

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

— جامعة أبي بكر بلقايد- تلمسان —

Université Aboubakr Belkaïd– Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



**Projet de fin d'études**

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

en : **Télécommunications**

Spécialité : **Systemes des Télécommunications**

Soutenu par : **SEDJELMACI Ferial Chifaa**

**Conception d'antennes filtrantes et intelligentes pour les applications 5G**

Soutenu publiquement, le **29/06/2025**, devant le jury composé de :

<b>Mme. BELHADEF Yamina</b>	M.C.A	Université de Tlemcen	Présidente
<b>Mr. DJEMAI Abderrezak</b>	M.C.B	Université de Tlemcen	Examineur
<b>Mr. BOUSAHLA Miloud</b>	M.C.B	Université de Tlemcen	Encadrant

**Année Universitaire 2024 - 2025**

## *Remerciements*

Nous tenons tout d'abord à remercier ALLAH, Le Tout-Puissant, de nous avoir accordé la volonté, la patience et le courage nécessaires pour mener à bien ce modeste travail.

Ce mémoire a été réalisé au sein du Laboratoire de Télécommunications (LTT) du Département des Télécommunications de la Faculté de Technologie de l'Université de Tlemcen, sous la direction de M. BOUSAHLA Miloud, que je tiens à remercier en particulier. Je tiens aussi à exprimer ma profonde gratitude aux membres du jury qui ont accepté d'évaluer ce travail.

Je tiens à exprimer ma plus profonde reconnaissance à ma mère pour son amour inconditionnel, sa patience et son soutien indéfectible. Ta présence rassurante, tes encouragements constants et tes sacrifices m'ont donné la force et la confiance nécessaires pour mener à bien ce travail. Merci pour tes conseils avisés et ta bienveillance quotidienne.

Mon mari, je te remercie pour ton soutien inébranlable, ta compréhension et ta présence réconfortante. Ta patience face à mes moments de doute et tes encouragements quotidiens m'ont permis d'avancer avec confiance.

Enfin, j'adresse mes remerciements les plus sincères à tous mes proches et amis, dont le soutien indéfectible et les encouragements ont été une source de motivation constante tout au long de cette aventure académique.

## Résumé :

Ce projet de fin d'études porte sur la conception et l'optimisation d'antennes, à la fois filtrantes et intelligentes pour les systèmes 5G. L'objectif est de développer une structure compacte intégrant les fonctions de filtrage et de rayonnement, offrant une sélectivité fréquentielle précise.

Nous avons simulé, à l'aide du logiciel CST Microwave Studio, plusieurs antennes filtennas, afin de comparer différentes configurations. Dans un second temps, une antenne filtrante mono-bande a été conçue, suivie de la conception d'une antenne bi-bande, capable de fonctionner sur deux bandes de fréquence distinctes. Les simulations ont permis d'optimiser les performances en termes d'adaptation d'impédance, de gain et de rejet hors bande. Ce travail prépare la transition vers la phase expérimentale, en vue d'une intégration dans les terminaux 5G.

**Mots clés :** Antenne filtrante, Antenne intelligente, Filtenna, 5G.

## Abstract :

This final-year project focuses on the design and optimization of both filtering and smart antennas for 5G systems. The objective is to develop a compact structure integrating filtering and radiation functions, offering precise frequency selectivity.

We simulated several Filtenna antennas using CST Microwave Studio software to compare different configurations. A single-band filtering antenna was then designed, followed by the design of a dual-band antenna capable of operating on two distinct frequency bands. The simulations enabled us to optimize performance in terms of impedance matching, gain, and out-of-band rejection. This work prepares the transition to the experimental phase, with a view to integration into 5G terminals.

**Keywords:** Filtering antenna, Intelligent antenna, Filtenna, 5G.

## ملخص:

يركز هذا المشروع في السنة النهائية على تصميم وتحسين كلٍّ من هوائيات الترشيح والهوائيات الذكية لأنظمة الجيل الخامس. ويهدف إلى تطوير هيكل مدمج يدمج وظائف الترشيح والإشعاع، مما يوفر انتقائية ترددية دقيقة. قمنا بمقارنة التكوينات المختلفة. ثم استخدمنا برنامج Filtenna بمحاكاة عدة هوائيات من نوع صُمم هوائي ترشيح أحادي النطاق، تلاه تصميم هوائي ثنائي النطاق قادر على العمل على نطاق تردد مختلفين. مكّنتنا عمليات المحاكاة من تحسين الأداء من حيث مطابقة المعاوقة، والكسب، والرفض خارج النطاق. يُمهّد هذا العمل للانتقال إلى المرحلة التجريبية، بهدف دمجها في محطات الجيل الخامس.

# Sommaire

Remerciements .....	I
Résumé .....	II
Sommaire .....	III
Liste des figures .....	V
Liste des tableaux .....	VIII
Acronymes et abréviations.....	IX
Introduction générale.....	XII
I. Chapitre I : Introduction aux réseaux mobiles de la 5G.....	1
I.1 Introduction : .....	2
I.2 Les défis de la 5G : .....	2
I.2.1 L'évolution des communications mobiles : .....	2
I.2.2 Approches technologiques et solutions envisagées pour le déploiement de la 5G : .....	5
I.3 Les technologies utilisées dans la 5G : .....	8
I.3.1 Massive MIMO (Multiple Input Multiple Output) : .....	8
I.3.2 Full Duplex : .....	9
I.3.3 Small Cells : .....	9
I.3.4 Formation de faisceaux (Beamforming) : .....	10
I.4 Conclusion : .....	11
II. Chapitre II : Etude des antennes et des filtres pour les systèmes de communication. ....	12
II.1 Introduction: .....	13
II.2 Les antennes : .....	13
II.2.1 Caractéristiques des antennes : .....	13
II.2.2 Types d'antennes : .....	16
II.2.3 Antennes Reconfigurables : .....	22

II.3	Les filtres :.....	24
II.3.1	Définition générale d'un filtre : .....	24
II.3.2	Classification des filtres selon la réponse en fréquence :.....	25
II.3.3	Classification selon la technologie de mise en œuvre :.....	26
II.3.4	Filtres micro-rubans : .....	27
II.4	Antennes filtrantes (Filtennas) : .....	31
II.4.1	Définition et principe : .....	31
II.4.2	Contraintes et avantages de l'intégration filtre–antenne :.....	32
II.4.3	Méthodes d'intégration : .....	33
II.4.4	Filtennas reconfigurables : .....	34
II.5	Conclusion :.....	34
III.	Chapitre III : Conception d'antennes filtrantes.....	36
III.1	Introduction :.....	37
III.2	Outil de la simulation : .....	37
III.3	Première antenne filtrante simulée :.....	37
III.3.1	Filtre à base de Complementary Loaded Loop (CLL) :.....	37
III.3.2	Filtenna : .....	40
III.4	Deuxième antenne filtrante simulée:.....	42
III.4.1	Filtre Hairpin : .....	42
III.4.2	filtenna elliptique :.....	44
III.5	Antenne filtrante mono-bande proposée : .....	45
III.6	Antenne filtrante bi-bande proposée :.....	47
III.6.1	Étude paramétrique :.....	49
III.7	Conclusion :.....	51
	Conclusion générale.....	LII
	Références bibliographiques.....	LIV

# Liste des figures

<b>Figure I-1:</b> Evolution des communications mobiles.....	2
<b>Figure I-2 :</b> Architecture du réseau 5G.....	4
<b>Figure I-3:</b> Tableau comparatif entre les différentes générations du réseau mobile. ....	5
<b>Figure I-4:</b> Comparaison entre la 4G et la 5G.....	5
<b>Figure I-5:</b> Spectre électromagnétique.....	6
<b>Figure I-6:</b> Système MIMO.....	9
<b>Figure I-7:</b> Small Cells.....	10
<b>Figure I-8:</b> Systèmes d’antennes à réseau phasé permettant la formation et la direction de faisceaux.....	10
<b>Figure I-9:</b> Système d’antenne à formation de faisceaux (technique 5G). ....	11
<b>Figure II-1:</b> Exemple de coefficient de réflexion et de la bande passante associée ....	15
<b>Figure II-2:</b> Diagramme de rayonnement classique d’une antenne directive. ....	15
<b>Figure II-3:</b> Types de polarisation.....	16
<b>Figure II-4:</b> Antenne Filaire & antenne Yagi.....	17
<b>Figure II-5 :</b> Antenne parabolique.....	18
<b>Figure II-6:</b> Présentation d’une antenne imprimée.....	19
<b>Figure II-7 :</b> Différentes formes d’antennes micro-ruban.....	19
<b>Figure II-8 :</b> Antenne imprimée alimentée par une ligne micro-ruban. ....	20
<b>Figure II-9:</b> Alimentation coaxiale directe.....	20
<b>Figure II-10:</b> Antenne Patch alimentée par couplage électromagnétique.....	21
<b>Figure II-11:</b> Antenne Patch alimentée par fente. ....	21
<b>Figure II-12 :</b> Les différentes techniques de reconfiguration.....	23
<b>Figure II-13:</b> Illustration de l’agilité fréquentielle. ....	23
<b>Figure II-14:</b> La reconfiguration de rayonnement en utilisant une antenne filaire à spirale carrée. ....	24
<b>Figure II-15:</b> La reconfiguration de polarisation en utilisant une antenne PASS. ....	24
<b>Figure II-16:</b> Types de filtres passifs.....	26
<b>Figure II-17:</b> Filtre RLC en série.....	26
<b>Figure II-18 :</b> Filtre passe-bande à guide d’ondes avec trois iris en cascade.....	27
<b>Figure II-19:</b> Illustration schématique d’un filtre passe-bande en technologie micro-ruban à résonateurs couplés. ....	27

<b>Figure II-20</b> : Exemple d'un filtre Hairpin micro-ruban. ....	28
<b>Figure II-21</b> : Exemple d'un filtre interdigital micro-ruban. ....	28
<b>Figure II-22</b> : Filtre passe-bande à lignes couplées. ....	29
<b>Figure II-23</b> : Filtre en fentes. ....	29
<b>Figure II-24</b> : Filtre exponentiel. ....	30
<b>Figure II-25</b> : Filtre à résonateurs en anneau ouvert. ....	30
<b>Figure II-26</b> : Filtre à impédance étagée composé de deux lignes micro-ruban. ....	30
<b>Figure II-27</b> : Schéma d'un filtre passe-bande à Stubs en court-circuit d'ordre 4. ....	31
<b>Figure II-28</b> : Exemple d'une filtenna reconfigurable pour les applications radio-cognitives. ....	32
<b>Figure II-29</b> : (a) & (b) : Filtenna reconfigurable en utilisant des diodes Varactors. ....	34
<b>Figure III-1</b> : Outil de simulation. ....	37
<b>Figure III-2</b> : Structure du filtre passe-bande à base de CLL. ....	38
<b>Figure III-3</b> : Paramètres S simulés du filtre passe-bande fondé sur des boucles chargées en capacité (CLL). ....	38
<b>Figure III-4</b> : Distribution du champ sur le filtre passe-bande à base de CLL. ....	39
<b>Figure III-5</b> : Distribution du courant sur filtre passe-bande à base de CLL. ....	39
<b>Figure III-6</b> : Structure de l'antenne filtrante avec : (a) Vue de Dessus, (b) Vue de Dessous (le jaune représente le plan de masse). ....	40
<b>Figure III-7</b> : Coefficient de réflexion de l'antenne filtrante simulée. ....	41
<b>Figure III-8</b> : Diagramme de rayonnement à la fréquence centrale 3.5Ghz en : (a):3D, (b):2D. ....	42
<b>Figure III-9</b> : Structure du filtre hairpin. ....	42
<b>Figure III-10</b> : Paramètres S simulés du filtre hairpin. ....	43
<b>Figure III-11</b> : Distribution du courant à la fréquence centrale 3.58 Ghz. ....	43
<b>Figure III-12</b> : Antenne filtrante elliptique avec : a) Vue Avant, (b) Vue Arrière. ....	44
<b>Figure III-13</b> : Coefficient de réflexion de l'antenne filtrante elliptique simulée. ....	45
<b>Figure III-14</b> : Diagramme de rayonnement à la fréquence centrale 2.6 Ghz en : (a):3D, (b):2D. ....	45
<b>Figure III-15</b> : Structure de l'antenne filtrante propose avec : (a): Vue de Dessus, (b): Vue de Dessous. ....	46
<b>Figure III-16</b> : Coefficient de réflexion de l'antenne filtrante proposée. ....	47
<b>Figure III-17</b> : Diagramme de rayonnement à la fréquence centrale 3.85Ghz en : (a):3D, (b):2D. ....	47

<b>Figure III-18:</b> Structure de l'antenne filtrante bi-bande avec : (a): Vue de Dessus, (b): Vue de Dessous. ....	48
<b>Figure III-19:</b> Coefficient de réflexion pour différentes longueurs du bras de couplage "La". ....	49
<b>Figure III-20:</b> Coefficient de réflexion pour différentes valeurs de la largeur du résonateur "L2". ....	49
<b>Figure III-21:</b> (a) & (b): le coefficient de réflexion de l'antenne filtrante bi-bande proposée. ....	50
<b>Figure III-22:</b> Diagramme de rayonnement à la fréquence de résonance 3.85 Ghz en: (a):3D, (b):2D.....	51
<b>Figure III-23:</b> Diagramme de rayonnement à la fréquence de résonance 4.9 Ghz en: (a):3D, (b):2D.....	51

# Liste des tableaux

<b>Tableau I-1:</b> Tableau comparatif des différentes bandes de fréquences exploitées. ....	7
<b>Tableau II-1:</b> Comparaison des paramètres clés entre différents types de filtres. ....	31
<b>Tableau III-1:</b> Paramètres de l'antenne filtrante.....	41
<b>Tableau III-2:</b> Les dimensions optimisées de l'antenne filtrante proposée.....	46
<b>Tableau III-3:</b> Les dimensions optimisées de l'antenne filtrante bi-bande. ....	49

## *Acronymes et abréviations*

<b>5G</b>	Cinquième Génération.
<b>AR</b>	Augmented Reality.
<b>BER</b>	Binary Error Rate.
<b>BPF</b>	Band-Pass Filter.
<b>BSF</b>	Band-Stop Filter.
<b>C</b>	Capacité.
<b>CDMA</b>	Code Division Multiplexing Access.
<b>CEM</b>	Compatibilité ElectroMagnétique.
<b>CLL</b>	Coupled Line Loop.
<b>CLL</b>	Complementary Loaded Loop.
<b>CST</b>	Computer Simulation Technology.
<b>DAS</b>	Distributed Antenna System.
<b>dB</b>	décibel.
<b>DSP</b>	Digital Signal Processing.
<b>EDGE</b>	Enhanced Data Rates for GSM Evolution.
<b>eMB</b>	enhanced Mobile Broadband.
<b>ESPRIT</b>	Estimation of Signal Parameters via Rotational Invariance Tech.
<b>FD</b>	Full Duplex.
<b>FDD</b>	Frequency Division Duplexing.
<b>FDMA</b>	Frequency Division Multiplexing Access.
<b>GPRS</b>	General Packet Radio Service.
<b>GSM</b>	Global System Mobile.
<b>HD</b>	Half Duplex.
<b>HPF</b>	High-Pass Filter.

<b>IoT</b>	Internet of Things.
<b>KPI</b>	Key Performance Indicator.
<b>L</b>	Inductance.
<b>LMS</b>	Least Mean Square.
<b>LPF</b>	Low-Pass Filter.
<b>LTE</b>	Long Term Evolution.
<b>MAC</b>	Media Access Control.
<b>mMTC</b>	massive Machine Type Communication.
<b>MEMS</b>	Micro Electro Mechanical Systems.
<b>MIMO</b>	Multiple Input Multiple Output.
<b>MU-MIMO</b>	Multi-User Multiple-Input Multiple-Output.
<b>MUSIC</b>	Multiple Signal Classification.
<b>MVDR</b>	Minimum Variance Distortionless Response.
<b>MW</b>	Micro-Wave.
<b>OFDM</b>	Orthogonal Frequency Division Multiplexing.
<b>OFDMA</b>	Orthogonal Frequency Division Multiplexing Access.
<b>OTA</b>	Over The Air.
<b>PIN</b>	Positif – Intrinsèque – Négatif.
<b>QAM</b>	Quadrature Amplitude Modulation.
<b>QE</b>	Qualité Externe.
<b>QoS</b>	Quality of Service.
<b>R</b>	Résistance.
<b>RF</b>	Radio Frequency.
<b>RL</b>	Reflection Loss.
<b>RLC</b>	Resistance.
<b>ROS</b>	Rapport d'Onde Stationnaire.

<b>SDR</b>	Radio Logicielle Restreinte.
<b>SIR</b>	Stepped Impedance Resonator
<b>SMS</b>	Short Message Service.
<b>SNR</b>	Signal Noise Rapport.
<b>TDD</b>	Time Division Duplexing.
<b>TDMA</b>	Time Division Multiplexing Access.
<b>TOS</b>	Taux d'Onde Stationnaire.
<b>TSA</b>	Tapered Slot Antenna.
<b>UIT</b>	Union Internationale Télécommunications.
<b>ULB</b>	Ultra Large Bande.
<b>UWB</b>	Ultra-Wide Band.
<b>VariCap</b>	Variable Capacity.
<b>VNA</b>	Vector Network Analyzer.
<b>VR</b>	Virtual Reality.
<b>Wi-Fi</b>	Wireless Fidelity.
<b>WiMAX</b>	Worldwide Interoperability for Microwave Access.
<b>WLAN</b>	Wireless Local Area Network.

# **Introduction générale**

L'explosion du trafic mobile et la multiplication des objets connectés imposent aujourd'hui des exigences croissantes en termes de débit, de latence, de fiabilité et de densité de connexions. Face à ces défis, la 5G « cinquième génération des réseaux mobiles » se positionne comme une solution incontournable qui offre un compromis optimal entre portée et capacité de transmission.

Pour exploiter les fréquences de la 5G de façon efficace, la conception des systèmes radiofréquence doit évoluer. En particulier, les antennes doivent non seulement assurer un rayonnement performant, mais aussi intégrer une sélectivité fréquentielle fine pour filtrer les signaux indésirables et limiter les interférences. L'approche des « filtennas », qui consiste à fusionner directement le filtre et l'antenne dans une même structure compacte, répond à ces enjeux en réduisant l'encombrement, les pertes d'insertion et la complexité de l'architecture RF.

L'objectif ultime de ce travail est de concevoir des antennes filtrantes pour les applications 5G. Ce mémoire s'organise en trois parties principales :

Introduction aux réseaux mobiles et enjeux de la 5G, où sont présentés l'évolution des générations précédentes, les caractéristiques fondamentales de la 5G.

Étude des antennes et des filtres pour la communication sans fil, qui détaille les principes, les caractéristiques des filtres, ainsi que les concepts d'antennes filtrantes et reconfigurables.

Conception et optimisation d'antennes filtrantes, l'analyse de leurs performances sous CST Microwave Studio.

# **Chapitre I : Introduction aux réseaux mobiles de la 5G.**

## I.1 Introduction :

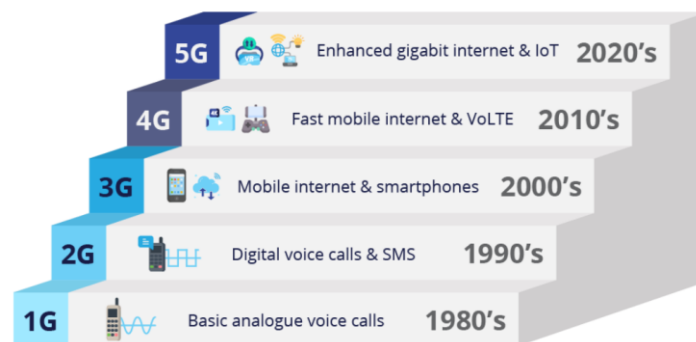
La 5G « cinquième génération des technologies de communication mobile » s'impose comme une réponse aux limitations des générations précédentes tout en ouvrant la voie à de nouvelles possibilités technologiques. Elle vise à offrir des débits de données nettement supérieurs, une latence minimale, une fiabilité accrue ainsi qu'une capacité massive de connexions simultanées.

