

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE DE M'HAMMED BOUGARA, BOUMERDES



FACULTE DE TECHNOLOGIE

Thèse de Doctorat

Présentée par :

FORTAS Ibrahim

En vue de l'obtention du diplôme de **DOCTORAT LMD** en :

Filière : Télécommunications

Spécialité : Systèmes des Télécommunications

**Etude et Conception d'une antenne Patch à bande
rejetée**

Devant le jury composé de :

MERAIHI Yassine	Prof.	Université de Boumerdes	Président
AYAD Mouloud	Prof.	Université de Sétif 1	Directeur
MESSAOUDI Nouredine	Prof.	Université de Boumerdes	Examineur
AKROUM Hamza	MC- A	Université de Boumerdes	Examineur
MAYOUF Abdelhalim	Prof.	Université de Sétif 1	Examineur
ZOUBIRI Bachir	MR -A	Centre CDTA	Invité

Année Universitaire : 2024/2025

Résumé

Les communications sans fil connaissent une expansion rapide, nécessitant des solutions innovantes face à la hausse des besoins en débits élevés et à la saturation du spectre. La technologie ultra-large bande (ULB) se présente comme une alternative prometteuse. Dans le cadre de cette thèse, deux nouvelles antennes ULB ont été proposées : une antenne élémentaire patch à doubles ellipses alimentée par une ligne coplanaire (CPW) et une antenne microruban réseau de dipôles logarithmiquement périodique (MLPDA) alimenté par deux lignes microrubans.

Étant donné que les systèmes ULB peuvent générer des interférences avec les applications existantes (WiMAX, WLAN, bande X, etc.), l'intégration de mécanismes de bandes rejetées s'avère essentielle. Pour y remédier, des cellules à métamatériaux sous forme de résonateurs en boucle ouverte ont été placées près du patch de la première antenne, tandis que des stubs rectangulaires ont été connectés à la ligne microruban de la seconde antenne. Ces techniques permettent de rejeter les bandes WLAN et Satellite DL (bande X) pour l'antenne patch, ainsi que les bandes WiMAX et WLAN pour l'antenne MLPDA. Les performances des antennes ont été analysées via des simulations sous CST Studio, puis validées par des mesures expérimentales. Les résultats obtenus montrent une bonne concordance entre simulations et expérimentations, confirmant l'efficacité des solutions proposées pour répondre aux exigences des communications sans fil modernes en termes de large bande et de rejet d'interférences.

Mots clés : antenne patch, microruban, ULB, CPW, Métamatériaux, Stubs, bandes rejetées.

Liste des Publications et des Communications

Les travaux de recherche scientifiques réalisés au cours de la préparation de cette thèse de doctorat :

I- Publications Internationales :

- 1- Fortas, I., Ayad, M., & Zoubiri, B. (2025). Compact UWB Patch Antenna with Open-Loop Resonator for Dual-Band Rejection. *Microwave Journal*, 68(2).
- 2- Fortas, I., Ayad, M., & Zoubiri, B. (2024). Dual Rectangular Band-Rejected for a Compact UWB Microstrip Log-Periodic Dipole Array Antenna using Rectangular Stubs. Vol. 20, No. 3 (2024) *J. Electrical Systems*.
- 3- Zoubiri, B., Fortas, I., Ayad, M., & Tebache, S. (2024). 2 to 18 GHz MLPDA Employs Tapered Balun Feed Structure. *Microwave Journal*, 67.

II- Communications Internationales :

- 1- Fortas, I., Zidour, A., "Dual band rejected for UWB patch antenna," 3rd International Conference on Electronics and Electrical Engineering (IC3E'2022), University of Bouira-Algeria, 05th-06th Dec 2022.
- 2- Fortas, I., Ayad, M., Zoubiri, B., Tebache, S., & Fertas, K. (2024, July). UWB Antenna with WLAN and X-Band Rejection Based on Metamaterials. In 2024 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and INC/USNC-URSI Radio Science Meeting (AP-S/INC-USNC-URSI) (pp. 2615-2616). IEEE.
- 3- I. Fortas, M. Ayad, B. Zoubiri and S. Tebache, "Compact UWB High Gain Microstrip Log Periodic Dipole Array Antenna," 2024 1st International Conference on Electrical, Computer, Telecommunication and Energy Technologies (ECTE-Tech), Oum El Bouaghi, Algeria, 2024, pp. 1-4, doi: 10.1109/ECTE-Tech62477.2024.10850967.

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, je remercie ALLAH, le Tout-Puissant. Sans Sa volonté, rien n'est possible. Il m'a donné l'aide, le courage et la patience nécessaires pour réaliser ce travail.

En premier lieu, j'exprime mes sincères remerciements et ma profonde gratitude à mon directeur de thèse, Monsieur le professeur AYAD Mouloud, Professeur à l'Université de Sétif. Sa passion pour la recherche, son aide inestimable, sa patience et ses encouragements constants ont été essentiels à l'accomplissement de ce travail. Ses conseils avisés, ses remarques constructives, ainsi que ses directives scientifiques et pédagogiques ont enrichi mon parcours académique. Je suis profondément reconnaissant pour toutes les connaissances qu'il m'a transmises.

Je souhaite également exprimer ma gratitude envers le Docteur ZOUBIRI Bchair, mon tuteur de stage au sein du centre de développement des technologies avancées, pour sa confiance, son orientation et son soutien indéfectible tout au long de ce travail.

Je remercie également toute l'équipe du département d'Ingénierie des Systèmes Électriques de l'Université de Boumerdès. Mes remerciements vont également à tous les membres du laboratoire Ingénierie des Systèmes et Télécommunications (LIST) de Boumerdès.

J'adresse mes remerciements aux membres de jury Prof. MERAIHI Yassine, professeur à l'université de Boumerdes, Prof. MESSAOUDI Nouredine, professeur à l'université de Boumerdes, Prof. MAYOUF Abdelhalim professeur à l'université de Sétif, et Dr. AKROUM Hamza Maître de conférences « A » professeur à l'université de Boumerdes.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à tous les membres du laboratoire Radiofréquences et Antennes (RFA) de la division TELECOMS au sein du CDTA pour leurs précieux conseils, leur expertise et leurs suggestions enrichissantes, qui ont grandement contribué à l'aboutissement de ce travail.

Je suis reconnaissant envers tous les professeurs de ma discipline, chacun par son nom, pour leur contribution à mon développement académique.

