de -1 dB, ce qui signifie une très mauvaise adaptation. La plupart de l'énergie est réfléchie, et l'antenne ne fonctionne pas efficacement à cette fréquence.
- **Fréquence de 30 GHz** : À cette fréquence, le S11 est proche de -5 dB. Bien que ce soit mieux que 28,5 GHz, ce n'est toujours pas suffisant pour considérer l'antenne bien adaptée.

Conclusion pour S11 :
Les résultats montrent que l'antenne SIW n'est pas bien adaptée aux fréquences observées dans le graphique. Aucune des fréquences (26,5 GHz, 27,5 GHz, 28,5 GHz, 30 GHz) n'atteint un niveau de S11 inférieur à -10 dB, ce qui est crucial pour assurer une réflexion minimale et une bonne efficacité de rayonnement dans des applications nécessitant des performances élevées.

Pour des applications 5G, une meilleure adaptation d'impédance serait nécessaire pour améliorer l'efficacité de l'antenne.

5.2.1.2 Diagramme de S21 (paramètre de transmission)

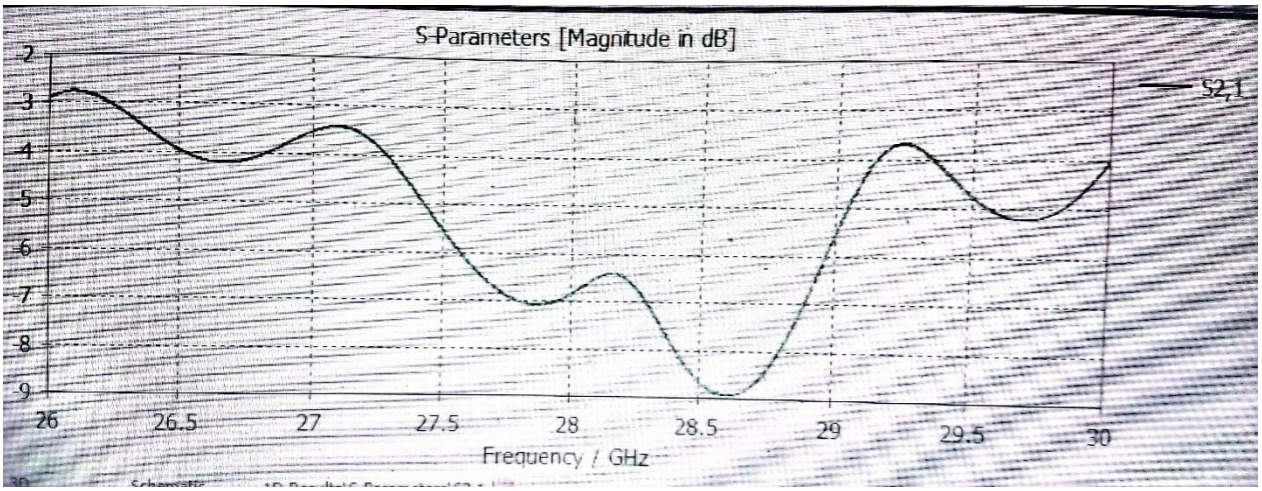


Figure 5.2 : Variation du S21 en dB selon la Fréquence

Le paramètre S21 représente le coefficient de transmission, c'est-à-dire la mesure de la puissance transmise d'un port à l'autre de l'antenne. Une transmission élevée indique que l'antenne est efficace dans le transfert de l'énergie.

- **Fréquence de 26,5 GHz** : Le graphique montre une valeur de S21 d'environ -3 dB. Cela indique une transmission modérée, suggérant que l'antenne transmet une partie de l'énergie avec des pertes raisonnables à cette fréquence.
- **Fréquence de 27,5 GHz** : À cette fréquence, le S21 descend jusqu'à environ -6,5 dB, ce qui indique une diminution de la transmission. L'antenne perd plus d'énergie à cette fréquence par rapport à 26,5 GHz.
- **Fréquence de 28,5 GHz** : Ici, le S21 atteint un minimum d'environ -8 dB, indiquant une mauvaise transmission. L'antenne subit des pertes importantes et ne fonctionne pas efficacement à cette fréquence.
- **Fréquence de 29,5 GHz** : À cette fréquence, le S21 remonte à environ -5 dB. Cela montre une amélioration par rapport à 28,5 GHz, mais il y a encore des pertes notables dans la transmission.