Ce chapitre se structure en trois sections complémentaires. La première présente les objectifs techniques de la 5G en les situant par rapport aux générations précédentes, tout en analysant les bandes de fréquences qui lui sont dédiées. La deuxième section met en évidence le rôle stratégique des antennes dans les systèmes de communication sans fil, en précisant les exigences techniques nécessaires à leur performance. Enfin, la dernière section propose une étude approfondie des différents types d'antennes spécifiquement conçues pour répondre aux besoins élevés en matière de connectivité, de capacité et d'efficacité énergétique dans le contexte de la 5G.

## I.2 Les défis de la 5G :

### I.2.1 L'évolution des communications mobiles :

L'évolution des réseaux mobiles constitue l'un des piliers majeurs du développement des technologies de l'information et de la communication. Chaque génération (de la 1G à la 5G) reflète une avancée technologique significative en matière de transmission, de traitement de données et de couverture réseau. Cette progression continue a permis de répondre aux besoins croissants des utilisateurs en matière de débit, de mobilité, de qualité de service et de sécurité. L'évolution des communications mobiles est représentée dans la figure I-1.



*Figure I-1: Evolution des communications mobiles. [1]*

### **I.2.1.1 La 1G : l'ère des communications analogiques.**

La première génération des réseaux cellulaires, ou 1G, est apparue à la fin des années 1970 et s'est généralisée dans les années 1980. Basée sur une transmission analogique, cette technologie permettait uniquement les communications vocales. Les signaux, modulés à des fréquences radio, étaient sensibles aux interférences et à la dégradation, entraînant une qualité audio souvent instable. De plus, l'absence d'encodage numérique limitait les possibilités de traitement et de sécurisation des données.

### **I.2.1.2 La 2G et 2.5G : la transition vers le numérique et l'introduction des services de données.**

L'avènement de la 2G au début des années 1990, avec la norme GSM « Global System for Mobile Communications », marque le passage aux communications numériques. Ce saut technologique a permis la transmission sécurisée de la voix et des premières données, tout en introduisant des fonctionnalités aujourd'hui fondamentales : SMS, itinérance internationale, appels en conférence, mise en attente et tarification basée sur les services. La sécurité s'est améliorée grâce à l'authentification des stations mobiles et au chiffrement des communications.

Entre 2000 et 2003, la 2.5G, avec les technologies GPRS « General Packet Radio Service » et EDGE « Enhanced Data Rates for GSM Evolution », a introduit la commutation par paquets, facilitant l'accès à Internet et offrant une connexion plus stable et continue. Cette évolution a également permis une facturation basée sur le volume de données, amorçant la transition vers les services à valeur ajoutée.

### **I.2.1.3 La 4G : un réseau tout-IP et des performances accrues.**

La quatrième génération, lancée à partir de 2010, repose sur une architecture intégralement basée sur IP. Son objectif principal était de proposer un accès à haut débit mobile, de l'ordre du gigabit par seconde, tout en améliorant la sécurité, la qualité de service et en réduisant les coûts liés à la voix, aux données et aux services multimédias. La norme LTE (Long Term Evolution), qui caractérise la 4G, abandonne la commutation de circuits au profit d'un modèle exclusivement basé sur la commutation de paquets.

Cependant, LTE ne répondait pas pleinement aux exigences de l'UIT en matière de performances 4G, ce qui a conduit à l'émergence de LTE-Advanced, une version améliorée intégrant des technologies comme le MIMO (Multiple Input Multiple Output) et l'agrégation

de porteuses. La 4G s'est appuyée sur plus de 40 bandes de fréquences à l'échelle mondiale, posant ainsi les bases techniques pour la 5G.

#### **I.2.1.4 La 5G : vers une connectivité massive et intelligente.**

La cinquième génération, ou 5G, dont le déploiement commercial a débuté autour de 2020, représente une évolution majeure tant sur le plan technologique que sur celui des usages. Elle promet des débits bien supérieurs à ceux de la 4G, une latence ultra-faible (inférieure à 1 ms), une connectivité massive et une fiabilité élevée, répondant ainsi aux besoins de nouvelles applications critiques et en temps réel.

La 5G repose sur plusieurs innovations clés, notamment le beamforming, qui permet de diriger dynamiquement les signaux vers les utilisateurs pour une couverture optimisée et le massive MIMO, qui améliore significativement la capacité et l'efficacité spectrale. Elle exploite à la fois les bandes sub-6 GHz pour assurer une large couverture et les bandes millimétriques (mmWave) pour atteindre des débits très élevés dans des zones à forte densité d'utilisateurs.

Un des apports majeurs de la 5G réside dans sa capacité à soutenir le développement de l'Internet des objets (IoT) à grande échelle. Elle permet une communication fluide entre des milliards d'appareils connectés, tout en assurant une faible consommation énergétique et une latence réduite, des caractéristiques essentielles pour des applications industrielles, médicales ou urbaines (villes intelligentes, véhicules autonomes, dispositifs médicaux connectés, etc.) [2].

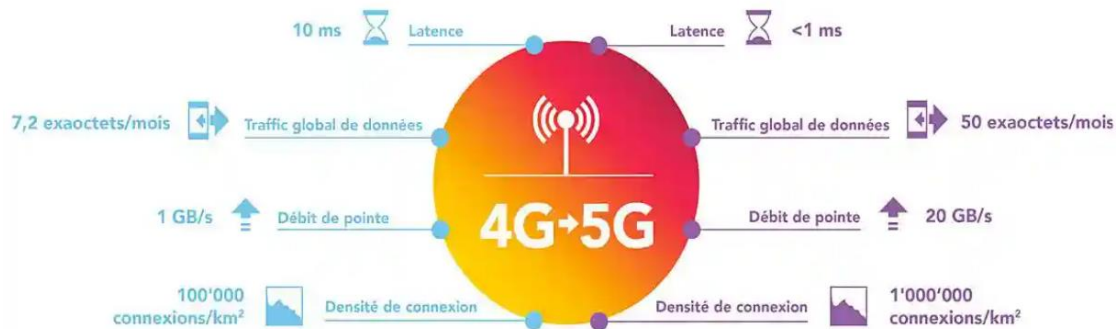
Les figures I-2 et I-3 illustrent respectivement, l'architecture proposée de la 5G ainsi qu'un tableau comparatif entre les différentes générations des réseaux mobiles.



**Figure I-2 : Architecture du réseau 5G.[3]**

Comparaison	2G	3G	4G	5G
Année d'introduction	1993	2001	2009	2018
Technologie	GSM	WCDMA	LTE, WiMAX	MIMO ,mmWave
Système d'accès	TDMA ,CDMA	CDMA	CDMA/OFDMA	OFDM ,BDMA
Type de communication	Commutation par circuit pour la voix et commutation par paquets pour les données	Commutation par paquets (et par circuits au début de la génération)	Commutation par paquets	Commutation par paquets
Service Internet	Bande étroite	Bande large	Ultra large bande	World Wide web sans fil
Bande passante	25MHz	25MHz	100MHz	30GHz à 300GHz
Avantage	Fonctionnalités multimédia (SMS, MMS), accès à Internet et SIM introduite	Vitesse	Transferts à haute vitesse, mobilité mondiale	Vitesses extrêmement élevées, faible latence
Application	Appels vocaux, messages courts	Vidéoconférence, télévision mobile, GPS	Applications à grande vitesse, télévision mobile, appareils portables	Streaming vidéo haute résolution, commande à distance de véhicules, robots et procédures médicales

**Figure I-3:** Tableau comparatif entre les différentes générations du réseau mobile.[4]



**Figure I-4:** Comparaison entre la 4G et la 5G.[5]

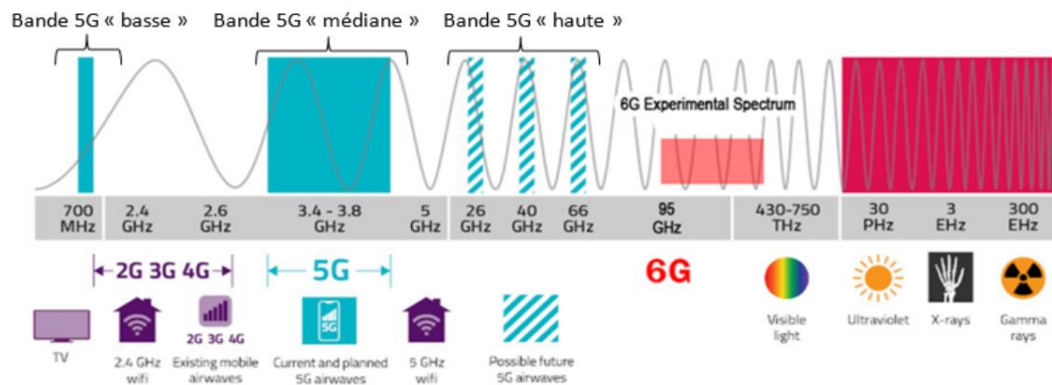
## I.2.2 Approches technologiques et solutions envisagées pour le déploiement de la 5G :

Les objectifs techniques associés à la norme 5G visent une amélioration radicale des performances en matière de connectivité : des débits jusqu'à 1000 fois supérieurs à ceux des réseaux précédents, une latence divisée par un facteur de 45, et une fiabilité renforcée des communications. Ces caractéristiques permettent non seulement une meilleure expérience utilisateur, mais aussi l'émergence de nouveaux usages critiques dans des domaines tels que la santé connectée, l'industrie 4.0, les véhicules autonomes ou encore les infrastructures intelligentes. [6]

### I.2.2.1 Les bandes de fréquences exploitées :

Le déploiement des réseaux 5G repose sur une stratégie de gestion du spectre qui nécessite un compromis entre couverture géographique et capacité de transmission. En effet, les bandes de fréquences basses sont privilégiées pour maximiser la couverture, en raison de

leur capacité à pénétrer les obstacles et à se propager sur de longues distances. À l'inverse, les bandes de fréquences élevées, bien que plus sensibles aux atténuations et à la diffraction, sont recherchées pour leur largeur de bande disponible, essentielle pour assurer une haute capacité et des débits élevés. [7]



**Figure I-5: Spectre électromagnétique.[8]**

Dans cette optique, la bande des 3,4 à 3,8 GHz communément appelée « bande des 3,5 GHz » s'impose comme la bande pivot du déploiement initial de la 5G. Elle constitue un compromis optimal entre portée et performance, permettant à la fois une couverture satisfaisante et une capacité suffisante pour les services à forte demande en données.

Les bandes dites « millimétriques » (au-delà de 24 GHz), bien qu'offrant des débits et une densité de données encore plus élevés, présentent une portée très limitée et sont fortement atténuées par les obstacles. Elles sont principalement destinées aux environnements urbains denses ou aux applications industrielles spécifiques [9].

Le tableau I.1 présente un récapitulatif des différentes bandes de fréquences exploitées dans les communications mobiles, en mettant en évidence leurs principales caractéristiques telles que la capacité de pénétration, la portée, le débit, l'attribution aux opérateurs ainsi que leur sensibilité au beamforming.

Fréquence	Pénétration à l'intérieur	Portée	Débit	Attribution aux opérateurs	Sensibilité au Beamforming
<b>700 MHz</b>	Excellente	Excellente	Modéré	Déjà attribuée depuis 2015	Faible
<b>2.1 GHz</b>	Intermédiaire	Appréciable	Satisfaisant	Attribuée à tous les opérateurs mobiles	Modérée

<b>3.5 GHz</b>	Bonne	Moyenne	Elevé	Attribuée à tous les opérateurs mobiles	Elevée
<b>Bandes de fréquence millimétrique 24 GHz, 26 GHz</b>	Limitée	Courte	Très élevé	Attribuée à tous les opérateurs mobiles	/
<b>47 et 60 GHz</b>				Pas encore attribué	

*Tableau I-1: Tableau comparatif des différentes bandes de fréquences exploitées.[9]*

### **I.2.2.2 Modulation et techniques d'accès multiple dans les réseaux mobiles :**

L'évolution des réseaux mobiles à travers les générations successives s'est accompagnée d'innovations majeures en matière de modulation et de techniques d'accès multiple, permettant de répondre à des exigences croissantes en termes de débit, de capacité et de qualité de service.

La première génération (1G) reposait sur un système de communication analogique, utilisant le multiplexage par répartition en fréquence (FDMA) pour séparer les canaux. Ce système était principalement dédié aux communications vocales, avec une capacité d'abonnés et de trafic fortement limitée.

La deuxième génération (2G) a marqué la transition vers une architecture entièrement numérique. Elle combinait FDMA et TDMA (multiplexage temporel), permettant d'optimiser l'utilisation du spectre et d'atteindre des débits de l'ordre de 64 kbps. Outre l'amélioration de la qualité vocale, la 2G a introduit des services de données élémentaires tels que la messagerie SMS. La troisième génération (3G), quant à elle, a introduit la commutation de paquets, permettant un transfert plus efficace des données et des débits pouvant atteindre jusqu'à 2 Mbps. Cette évolution a rendu possible l'essor de l'Internet mobile et des services multimédias.

La quatrième génération (4G) a permis une rupture technologique avec l'adoption du multiplexage orthogonal par répartition de fréquence (OFDM) et de l'accès multiple par répartition de code (CDMA). L'OFDM, basé sur l'utilisation de sous-porteuses orthogonales, a permis une transmission plus robuste face aux interférences et aux échos. Le CDMA, quant à lui, repose sur l'étalement de spectre pour permettre l'accès simultané de multiples

utilisateurs. Ces avancées ont permis d'atteindre des débits de l'ordre de 100 Mbps en mobilité.

La cinquième génération (5G) reprend le principe de l'OFDMA « Orthogonal Frequency Division Multiple Access », déjà présent en 4G, mais l'enrichit par une plus grande flexibilité dans le découpage temporel et fréquentiel, permettant de s'adapter à une diversité d'usages (haut débit mobile, communications ultra-fiables à faible latence, Internet des objets massifs). Cette adaptabilité est essentielle pour satisfaire les besoins croissants en bande passante, notamment avec la montée en puissance des smartphones, des applications immersives comme la réalité virtuelle, et la généralisation des environnements intelligents interconnectés. [10]

### **I.3 Les technologies utilisées dans la 5G :**

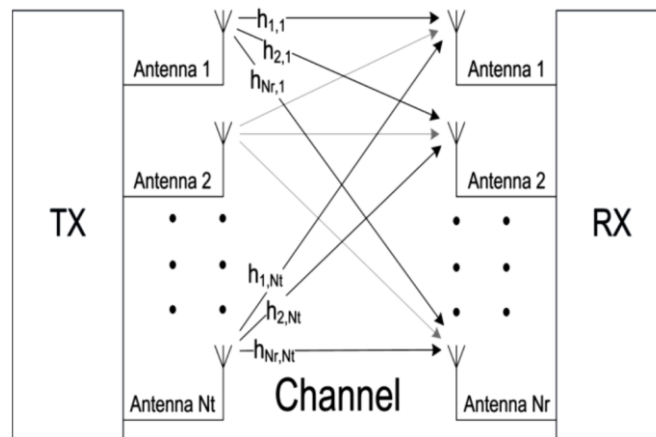
#### **I.3.1 Massive MIMO (Multiple Input Multiple Output) :**

Le concept de MIMO (Multiple Input Multiple Output), introduit dans les années 1990, s'est imposé comme l'une des technologies fondamentales pour augmenter la capacité des systèmes de communication sans fil sans nécessiter de ressources spectrales supplémentaires. Il repose sur l'utilisation simultanée de plusieurs antennes à l'émission et à la réception, créant ainsi un système capable d'exploiter pleinement la diversité spatiale du canal radio.

Contrairement aux systèmes classiques à antenne unique, un système MIMO à  $M$  antennes émettrices et  $N$  antennes réceptrices permet d'établir jusqu'à  $M \times N$  chemins de transmission indépendants, augmentant ainsi la fiabilité et la capacité globale du système. À l'origine, l'utilisation de réseaux d'antennes visait principalement à améliorer le rapport signal sur bruit (SNR) à travers des techniques telles que le beamforming, concentrant l'énergie rayonnée dans des directions spécifiques.

Par la suite, les antennes multiples ont été exploitées pour introduire une diversité spatiale, permettant de compenser les effets néfastes du fading multipath. Grâce à une réception simultanée des signaux propagés sur différentes trajectoires, il devient possible d'additionner ces signaux de manière constructive, réduisant ainsi significativement le taux d'erreur binaire (BER) du système. Toutefois, cette diversité spatiale seule offre des gains limités. [11] [12]

La 5G introduit une version évoluée de cette technologie : le Massive MIMO, qui fait appel à des ensembles d'antennes beaucoup plus nombreux (parfois plusieurs dizaines voire centaines), particulièrement dans les bandes de fréquences élevées comme les ondes millimétriques [13] [14].



*Figure I-6: Système MIMO.[15]*

### **I.3.2 Full Duplex :**

Dans le cadre de la 5G, la capacité à émettre et recevoir simultanément des signaux sur une même bande de fréquence, appelée Full Duplex (FD), constitue une avancée majeure par rapport aux générations précédentes de réseaux sans fil.

Le Full Duplex permet de doubler le débit du système par rapport aux solutions en demi-duplex. [12] [16]

### **I.3.3 Small Cells :**

Une Small Cell est une station de base à faible puissance et à portée réduite, conçue pour desservir des zones géographiques restreintes telles que les centres commerciaux, les gares, les campus, ou les environnements urbains denses.

Contrairement aux Macro Cells traditionnelles, qui couvrent de larges zones avec une capacité limitée par utilisateur, les Small Cells permettent une densification du réseau en rapprochant les points d'accès des utilisateurs finaux. Cette approche, connue sous le nom de network densification, permet d'améliorer la qualité de service (QoS), d'augmenter le débit par utilisateur et de réduire la latence, en particulier dans les environnements à forte densité d'appareils.