Je tiens à remercier mes parents et ma famille pour leur soutien inconditionnel. Votre éducation, vos prières et votre aide sous toutes leurs formes ont été les piliers de ma réussite. Je ne trouve pas les mots pour exprimer ma gratitude. Merci papa, maman, pour tout ce que vous avez fait pour moi. Que Dieu me donne les moyens de vous le rendre. Je remercie également vivement ma femme pour son soutien et ses encouragements durant les moments difficiles.

Enfin, merci à tous ceux qui ont participé, de près ou de loin, à la réalisation de ce manuscrit.

Liste des abréviations

- ANN : Réseau de Neurones Artificiels / Artificial Neural Network
- BP : Bande Passante / Bandwidth
- CEM : Compatibilité Électromagnétique / Electromagnetic Compatibility
- CNN : Réseau de Neurones Convolutifs / Convolutional Neural Network
- CPW : Ligne Coplanaire / Coplanar Waveguide
- CSRR : Résonateur Annulaire Fendu Complémentaire / Complementary Split Ring Resonator
- CST : Technologie de Simulation Informatique / Computer Simulation Technology
- DGS : Structure de Plan de Masse Défectueuse / Defected Ground Structure
- DE : Évolution Différentielle / Differential Evolution
- DMS : Structure Microruban Défectueuse / Defected Microstrip Structure
- DNG : Double-Négatif / Double Negative
- DPS : Structure de Patch Défectueuse / Defected Patch Structure
- DSP : Densité spectrale de Puissance
- EBG : Bande Interdite Électromagnétique / Electromagnetic Band Gap
- ENG : Épsilon-Négatif / Epsilon-Negative
- FCC : Commission Fédérale des Communications / Federal Communications Commission
- FEKO : Logiciel de Simulation Électromagnétique / Electromagnetic Simulation Software
- FDTD : Méthode des Différences Finies dans le Domaine Temporel / Finite-Difference Time-Domain
- FEM : Méthode des Éléments Finis / Finite Element Method
- FLSE : Élément Replié en Forme de T / Folded T-shaped Stub Element
- FPGA : Circuit Logique Programmable sur le Terrain / Field-Programmable Gate Array
- FR4 : Substrat en Époxy Renforcé de Fibre de Verre / Flame Retardant 4
- FSS : Service Fixe par Satellite / Fixed Satellite Service
- GA : Algorithme Génétique / Genetic Algorithm
- GHz : Gigahertz / Gigahertz
- GPS : Système de Positionnement Global / Global Positioning System
- Γ (Gamma) : Coefficient de Réflexion / Reflection Coefficient
- HIPERLAN : Réseau Local Radio à Haute Performance / High Performance Radio Local Area Network
- HFSS : Simulateur de Structures à Haute Fréquence / High Frequency Structure Simulator
- IEEE : Institut des Ingénieurs Électriciens et Électroniciens / Institute of Electrical and Electronics Engineers
- IOT : Internet des Objets / Internet of Things
- IR : Radio à Impulsions / Impulse Radio
- ISM : Bandes Industrielles, Scientifiques et Médicales / Industrial, Scientific, and Medical bands
- LM : Levenberg-Marquardt / Levenberg-Marquardt
- LTE : Évolution à Long Terme / Long-Term Evolution
- MAPE : Erreur Absolue Moyenne en Pourcentage / Mean Absolute Percentage Error
- MNG : Mu-Négatif / Mu-Negative
- MOM : Méthode des Moments / Method of Moments
- MAPE : Erreur de Pourcentage Absolue Moyenne

- MSE : Erreur Quadratique Moyenne / Mean Square Error
- MTM : Métamatériaux / Metamaterials
- OEM : Onde Électromagnétique / Electromagnetic Wave
- PCB : Circuit Imprimé / Printed Circuit Board
- PIFA : Antenne Inversée de Type F Plane / Planar Inverted-F Antenna
- PSO : Optimisation par Essaim Particulaire / Particle Swarm Optimization
- RA : Résistance de l'Antenne / Antenna Resistance
- RF : Radiofréquence / Radio Frequency
- RFID : Identification par Radiofréquence / Radio Frequency Identification
- RL : Résistance de Pertes de l'Antenne / Antenna Loss Resistance
- RO4003 : Type de Substrat Rogers / Rogers Substrate Type 4003
- ROS : Rapport d'Onde Stationnaire / Standing Wave Ratio
- R_r : Résistance de Rayonnement / Radiation Resistance
- S11 : Coefficient de Réfexion / Reflection Coefficient (S11)
- S/m : Siemens par Mètre / Siemens per Meter
- SMA : Connecteur SubMiniature Version A / SubMiniature version A
- SNR : Rapport Signal sur Bruit / Signal-to-Noise Ratio
- SRR : Résonateur Annulaire Fendu / Split Ring Resonator
- TLC : Composite Stratifié en Téflon / Teflon Laminate Composite
- UIT-R : Union Internationale des Télécommunications – Secteur des Radiocommunications / International Telecommunication Union – Radiocommunication Sector
- UWB : Ultra Large Bande / Ultra-Wideband
- VB : Visual Basic / Visual Basic
- VNA : Analyseur de Réseau Vectoriel / Vector Network Analyzer
- VMTS : Bandes de Télémétrie Médicale Sans Fil / Wireless Medical Telemetry Service bands
- VSWR : Rapport d'Onde Stationnaire en Tension / Voltage Standing Wave Ratio
- WLAN : Réseau Local Sans Fil / Wireless Local Area Network
- WiMAX : Interopérabilité Mondiale pour l'Accès Micro-ondes / Worldwide Interoperability for Microwave Access
- X_A : Réactance d'Antenne / Antenna Reactance
- YIG : Grenat d'Yttrium et de Fer / Yttrium Iron Garnet
- ZC : Impédance Caractéristique de la Ligne / Characteristic Impedance
- Z_A : Impédance d'Entrée de l'Antenne / Antenna Input Impedance
- θ (Theta) : Angle d'Élévation / Elevation Angle
- Φ (Phi) : Angle d'Azimut / Azimuth Angle
- μm : Micromètre / Micrometer

Liste des notations et symboles

- A : Amplitude
- A_s : Surface de la cellule métamatériaux
- B_p : Bande passante
- β : Facteur d'onde de propagation
- C : Capacité du circuit équivalent /
- c : Vitesse de la lumière ($\sim 3 \times 10^8$ m/s)