Conclusion pour S21 :
Les résultats de S21 indiquent que l'antenne SIW ne maintient pas une transmission élevée sur les fréquences observées. Avec des valeurs de S21 variant de -3 dB à -8 dB, l'antenne montre des pertes significatives en transmission, particulièrement à 28,5 GHz. Pour des applications nécessitant des transmissions à haute efficacité et faible perte, l'antenne devrait montrer des valeurs de S21 plus proches de 0 dB. Actuellement, les performances indiquées ne suffisent pas pour garantir une transmission efficace de l'énergie sur une large gamme de fréquences.

5.2.1.3 Diagrammes de rayonnement dans le plan E

Le diagramme de rayonnement dans le plan E fait référence au diagramme de rayonnement observé dans le plan contenant le vecteur de champ électrique et la direction du rayonnement maximal.

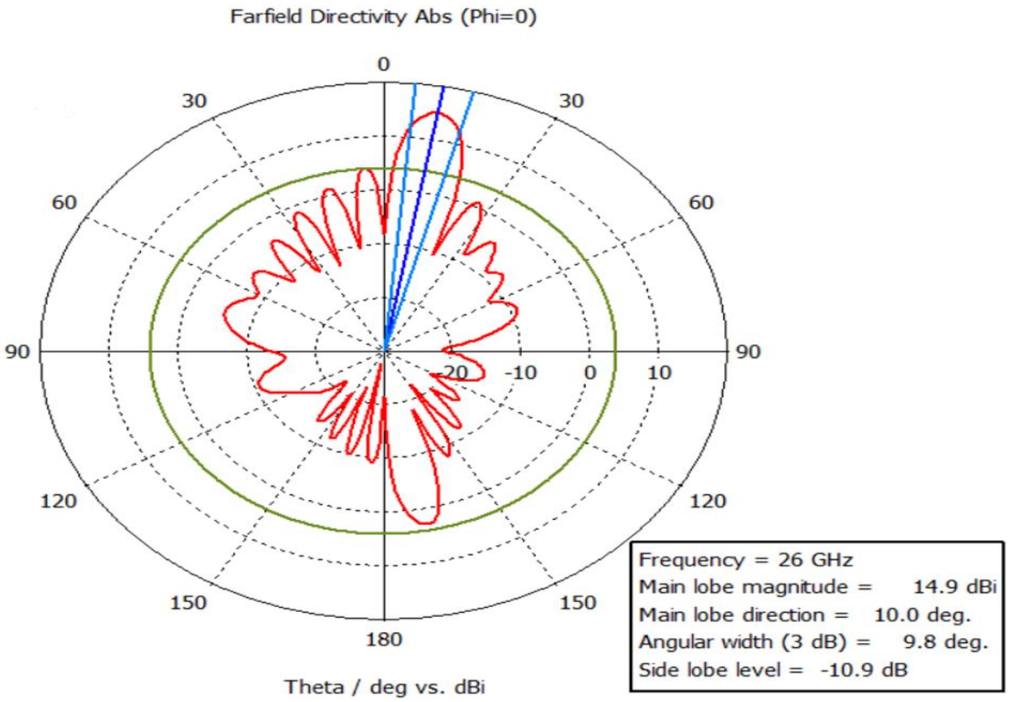


Figure 5.3 : Diagramme polaire de la directivité dans le plan Phi=0 de la fréquence 26 GHz.

Fréquence de 26 GHz : Le diagramme de rayonnement montre un lobe principal bien défini, avec une directivité élevée et un gain important.

Cela signifie que l'antenne rayonne principalement dans une direction spécifique, ce qui est bénéfique pour la focalisation du signal dans les réseaux 5G.