Les Small Cells jouent également un rôle central dans l'exploitation des bandes de fréquences millimétriques (mmWave), dont la portée est limitée et qui sont particulièrement sensibles aux obstacles physiques. Le déploiement massif de petites cellules est donc crucial pour exploiter efficacement ces bandes et fournir les débits très élevés attendus de la 5G. [17]

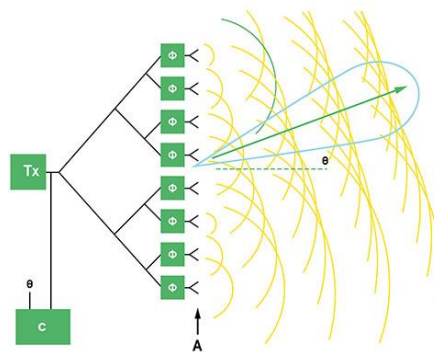


**Figure I-7: Small Cells.**[18]

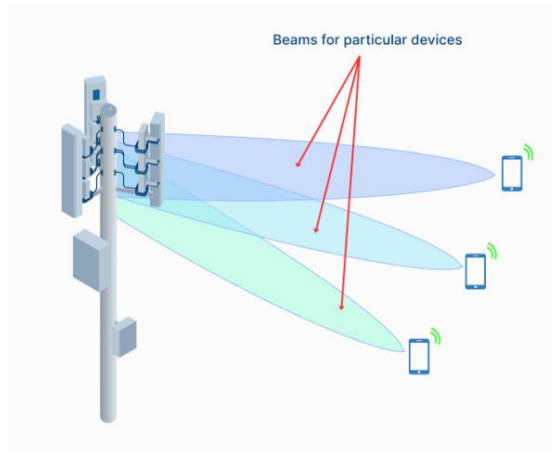
### **I.3.4 Formation de faisceaux (Beamforming) :**

Contrairement aux antennes omnidirectionnelles classiques qui émettent dans toutes les directions, le beamforming consiste à orienter dynamiquement le diagramme de rayonnement de l'antenne vers une direction précise, afin de concentrer l'énergie électromagnétique vers l'utilisateur cible tout en atténuant les signaux indésirables. [19]

Cette technique repose sur l'utilisation d'antennes intelligentes reconfigurables, capables de modifier leur diagramme de rayonnement en fonction de l'environnement et des conditions du canal. Cela permet d'améliorer le débit, l'efficacité énergétique, la portée de transmission, et de réduire les interférences entre utilisateurs. [20]



**Figure I-8: Systèmes d'antennes à réseau phasé permettant la formation et la direction de faisceaux.**[21]



**Figure I-9:** Système d'antenne à formation de faisceaux (technique 5G).[22]

#### **I.4 Conclusion :**

Ce chapitre a retracé l'évolution des communications mobiles jusqu'à l'avènement de la 5G, une technologie de rupture qui vise à répondre à des besoins toujours plus exigeants en matière de connectivité, de débit, de latence et de densité d'utilisateurs. En explorant les différentes approches technologiques adoptées (telles que le Massive MIMO, le Full Duplex, les Small Cells ou encore le Beamforming), nous avons mis en lumière les leviers techniques permettant d'atteindre les performances attendues.

Toutefois, ces avancées s'accompagnent de défis majeurs, en particulier, les systèmes d'antennes et les dispositifs de filtrage qui se trouvent au cœur des problématiques liées à la miniaturisation, à la sélectivité fréquentielle et à l'intégration fonctionnelle.

Pour cela, on va explorer dans le chapitre suivant, les fondements, les évolutions et les approches d'intégration des filtres et des antennes micro-ruban dans une seule structure qu'on appellera: les antennes filtrantes (filtennas), qui vont combinés à la fois, les fonctions de filtrage et de rayonnement, répondant ainsi aux exigences strictes imposées par les systèmes 5G.

**Chapitre II : Etude des  
antennes et des filtres pour  
les systèmes de  
communication.**

## **II.1 Introduction:**

Après avoir présenté les enjeux et les défis technologiques liés au déploiement de la 5G, ce chapitre se consacre à l'étude des composants passifs essentiels aux systèmes de communication : les antennes et les filtres. Ces éléments jouent un rôle fondamental dans la transmission et la réception des signaux radiofréquences, et leur conception doit répondre à des critères stricts en termes de compacité, de sélectivité fréquentielle et d'efficacité.

Dans un premier temps, nous aborderons les principes de fonctionnement des antennes, leurs différentes typologies ainsi que leurs principales caractéristiques électromagnétiques. Nous poursuivrons avec l'étude des filtres RF, en mettant en lumière leur utilité dans le contrôle du spectre et la réduction des interférences. Enfin, nous introduirons le concept d'intégration antenne-filtre, ou filtenna, une approche innovante visant à fusionner les fonctions de rayonnement et de filtrage au sein d'une structure unique, afin de répondre aux exigences croissantes des systèmes de communication de nouvelle génération.

## **II.2 Les antennes :**

### **II.2.1 Caractéristiques des antennes :**

Une antenne est généralement décrite à travers un ensemble de paramètres techniques essentiels, parmi lesquels figurent : l'impédance d'entrée, la fréquence opérationnelle, la largeur de bande, les propriétés de rayonnement telles que la directivité et le gain, le diagramme de rayonnement, ainsi que la polarisation.

#### **II.2.1.1 Impédance, fréquence de fonctionnement et bande passante :**

Dans le domaine des télécommunications, une antenne peut être modélisée comme un circuit résonant, dont la fréquence de résonance fondamentale est déterminée par les paramètres inductifs (L) et capacitifs (C) inhérents à sa structure géométrique, à ses dimensions physiques ainsi qu'aux composants additionnels qui lui sont associés. Cette fréquence de résonance constitue un facteur clé dans le comportement électromagnétique de l'antenne.

Lorsqu'elle est intégrée à un système, l'antenne est typiquement connectée aux autres dispositifs par l'intermédiaire d'une ligne de transmission normalisée, dont l'impédance caractéristique est généralement de  $50\Omega$  ou  $75\Omega$ , selon les standards utilisés. L'impédance d'entrée de l'antenne, qui varie en fonction de la fréquence, permet de caractériser sa réponse

fréquentielle. Cette variation joue un rôle déterminant dans la définition de la bande passante opérationnelle de l'antenne, c'est-à-dire la plage de fréquences pour laquelle l'adaptation d'impédance est suffisante pour garantir un transfert de puissance optimal.

La réponse fréquentielle d'une antenne est exprimée à travers l'évolution de son impédance d'entrée  $Z_{in}(\omega)$ , qui se présente sous forme complexe :

$$Z_{in}(\omega) = R(\omega) + jX(\omega)$$

où  $\omega = 2\pi f$ , désigne la pulsation,  $R(\omega)$  la composante résistive, et  $X(\omega)$  la composante réactive (inductive ou capacitive) de l'impédance.

Le coefficient de réflexion  $\Gamma$ , qui traduit la proportion du signal réfléchi par l'antenne par rapport au signal incident, dépend de l'impédance d'entrée de l'antenne et de l'impédance caractéristique  $Z_0$  de la ligne de transmission. Il est défini par la relation :

$$\Gamma = \frac{Z_{in}(\omega) - Z_0}{Z_{in}(\omega) + Z_0}$$

À partir de ce coefficient, les pertes par réflexion (Reflection Loss, RL) peuvent être exprimées en décibels par :

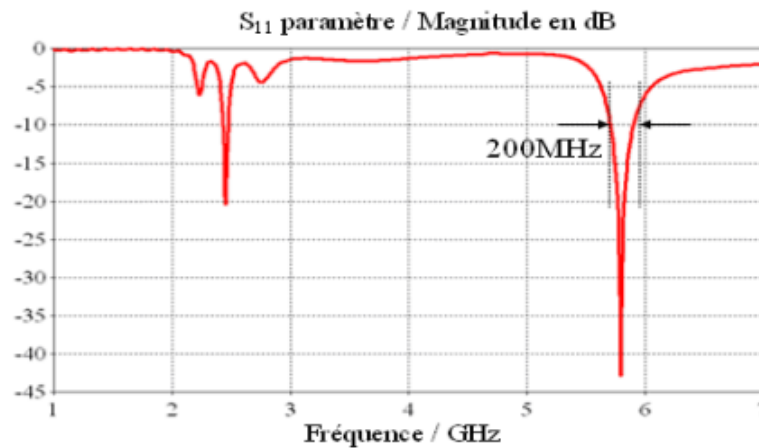
$$RL = -20 \log|\Gamma|$$

Le taux d'ondes stationnaires (TOS), indicateur du niveau d'adaptation entre l'antenne et la ligne de transmission, est donné par :

$$TOS = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|}$$

L'impédance d'entrée d'une antenne est souvent représentée sur un diagramme de Smith, permettant une visualisation simultanée de la phase, de l'amplitude et du caractère inductif ou capacitif du comportement de l'antenne. À la fréquence de résonance, cette impédance devient purement réelle, et la courbe associée coupe alors l'axe réel du diagramme.

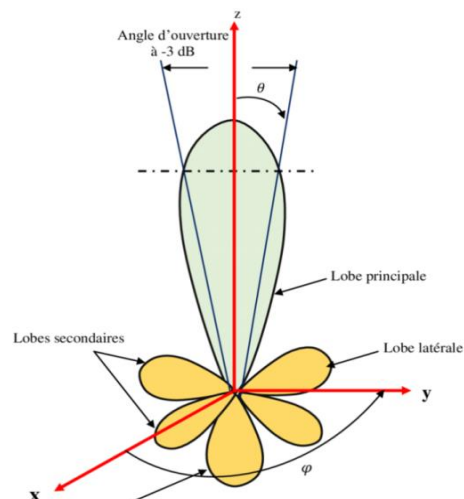
La bande passante d'une antenne correspond à l'intervalle de fréquences dans lequel celle-ci présente une adaptation acceptable, généralement définie comme la plage où  $|\Gamma|$  est inférieur à -10 dB, soit un TOS inférieur à 2. [23] [24]



**Figure II-1:** Exemple de coefficient de réflexion et de la bande passante associée.[23]

### II.2.1.2 Caractéristiques de rayonnement :

Les diagrammes de rayonnement illustrent, en champ lointain, la distribution spatiale de l'énergie émise ou reçue par une antenne. Ils représentent l'intensité rayonnée, c'est-à-dire la puissance par unité d'angle solide, normalisée et exprimée en décibels, en fonction de l'angle d'observation. À partir de ces courbes, on détermine l'ouverture à -3 dB, correspondant à l'intervalle angulaire sur lequel la puissance rayonnée reste au-dessus de la moitié de sa valeur maximale. [25] [26]

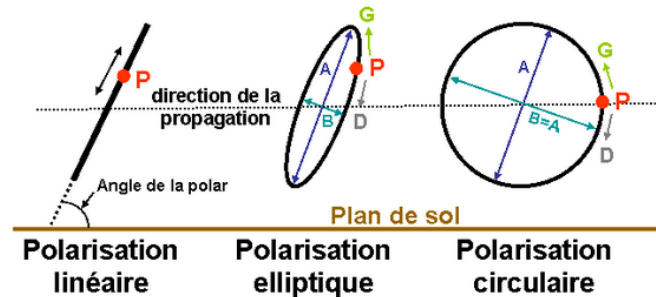


**Figure II-2:** Diagramme de rayonnement classique d'une antenne directive.[27]

### II.2.1.3 Polarisation :

La polarisation d'une antenne désigne l'orientation du vecteur champ électrique  $\vec{E}$  de l'onde électromagnétique qu'elle émet ou qu'elle capte, en particulier dans la direction de son lobe principal de rayonnement. Lorsque le vecteur  $\vec{E}$  conserve une direction constante au cours du temps, la polarisation est dite linéaire, pouvant être orientée horizontalement ou

verticalement selon l'alignement du champ. En revanche, si la direction et l'amplitude de  $\vec{E}$  varient de manière à décrire une ellipse dans le plan de polarisation, on parle alors de polarisation elliptique. Ce cas général inclut comme cas particuliers les polarisations circulaires, obtenues lorsque l'ellipse devient un cercle. [23] [28]



*Figure II-3: Types de polarisation.[29]*

## II.2.2 Types d'antennes :

Les antennes se déclinent en plusieurs catégories selon leur géométrie, leur directivité, la configuration du faisceau rayonné ainsi que leur bande passante. Une première grande famille est constituée des antennes filaires.

### II.2.2.1 Antennes filaires :

Les antennes filaires sont constituées de conducteurs métalliques fins, généralement de forme rectiligne ou courbée, et sont caractérisées par une densité linéique de courant le long de leur structure. L'exemple le plus élémentaire de cette catégorie est le dipôle, composé de deux segments conducteurs symétriques disposés en opposition. Ces antennes peuvent être simples ou organisées en réseaux pour former des structures plus directives.

Parmi les configurations couramment utilisées, on retrouve :

- Les dipôles (demi-onde, plié, etc.).
- Les monopôles, souvent montés au-dessus d'un plan de masse.
- Les boucles (circulaires ou rectangulaires).
- Ainsi que des agencements plus complexes tels que l'antenne Yagi-Uda, l'antenne en V, les antennes en losange, les rideaux d'antennes, ou encore les antennes hélicoïdales.

Ces structures sont largement employées dans les systèmes de communication radio en raison de leur simplicité de conception, de leur efficacité et de leur adaptation facile à différentes bandes de fréquence. [30] [31]



*Figure II-4: Antenne Filaire & antenne Yagi.[32][33]*

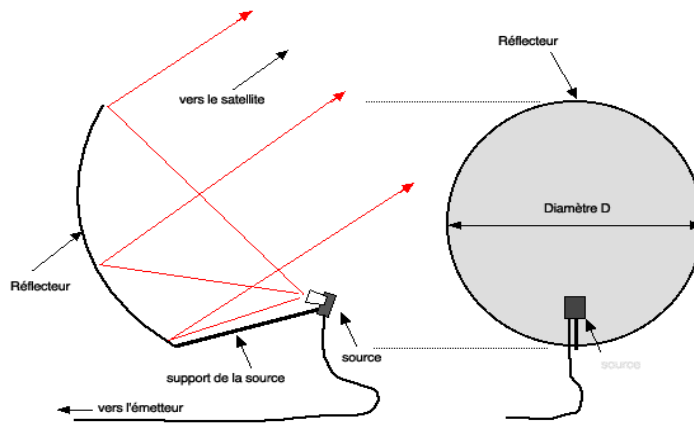
### **II.2.2.2 Antennes paraboliques :**

Les antennes paraboliques appartiennent à la catégorie des antennes à ouverture, connues pour leur forte directivité. Elles fonctionnent selon le principe de la concentration des ondes électromagnétiques par un réflecteur parabolique, dont la taille est généralement grande par rapport à la longueur d'onde du signal exploité. Cela permet d'obtenir un faisceau très étroit, idéal pour les liaisons point à point et les systèmes radar.

Le système est composé d'un réflecteur de forme parabolique et d'un élément source, généralement un cornet d'alimentation, positionné au foyer du réflecteur. Ce dernier doit répondre à plusieurs exigences fondamentales :

- Collecter efficacement les ondes focalisées par la parabole.
- Minimiser la réception des bruits de fond et des signaux indésirables.
- Conserver une faible contribution de bruit interne, afin de ne pas dégrader le rapport signal/bruit du système global.

Grâce à ces caractéristiques, les antennes paraboliques sont largement utilisées dans les communications satellite, la radio-télescopie, et les systèmes radar à haute précision. [30] [34]



*Figure II-5 : Antenne parabolique.[35]*

### **II.2.2.3 Antenne Patch (micro-ruban) :**

#### **II.2.2.3.1 Description générale :**

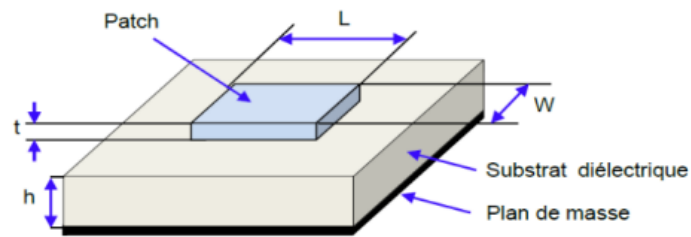
Une antenne patch est constituée d'une fine couche conductrice de forme géométrique déterminée (rectangle, disque, triangle, ou structures plus complexes), déposée sur un substrat diélectrique. Ce dernier est lui-même apposé sur un plan de masse servant de réflecteur. L'ensemble forme une structure rayonnante plane et compacte.

#### **II.2.2.3.2 Structure et fonctionnement :**

L'architecture typique comprend :

- Un élément rayonnant dont la géométrie est choisie selon les performances de rayonnement visées (fréquence, bande passante, diagramme, polarisation).
- Un ou plusieurs substrats diélectriques assurant l'espacement entre le patch et le plan de masse.
- Un plan conducteur inférieur servant de masse de référence.

Les substrats employés, comme le FR4 ou le Rogers RO4350, présentent généralement une permittivité relative modérée ( $\epsilon_r \leq 3$ ) pour favoriser le rayonnement et réduire les pertes par confinement de champ dans la cavité formée sous l'élément rayonnant.



**Figure II-6: Présentation d'une antenne imprimée.[36]**

L : Longueur du patch.

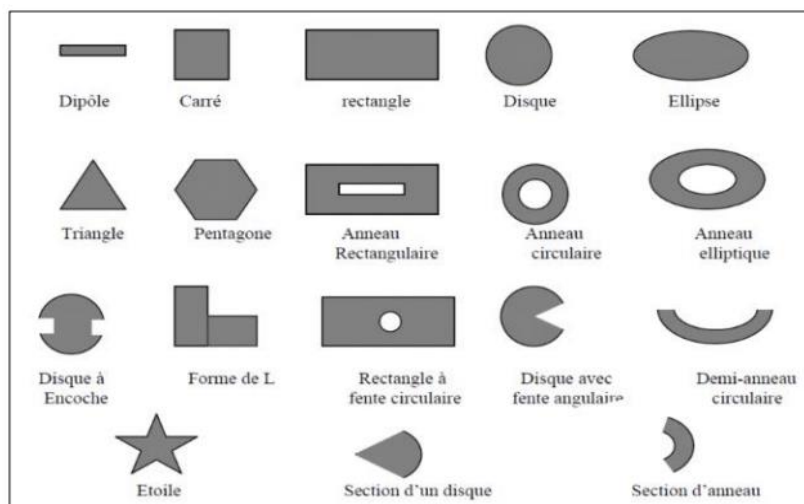
t : épaisseur du patch.

W : Largeur du patch.

h : épaisseur du substrat.

### II.2.2.3.3 Différentes formes d'antennes micro-ruban :

Les antennes patch se distinguent également par la flexibilité géométrique de leur élément rayonnant.



**Figure II-7 : Différentes formes d'antennes micro-ruban.[37]**

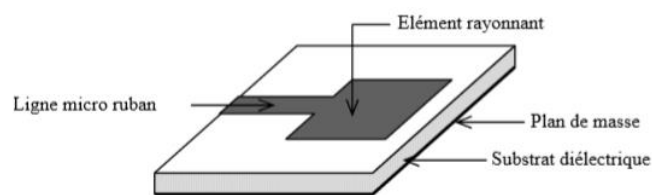
### II.2.2.3.4 Techniques d'alimentation des antennes Patch :

L'alimentation constitue une étape critique dans la conception des antennes patch, car elle influe directement sur l'adaptation d'impédance, le rendement de rayonnement et la bande passante. Plusieurs techniques sont couramment utilisées, classées selon qu'elles impliquent un contact direct ou un couplage par proximité avec l'élément rayonnant.