- d : Distance
- dA : Élément différentiel de surface
- dB : Décibel
- D : Directivité
- E : Champ électrique
- f : Fréquence
- f_0 : Fréquence de résonance
- G : Gain de l'antenne
- Γ : Coefficient de réflexion
- h : Hauteur du substrat
- H : Champ magnétique
- K : Rapport des axes dans une antenne elliptique
- L : Longueur du patch
- L_{eff} : Longueur effective du patch
- L_s : Longueur du substrat
- W_s : Largeur du substrat
- M : Métamatériaux responsables des rejets des bandes
- μ_{eff} : Perméabilité effective
- P : Puissance
- P_r : Puissance reçue
- P_{in} : Puissance d'entrée et
- P_{out} : Puissance de sortie
- Q : Facteur de qualité
- R : Résistance du circuit équivalent / Rayon
- R_g : Résistance de la ligne de transmission
- S : Scattering parameters
- S_{21} : Coefficient de transmission
- S_{11} : Coefficient de réflexion
- $\tan \delta$: Tangente de perte diélectrique
- λ : Longueur d'onde
- ϵ_r : Permittivité relative
- μ_r : Perméabilité relative

Table des matières

Introduction Générale	1
-----------------------------	---

Chapitre 01 « Généralités sur les antennes »

1.1.Introduction.....	4
1.2. Définition d'une antenne.....	4
1.3. Histoire des antennes	4
1.4. Caractéristiques fondamentales des antennes	5
1.4.1. L'impédance d'entrée (Z_A).....	5
1.4.2. Le rendement.....	6
1.4.3. Le coefficient de réflexion (S_{11})	6
1.4.4. Le rapport d'onde stationnaire (ROS).....	6
1.4.5. Le diagramme de rayonnement.....	7
1.4.5.1. Les zones de rayonnement.....	8
1.4.6. La densité de puissance de rayonnement	9
1.4.7. L'intensité de rayonnement.....	9
1.4.8. La directivité (D).....	9
1.4.9. L'efficacité (η)	9
1.4.10. La polarisation.....	10
1.4.10.1. Types de Polarisation.....	10
1.4.11. La bande passante (BP)	11
1.4.12. Le gain (G)	12
1.5. Classification des antennes	11
1.6. Etapes clés pour avoir une antenne fiable.....	12
1.6.1. Étude et modélisation.....	12
1.6.2. Conception	13
1.6.3. Prototypage (Fabrication).....	13
1.6.4. Test et Validation	13
1.7. Conclusion	14

Chapitre 02 « Etat de l'art sur les antennes patches »

2.1. Introduction.....	16
------------------------	----

2.2. Les antennes imprimées.....	16
2.2.1. Historique des antennes imprimées.....	16
2.2.2. Avantages et inconvénients des antennes imprimées.....	16
2.2.3. Types d'antennes imprimées.....	17
2.3. L'antenne patch.....	17
2.3.1. Composition de l'antenne patch.....	17
2.3.1.1. L'élément rayonnant.....	18
2.3.1.2. Le substrat.....	18
2.3.1.3. Le plan de masse.....	19
2.3.1.4. Le point d'alimentation	19
2.4. Techniques d'alimentation.....	19
2.4.1. Alimentation avec contact.....	19
2.4.1.1. La ligne microruban.....	19
2.4.1.2. La sonde coaxiale	20
2.4.1.3. La ligne coplanaire (CPW).....	21
2.4.1.3.1. Les variantes de CPW	21
2.4.2. Alimentation sans contact	22
2.4.2.1. Alimentation par couplage électromagnétique	22
2.4.2.2. Alimentation couplée par fente (ouverture).....	23
2.5. Circuit équivalent de l'antenne patch	23
2.6. Méthodes d'analyse des antennes patches.....	25
2.6.1. Méthode de cavité	25
2.6.2. Méthode de la ligne de transmission	25
2.6.3. Méthode Full Wave.....	25
2.7. Champ de rayonnement de l'antenne patch.....	26
2.8. Les applications des antennes patch	27
2.8.1. Applications Biomédicales.....	27
2.8.2. Communication sans fil.....	27
2.8.3. Applications Satellites.....	27
2.8.4. Applications en Télécommunications	27
2.8.5. Applications Militaires.....	27
2.8.6. Instrumentation Environnementale	27
2.9. Conclusion	28

Chapitre 03 « Techniques d'amélioration de la BP et de rejet de bandes des antennes patches »

3.1. Introduction.....	29
3.2. Techniques utilisés pour l'optimisation de la BP des antennes Patches.....	29
3.2.1. L'usage des fentes et encoches.....	29
3.2.2. L'alimentation CPW	30
3.2.3. Les Patches parasites.....	30
3.2.4. Broche Court-circuit.....	32
3.2.5. Le choix de substrat.....	33
3.2.6. Les substrats ferrites.....	34
3.2.7. La technique DGS	35
3.2.8. La géométrie Fractale.....	36
3.2.9. L'usage des composants actifs	37
3.2.10. Les techniques d'optimisation computationnelles	37
3.2.11. Les outils de l'IA.....	38
3.3. Résumé des techniques d'optimisation de la BP des antennes patches.....	38
3.4. La technologie ULB.....	40
3.4.1. Historique	40
3.4.2. Avantages et inconvénients.....	40
3.5. Antennes patches ULB	41
3.5.1. Applications des antennes ULB	41
3.6. La contrainte principale de la technologie ULB.....	42
3.7. Notion de bande rejetée (Notch).....	42
3.8. Techniques de rejet des bandes pour les antennes patches ULB.....	44
3.8.1. Les fentes et encoches (Slot) (DPS et DMS)	44
3.8.2. La structure DGS.....	46
3.8.3. L'usage des stubs	47
3.8.4. Les résonateurs sous forme d'anneau (SSR).....	48
3.8.5. Les structures EBG.....	50
3.8.6. Les métamatériaux	51
3.8.7. Les outils de l'IA.....	54

3.9. Résumé des techniques pour rejeter des bandes pour les antennes patchs ULB	57
3.10. Conclusion	58

Chapitre 04 « Contributions et Travaux réalisés »