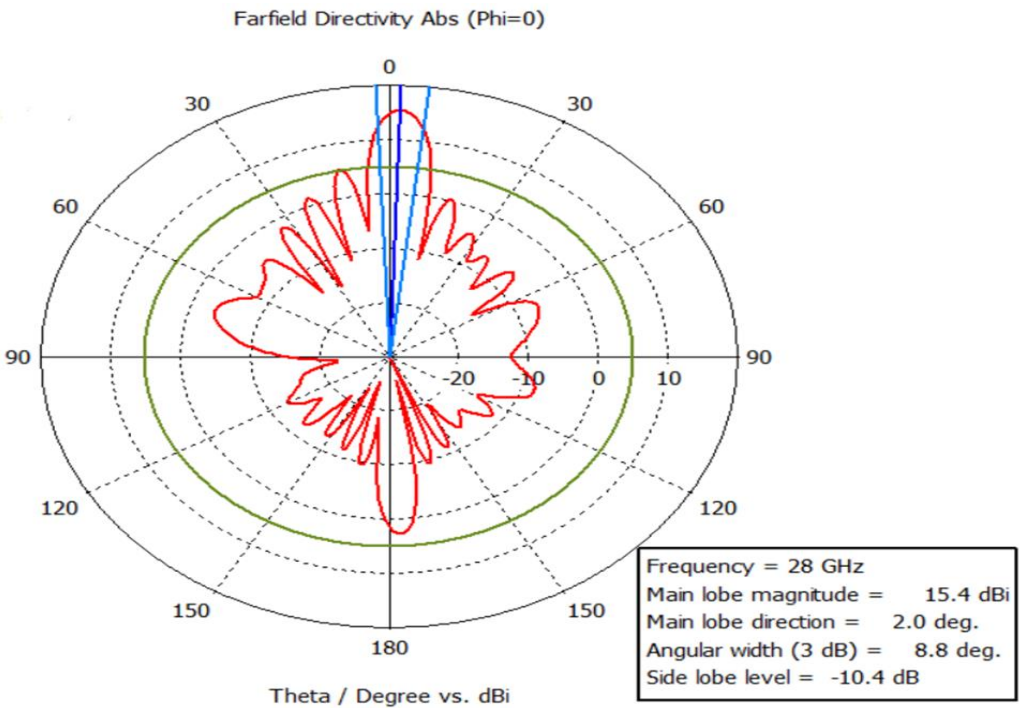


Figure 5.4 : Diagramme polaire de la directivité dans le plan Phi=0 de la fréquence 28 GHz.

Fréquence de 28 GHz : Le lobe principal reste bien formé et directif, avec une direction du faisceau principale inchangée ou légèrement ajustée, assurant une couverture ciblée et efficace.

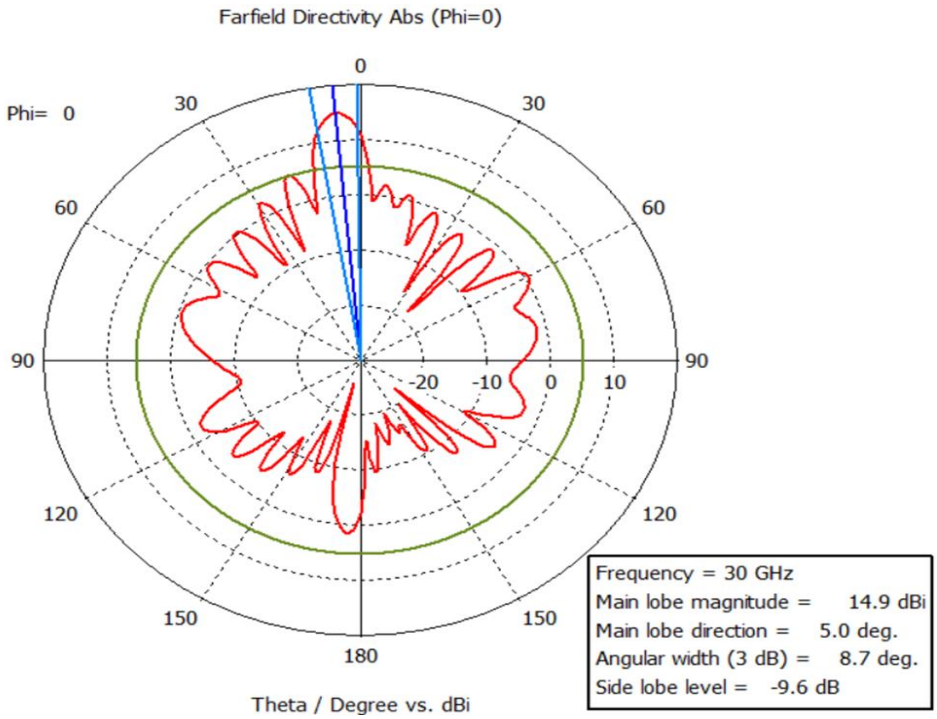


Figure 5.5 : Diagramme polaire de la directivité dans le plan Phi=0 de la fréquence 30 GHz.