### II.2.2.3.4.1 Alimentations par contact :

#### II.2.2.3.4.1.1 Alimentation par une ligne micro-ruban :

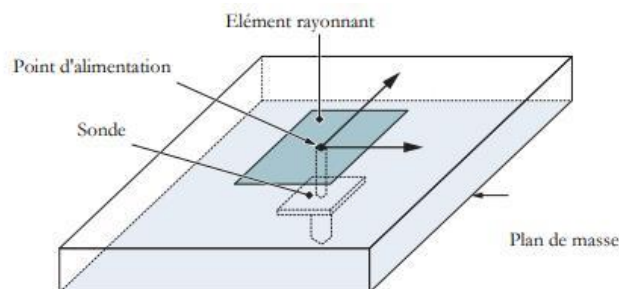
Dans cette configuration, une ligne de transmission micro-ruban, généralement de  $50\Omega$ , est directement connectée au bord du patch rayonnant. Elle est gravée sur le même plan que l'antenne, ce qui permet de réaliser une structure totalement plane, compacte et compatible avec les circuits imprimés. Cette méthode est simple à mettre en œuvre et peu coûteuse, mais elle peut présenter un rayonnement parasite au niveau de la ligne. [30] [38] [39]



*Figure II-8 : Antenne imprimée alimentée par une ligne micro-ruban.[40]*

#### II.2.2.3.4.1.2 Alimentation coaxiale directe :

Ce type d'alimentation utilise une ligne coaxiale traversant le substrat et le plan de masse. Le conducteur central est connecté à un point spécifique du patch, généralement positionné sur l'axe de symétrie, afin d'assurer une bonne adaptation d'impédance. Le conducteur externe est quant à lui soudé au plan de masse. Cette technique offre une bonne isolation entre la ligne d'alimentation et le champ rayonné, mais nécessite un perçage précis du substrat. [30] [38]

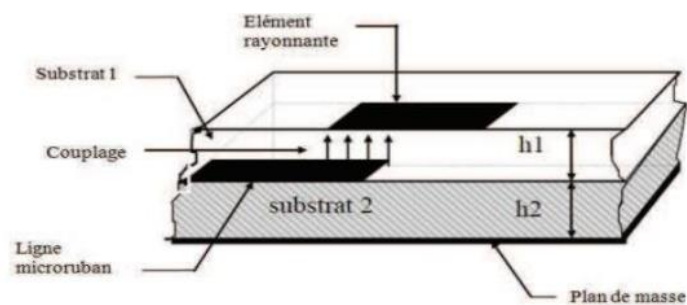


*Figure II-9: Alimentation coaxiale directe.[41]*

## II.2.2.3.4.2 Alimentations par proximité:

### II.2.2.3.4.2.1 Alimentation par couplage électromagnétique:

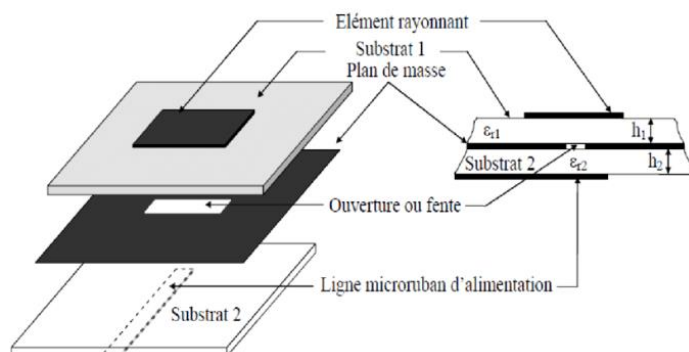
Une ligne micro-ruban de couplage est placée en dessous du patch rayonnant, séparée par un substrat. L'énergie est transférée par couplage électromagnétique, sans connexion physique directe. Cette méthode améliore la bande passante et réduit les interférences parasites, mais elle implique une fabrication plus complexe due à l'ajout de couches supplémentaires. [30] [39]



**Figure II-10:** Antenne Patch alimentée par couplage électromagnétique.[35]

### II.2.2.3.4.2.2 Alimentation par couplage à ouverture (fente) dans le plan de masse :

Dans cette technique, le patch rayonnant et la ligne d'alimentation sont situés de part et d'autre du plan de masse, dans lequel une fente étroite est découpée. Cette ouverture permet le transfert d'énergie de la ligne vers l'élément rayonnant par couplage. Bien qu'elle permette une bonne isolation et un élargissement de la bande passante, cette méthode exige un alignement précis de la fente avec le patch. [30] [39]



**Figure II-11:** Antenne Patch alimentée par fente.[42]

## **II.2.3 Antennes Reconfigurables :**

### **II.2.3.1 Définition et enjeux :**

Une antenne reconfigurable est un dispositif capable d'ajuster dynamiquement ses caractéristiques opérationnelles telles que la fréquence, la polarisation, la bande passante et le diagramme de rayonnement après sa fabrication. Ce réglage dynamique est possible grâce à la variation de paramètres électriques, mécaniques ou optiques, ou par l'intégration de matériaux agiles tels que les ferrites et les cristaux liquides.

### **II.2.3.2 Nécessité et avantages de la reconfiguration :**

Dans les communications mobiles, l'antenne joue un rôle central en recevant ou en émettant des ondes électromagnétiques. Contrairement aux antennes classiques, qui sont généralement limitées à une bande fréquentielle spécifique, les antennes reconfigurables permettent de couvrir plusieurs bandes ou standards (Wi-Fi, WLAN, GSM) avec une seule structure. Elles offrent ainsi une flexibilité accrue, une meilleure gestion dynamique du spectre, une réduction du nombre d'antennes nécessaires et une optimisation spatiale grâce à une diversité directionnelle améliorée. [43]

### **II.2.3.3 Techniques de reconfiguration :**

Plusieurs techniques sont employées pour reconfigurer les antennes :

**II.2.3.3.1 Reconfiguration électrique :** utilise des composants actifs tels que les diodes PIN, les diodes Varactors et les MEMS RF. La diode PIN agit comme un interrupteur rapide offrant deux états distincts (circuit ouvert ou fermé), tandis que la diode Varactor permet une variation continue de capacité, adaptée à la reconfiguration fréquentielle.

**II.2.3.3.2 Reconfiguration optique :** utilise des éléments photoconducteurs pour éviter les complications liées aux circuits électriques traditionnels et présente un temps de réponse très faible malgré un coût élevé.

**II.2.3.3.3 Reconfiguration physique :** implique une modification mécanique de la structure de l'antenne.

#### II.2.3.3.4 Matériaux agiles : intégration de matériaux dont les propriétés

électromagnétiques sont ajustables, comme les ferroélectriques ou les cristaux liquides, permettant une reconfiguration dynamique tout en minimisant la consommation énergétique et l'encombrement. [43]

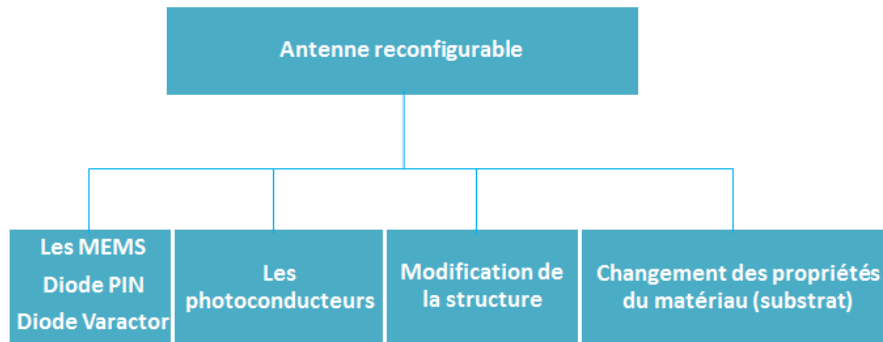


Figure II-12 : Les différentes techniques de reconfiguration. [35]

#### II.2.3.4 Types de reconfiguration :

##### II.2.3.4.1 Reconfiguration en fréquence :

Les antennes reconfigurables en fréquence, ou antennes accordables, peuvent être classées en deux catégories :

- **Continue** : ajustement continu de la fréquence via des diodes Varactor.
- **Discrète** : commutation entre bandes distinctes via des interrupteurs (diodes PIN, MEMS). Ces antennes couvrent plusieurs fréquences avec agilité fréquentielle, adaptée aux standards tels que le Wi-Fi (norme IEEE 802.11). [43] [44]

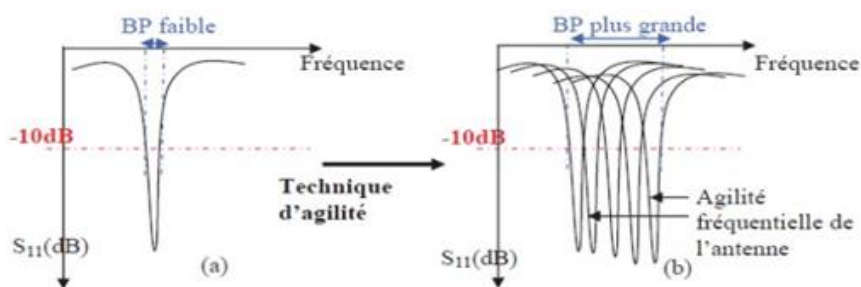
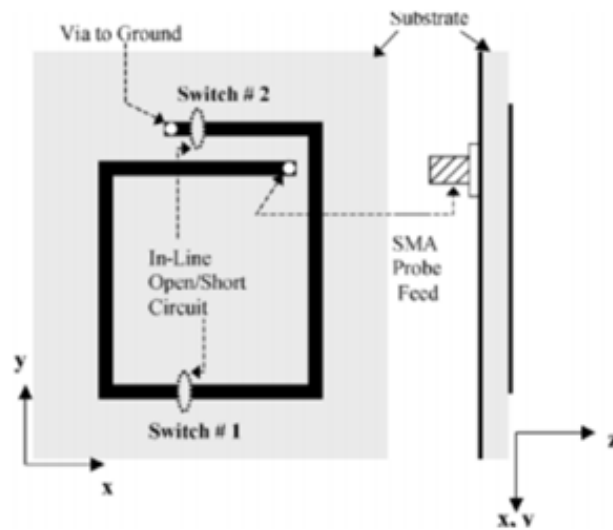


Figure II-13: Illustration de l'agilité fréquentielle.

##### II.2.3.4.2 Reconfiguration en rayonnement :

Permet de modifier dynamiquement la forme, la direction et le gain du diagramme de rayonnement pour optimiser la réception ou l'émission, éviter les interférences et améliorer la

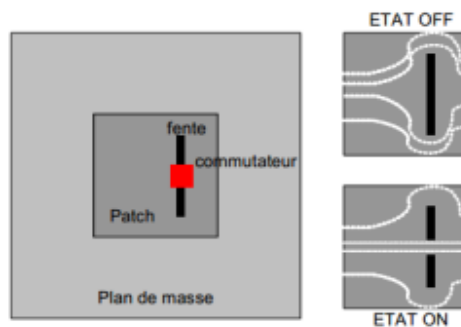
sécurité. Cette technique est particulièrement utile en radio cognitive et en systèmes mobiles. [43] [44]



*Figure II-14: La reconfiguration de rayonnement en utilisant une antenne filaire à spirale carrée.[35]*

### II.2.3.4.3 Reconfiguration en polarisation :

Ajuste l'orientation vectorielle du champ électrique sans modifier les fréquences ni le diagramme. Une méthode courante est l'utilisation de fentes commutables dans les antennes patch (antenne PASS), permettant une commutation rapide entre différentes polarisations (linéaire ou circulaire). [43] [45]



*Figure II-15: La reconfiguration de polarisation en utilisant une antenne PASS.[35]*

## II.3 Les filtres :

### II.3.1 Définition générale d'un filtre :

Dans les systèmes de télécommunications et en conception d'antennes filtrantes (filtrennas), les filtres jouent un rôle fondamental pour sélectionner ou rejeter certaines bandes de fréquences. Leur intégration au sein d'une structure radiative permet d'améliorer la

sélectivité spectrale, de réduire les interférences et d'assurer une cohabitation harmonieuse entre plusieurs services.

Un filtre est un dispositif ou un réseau électrique qui laisse passer les signaux dans une plage de fréquences souhaitée (ou plusieurs plages) tout en atténuant (ou bloquant) les composants en dehors de ces plages.

Formellement, le filtre est un réseau linéaire dont la fonction de transfert  $H(f)$  satisfait :  $|H(f)| \approx 1$  (ou une valeur constante) pour les fréquences utiles et  $|H(f)| \ll 1$  pour les fréquences à supprimer.

### **II.3.2 Classification des filtres selon la réponse en fréquence :**

On distingue essentiellement quatre types de filtres passifs, selon la zone de fréquences qu'ils laissent passer ou rejettent :

#### **II.3.2.1 Filtre passe-bas (Low-Pass Filter, LPF) :**

- **Fonction** : Laisse passer les signaux dont la fréquence  $f \leq f_c$  et atténue ceux dont  $f > f_c$ .
- **Réponse caractéristique** :  $|H(f)| \approx 1$  avec  $f \leq f_c$  ;  $|H(f)| \approx 0$  avec  $f > f_c$

#### **II.3.2.2 Filtre passe-haut (High-Pass Filter, HPF) :**

- **Fonction** : Laisse passer  $f \geq f_c$  et atténue  $f < f_c$ .
- **Réponse caractéristique** :  $|H(f)| \approx 0$  avec  $f < f_c$  ;  $|H(f)| \approx 1$  avec  $f \geq f_c$

#### **II.3.2.3 Filtre passe-bande (Band-Pass Filter, BPF) :**

- **Fonction** : Laisse passer uniquement la bande  $f_1 \leq f \leq f_2$ , où  $f_1$  et  $f_2$  sont les fréquences limites du passage.
- **Réponse caractéristique** :  $|H(f)| \approx 0$  avec  $f < f_1$  ;  $|H(f)| \approx 1$  avec  $f_1 \leq f \leq f_2$  ;  $|H(f)| \approx 0$  avec  $f > f_2$ .

#### **II.3.2.4 Filtre coupe-bande (Band-Stop Filter, BSF ou Notch Filter) :**

- **Fonction** : Rejette une bande donnée  $f_1 \leq f \leq f_2$  et laisse passer les fréquences en-dehors.

- **Réponse caractéristique :**  $|H(f)| \approx 1$  avec  $f < f_1$  ou  $f > f_2$  ;  $|H(f)| \approx 0$  avec  $f_1 \leq f \leq f_2$

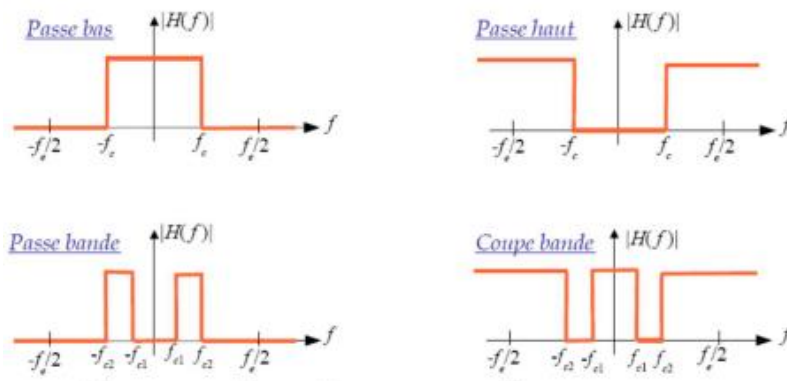


Figure II-16: Types de filtres passifs.[46]

### II.3.3 Classification selon la technologie de mise en œuvre :

#### II.3.3.1 Filtres discrets (RLC classiques) :

- **Principe :** Utilisent des composants passifs distincts (résistances, inductances, condensateurs) montés en série ou en parallèle.

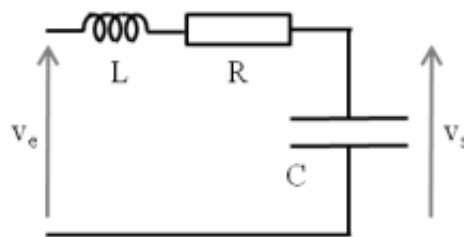
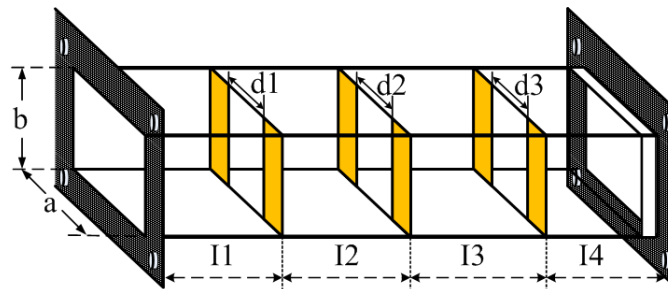


Figure II-17: Filtre RLC en série.[47]

#### II.3.3.2 Filtres répartis (lignes à guide d'ondes ou micro-ruban) :

- **Principe :** Exploitent la longueur électrique de segments de lignes de transmission pour réaliser la résonance.
- **Exemples courants :**
  - **Guide d'ondes à fentes (waveguide filters)** pour liaisons millimétriques (radar, communications satellite).
  - **Lignes micro-ruban** sur substrat (Rogers, FR-4) :
    - **Filtres à sections en  $\lambda/4$**  (quatre sections en échelle).
    - **Filtres hairpin** (résonateurs repliés en U).

- **Filtres interdigital** (résonateurs parallèle alignés).
- **Filtres en fente transversale (slotline filters)**. [48] [49]



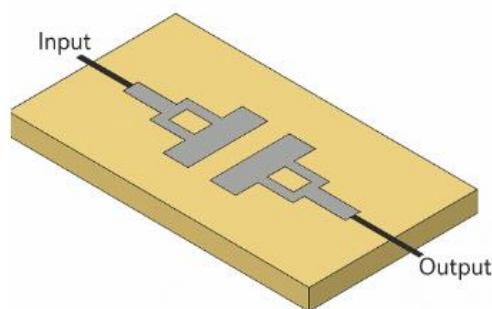
*Figure II-18 : Filtre passe-bande à guide d'ondes avec trois iris en cascade.[50]*

### II.3.4 Filtres micro-rubans :

#### II.3.4.1 Définition et fonction des filtres RF/MW :

Les filtres micro-rubans sont des circuits passifs essentiels en radiofréquence et en hyperfréquence, conçus pour transmettre une bande de fréquences désirée tout en rejetant les composantes spectrales indésirables. Ils sont utilisés dans toutes les étapes des chaînes de communication sans fil, notamment au niveau des frontaux RF, pour garantir la sélectivité, atténuer les interférences et minimiser les pertes hors bande.