4.1. Introduction.....	59
4.2. Antenne patch ULB compacte avec deux bandes rejetées.....	59
4.2.1. L'étude	59
4.2.1.1. Cahier des Charges	59
4.2.2. La Conception	60
4.2.2.1. Le choix d'outil de simulation.....	60
4.2.2.2. Le choix de substrat.....	60
4.2.2.3. Le choix de la méthode d'alimentation.....	60
4.2.2.4. Le choix de connecteur.....	61
4.2.2.5. La conception de l'antenne ULB.....	61
4.2.3. Les bandes rejetées	62
4.2.3.1. Le choix de la technique de rejet des bandes indésirables	62
4.2.3.2. La conception de la cellule unitaire à métamatériaux	62
4.2.3.3. La première bande rejetée (WLAN).....	65
4.2.3.4. L'effet de stubs rectangulaire	66
4.2.3.5. La deuxième bande rejetée (Bande X de satellite DL).....	67
4.2.4. La fabrication du prototype final	69
4.2.5. Test et validation des résultats	70
4.2.5.1. Coefficient de réflexion.....	70
4.2.5.2. Le gain.....	71
4.2.5.3. Le diagramme de rayonnement	72
4.2.5.4. La distribution du courant	74
4.2.6. Résumé de la procédure de la conception du prototype final	75
4.2.7. Comparaison avec d'autres travaux similaires	75
4.3. Antenne ULB-MLPDA avec deux bandes rejetées	76
4.3.1. l'antenne ULB-MLPDA	76
4.3.2. Les bandes rejetées	78
4.3.2.1. Analyse du courant de surface	79

4.3.2.2. La premiere bande rejetée (WiMAX)	79
4.3.2.3. La bande rejetée rectangulaire	81
4.3.2.4. La deuxieme bande rejetée (WLAN)	82
4.3.3. Fabrication de prototype et mesure	83
4.3.3.1. Le coefficient de reflexion (S11)	83
4.3.3.2. Le gain	85
4.3.3.3. Le diagramme de rayonnement	85
4.3.3.4. La distribution du courant	86
4.3.4. Comparaison avec des travaux similaires	87
4.3. Conclusion	88
Conclusion générale et perspectives	89

Liste des figures

Chapitre 01

Figure 1.1: Schéma équivalent d'une antenne	5
Figure 1.2: Diagramme de rayonnement d'une antenne directive	7
Figure 1.3: Les zones de rayonnement d'une antenne	8
Figure 1.4: Types de polarisation a) Polarisation linéaire, b) Polarisation circulaire, c) Polarisation elliptique	10
Figure 1.5: Classification des antennes.....	12
Figure 1.6: Etapes clés pour réaliser une antenne fiable.....	13
Figure 1.7: L'analyseur de réseaux vectoriels (VNA) de L'équipe RFA du CDTA.....	15

Chapitre 02

Figure 2.1: Géométrie de l'antenne patch.....	17
Figure 2.2: Exemple d'une antenne patch alimenté par une ligne microruban	18
Figure 2.3: Exemple d'une antenne patch alimentée par une sonde coaxiale	19
Figure 2.4: Exemple d'une ligne coplanaire CPW	20
Figure 2.5: Ligne coplanaire de masse (GCPW)	20
Figure 2.6: Alimentation par couplage électromagnétique.....	21
Figure 2.7: Alimentation couplée par fente (ouverture)	23
Figure 2.8: Circuit équivalent d'une antenne patch	24
Figure 2.9: Principe de rayonnement d'une antenne patch.....	26

Chapitre 03

Figure 3.1: Géométrie de l'antenne patch proposée utilisant des fentes et encoches.....	30
Figure 3.2: S11 du prototype utilisant des fentes et encoches	30
Figure 3.3: Géométrie de l'antenne proposée utilisant la technique CPW	31
Figure 3.4: Coefficient de réflexion de l'antenne proposée utilisant la technique CPW.....	31
Figure 3.5: Photographie de l'antenne fabriquée utilisant des patches parasites	31
Figure 3.6: S11 de l'antenne proposée utilisant des patches.....	32
Figure 3.7: Géométrie de l'antenne proposée utilisant un Via A) Patch, B) Plan de masse....	33
Figure 3.8 : S11 de l'antenne proposée utilisant un Via	33
Figure 3.9 : Comparaison du coefficient de réflexion pour les trois substrats	34
Figure 3.10: Prototype de l'antenne patch proposée utilisant la géométrie fractale	36
Figure 3.11: Comparaison entre le S11 simulé et mesuré du prototype final.....	37
Figure 3.12: Système d'antenne ULB avec rejet de bandes utilisant un filtre coupe-bande....	43
Figure 3.13: Comparaison entre les bandes rejetées conventionnelles et les bandes rejetées .	43
Figure 3.14: Géométrie de l'antenne patch ULB avec deux bandes rejetées en prototype d'antenne ULB utilisant les fentes H et U	45
Figure 3.15: Comparaison entre le S11 mesuré et simulé du prototype d'antenne ULB avec deux bandes rejetées utilisant les fentes H et U	45

Figure 3.16: Gain simulé du prototype d'antenne ULB avec deux bandes rejetées utilisant les fentes H et U	46
Figure 3.17: Géométrie de l'antenne patch ULB avec trois bandes rejetées utilisant la DGS	46
Figure 3.18: S11 de l'antenne patch ULB avec trois bandes rejetées utilisant la DGS	46
Figure 3.19: Gain de l'antenne patch ULB avec trois bandes rejetées utilisant la DGS	47
Figure 3.20: Géométrie de l'antenne proposée avec une bande rejetée utilisant un stub en forme de T	47
Figure 3.21: Taux d'ondes stationnaire de l'antenne proposée avec une bande rejetée utilisant un Stub en forme de T	48
Figure 3.22: Gain de l'antenne proposée avec une bande rejetée utilisant un Stub en forme T..	48
Figure 3.23: Géométrie de l'antenne patch ULB utilisant les résonateurs SSRs	49
Figure 3.24: S11 de l'antenne ULB avec deux bandes rejetées utilisant les résonateurs SSRs	49
Figure 3.25: L'efficacité de rayonnement de l'antenne patch ULB avec deux bandes rejetées utilisant les résonateurs SSRs	49
Figure 3.26: Modèle d'un EBG A) Structure EBG, B) circuit équivalent du EBG	50
Figure 3.27: Géométrie de l'antenne patch ULB avec double bandes rejetées utilisant les EBG A) Vue de face, B) Vue latérale, C) Vue arrière	51
Figure 3.28: Le S11 pour l'antenne patch avec deux bandes rejetées utilisant 4 EBG dans le plan de masse	51
Figure 3.29: Géométrie de l'antenne patch ULB avec trois bandes rejetées utilisant les EBGs ET les SRRs A) Vue de face, B) Vue arrière	52
Figure 3.30: S11 de l'antenne patch ULB avec trois bandes rejetées utilisant les EBGs ET les SRRs	52
Figure 3.31: Gain de l'antenne patch ULB avec trois bandes rejetées utilisant les EBGs ET les SRRs	53
Figure 3.32: Géométrie de l'antenne patch ULB A) Vue de dessus, B) Vue de Dessous	53
Figure 3.33: S11 de l'antenne ULB avec deux bandes rejetées utilisant 4 SRRs et 3 CSRRs	54
Figure 3.34: Gain de l'antenne patch ULB avec deux bandes rejetées utilisant 4 SRRs et 3 CSRRs	54
Figure 3.35: Géométrie de l'antenne patch ULB avec trois bandes rejetées utilisant l'ANN	55
Figure 3.36: S11 de l'antenne patch ULB avec trois bandes rejetées utilisant l'ANN	55
Figure 3.37: Géométrie de l'antenne patch ULB avec une bande rejetée utilisant l'ANN	56
Figure 3.38: S11 de l'antenne patch ULB avec une bande rejetée utilisant l'ANN	56