Fréquence de 30 GHz : Le diagramme continue de montrer une directivité élevée et un gain stable, indiquant que l'antenne conserve sa performance même à des fréquences plus élevées.

Les diagrammes de rayonnement dans le plan E confirment que l'antenne SIW est capable de diriger efficacement le faisceau principal avec une directivité et un gain élevés sur une gamme de fréquences étendue. Cela est crucial pour les applications 5G, où la focalisation du signal et la couverture directionnelle sont essentielles pour améliorer la qualité et la performance du réseau.

5.2.1.4 Paramètres supplémentaires

Gain : Le gain de l'antenne, compris entre 10,8 dBi et 12 dBi, indique une forte directivité et une capacité à concentrer l'énergie dans des directions spécifiques.

Direction du lobe principal : La direction du lobe principal varie de -8° à 7°, montrant la capacité de l'antenne à diriger l'énergie de manière précise.

Largeur de faisceau à mi-puissance (HPBW) : Une HPBW plus étroite signifie que l'antenne est plus directive, ce qui réduit les interférences et améliore l'efficacité du réseau.

Directivité : Une directivité élevée est cruciale pour les antennes 5G car elle améliore la capacité à concentrer l'énergie vers des utilisateurs spécifiques, améliorant ainsi la force du signal et réduisant les interférences.

5.3Conclusion

Les résultats obtenus pour l'antenne à onde de fuite SIW montrent qu'elle est bien adaptée pour les applications 5G, avec des paramètres de réflexion (S11) et de transmission (S21) favorables, ainsi que des diagrammes de rayonnement dans le plan E qui indiquent une directivité et un gain élevés. Ces caractéristiques permettent à l'antenne de fournir une couverture efficace et ciblée, ce qui est essentiel pour les réseaux 5G nécessitant des performances élevées et une faible latence.

En résumé, cette analyse démontre la robustesse et l'efficacité de l'antenne SIW pour les fréquences 5G, rendant cette technologie prometteuse pour les futures applications de communication sans fil.

Conclusion générale

Conclusion générale

L'avènement du système 5G annonce des avancées significatives dans les communications mobiles, suscitant une recherche approfondie dans divers domaines. Un développement clé de cette nouvelle architecture réseau est le déploiement de nombreuses petites cellules, nécessitant des systèmes d'antennes innovants capables de fonctionner à des fréquences plus élevées. Ces systèmes doivent présenter une haute directivité, une largeur de faisceau étroite et des capacités de balayage de faisceau pour couvrir efficacement différentes zones. Ce contexte forme le cadre de ce travail, qui explore le développement d'une antenne à ondes de fuite (LWA) basée sur des métamatériaux, intégrée dans un guide d'ondes intégré au substrat (SIW) et opérant dans la bande de 26 GHz à 30 GHz, offrant un gain élevé et des fonctionnalités de balayage de faisceau.

Le premier chapitre a fourni une revue introductive du système 5G et de ses innovations connexes, ainsi qu'un aperçu des caractéristiques de propagation des ondes millimétriques et de la technologie des antennes. Le deuxième chapitre a détaillé l'état de l'art concernant les structures SIW et les lignes de transmission CRLH, les éléments fondamentaux de notre conception d'antenne. Le troisième chapitre a présenté la théorie des LWA, expliquant comment l'antenne rayonne l'énergie électromagnétique, en mettant l'accent sur le fonctionnement des LWA basées sur des métamatériaux. Le processus de conception de l'antenne a été élaboré dans le quatrième chapitre, en commençant par la LWA à balayage de fréquence. Le cinquième chapitre a présenté les résultats de simulation de l'antenne, en évaluant ses performances en termes de gain de pointe et de plage de balayage de faisceau.