Ces filtres se distinguent par leur compatibilité avec les technologies planaires, leur compacité, leur facilité de fabrication et leur intégration aisée sur circuits imprimés. Ils sont notamment privilégiés dans les dispositifs portables, les systèmes embarqués et les architectures 5G à haute densité spectrale. [48] [49]



*Figure II-19: Illustration schématique d'un filtre passe-bande en technologie micro-ruban à résonateurs couplés.[49]*

### II.3.4.2 Principaux types de filtres micro-ruban :

Différentes topologies de filtres micro-rubans ont été développées pour répondre à des critères spécifiques de bande passante, de sélectivité, de facteur de qualité, de taille ou encore de complexité de fabrication. Parmi les structures les plus répandues, on distingue :

#### II.3.4.2.1 Filtre hairpin ou Comblin (en U) :

- **Description :** Particulièrement adaptés aux designs compacts, utilisent des résonateurs quart-d'onde repliés en forme de U, couplés latéralement pour réaliser un filtre passe-bande. [49] [51]

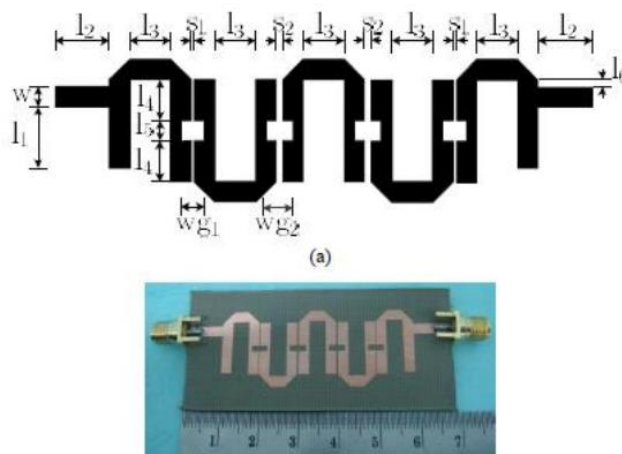


Figure II-20 : Exemple d'un filtre Hairpin micro-ruban.[52]

#### II.3.4.2.2 Filtre interdigital :

- **Description :** Série de lignes quart d'onde parallèles, couplées entre elles ; l'alimentation se fait généralement sur l'un des bords externes.
  - **Avantages :** Large bande passante, pente d'atténuation raide.
  - **Limitation :** Taille légèrement plus grande qu'un hairpin pour le même ordre, complexité de couplage.
- [48] [49]

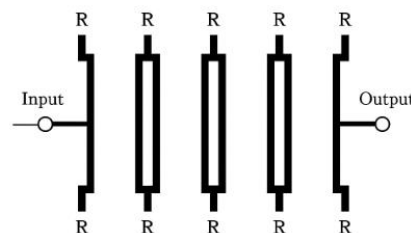


Figure II-21 : Exemple d'un filtre interdigital micro-ruban.[49]

### II.3.4.2.3 Filtre en ligne couplée CLL :

- **Description :** Résonateurs en boucle (Loop) ou anneau, couplés magnétiquement ou capacitivement.
- **Avantages :** Bonnes performances en bande étroite et sont adaptés à des fréquences élevées, très bonne isolation hors bande, bande passante ajustable par géométrie de boucle.
- **Limitation :** Géométrie plus complexe, dimensions parfois supérieures. [49] [53]

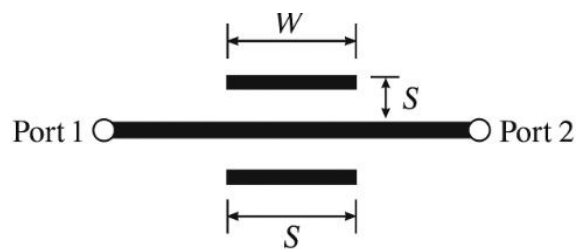


Figure II-22: Filtre passe-bande à lignes couplées.[49]

### II.3.4.2.4 Filtre en fente (Slotline Filter) :

- **Description :** Fente découpée dans le plan de masse, formant un résonateur parallèle ou série pour filtrer une bande.
- **Avantages :** Intégration facile sous un patch (filtenna), large bande passante possible.
- **Limitation :** Contrôle précis de l'impédance sur fente plus délicat, perte de planéité. [48] [54]

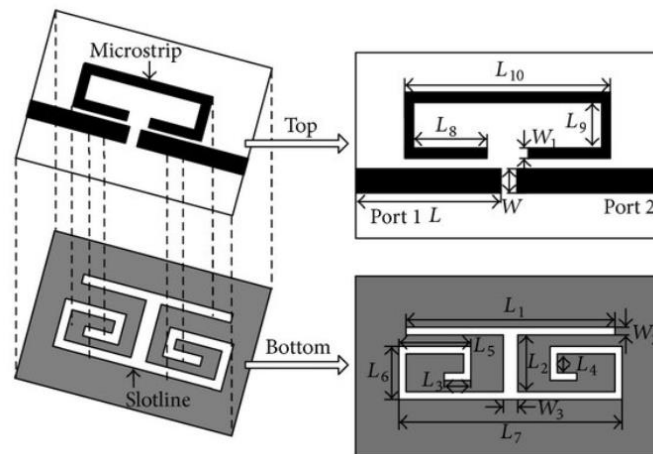


Figure II-23: Filtre en fentes.[55]

### II.3.4.2.5 Filtre exponentiel ou TPSA (Tapered Parallel-Stripline Array) :

- **Description** : Réseau de lignes parallèles dont l'espacement ou la largeur varie exponentiellement.
- **Avantages** : Bande passante très large (UWB), adaptation d'impédance progressive.
- **Limitation** : Conception complexe, nécessite substrat spécial pour faible perte. [49] [56]

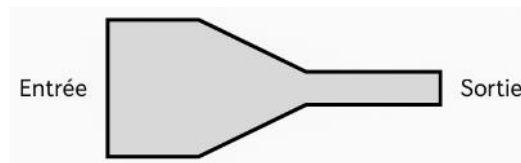


Figure II-24: Filtre exponentiel.[48]

### II.3.4.2.6 Filtres à résonateurs en anneau ouvert (Open-Loop Resonator)

**Resonator**) : ces structures compactes permettent une miniaturisation efficace et un bon contrôle des pôles de transmission. [49] [53]

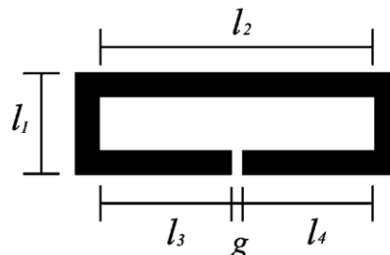


Figure II-25 : Filtre à résonateurs en anneau ouvert.[57]

### II.3.4.2.7 Filtres à impédance étagée (SIR, Stepped Impedance Resonator)

**Resonator**) : ils utilisent des sections alternées de haute et basse impédance pour réduire la taille tout en contrôlant les harmoniques. [58] [59]

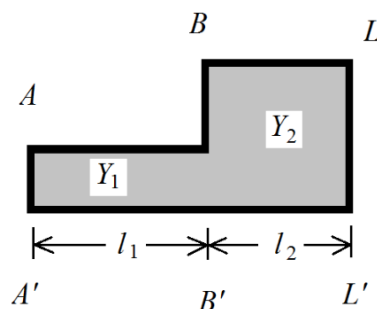


Figure II-26: Filtre à impédance étagée composé de deux lignes micro-ruban.[60]

**II.3.4.2.8 Filtres à stubs** : intègrent des éléments en court-circuit ou en circuit ouvert perpendiculaires à la ligne principale, permettant une syntonisation fine des fréquences de coupure. [48] [49]

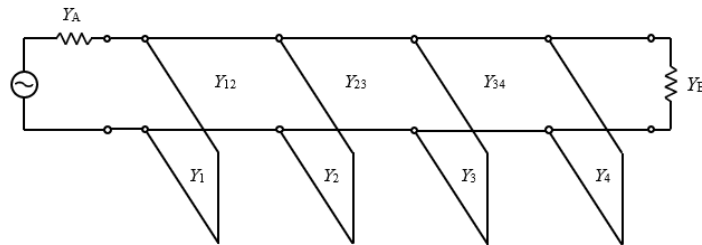


Figure II-27 : Schéma d'un filtre passe-bande à Stubs en court-circuit d'ordre 4.[49]

**II.3.4.3 Exemples de spécifications et paramètres clés :**

Type de filtre	Ordre typique	Bande passante relative	Impédance	Applications courantes
Hairpin	2 à 5	5 % - 15 %	50 $\Omega$	Filtrennas Wi-Fi, 5G sub-6 GHz
Interdigita 1	3 à 7	10 % - 20 %	50 $\Omega$	Récepteurs satellite, Wi-Fi, 4G
CLL (Boucle)	2 à 4	5 % - 12 %	50 $\Omega$	Applications CEM, 5 GHz radar
Slotline	1 à 3	15 % - 40 %	50 $\Omega$	Filtrennas UWB, capteurs radar
TPSA (évasé)	1 à 2	> 50 %	50 $\Omega$	Systèmes UWB (0,5 - 10GHz), 5G mm-Wave

Tableau II-1: Comparaison des paramètres clés entre différents types de filtres.[48]

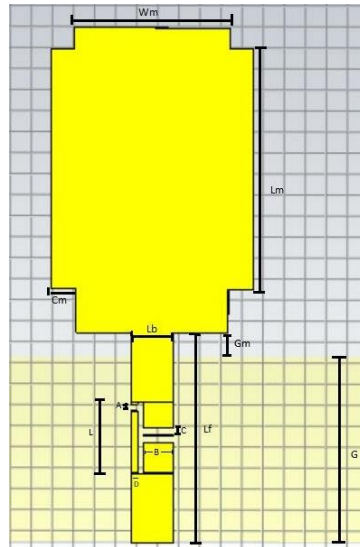
**II.4 Antennes filtrantes (Filtrennas) :**

**II.4.1 Définition et principe :**

Les antennes filtrantes, ou filtrennas, sont des dispositifs intégrés qui assurent simultanément les fonctions de filtrage et de rayonnement. Contrairement aux architectures classiques où le

filtre et l'antenne sont deux composants distincts reliés en cascade, la filtenna intègre le filtre directement dans la structure rayonnante, réduisant ainsi l'encombrement, les pertes d'insertion et les coûts d'assemblage.

Le principe de fonctionnement repose sur l'incorporation de structures résonantes, telles que des lignes couplées, des stubs ou des anneaux, dans l'antenne ou dans sa ligne d'alimentation, permettant un contrôle fréquentiel de la réponse en plus de la fonction de rayonnement. [48] [61]



*Figure II-28 : Exemple d'une filtenna reconfigurable pour les applications radio-cognitives.[62]*

#### II.4.2 Contraintes et avantages de l'intégration filtre-antenne :

Lorsqu'un filtre est intégré directement dans la structure de l'antenne (configuration filtenna), plusieurs contraintes apparaissent :

- **Compacité** : le filtre doit occuper un espace minimal.
- **Adaptation d'impédance mutuelle** : la présence du filtre modifie l'impédance de l'antenne, et vice versa.
- **Impact sur le diagramme de rayonnement** : certaines topologies peuvent influencer la forme du faisceau ou la polarisation.
- **Perte insertion réduite** : essentielle pour ne pas dégrader le gain global.

Le choix de la topologie se fera donc en fonction de la bande souhaitée, de la bande passante relative requise, de la complexité de fabrication (CST,...), et de l'influence sur le comportement rayonnant de l'antenne.

L'intégration des fonctions de filtrage et de rayonnement présente de nombreux avantages pour les systèmes de communication modernes, en particulier dans les environnements contraints comme les terminaux mobiles, les capteurs sans fil ou les dispositifs embarqués.

Parmi les bénéfices notables :

- Réduction de l'encombrement global grâce à la suppression de la ligne d'interconnexion entre filtre et antenne.
- Amélioration de la sélectivité fréquentielle avec un rejet hors-bande directement intégré dans la réponse rayonnée.
- Diminution des pertes d'insertion, améliorant le rendement global du système.
- Simplification de l'architecture RF, réduisant le nombre de composants passifs nécessaires.

Ces avantages rendent les filtennas particulièrement adaptées aux standards multi-bandes (4G, 5G, Wi-Fi, IoT) et aux systèmes à hautes performances. [63]

### II.4.3 Méthodes d'intégration :

Plusieurs approches ont été développées pour implémenter la fonction filtrante dans une antenne. Les principales sont :

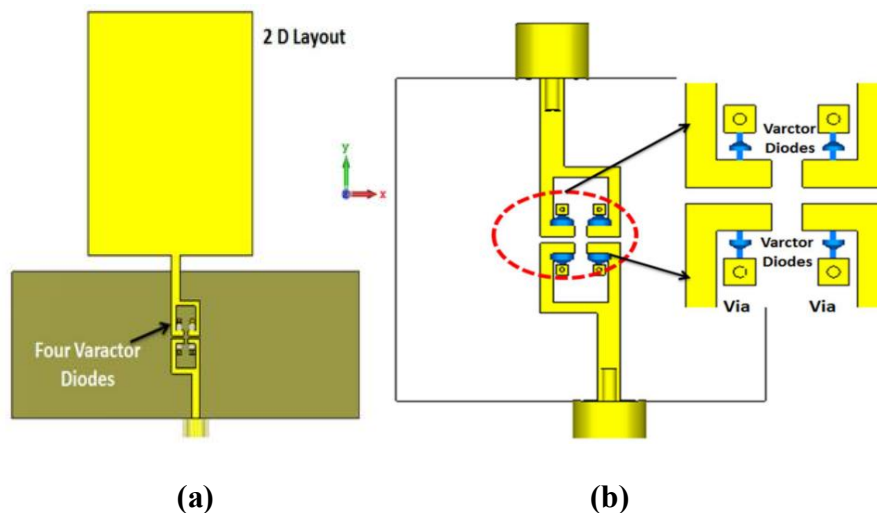
- **Couplage via la ligne d'alimentation** : insertion d'un filtre micro-ruban (BPF) dans la ligne d'alimentation de l'antenne.
- **Filtre intégré au patch rayonnant** : des éléments résonants (slots, stubs, anneaux) sont gravés ou ajoutés directement sur le patch, générant une réponse filtrante intrinsèque.
- **Structures hybrides** : combinaison des deux méthodes précédentes pour obtenir des réponses plus complexes (bi-bande, bande ultra-large, etc.). [48] [49]

## II.4.4 Filtrennas reconfigurables :

La reconfigurabilité permet d'adapter dynamiquement la fréquence centrale, la bande passante ou les caractéristiques du rayonnement en fonction de l'environnement ou des besoins fonctionnels. Les techniques de reconfiguration incluent :

- Intégration de diodes PIN pour activer ou désactiver certaines parties de la structure.
- Utilisation de varactors pour ajuster les fréquences de résonance de manière continue.
- Technologies MEMS pour une commutation électromécanique à haute fiabilité.

Les filtrennas reconfigurables sont particulièrement prometteuses pour les radios cognitives, les systèmes adaptatifs et les plateformes multi-standards. [64] [65]



*Figure II-29 : (a) & (b) : Filtrenna reconfigurable en utilisant des diodes Varactors.[66]*

## II.5 Conclusion :

Ce chapitre a permis d'explorer les fondements, les évolutions et les approches d'intégration des filtres micro-rubans et des antennes filtrantes, éléments devenus incontournables dans la conception des systèmes RF modernes.

Dans le chapitre qui suit, nous allons concevoir et simuler deux filtrennas issues de la littérature pour ensuite proposer une conception et une simulation de deux filtrennas respectivement, mono-bande et bi-bande.

Parallèlement, l'émergence des filtennas offre une réponse innovante aux contraintes de miniaturisation, de coût et d'efficacité, en combinant dans une même structure les fonctions de filtrage et de rayonnement. L'intégration directe du filtre sur la ligne d'alimentation ou le patch rayonnant permet de réduire les pertes d'insertion, d'améliorer la sélectivité et de simplifier l'architecture du module RF.

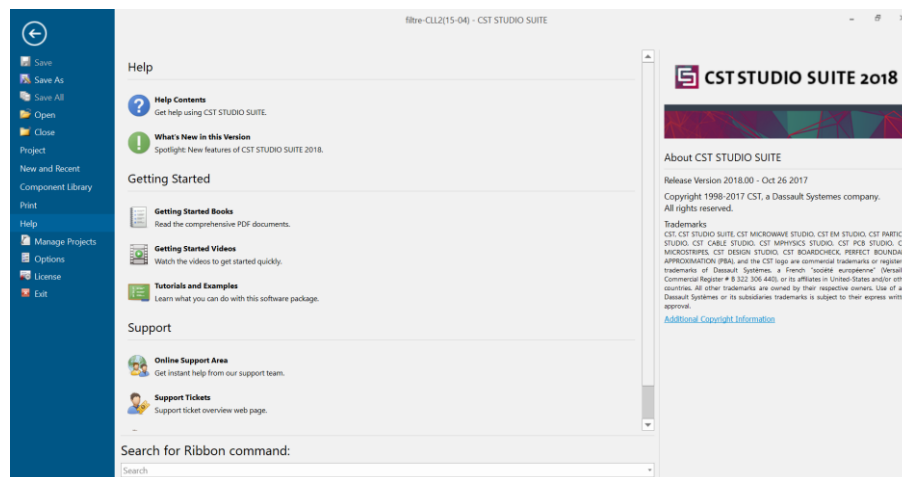
**Chapitre III :**  
**Conception d'antennes**  
**filtrantes.**

### III.1 Introduction :

Ce chapitre est consacré à la conception et à la simulation d'antennes filtrantes. Nous présentons dans un premier temps les résultats de simulation, à l'aide du logiciel CST Microwave Studio, de deux antennes filtenna afin de comparer différentes configurations. Dans un second temps, une antenne filtrante mono-bande proposée sera présentée, suivie de la conception d'une deuxième antenne bi-bande proposée, capable de fonctionner sur deux bandes de fréquence distinctes.

### III.2 Outil de la simulation :

La conception d'antennes filtrantes a été conçue avec le logiciel CST Studio Suite v.2018 pour un fonctionnement optimal dans la bande 5G.



*Figure III-1: Outil de simulation.*

### III.3 Première antenne filtrante simulée :

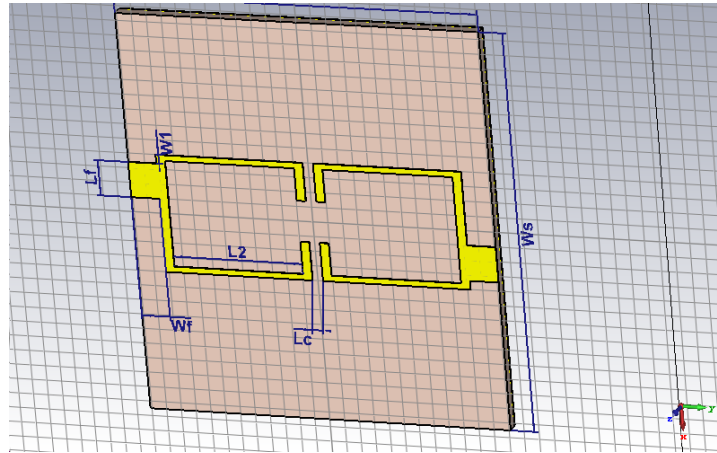
L'antenne filtrante considérée, se compose d'un filtre passe-bande de type CLL (Complementary Loaded Loop) et d'une antenne croissant. [67]

Nous présentons ci-après la géométrie du filtre ainsi que son intégration dans la structure, accompagnées des résultats de simulation.

#### III.3.1 Filtre à base de Complementary Loaded Loop (CLL) :

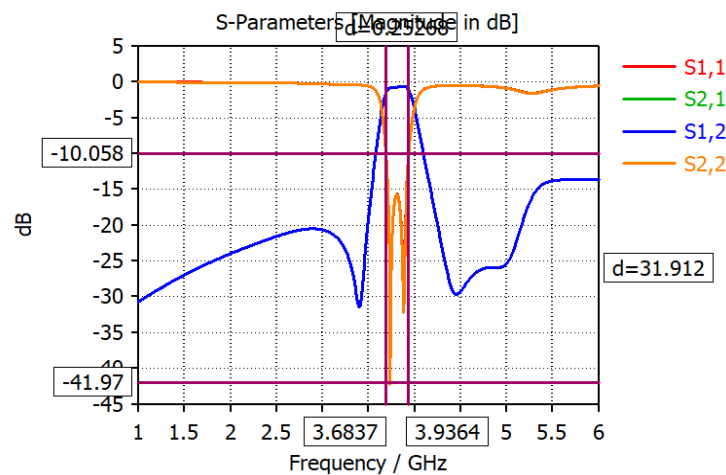
La configuration présentée en figure III-2 se fonde sur un réseau coplanaire de deux boucles CLL disposées en série entre une ligne micro-ruban d'entrée et une ligne micro-ruban de sortie, toutes deux de  $50\Omega$ . Chaque boucle constitue un résonateur quart-onde dont le

couplage interdigital engendre deux pôles de résonance. Les paramètres géométriques de cette structure sont définis comme suit :  $L_{sub}= 24.2$  mm,  $W_{sub}= 27$  mm,  $W_f= 1.9$  mm,  $L_f= 2.4$  mm,  $L_1= 8$  mm,  $L_c= 0.7$  mm,  $W_1= 0.6$  mm et  $L_2= 8.65$  mm.