Chapitre 04

Figure 4.1: Géométrie de l'antenne ULB a) Patch elliptique b) patch à double ellipses	61
Figure 4.2: Comparaison des Coefficients de Réflexion : antenne patch elliptique et antenne patch à double ellipses	62
Figure 4.3: Cellule unitaire à métamatériaux en 3-D	63
Figure 4.4: Perméabilité de la cellule à métamateriaux	64
Figure 4.5: Perméabilité de la cellule à métamateriaux pour différentes valeurs de L_m	64

Figure 4.6: Géométrie de l'antenne ULB avec l'insertion de deux cellules à métamatériaux M1 et M2.....	65
Figure 4.7: S11 de l'antenne ULB avec deux cellules à métamatériaux M1 et M2	66
Figure 4.8: Géométrie de l'antenne ULB avec l'insertion de deux stubs.....	66
Figure 4.9: S11 ULB avec l'insertion de deux stubs	67
Figure 4.10: Géométrie de l'antenne ULB avec l'insertion de deux cellules à métamatériaux M3 et M4.....	67
Figure 4.11: S11 ULB avec l'insertion de deux cellules à métamatériaux M3 et M4.....	68
Figure 4.12: Géométrie du design final	68
Figure 4.13: Vue du prototype final réalisé	70
Figure 4.14: Vue expérimentale de mesure du S11 de l'antenne proposée	70
Figure 4.15: Comparaison entre le S11 simulé et mesuré de l'antenne proposée	71
Figure 4.16: Gain obtenu par simulation et par mesure pour l'antenne proposée	71
Figure 4.17: Diagramme de rayonnement simulé et mesuré de l'antenne proposée à 4,3GHz, 6,6GHz et 9GHz.....	72
Figure 4.18: Montage de mesure du gain et du diagramme de rayonnement de l'antenne proposée	73
Figure 4.19: Distribution du courant pour l'antenne proposée aux fréquences centrales des bandes rejetées	74
Figure 4.20: Procédure de conception de l'antenne proposée	75
Figure 4.21: Géométrie de l'antenne ULB-MLPDA proposée	77
Figure 4.22: S11 de l'antenne proposée.....	78
Figure 4.23: Distribution du courant de surface de l'antenne ULB MLPDA proposée à Fn1 et Fn2	80
Figure 4.24: Géométrie du design avec l'ajout du premier stub rectangulaire S1	80
Figure 4.25: S11 de l'antenne ULB MLPDA avec Stub S1 pour différentes valeurs de L_{S1} ... 80	
Figure 4.26: Géométrie du design avec l'ajout du deuxième tenon rectangulaire S2.....	81
Figure 4.27: Coefficient de réflexion de l'ULB-MLPDA proposé avec deux excroissances S1 et S2	81
Figure 4.28: Géométrie de la conception ajoutant, a) le troisième stub rectangulaire S3, b) le quatrième stub rectangulaire S4	82
Figure 4.29: S11 de l'ULB-MLPDA proposé avec les Stubs S3 et S4	82
Figure 4.30: Prototype de l'antenne ULB-MLPDA réalisée avec deux bandes rejetées rectangulaires :A) Vue de dessus, B) Vue de dessous	83
Figure 4.31: Mesure du S11 de l'antenne proposée.....	84
Figure 4.32: Coefficient de réflexion simulé et mesuré de l'antenne proposée	84
Figure 4.33: Gain obtenu par simulation et par mesure pour l'antenne proposée	85
Figure 4.34: Diagramme de rayonnement simulé et mesuré de l'antenne proposée dans le plan E et le plan H à 2.4, 4 et 10 GHz	86
Figure 4.35: Distribution du courant de l'antenne proposée : A) à Fn1, B) à Fn2.....	87

Liste des tableaux

Chapitre 03

Tableau 3.1: Comparaison des performances d'une antenne rectangulaire fonctionnant à 3.5 GHz sur différents substrats.....	34
Tableau 3.2: Comparaison des performances de l'antenne proposée avant et après l'ajout du substrat ferrite (YIG).....	35
Tableau 3.3: Comparaison des performances de l'antenne avant et après l'implémentation de la DGS.....	36
Tableau 3.4: Différentes techniques et méthodes d'amélioration de la BP pour les antennes patches	39
Tableau 3. 5: Différentes techniques utilisées pour le rejet de bandes indésirables pour les antenne patch ULB	57

Chapitre 04

Tableau 4. 1: Paramètres de l'antenne patch ULB	61
Tableau 4. 2: Différents paramètres des cellules à métamatériaux.....	69
Tableau 4. 3: Comparaison des travaux connexes avec l'antenne proposée	76
Tableau 4. 4: Paramètres de la conception finale de l'antenne ULB-MLPDA	78
Tableau 4. 5: Paramètres optimisés finaux des Stubs	83
Tableau 4. 6: Comparaison des performances de l'antenne proposée avec des travaux similaires existants	87

Introduction Générale

Introduction générale

Les antennes sont des composants essentiels des systèmes de communication modernes utilisés pour transmettre et recevoir des signaux électromagnétiques. Les technologies sans fil évoluent rapidement, créant une forte demande d'antennes à haute performance capables de fonctionner sur différentes fréquences. Parmi les types d'antennes, les antennes patch, largement utilisées dans les systèmes de communication sans fil [1-3], la télédétection [4] et l'Internet des objets (IoT) [5-6], sont appréciées pour leur compacité, leur faible coût et leur facilité d'intégration [1], [7-8]. Cependant, avec l'accroissement des dispositifs fonctionnant sur des bandes de fréquences chevauchantes (WiMAX, 5G, WLAN ...etc.), un défi majeur se pose c'est comment éviter les interférences provenant de signaux indésirables tout en maintenant des performances optimales dans les bandes utiles. C'est dans ce contexte que les antennes patch à bandes rejetées suscitent un intérêt croissant [9]. Ces antennes visent à bloquer sélectivement des plages de fréquences spécifiques grâce à des techniques innovantes, comme l'intégration de fentes structurées, de métamatériaux, ... Néanmoins, leur conception soulève des problématiques complexes telle que le contrôle précis des bandes rejetées sans dégrader le gain, la bande passante ou l'efficacité, le poids des structures (essentielle pour les applications embarquées), stabilité des performances face aux variations environnementales ou de fabrication [10].