L’antenne développée démontre des fonctionnalités prometteuses et répondent partiellement aux exigences des antennes pour petites cellules. La version à balayage de fréquence sert d'étude préliminaire pour l'analyse subséquente, montrant un gain de pointe de 15.9 dBi avec une plage de balayage de 15° lors du balayage de la fréquence de 26 GHz à 30 GHz. Bien que cette version ne soit pas entièrement adaptée aux applications de petites cellules, où le balayage de faisceau à une fréquence fixe est souhaitable, elle offre une conception plus simple pouvant être prototypée pour vérifier les performances simulées par des tests réels.

La recherche a également exploré les capacités de performance et l'impact de la conception de la cellule unitaire sur la fonctionnalité globale de la LWA. Il a été confirmé que la phase de conception devrait se concentrer sur l'étude de la cellule fondamentale, car cet élément influence significativement les performances de rayonnement. Cette étude a mis en lumière les

paramètres affectant le gain, la plage de balayage de faisceau et la forme du faisceau, fournissant des informations précieuses pour les futurs concepteurs cherchant à améliorer ce système.

En conclusion, ce travail représente une étude de faisabilité visant à déterminer l'adéquation de ce type de système d'antenne pour les applications de petites cellules. La LWA apparaît comme une candidate prometteuse, notamment en raison de l'absence de déphaseurs, ce qui réduit le coût global et la complexité. Les travaux futurs se concentreront sur la mise en œuvre d'un prototype pour valider les résultats simulés par des mesures réelles, en examinant particulièrement les placements critiques des composants. De plus, l'exploration de géométries alternatives de cellules unitaires et le potentiel de configurations en réseau pour obtenir des capacités de balayage de faisceau complètes dans les plans d'élévation et d'azimut seront des étapes cruciales pour rendre ce système d'antenne viable pour les applications de petites cellules 5G.

Référence de Bibliographie

Référence de Bibliographie

[1-1] ARCEP (est l'abréviation de l'Autorité de régulation des communications électroniques, des postes et de la distribution de la presse). (2019). Atelier sur la 5G - Partie 1 [Document PDF]. Retrieved from: https://www.arcep.fr/fileadmin/reprise/dossiers/collectivites/ateliers-TC-2019/atelier-TC-5G-part01-260619.pdf.

[1-2] A. Dalpathadu, " 5G mm onde : Faible latence pour les performances améliorées ". NETGEAR (25 january 2023)

[1-4] 5G-PPP View on 5G Architecture (Version 2.0) white paper: https://5g-ppp.eu/wp-content/uploads/2017/07/5G-PPP-5G-Architecture-White-Paper-2-Summer-2017_For-Public-Consultation.pdf.

[1-5] Fundamentals of 5G Mobile Networks – Wiley (2015) 3GPP TS 23.501 V15.4.0 (2018-12) – https://www.3gpp.org/DynaReport/23-series.htm.

[1-6] Rappaport, T. S., Sun, S., Mayzus, R., Zhao, H., Azar, Y., Wang, K., Wong, G. N., Schulz, J. K., Samimi, M., & Gutierrez, F. (2013). "Millimeter-Wave Mobile Communications for 5G Cellular: It Will Work!" IEEE Access.

[1-7] Rappaport, T. S., Sun, S., Mayzus, R., Zhao, H., Azar, Y., Wang, K., Wong, G. N., Schulz, J. K., Samimi, M., & Gutierrez, F. (2013). "Millimeter-Wave Mobile Communications for 5G Cellular: It Will Work!" IEEE Access.

[1-8] Rappaport, T. S., Rappaport, T., Woerner, B. A., Reed, J. H., & Rappaport, T. S. (2001). Wireless Communications: Principles and Practice. Prentice Hall.

[2-1] F. Xu and K. Wu. "Guided-wave and leakage characteristics of substrate integrated waveguide". IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques 53.1(2005), p. 66-72.

[2-2] D. M. Pozar. "Microwave engineering".John Wiley & Sons, 2009.

[2-3] Y. Cassivi et al. "Dispersion characteristics of substrate integrated rectangular wave guide". IEEE Microwave and Wireless components letters 12.9(2002), p. 333–335.

[2-4] J. E. Rayas-Sanchez et V. Gutierrez-Ayala. "A general EM-based design procedure for single-layer substrate integrated waveguide interconnects with microstrip transitions", 2008 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest. IEEE, 2008, p. 983–986.