**Figure III-2:** Structure du filtre passe-bande à base de CLL.

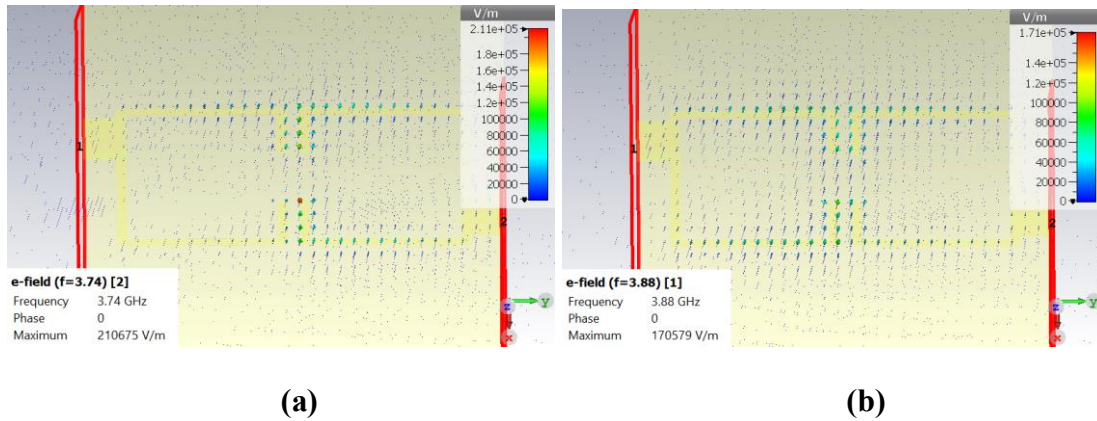
L'évaluation des performances de l'antenne filtrante et du filtre proposés a été réalisée à travers des simulations sous CST Microwave Studio. Les résultats présentés ci-après mettent en évidence le comportement du coefficient de réflexion S11 ainsi que la réponse fréquentielle de la structure, éléments essentiels pour apprécier l'adaptation d'impédance et la sélectivité dans la bande de fréquences ciblée.



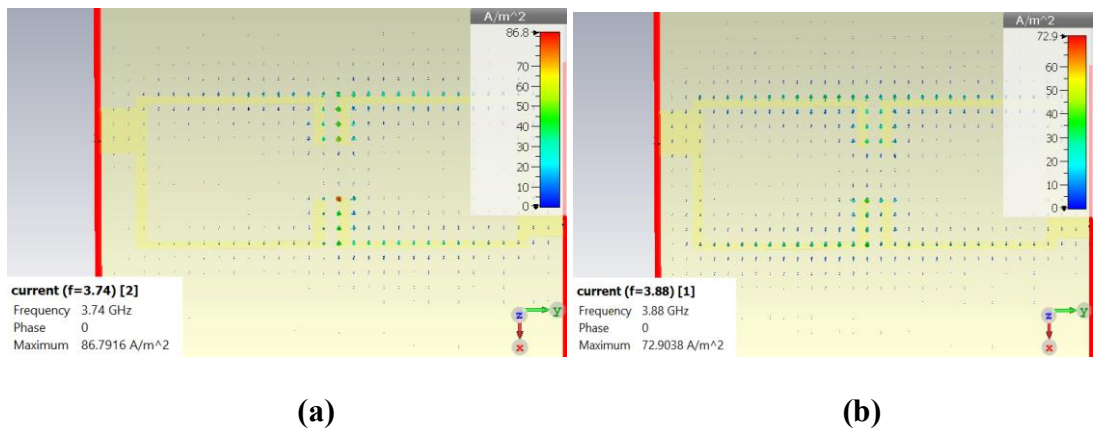
**Figure III-3 :** Paramètres S simulés du filtre passe-bande fondé sur des boucles chargées en capacité (CLL).

Le coefficient de réflexion S11, représenté sur la plage de fréquences de 1 à 6 GHz comme montre la figure III-3, met en évidence les paramètres S obtenus lors de la simulation du filtre CLL. La bande passante du filtre, estimée à 260 MHz, s'étend de 3.68 GHz à 3.94 GHz, ce qui permet de couvrir efficacement la plage de fréquences visée.

Le paramètre de transmission S21 présente une variation faible sur toute la bande passante, ce qui se traduit par une perte d'insertion inférieure à 1 dB.



**Figure III-4:** Distribution du champ sur le filtre passe-bande à base de CLL

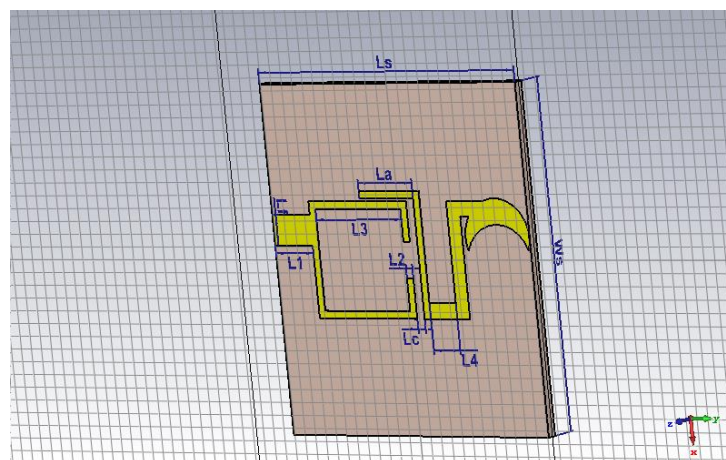


**Figure III-5:** Distribution du courant sur filtre passe-bande à base de CLL.

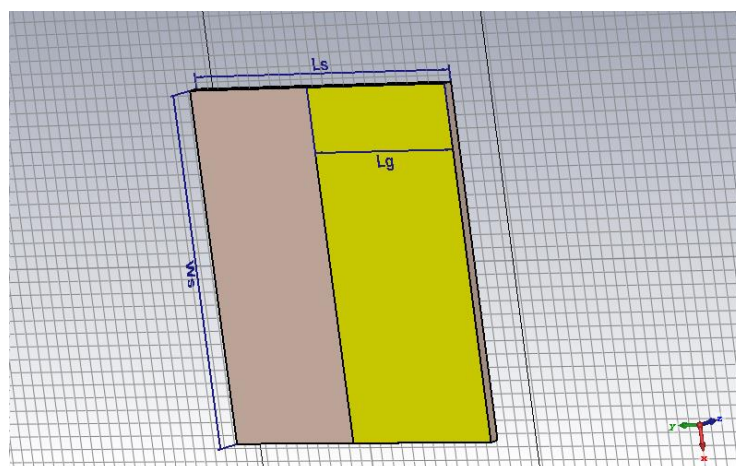
L'analyse de la distribution du courant met en évidence la présence de deux modes résonants distincts au sein de la structure CLL. Le mode impair se manifeste par un maximum de courant au centre, caractéristique d'une condition de court-circuit, tandis que le mode pair se distingue par une annulation du courant à ce même emplacement, traduisant un comportement de circuit ouvert, comme l'illustre la figure III-5. Par ailleurs, l'analyse du champ confirme cette dualité : le mode impair se traduit par une concentration du champ au centre du dispositif, alors qu'en mode pair, l'intensification du champ s'observe principalement aux extrémités, comme présenté dans la figure III-4. Cette répartition met en lumière la complémentarité des distributions de charges propres à chaque mode.

### III.3.2 Filtenna :

Cette structure, qui permet d'assurer à la fois les fonctions de rayonnement et de sélectivité fréquentielle, s'appuie sur l'intégration d'une antenne monopole et d'un filtre passe-bande CLL à anneau unique au sein d'un même dispositif compact. L'alimentation est assurée par une ligne micro-ruban. La géométrie de l'antenne filtrante est illustrée dans la figure III-6. Le choix du substrat s'est porté sur le Rogers RT5880, avec une permittivité relative  $\epsilon_r = 2.2$ , une tangente de pertes  $\delta = 0.0009$  et une épaisseur  $h = 0.8$  mm. L'ensemble de la structure présente des dimensions compactes de  $24.2 \times 27 \times 0.8$  mm<sup>3</sup>, répondant ainsi aux exigences de miniaturisation imposées par les applications modernes.



(a)

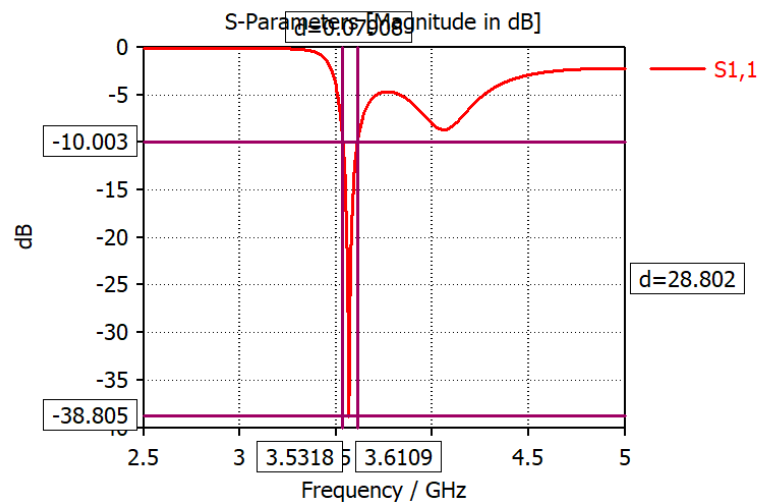


(b)

**Figure III-6:** Structure de l'antenne filtrante avec : (a) Vue de Dessus, (b) Vue de Dessous (le jaune représente le plan de masse).

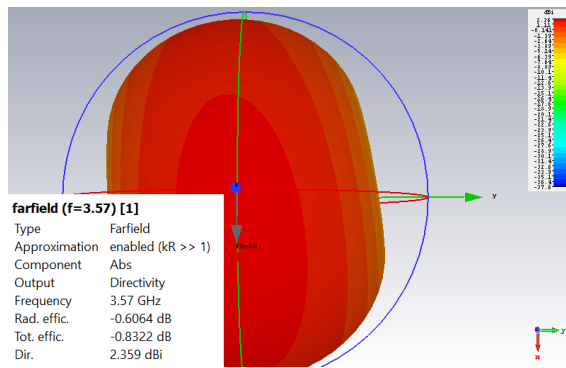
Paramètres	Dimension (mm)	Paramètres	Dimension (mm)
L	24.2	L <sub>5</sub>	1.2
W	27	L <sub>6</sub>	3.05
L <sub>g</sub>	13	L <sub>a</sub>	5.09
W <sub>f</sub>	2.4	d	3.8
R	3	L <sub>c</sub>	0.7
L <sub>1</sub>	3.6	W <sub>1</sub>	1
L <sub>2</sub>	0.4	W <sub>2</sub>	2.8
L <sub>3</sub>	8.09	W <sub>3</sub>	9
L <sub>4</sub>	2.49	/	/

**Tableau III-1:** Paramètres de l'antenne filtrante.

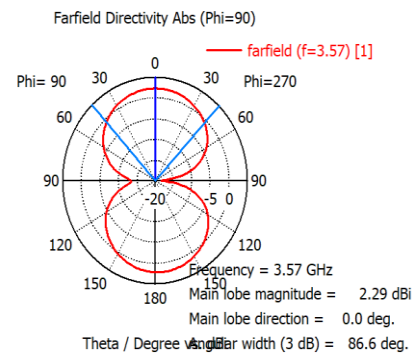


**Figure III-7:** Coefficient de réflexion de l'antenne filtrante simulée.

La courbe du paramètre S11 obtenue met en évidence une bonne adaptation d'impédance et des pertes par réflexion quasi négligeables à la fréquence de résonance. La bande passante, comprise entre 3.53 GHz et 3.61 GHz, présente une largeur de 80 MHz. Cette sélectivité accrue confirme l'efficacité de la structure en tant que filtenna, assurant un rejet significatif des fréquences hors bande.



(a)



(b)

**Figure III-8:** Diagramme de rayonnement à la fréquence centrale 3.5Ghz en : (a):3D, (b):2D..

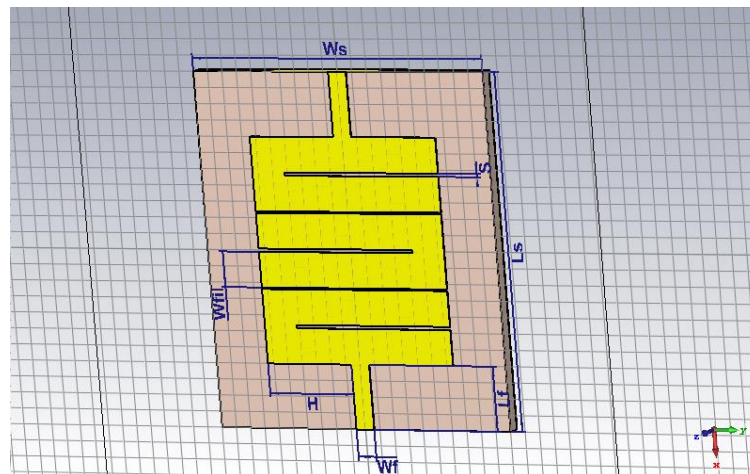
### III.4 Deuxième antenne filtrante simulée:

La deuxième antenne filtrante considérée est constituée d'un filtre passe-bande de type hairpin associé à une antenne elliptique [68].

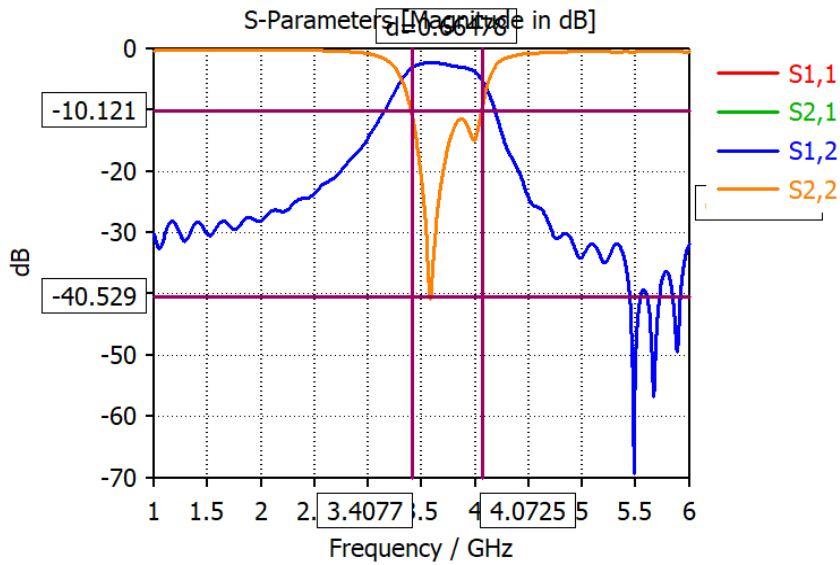
Nous présentons ci-après la géométrie du filtre ainsi que son intégration au sein de la structure, accompagnées des résultats de simulation.

#### III.4.1 Filtre Hairpin :

La figure suivante représente un filtre passe-bande de type hairpin à structure compacte, conçu pour une sélectivité accrue grâce à l'étroite séparation entre ses résonateurs. Ce filtre est particulièrement adapté aux applications en micro-ruban nécessitant un encombrement réduit et une bonne adaptation d'impédance. Les dimensions géométriques de la structure sont les suivantes :  $L_{sub}= 22$  mm,  $W_{sub}= 20$  mm,  $H= 5.8$  mm,  $H_l= 12.8$  mm,  $W_{fil}= 2.2$  mm,  $W_f= 1.23$  mm,  $L_f= 4$  mm et  $S= 0.2$  mm.



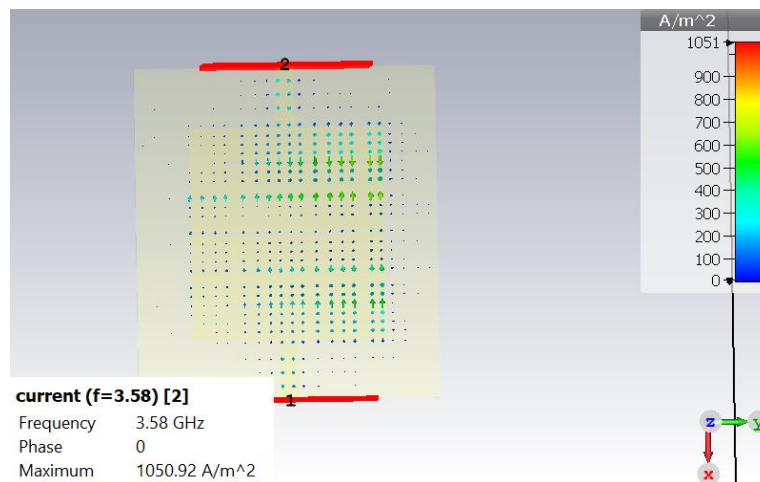
**Figure III-9:** Structure du filtre hairpin.



**Figure III-10:** Paramètres S simulés du filtre hairpin .

L'analyse du coefficient de réflexion S11, mesuré sur la plage [1 - 6 GHz] pour la structure du filtre hairpin comme présenté dans Figure III-10, met en évidence une adaptation optimale autour de la fréquence centrale de 3.58 GHz, où S11 atteint un minimum de -40 dB. Cette valeur traduit une très faible réflexion et une transmission efficace du signal à cette fréquence. La bande passante à -10 dB est évaluée à environ 600 MHz, s'étendant de 3.4 GHz à 4 GHz.

Parallèlement, le S21 révèle une valeur élevée, proche de 0 dB, dans cette même plage de fréquences, ce qui confirme une transmission optimale au sein de la bande passante du filtre. En dehors de cette bande, S21 chute rapidement, traduisant une bonne sélectivité et une atténuation efficace des signaux hors bande.

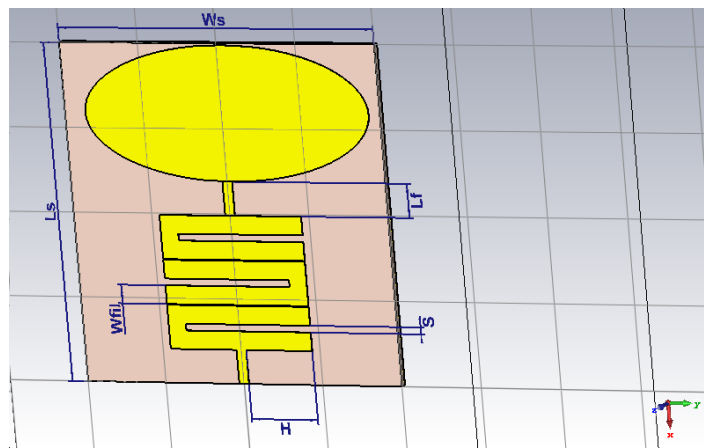


**Figure III-11:** Distribution du courant à la fréquence centrale 3.58 Ghz.

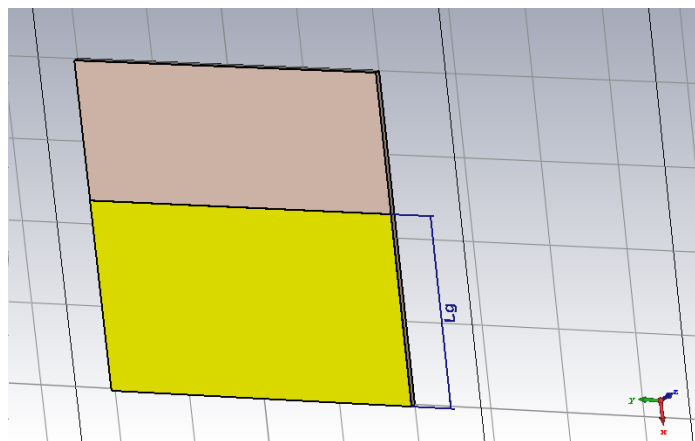
À la fréquence centrale 3.58 GHz, l'analyse de la densité de courant met en évidence une accumulation significative au centre de la structure, atteignant une valeur maximale de 1050.92 A/m<sup>2</sup> (figure III-11).