Cette étude se concentre sur la conception d'une antenne microruban multifonctionnelle, capable de rejeter des bandes critiques tout en répondant aux exigences des systèmes modernes (faible encombrement, robustesse, coût maîtrisé). L'objectif de ce travail de doctorat est d'explorer des solutions innovantes pour optimiser le compromis entre le rejet sélectif des fréquences et les performances globales, en s'appuyant sur des simulations électromagnétiques. Il s'agit d'une thèse qui se base sur l'étude, la conception et la réalisation d'une antenne microruban avec deux bandes rejetées. L'antenne est destinée à être utilisée dans les applications ultra-larges bandes (ULB) pour lesquelles la gestion des interférences est une préoccupation majeure.

Nous soulignons l'importance d'utiliser des antennes optimisées pour les applications ULB, en mettant en avant les avantages des techniques avancées telles que les métamatériaux et les stubs pour éliminer efficacement les bandes indésirables. L'intégration de ces approches permet de minimiser les interférences tout en maintenant un bon appariement d'impédance et des performances de rayonnement stables. De plus, cette étude met en évidence de nouvelles pistes de recherche visant à affiner la conception des futurs dispositifs de communication, en insistant sur la nécessité de développer des antennes plus compactes et plus performantes adaptées aux exigences des prochaines générations de technologies sans fil.

La présentation de notre thèse est structurée comme suit :

Le premier chapitre présentera une vue d'ensemble des principes fondamentaux des antennes en s'appuyant sur des ouvrages de référence dans le domaine tels que ceux de Balanis, Pozar et d'autres auteurs renommés. Ce chapitre explorera les bases théoriques essentielles qui régissent le fonctionnement des antennes, en décrivant les différentes catégories d'antennes, allant des dipôles (Filaire) aux antennes patch (Planaire), leurs caractéristiques fondamentales comme le gain, qui mesure la capacité d'une antenne à diriger l'énergie dans une direction spécifique, et la directivité, qui quantifie l'efficacité de la concentration du rayonnement électromagnétique. D'autres paramètres critiques, tels que la largeur de bande, qui définit l'étendue de fréquences sur laquelle l'antenne peut opérer efficacement, sont également discutés. Ainsi que leurs applications dans le domaine de la communication sans fil, des radars et des systèmes de détection, illustrant ainsi leur importance dans les technologies modernes.

Dans le deuxième chapitre, nous explorerons l'état de l'art des antennes patch, qui sont largement utilisées dans les applications modernes en raison de leur faible profil, de leur facilité de fabrication et de leur capacité à être intégrées dans des circuits imprimés. Ces antennes offrent plusieurs avantages, tels que des coûts de production réduits et une bonne performance de rayonnement, mais elles présentent aussi des défis, notamment en termes de bande passante limitée et de sensibilité aux pertes. Nous analyserons les différents modèles existants ainsi que les techniques d'alimentation courantes, telles que l'alimentation par ligne microruban et la ligne Coplanaire (CPW).

Le troisième chapitre s'articulera autour de trois axes principaux. Tout d'abord, nous explorerons les différentes techniques d'amélioration de la bande passante des antennes patch, en mettant l'accent sur des approches avancées telles que l'intégration de structures résonantes, l'utilisation de motifs fractals et l'adoption de configurations multicouches, qui permettent d'élargir la couverture fréquentielle tout en maintenant une efficacité de rayonnement élevée. Ensuite, nous justifierons le choix de la technologie ULB en soulignant ses atouts majeurs, notamment sa capacité à offrir une transmission large bande et sa compatibilité avec les exigences croissantes des systèmes modernes de communication sans fil. Enfin, nous examinerons les techniques de rejet de bandes visant à atténuer les interférences générées par les systèmes coexistant dans le spectre ULB, tels que le WiMAX, le WLAN et autres. À cet effet, nous analyserons des méthodes efficaces basées sur l'intégration d'encoques sélectives, de résonateurs parasites et de métamatériaux, permettant de filtrer précisément ces fréquences indésirables sans compromettre les performances globales de l'antenne.

Le dernier chapitre mettra en avant la portée scientifique de cette thèse, qui repose sur deux travaux principaux. Le premier concerne la conception d'une antenne patch ULB compacte intégrant des cellules de métamatériaux pour rejeter deux bandes conventionnelles, offrant ainsi une meilleure

immunité aux interférences sans compromettre les performances globales de l'antenne. Le second travail porte sur une antenne microruban ULB à réseau de dipôles logarithmiquement périodique (ULB-MLPDA), dans laquelle deux bandes rectangulaires sont rejetées grâce à l'ajout de stubs serrés à la ligne microruban d'alimentation, permettant une suppression sélective des fréquences indésirables. L'ensemble du processus, incluant la conception, les simulations électromagnétiques, la fabrication et les tests expérimentaux de ces deux antennes, est minutieusement détaillé dans nos publications, mettant ainsi en évidence l'efficacité des techniques proposées et leur pertinence pour les applications modernes en télécommunications.

Finalement, les avancées continues dans les techniques de rejet de bande ouvrent la voie à des systèmes de communication plus robustes et plus sélectifs, capables d'opérer efficacement dans des environnements de plus en plus denses en signaux.

Chapitre 01

Généralités sur les antennes

1.1. Introduction

Dans cette partie de ce document, nous allons commencer par rappeler le concept des antennes en général en examinant les définitions essentielles et l'historique afin de comprendre leur évolution. Nous évoquerons ensuite une classification de ces dispositifs en catégories, offrant les connaissances essentielles nécessaires, ainsi que les principales caractéristiques et le principe de rayonnement en finissant par énumérer les étapes clés pour obtenir une antenne fiable et prête à utiliser.

1.2. Définition d'une antenne

D'après le dictionnaire Webster, une antenne est « un dispositif, généralement métallique (comme une tige ou un fil), servant à transmettre ou à recevoir des ondes radio ».

De son côté, la norme IEEE Std 145-1983 [1] définit une antenne comme « un moyen d'émettre ou de capter des ondes radio ».