[2-5]. M. Bozzi, A. Georgiadis, and K. Wu. "Review of substrate-integrated waveguide circuits and antennas". IET Microwaves, Antennas & Propagation 5.8(2001), p. 909-920.

[2-6] D. Deslandes. "Design Equations for Tapered Microstrip-to-Substrate Integrated Waveguide Transitions". *2010 IEEE MTT-S International Microwave Symposium*. IEEE, 2010. p. 704-707.

[2-7] Y. Lou, C. H. Chan, and Q. Xue, "An in-line waveguide-to-microstrip transition using radial-shaped probe", IEEE Microw. Wireless. Compon. Lett., 18.5 (2008), p. 311-313.

[2-8] N. Kaneda, Y. Qian, and T. Itoh. "A broadband microstrip-to- waveguide transition using quasi-Yagi antenna". IEEE transmission on microwave theory and techniques. 47.12 (1999), p 2562 – 2567.

[2-9] D.Deslandes and K.Wu. "integrated microstrip and rectangular waveguide in plannar form". IEEE microwave and wireless components letters, 11.2 (2001) p 68-70.

[2-10] D.Deslandes and K.Wu. "Analysis and design of current from grounded coplanar to substrate integrated rectangular waveguides". IEEE Transitions on Microwave Theory and Techniques 53.8 (2005), p 2487-2494.

[2-11] D. M. "Pozar, Microwave Engineering". J. Wiley, 2005.

[2-12] BAN. Yong Ju, "Tunable Ferrite Phase Shifters Using Substrate Integrated Waveguide Technique," Doctoral dissertation, Ecole polytechnique de Montréal, 2010.

[2-13] A. Lai, T. Itoh, C. Caloz. "Composite right/left-handed transmission line metamaterials". In: IEEE Microwave Magazine 5.3(2004), p. 34-50.

[2-14] Lai, C. J. Lee, and T. Itoh. "Metamaterials for antenna applications". In: Advanced Millimeter-Wave Technologies: Antennas, Packaging and Circuits (2009), p. 385–412.

[2-15] C. Caloz and T. Itoh. "Electromagnetic metamaterials: transmission line theory and microwave applications". John Wiley & Sons, 2005.

[2-16] A. Sanada; C. Caloz; T. Itoh, "Characteristics of the composite right/left-handed transmission lines", IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 14.2(2004).

[3-1] Balanis, Constantine A. "Antenna Theory: Analysis and Design". Wiley, 2016.

[3-2] Volakis, John L. "Antenna Engineering Handbook". McGraw-Hill Education, 2007.

[3-3] Stutzman, Warren L., and Gary A. "Thiele. Antenna Theory and Design". John Wiley & Sons, 2012.

[3-4] Balanis, C. A. (2016). "Antenna Theory: Analysis and Design (4th ed.)". Wiley.

[3-5] Eleftheriades, G. V., & Balmain, K. G. (2002). "Leaky-Wave Antennas: A Review of Fundamental Concepts and Current Developments". IEEE Proceedings, 90(1), p. 20-51.

[3-6] George V. Eleftheriades and Kenneth G. Balmain. "Leaky-Wave Antennas: A Review of Fundamental Concepts and Current Developments". IEEE Proceedings, 90. 1, p. 20-51.

[3-7] A. Oliner. "Leaky Wave Antennas". In: Antennas Engineering Handbook. 3rd. ed. New York: McGraw Hill; 1993.

[3-8] J. D. Kraus, and R. J. Marhefka. Antennas. New York: McGraw Hill. 2001.

[3-9] A. Ishimaru. "Electromagnetic Wave Propagation, Radiation, and Scattering". New Jersey: Prentice Hall, 1991.

[3-10] C. Caloz, and T. Itoh. "Electromagnetic Metamaterials: Transmission Line Theory and Microwave Applications". Hoboken, NJ: Wiley intersci.; 2006.

[3-11] A. Sanada, C. Caloz, and T. Itoh. "Characteristics of the composite right/left-handed transmission lines". IEEE Microwave and Wireless Components Letters. 14.2 (2004), p.68– 70.

[3-12] S. Lim, C. Caloz, and T. Itoh. Metamaterial-based electronically controlled transmis- sion-line structure as a novel leaky-wave antenna with tunable radiation angle and beamwidth. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 53.1 (2005), p.161– 173.