### III.4.2 filtenna elliptique :

La structure se compose d'une antenne filtrante micro-ruban intégrant un patch elliptique et un filtre hairpin inséré dans la ligne d'alimentation, comme illustré à la figure III-12. Le substrat utilisé est un FR4 ( $\epsilon_r = 4.4$ ,  $\tan \delta = 0.0025$ ,  $h = 0.8$  mm) de dimensions  $40 \times 40$  mm<sup>2</sup>. Les dimensions principales de l'antenne filtrante sont :  $H = 8.4$  mm,  $H1 = 18.03$  mm,  $W_{fil} = 2.2$  mm,  $W_f = 1.23$  mm,  $L_f = 4$  mm,  $S = 0.8$  mm,  $b = 18$  mm,  $a = 8$  mm et  $L_g = 23.1$  mm.

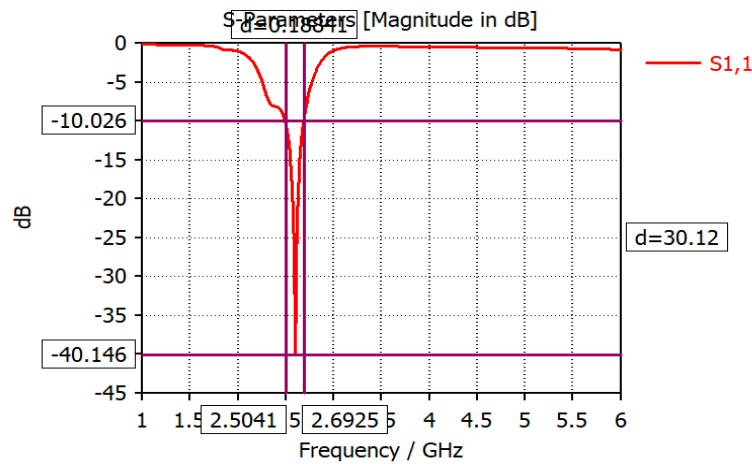


(a)



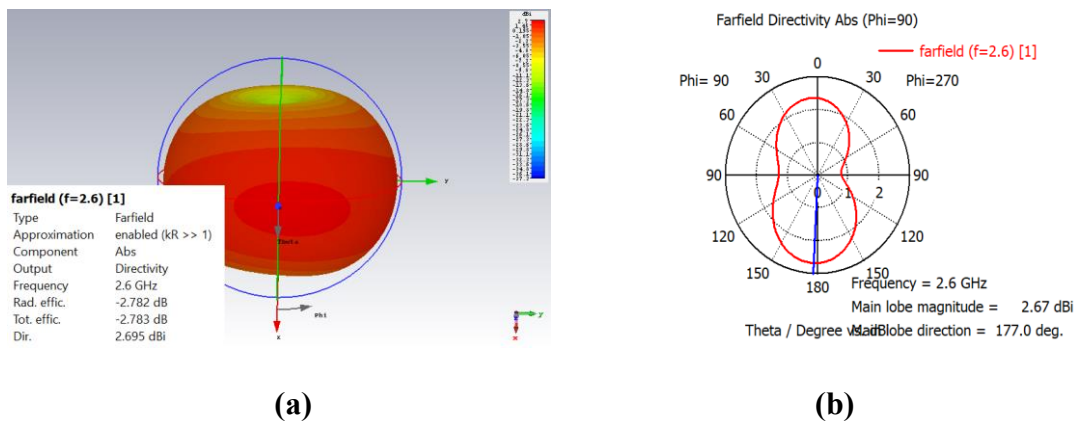
(b)

*Figure III-12: Antenne filtrante elliptique avec : a) Vue Avant, (b) Vue Arrière.*



**Figure III-13:** Coefficient de réflexion de l’antenne filtrante elliptique simulée.

Le paramètre S11 de l’antenne filtrante elliptique met clairement en évidence la sélectivité du dispositif, comme le montre la figure III-13. La bande passante utile s’étend de 2.5 GHz à 2.7 GHz, soit d’une largeur de 200 MHz. On note un minimum particulièrement marqué de -40 dB à la fréquence centrale de 2.6 GHz. Ce résultat reflète une adaptation d’impédance optimale : à cette fréquence, la quasi-totalité de l’énergie est transmise et la réflexion du signal est très faible.

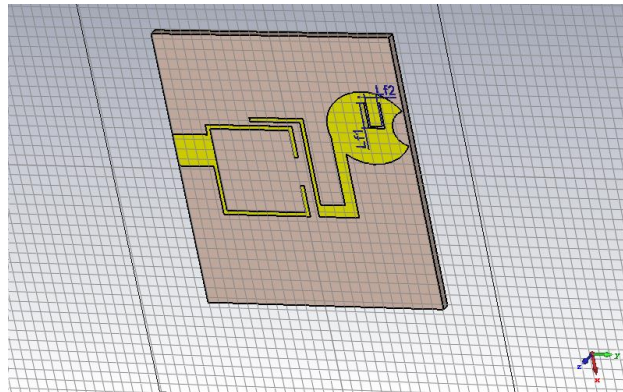


**Figure III-14:** Diagramme de rayonnement à la fréquence centrale 2.6 Ghz en : (a):3D, (b):2D.

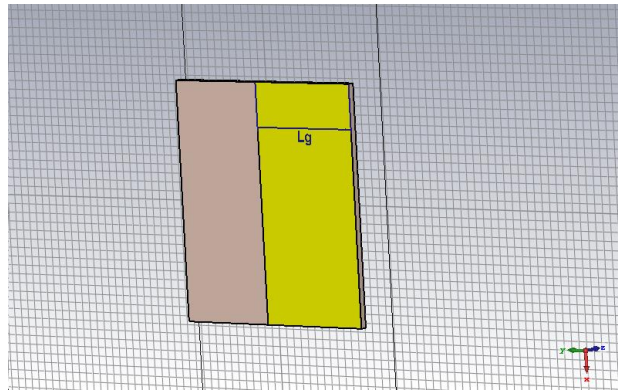
### III.5 Antenne filtrante mono-bande proposée :

À la suite des analyses et des simulations menées sur les deux configurations de filtennas extraites de la littérature, une nouvelle structure d’antenne filtrante a été conçue. La configuration finale, illustrée sur la figure III-15, elle utilise un filtre passe-bande de type CLL. Afin d’enrichir la réponse fréquentielle et d’améliorer l’adaptation, une fente en forme de U a été introduite au niveau du patch. Le choix du substrat s’est porté sur le Rogers RT5880, avec une permittivité relative  $\epsilon_r = 2.2$ , une tangente de pertes  $\delta = 0.0009$  et une

épaisseur  $h= 0.8$  mm. L'ensemble de la structure présente des dimensions compactes de  $24.2 \times 27 \times 0.8$  mm<sup>3</sup>. Les dimensions de la structure sont listées dans le tableau III-3 ci-dessous.



(a)

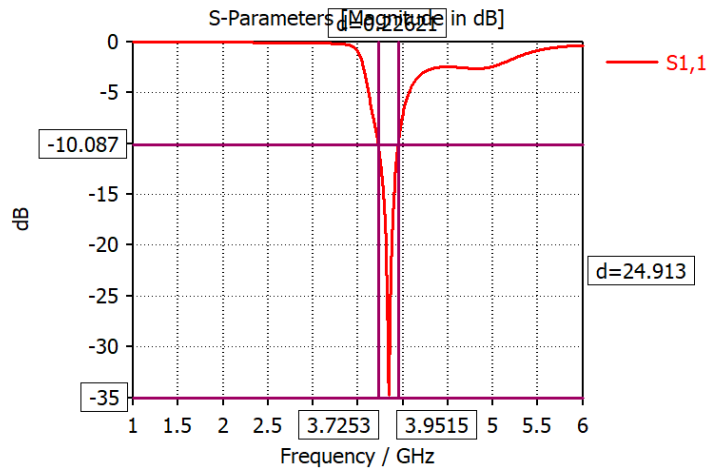


(b)

**Figure III-15:** Structure de l'antenne filtrante proposée avec : (a): Vue de Dessus, (b): Vue de Dessous.

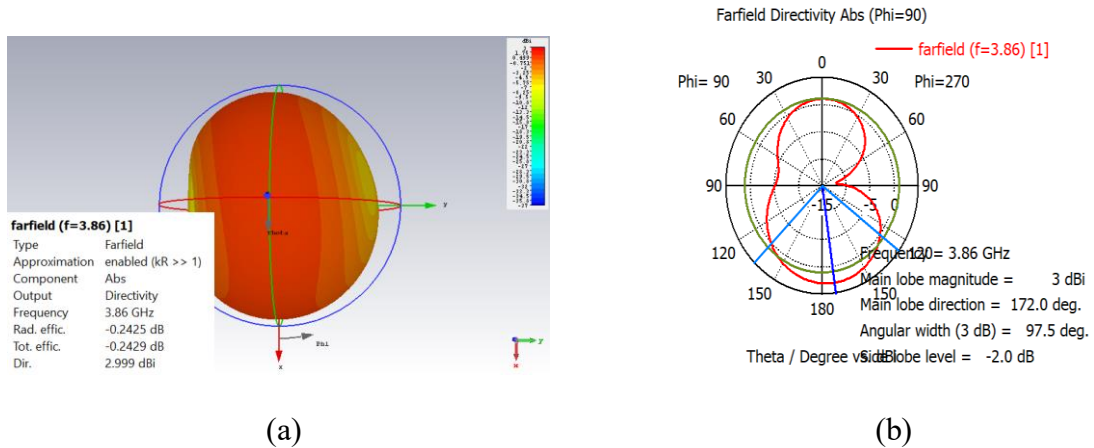
<i>Paramètres</i>	<i>Dimension (mm)</i>	<i>Paramètres</i>	<i>Dimension (mm)</i>
L	24.2	L <sub>5</sub>	1.2
W	27	L <sub>6</sub>	3.05
L <sub>g</sub>	13	L <sub>a</sub>	5.09
W <sub>f</sub>	3.2	d	3.8
R	1.8	L <sub>c</sub>	0.7
L <sub>1</sub>	3.6	W <sub>1</sub>	1
L <sub>2</sub>	0.4	W <sub>2</sub>	2.8
L <sub>3</sub>	8.09	W <sub>3</sub>	9
L <sub>4</sub>	2.49	a	3.6
L <sub>f1</sub>	1.7	b	4.2
L <sub>f2</sub>	1.2	W <sub>f1</sub>	0.2

**Tableau III-2:** Les dimensions optimisées de l'antenne filtrante proposée.



**Figure III-16:** Coefficient de réflexion de l'antenne filtrante proposée.

La figure III-16 présente le paramètre de réflexion S11 de la structure proposée, sur une plage fréquentielle de 1 à 6 GHz. Cette courbe montre un comportement **mono-bande**, caractérisé par un seul creux prononcé centré autour de 3.86 GHz, où S11 atteint une valeur minimale de -35 dB. Cette valeur indique une excellente adaptation traduisant une perte par réflexion quasi négligeable à la fréquence de résonance. La bande passante utile, déterminée selon le critère de -10 dB, s'étend approximativement de 3.72 GHz à 3.95GHz, soit une largeur de bande de 230 MHz.

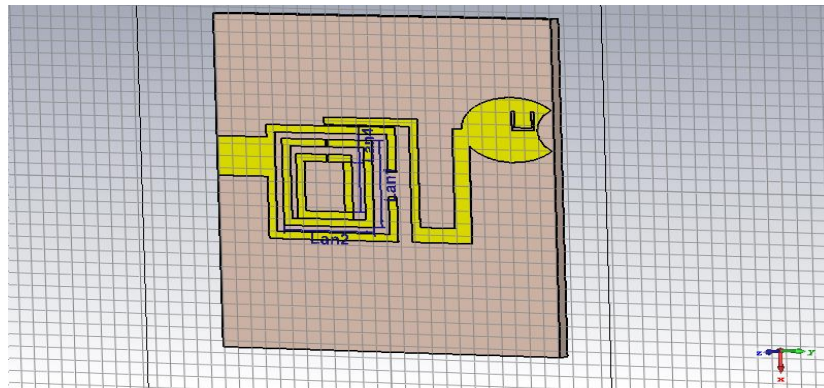


**Figure III-17:** Diagramme de rayonnement à la fréquence centrale 3.85Ghz en : (a):3D, (b):2D.

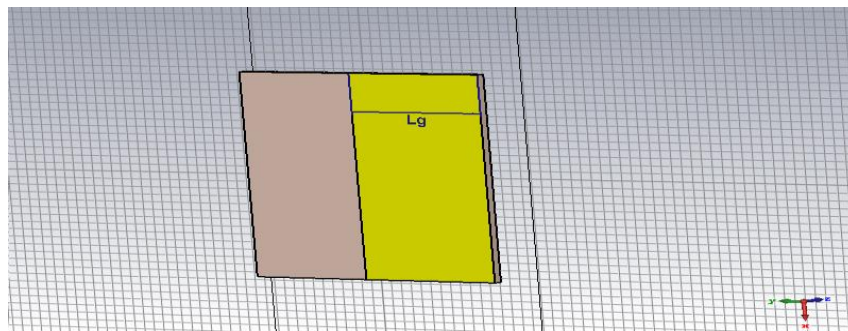
### III.6 Antenne filtrante bi-bande proposée :

Après avoir validé les performances de la première structure, nous nous sommes orientés vers la conception d'une antenne filtrante bi-bande. Comme illustrée à la figure III-18, cette transition s'est traduite par l'intégration de deux anneaux en forme carré ainsi que de deux fentes supplémentaires, favorisant l'apparition de nouvelles résonances et offrant une

flexibilité accrue dans le réglage des bandes de fonctionnement. Par ailleurs, la géométrie de l'antenne a été optimisée afin d'améliorer l'interaction électromagnétique avec la ligne d'alimentation. Les dimensions de la structure sont listées dans le tableau III-4 ci-dessous.



(a)



(b)

**Figure III-18:** Structure de l'antenne filtrante bi-bande avec : (a): Vue de Dessus, (b): Vue de Dessous.

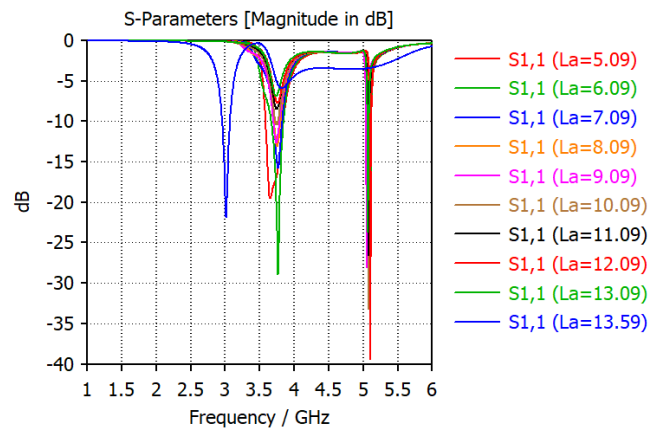
<i>Paramètres</i>	<i>Dimension (mm)</i>	<i>Paramètres</i>	<i>Dimension (mm)</i>
L	24.2	L <sub>5</sub>	1.7
W	27	L <sub>6</sub>	3.05
L <sub>g</sub>	12.2	L <sub>a</sub>	6.09
W <sub>f</sub>	3.2	d	3.8
R	1.8	L <sub>c</sub>	1
L <sub>1</sub>	3.6	W <sub>1</sub>	1
L <sub>2</sub>	0.6	W <sub>2</sub>	2.8
L <sub>3</sub>	8.09	W <sub>3</sub>	9.2
L <sub>4</sub>	2.49	a	2.6
L <sub>f1</sub>	1.5	b	3.6

$Lf_2$	3.2	$W_{fl}$	0.2
Lan1	7	Lan2	5.3
Lan3	4.01	Lan4	4.6

**Tableau III-3:** Les dimensions optimisées de l'antenne filtrante bi-bande.

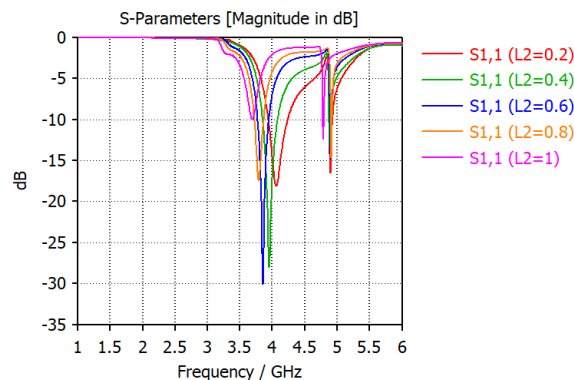
### III.6.1 Étude paramétrique :

L'objectif de cette étude est d'analyser l'impact des modifications apportées aux différents paramètres constitutifs de l'antenne sur son coefficient de réflexion.



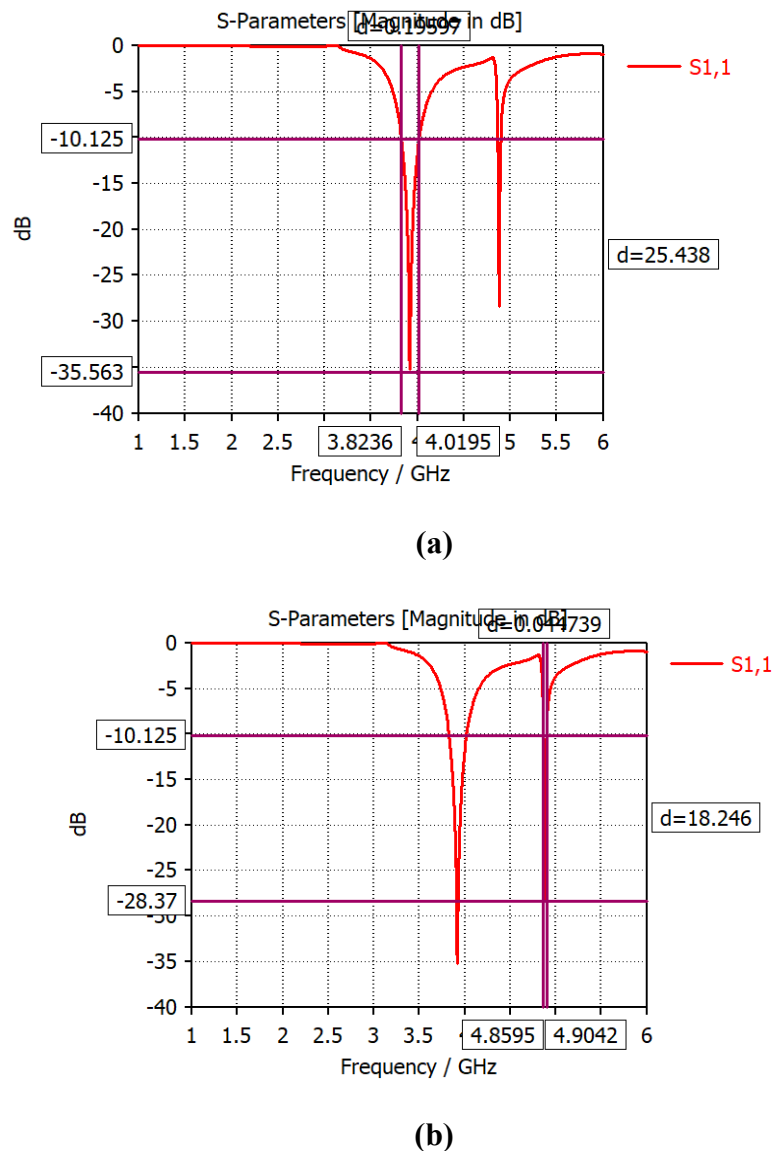
**Figure III-19:** Coefficient de réflexion pour différentes longueurs du bras de couplage «La».

La figure III-22 illustre le coefficient de réflexion S11 en fonction de la fréquence pour différentes longueurs du bras de couplage «La». On constate que l'augmentation de «La» entraîne un déplacement des fréquences de résonance vers des valeurs plus basses. Cette variation s'accompagne également d'une modification de la profondeur des minima de S11, reflétant ainsi une adaptation d'impédance variable selon la longueur considérée. En outre, certaines valeurs de «La» favorisent l'apparition de deux résonances.