Plus simplement, une antenne est un système qui assure la conversion entre l'énergie électrique et les ondes électromagnétiques : elle transforme l'énergie électrique en ondes électromagnétiques lors de l'émission, et inversement lors de la réception. Elle constitue ainsi l'interface entre un dispositif de guidage (comme une ligne coaxiale ou un guide d'ondes) et l'espace libre, permettant le transfert de l'énergie électromagnétique entre ces deux environnements [1].

1.3. Histoire des antennes

En 1831, Michael Faraday réalise une expérience novatrice mettant en lumière l'induction électromagnétique. En glissant un aimant à travers une bobine connectée à un galvanomètre, il engendre un champ magnétique variable. La bobine, agissant comme une antenne de cadre, capte le rayonnement électromagnétique, détecté par le galvanomètre. À cette époque, le concept de l'OEM n'était pas encore envisagé [11].

De 1861 à 1865, James Clerk Maxwell développe la théorie de l'électromagnétisme, basée sur les travaux expérimentaux de Faraday et d'autres scientifiques. Les équations de Maxwell expriment cette théorie, prévoyant l'existence des OEMs [11].

La validation de la théorie de Maxwell survient en 1886 grâce à Heinrich Hertz, qui met en place un système de communication sans fil. Hertz observe une perturbation en provoquant une étincelle électrique à proximité d'une antenne dipôle, utilisant le cadre de l'antenne comme récepteur. Ces expériences fondamentales jettent les bases du développement ultérieur de la technologie de la communication sans fil [11].

En 1901, Marconi réalise une prouesse en transmettant des informations au-dessus de l'Atlantique. Son émetteur utilise plusieurs fils verticaux fixés au sol, formant une antenne d'émission. L'antenne

de réception, située de l'autre côté de l'océan, consiste en un câble de 200 mètres soutenu par un cerf-volant [11]. Depuis cette avancée historique, des chercheurs du monde entier s'efforcent continuellement de développer de nouveaux concepts d'antennes afin de répondre aux exigences croissantes du marché [11].

1.4. Caractéristiques fondamentales des antennes

Les antennes occupent une place essentielle dans les systèmes de communication modernes, en assurant la transmission et la réception des OEMs. Leur conception et leurs caractéristiques techniques garantissent une communication fiable et performante dans des domaines variés tels que les télécommunications, la radiodiffusion, la télédétection, la navigation, entre autres. Dans cette partie, nous explorerons les caractéristiques techniques fondamentales des antennes, qui définissent leurs performances et leur utilité dans des applications spécifiques [1].

1.4.1. L'impédance d'entrée (Z_A)

L'impédance d'entrée d'une antenne, notée Z_A , se définit comme la résistance qu'une antenne présente à ses points d'accès. Elle peut être exprimée soit comme le rapport entre la tension et le courant à ces points, soit comme le rapport entre les composantes électriques et magnétiques du champ au point de connexion de l'antenne [1].

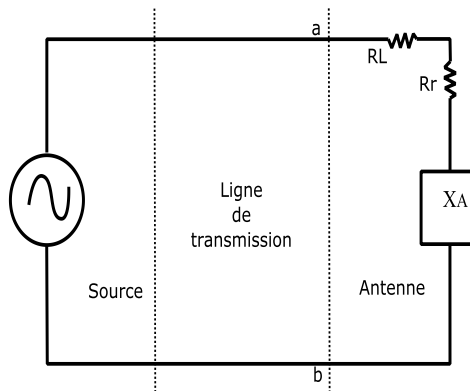


Figure 1.1. Schéma équivalent d'une antenne [1]

Dans la Figure 1.1, les bornes de l'antenne sont repérées par les points a et b. Son impédance Z_A est de nature complexe, composée d'une partie réelle R_A et d'une partie imaginaire X_A .

$$Z_A = R_A + jX_A \quad (1.1)$$

$$R_A = R_r + R_L \quad (1.2)$$

Avec :

- Z_A est l'impédance d'antenne
- R_A est la résistance de l'antenne
- X_A est la réactance d'antenne

- R_r désigne la résistance de rayonnement de l'antenne. Elle correspond à la part de l'énergie transférée entre le circuit électrique et l'espace libre.
- R_L représente la résistance de pertes de l'antenne, incluant les pertes diélectriques, les pertes par conduction ainsi que celles dues aux ondes de surface. Elle traduit l'ensemble de l'énergie dissipée sous différentes formes.

1.4.2. Le rendement

Le rendement d'une antenne correspond au rapport entre l'énergie rayonnée par l'antenne et l'énergie totale fournie par son système d'alimentation [1]. Cette grandeur est habituellement exprimée par :

$$\eta = \frac{R_r}{R_r + R_L} \quad (1.3)$$

1.4.3. Le coefficient de réflexion (S11)

Le coefficient de réflexion, noté Γ (Gamma) ou S11 dans le contexte d'un système à accès unique, constitue un paramètre crucial pour caractériser l'adaptation d'une antenne à son circuit environnant. Il mesure la proportion d'amplitude entre l'onde incidente à l'entrée de l'antenne et l'onde renvoyée par celle-ci, résultant des discontinuités entre l'antenne et le circuit.

Lorsqu'une onde incidente se propage dans son milieu, une fraction de cette onde est réfléchie, tandis qu'une autre partie est dispersée dans l'environnement. Idéalement, le passage du régime "guidé" au régime "propagation" devrait s'effectuer sans pertes significatives. Pour atteindre cette idéalité, il est essentiel de minimiser le coefficient de réflexion, c'est-à-dire de réduire au maximum la quantité d'énergie réfléchie par l'antenne.

En analysant le coefficient de réflexion, les ingénieurs peuvent évaluer l'efficacité de l'adaptation de l'antenne au circuit précédent, contribuant ainsi à optimiser les performances globales du système [12].

Une meilleure adaptation de l'antenne se traduit par une valeur de réflexion plus faible. Ainsi, une réflexion de -10 dB correspond à une transmission de 90 % de la puissance vers l'antenne. Le coefficient de réflexion est mesuré par l'analyseur de réseau en fonction de la fréquence.

La valeur de Γ est exprimée par :

$$\Gamma = \frac{Z_A - Z_C}{Z_A + Z_C} \quad (1.4)$$

Notons que Z_C est l'impédance caractéristique de la ligne (qui est généralement réelle et égale à 50 Ω dans les bandes de fréquences pertinentes pour notre étude). Dans le cas où rien ne réfléchit, l'antenne est parfaitement adaptée ($Z_A = Z_C$), et par conséquent, $\Gamma = 0$.