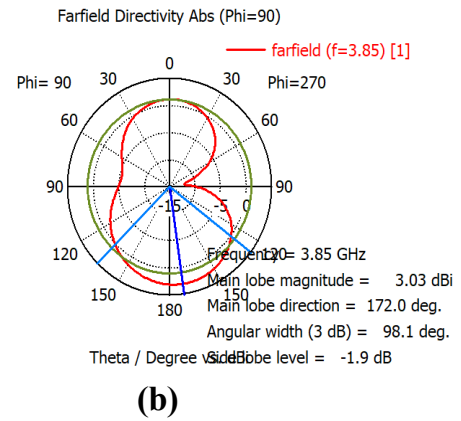
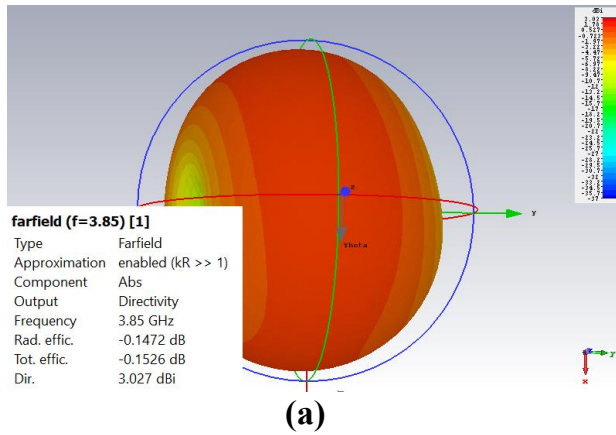
**Figure III-20:** Coefficient de réflexion pour différentes valeurs de la largeur du résonateur «L2».

La figure III-23 met en évidence la relation entre la fréquence de résonance et la largeur du résonateur « L2 ». On constate que la diminution de « L2 » se traduit par une amélioration de l'adaptation, avec une baisse notable du coefficient de réflexion aux deux résonances principales. La valeur (L2= 0.6) offre la meilleure adaptation, avec un coefficient de réflexion minimal et une bande passante satisfaisante.

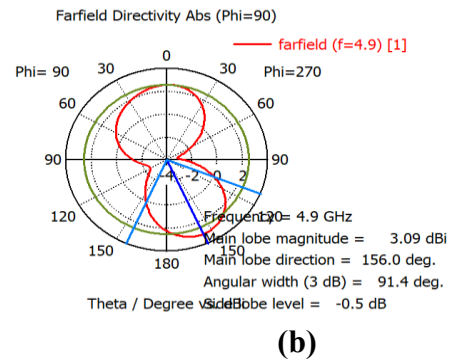
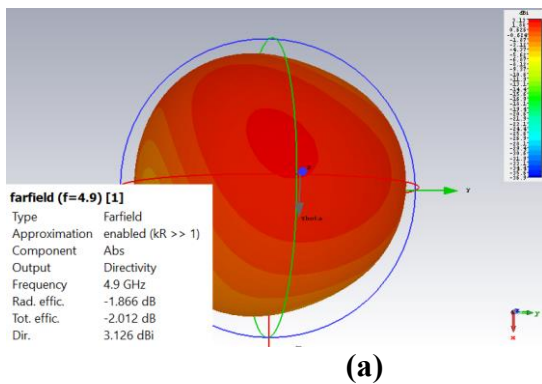


**Figure III-21:** (a) & (b): le coefficient de réflexion de l'antenne filtrante bi-bande proposée.

La courbe présentée dans la figure III-19 illustre le coefficient de réflexion S11 en fonction de la fréquence pour la structure proposée. On observe deux bandes passantes distinctes. La première bande passante varie de 3.82 à 4GHz et la deuxième bande passante varie de 4.85 à 4.9GHz, ce qui met en évidence le caractère **bi-bande** de l'antenne.



**Figure III-22:** Diagramme de rayonnement à la fréquence de résonance 3.85 Ghz en: (a):3D, (b):2D.



**Figure III-23:** Diagramme de rayonnement à la fréquence de résonance 4.9 Ghz en: (a):3D, (b):2D.

### III.7 Conclusion :

Ce chapitre a présenté la conception et la simulation des antennes filtrantes pour les applications 5G. La simulation sous CST Microwave Studio a permis de démontrer la capacité des deux structures d'antennes filtrantes proposées à offrir une bonne adaptation d'impédance et une compacité satisfaisante. Ces résultats confirment la pertinence de l'approche proposée et ouvrent la voie à des validations expérimentales ultérieures.

# **Conclusion générale**

Ce mémoire reflète le fruit de mon engagement dans la conception et l'optimisation d'antennes filtrantes pour les applications 5G. À travers une démarche mêlant étude théorique, recherches documentaires et simulations numériques sur CST Microwave Studio, j'ai pu explorer en profondeur l'impact des paramètres géométriques sur le comportement électromagnétique de différentes architectures d'antennes filtrantes.

Ce projet s'est porté sur trois parties :

- Tout d'abord, une introduction aux réseaux mobiles et enjeux de la 5G, où sont présentés l'évolution des générations précédentes, les caractéristiques fondamentales de la 5G.
- Ensuite, une étude des antennes et des filtres pour la communication sans fil, qui détaille les principes, les caractéristiques des filtres, ainsi que les concepts d'antennes filtrantes et reconfigurables.
- Et enfin, une conception, une simulation, une optimisation d'antennes filtrantes et l'analyse de leurs performances sous CST Microwave Studio.

Ce travail a été pour moi une véritable opportunité d'enrichir mes compétences, aussi bien sur le plan technique que méthodologique. J'ai appris à structurer une démarche scientifique, à analyser de manière critique les résultats obtenus et à m'adapter face aux difficultés rencontrées lors de la conception et de la simulation.

Bien que les objectifs initiaux aient été atteints, je reste convaincue que ce domaine offre encore de nombreux axes d'amélioration. La réalisation et à la caractérisation expérimentale des prototypes conçus permettrait de valider les performances simulées. À l'avenir, il serait enrichissant de poursuivre cette étude en intégrant des dispositifs de reconfiguration cela permettrait de répondre encore mieux aux exigences des systèmes de communication de nouvelle génération.

## Références bibliographiques

- «Tridens Technology,» [En ligne]. Available:  
1] <https://tridenstechnology.com/fr/generations-de-reseaux-mobiles/>.
- M. DRISSI, *Etude et conception d'antennes réseaux intelligente 5G pour les*  
2] *Small Cells.*, Caen, 2023.
- «EMF Explained 2.0,» [En ligne]. Available:  
3] <https://emfexplained.info/fra/?ID=25916>.
- [En ligne]. Available: [https://www.linkedin.com/pulse/quest-ce-que-le-](https://www.linkedin.com/pulse/quest-ce-que-le-r%C3%A9seau-5g-et-queelles-sont-les-diff%C3%A9rences-entre-/)  
4] [r%C3%A9seau-5g-et-queelles-sont-les-diff%C3%A9rences-entre-/](https://www.linkedin.com/pulse/quest-ce-que-le-r%C3%A9seau-5g-et-queelles-sont-les-diff%C3%A9rences-entre-/).
- [En ligne]. Available: [https://www.xavierstuder.com/2019/04/reseaux-mobiles-](https://www.xavierstuder.com/2019/04/reseaux-mobiles-pionnier-de-la-5g-sunrise-depasse-swisscom/4g-5g/)  
5] [pionnier-de-la-5g-sunrise-depasse-swisscom/4g-5g/](https://www.xavierstuder.com/2019/04/reseaux-mobiles-pionnier-de-la-5g-sunrise-depasse-swisscom/4g-5g/).
- P. ZHANG, X. YANG et J. CHEN, *A survey of testing for 5G: Solutions,*  
6] *opportunities, and challenges.*, Chine, 2019.
- U. SIDDIQUE, H. TABASSUM et E. HOSSAIN, «Wireless backhauling of 5G  
7] small cells: Challenges and solution approaches.,» 2015.
- «Alter Numeris,» [En ligne]. Available: : [https://www.alternumeris.org/la-5g-au-](https://www.alternumeris.org/la-5g-au-dela-du-pour-ou-contre/)  
8] [dela-du-pour-ou-contre/](https://www.alternumeris.org/la-5g-au-dela-du-pour-ou-contre/).
- W. WANG, H. XU et M. ALAZAB, *Blockchain-based reliable and efficient*  
9] *certificateless signature for IIoT devices.*, 2021.
- K. E. SAMAN, O. H. SATTAR et M. A. MUDHAFFER, *Microstrip patch*  
10] *antenna design, simulation and fabrication for 5G applications, Simulation Modelling Practice and Theory.*, 2022.
- E. G. LARSSON, «Massive MIMO for next-generation wireless systems.,» pp.  
11] 186-195, 2014.
- D. TSE et P. VISWANATH, «Fundamentals of Wireless Communication.,»  
12] 2005.

J. MIETZNER, Multiple antenna techniques for wireless communications: a  
13] comprehensive literature survey., 2009.

G. J. FOSCHINI et M. J. GANS, On limits of wireless communications in a  
14] fading environment when using multiple antennas..

«Research Gate,» [En ligne]. Available:  
15] [https://www.researchgate.net/figure/MIMO-system-block-diagram-25-MIMO-Advantages-There-are-numerous-benefits-of-using-MIMO\\_fig1\\_293811680](https://www.researchgate.net/figure/MIMO-system-block-diagram-25-MIMO-Advantages-There-are-numerous-benefits-of-using-MIMO_fig1_293811680).

A. NGOM, *Conception de petits réseaux d'antennes reconfigurables ou 'Small  
16] Cells' pour le standard 5G.*, 2019.

T. S. RAPPAPORT, Millimeter Wave Mobile Communications for 5G Cellular:  
17] It Will Work!, 2013.

«Litepoint,» [En ligne]. Available: <https://www.litepoint.com/ko/blog/an-introduction-to-the-5g-small-cell/>.

G. BARB et M. OTESTEANU, 4G/5G: A Comparative Study and Overview on  
19] what to Expect from 5G, 2020.

D. KIM, H. LEE et D. HONG, A Survey of In-Band Full-Duplex Transmission:  
20] From the Perspective of PHY and MAC Layers., 2017.

«Avnet,» [En ligne]. Available:  
21] <https://my.avnet.com/abacus/solutions/markets/communications/5g-solutions/5g-beamforming/>.

«Nybsys,» [En ligne]. Available: <https://nybsys.com/types-of-5g-antennas/>.  
22]

T. D. NGUYEN, *Conception d'antenne intelligente reconfigurable pour la radio  
23] cognitive.*, Grenoble, 2012.

D. AMEZIANE, *Etude et optimisation d'antennes fractales plaquées.*, Tlemcen,  
24] 2009.

S. A. RAHMANI, *Analyse des antennes imprimées en anneaux concentriques :  
25] Etude et simulation des antennes imprimées fonctionnant en multi bandes*, Tlemcen,

2012.

A. BALANIS, *Antenna theory: analysis and design.*, Arizona, 2015.

26]

S. M. BAHLOUL et M. ABRI, *Etude et conception de réseaux d'antennes imprimés large bande à polarisation diverse par l'utilisation d'architectures log-périodiques*, Tlemcen, 2017.

H. BOUDGHENE STAMBOULI et S. BOUNEBBAB, *Étude et Conception d'antennes à résonateurs diélectriques.*, Tlemcen, 2017.

«Radio-club F6KRK,» [En ligne]. Available: <https://blog.f6krk.org/wp-content/uploads/2012/02/Polarisation1.pdf>.

A. KDROUCI, *Conception d'une antenne patch inspirée des méta-matériaux pour les applications RFID.*, Tlemcen, 2021.

A. MERITET, *Optimisation des antennes Filaires.*, Le Chesnay, 1980.

«Radio-media-system,» [En ligne]. Available: <https://radio-media-system.com/p/g5rv-zs6bkw-hari-full-size>.

«Radioamateurs,» [En ligne]. Available: <http://www.radioamateurs.news.sciencesfrance.fr/?p=32492>.

J. R. MURAT, *Éléments de construction.*, 1980.

M. N. N. DAHO, *Etude et conception des antennes reconfigurables dans les réseaux radio-cognitifs destinés aux applications médicales.*, Tlemcen, 2021.

Z. BEN TAHAR et S. BEN ABDESSELAM, *Réalisation d'une interface graphique de calcul des paramètres d'antennes patch et conception logicielle.*, A. Témouchent, 2019.

I. BENAMARA et H. SI ALI, *Antenne patch pour la 5G millimétrique.*, A. Témouchent, 2023.

D. AISSAOUI, *Etude et conception d'antennes fractales pour des applications*

38] *ultra-large-bande.*, Tlemcen, 2019.

A. BOUFRIOUA, *Contribution à l'étude des antennes à patch résistif et*  
39] *parfaitement conducteur tenant compte d'une source d'excitation et des nouvelles formes*  
*asymptotiques de courant.*, Constantine, 2006.

F. OTSMANI, *Simulation d'une antenne large bande pour une application WiFi.*,  
40] A. Témouchent, 2019.

D. KERARTI ZIANI, *Etude et conception d'antennes ultra-large bandes.*, Oran,  
41] 2011.

Z. HAMAIZIA, *Conception et simulation d'un réseau d'antennes micro-rubans*  
42] *circulaires pour les applications radar.*, 2015.

A. CHAIMA, *Etude et conception d'une antenne reconfigurable pour les*  
43] *applications WLAN.*, M'sila, 2018.

A. FOUKIA et Y. ZEMAM, *Étude et conception d'antennes reconfigurables par*  
44] *Association d'éléments actifs.*, Tlemcen, 2017.

M. NOUIRI et Z. TERKI, *Conception d'une antenne microruban reconfigurable*  
45] *à base de diode PIN et des Structures EBG.*, M'sila, 2019.

«Electronique 3D,» [En ligne]. Available: [http://www.electronique-](http://www.electronique-3d.fr/Le_Filtre_passe_bas.html)  
46] [3d.fr/Le\\_Filtre\\_passe\\_bas.html](http://www.electronique-3d.fr/Le_Filtre_passe_bas.html).

«Cours d'électronique,» [En ligne]. Available:  
47] [https://courselectronique.wordpress.com/etude-des-circuits/circuits-en-regime-](https://courselectronique.wordpress.com/etude-des-circuits/circuits-en-regime-transitoire/circuit-rlc-serie/)  
[transitoire/circuit-rlc-serie/](https://courselectronique.wordpress.com/etude-des-circuits/circuits-en-regime-transitoire/circuit-rlc-serie/).

D. M. POZAR, *Microwave engineering.*, 2011.  
48]

J. S. HONG, *Microstrip filters for RF/Microwave applications.*, 2001.  
49]

«Scientific and academic publishing,» [En ligne]. Available:  
50] <http://article.sapub.org/10.5923.j.eee.20120203.08.html>.

- J. UHER et W. ZIRWAS, «Ultra wideband hairpin bandpass filters.,» 1995.  
51]
- Y. DIA, *Optimisation par conception conjointe de dispositifs multifonctions*  
52] *filtreantenne compacts et agiles.*, Limoges, 2016.
- W. WU et R. L. WHITE, Loop resonator filters with high isolation., 1990.  
53]
- K. C. GUPTA, Microstrip lines and slotlines..  
54]
- X. GUAN et Y. YUAN, «A novel triple-mode bandpass filter based on a dual-  
55] mode defected ground structure resonator and a microstrip resonator.,» 2013.
- K. WILLIAMS, Bandwidth enhancement of microstrip filters using tapered  
56] lines..
- M. SOUZA et F. SILVA, «Discriminators for instantaneous frequency  
57] measurement subsystem based on open-loop resonators.,» 2009.
- Y. J. YOON et J. S. HONG, Synthesis of compact dual-mode microstrip  
58] bandpass filters..
- H. C. CHIU et C. H. LU, A novel miniaturized microstrip bandpass filter with  
59] stepped-impedance resonators..
- M. ALAYDRUS et D. ASTUTI, Study of SIR for designing filters with arbitrary  
60] resonant positions., 2014.
- M. ESFAHANI et M. ALBOOYEH, «Design of compact microstrip filtennas for  
61] 2.45 GHz WLAN applications.,» 2013.
- A. MUDULI et K. PANWAR, «A reconfigurable filtenna for cognitive radio  
62] application.,» 2021.
- A. YIGIT et F. YANG, Broadband filtenna design for 2.36–2.42 GHz WLAN..  
63]
- P. SINGH et P. TANDRA, Reconfigurable microstrip filtenna with wide tuning

64] range for Sub-6 GHz applications., 2015.

C. CHEN et V. DEVABHAKTUNI, A reconfigurable filtenna for cognitive radio  
65] applications., 2014.

M. ABDELGHANY, W. ALI et H. MOHAMED, «Filtenna with frequency  
66] reconfigurable operation for cognitive radio and wireless applications.,» 2023.

F. K. A.-M. A. I. Juma'a, «. Design and implementation of a miniaturized  
67] filtering antenna for 5G mid-band applications,» *Electronics*,, 2022.

R. D. A. & R. J. S. Boddu, «Design of a microstrip filtering antenna for 4G and  
68] 5G wireless networks,» *Journal of Telecommunications and Information Technology*,  
2023.

F. RUSEK, Scaling up MIMO: opportunities and challenges with very large  
69] arrays., 2012.

E. ALI, M. ISMAIL et R. NORDIN, Beamforming Techniques for Massive  
70] MIMO Systems in 5G: Overview, Classification, and Trends for Future Research., 2017.

B. SCHULZ, MIMO and Beamforming Technologies., 2015.  
71]

C. W. a. S. Balanis, «Antenna Theory: Analysis and Design,» 2016.  
72]

D. J. W. & S. Pozar, Microwave Engineering, Hoboken, NJ, USA., 2011.  
73]

R. Garg, I. Bahl et Bozzi, Microstrip Lines and Slotlines, London, UK,,: Artech  
74] House, 2013.

A. GHIOTTO, «Conception d'antennes de tags RFID UHF, application a la  
75] réalisation par jet de matière.,» 2008.

A. BENOMAR, *Etude des antennes à Résonateurs Diélectriques. Application*  
76] *aux réseaux de télécommunications.*, Bretagne, 2013.

L. BABOUR, *Etude et conception d'antennes ultra large bande miniaturisées en*

77] *impulsionnel.*, Grenoble, 2009.

J. NEVERLY, *Design of Vivaldi antenna.*, Prague, 2007.

78]

«Le radioamateur,» [En ligne]. Available:

79] <https://www.leradioamateur.com/antenne-dipole.html>.

«Manuals +,» [En ligne]. Available: <https://manuals.plus/fr/ets-lindgren/3104c->

80] *biconical-antenna-manual*.

N. AGRAWALL et G. KUMAR, «New wideband monopole antennas,» chez

81] *Antennas and propagation.*, 1997, pp. 248-251.

«Delta,» [En ligne]. Available: <https://shopdelta.eu/antenne-log-periodique-atk->

82] *log5-1221-60-dipol\_14\_p10960.html*.

K. CARVER et J. MINK, «Microstrip Antenna Technology,» chez *Antenna*

83] *propagation*, 1981, pp. 2-24.

O. PICON et COLL, *Les antennes, théorie, conception et application*, Paris, 2009.

84]

D. AISSAOUI, *Analyse à l'aide de modèles équivalents d'antennes imprimées*

85] *alimentées par ligne adaptée.*, Tlemcen, 2007.

B. ABLA, *Contribution à l'étude des antennes microstrip Supraconducteur de*

86] *forme triangulaire.*, Constantine, 2010.