1.4.4. Le rapport d'onde stationnaire (ROS)

Le rapport de stationnarité, est calculé à partir du coefficient de réflexion présenté précédemment. Il mesure l'incompatibilité de l'impédance entre deux éléments. En utilisation réelle, l'antenne n'est jamais parfaitement adaptée. Le cas minimal qui se traduit par une adaptation parfaite est $ROS=1$. En général, un ROS de 3, qui se traduit par un S_{11} de -6 dB, est encore considéré comme acceptable, Par exemple, dans le cas des applications de téléphonie mobile, cela correspond à un transfert de 75 % de la puissance incidente.

Le transfert de puissance est optimal lorsque l'impédance de l'antenne est parfaitement adaptée à celle du circuit [12].

$$ROS = \frac{1+\Gamma}{1-\Gamma} \quad (1.5)$$

1.4.5. Le diagramme de rayonnement

Le diagramme de rayonnement d'une antenne représente graphiquement la répartition de l'intensité rayonnée dans l'espace autour de l'antenne. Il montre comment l'antenne émet ou capte des ondes électromagnétiques dans différentes directions. La forme du diagramme de rayonnement est liée au type d'antenne utilisé, de sa conception et de ses caractéristiques [1].

Dans la région du champ lointain, le diagramme de rayonnement est déterminé et présenté en coordonnées sphériques. La figure 1.2 montre un exemple de diagramme de rayonnement d'une antenne directive dont le lobe principal est dirigé vers l'axe Z.

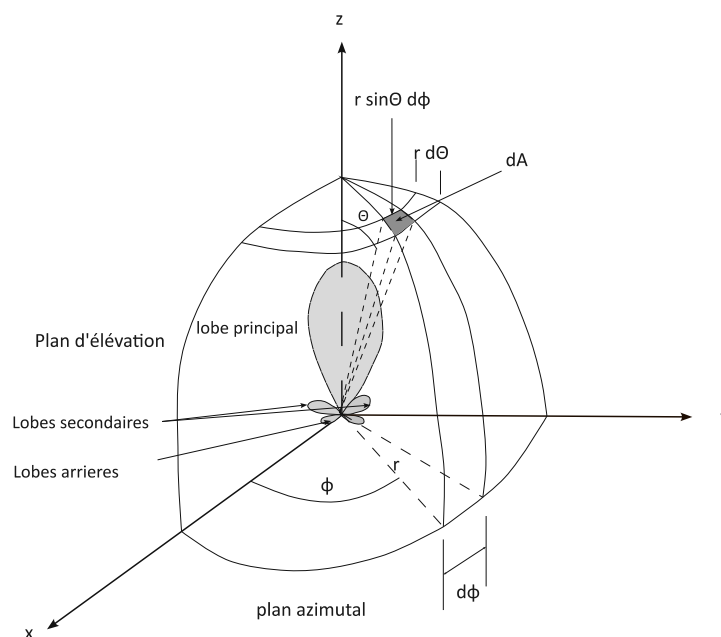


Figure 1.2. Diagramme de rayonnement d'une antenne directive [1]

Avec :

- **Le lobe principal** : C'est la partie du diagramme où l'antenne rayonne plus d'énergie. Il est souvent dirigé dans la direction d'intérêt.
- **Les lobes secondaires** : Ce sont des lobes de rayonnement qui se trouvent en dehors du lobe principal. Ils représentent des directions où l'antenne rayonne une certaine quantité d'énergie, mais moins que dans le lobe principal. Ils sont souvent indésirables car ils peuvent causer des interférences.
- **Les lobes arrières** : Ce sont des lobes de rayonnement situés à l'opposé du lobe principal. Ils montrent la quantité d'énergie rayonnée en arrière de l'antenne.
- **Le plan d'élévation** : C'est le plan vertical qui passe par l'axe de l'antenne et la direction du lobe principal. Il est utilisé pour analyser la répartition de l'énergie en fonction de l'angle d'élévation (θ).
- **Le plan azimutal** : C'est le plan horizontal qui passe par l'antenne et qui est perpendiculaire à l'axe du lobe principal. Il est utilisé pour analyser la répartition de l'énergie en fonction de l'angle d'azimut (ϕ).
- **$d\Phi$** : C'est un petit incrément de l'angle d'azimut. C'est la variation infinitésimale de l'angle Φ . Lorsqu'on intègre sur toute la surface sphérique pour calculer des grandeurs comme la puissance rayonnée totale, on utilise $d\Phi$ pour balayer toutes les directions dans le plan horizontal.
- **$r d\theta$** : C'est l'élément de longueur dans la direction de l'angle d'élévation θ .
- **$r \sin\theta d\phi$** : C'est l'élément de longueur dans la direction de l'angle d'azimut ϕ .
- **dA** : C'est l'élément différentiel de surface sur une sphère de rayon r . En coordonnées sphériques, il est donné par :

$$dA = r^2 \sin \theta d\theta d\phi \quad (1.6)$$

1.4.5.1. Les zones de rayonnement

L'espace autour d'une antenne est généralement segmenté en trois zones distinctes : le champ proche réactif, le champ proche rayonné (ou région de Fresnel) et le champ lointain (ou région de Fraunhofer), comme illustré à la figure 1.3.

Ces divisions permettent de caractériser la structure du champ électromagnétique propre à chaque région.

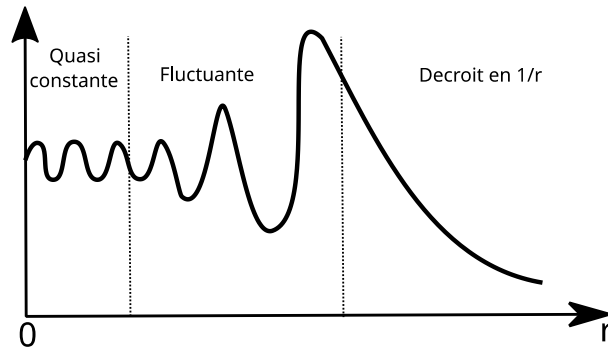


Figure 1.3. Les zones de rayonnement d'une antenne [1]

La région du champ proche réactif correspond à la zone du champ proche située autour de l'antenne, où les composantes réactives du champ électromagnétique sont dominantes. En règle générale, sa limite extérieure est définie par la distance $R < 0.62\sqrt{D^3/\lambda}$ de la surface de l'antenne.

Où λ est la longueur d'onde et D est la plus grande dimension de l'antenne.

La région du champ proche rayonné (Fresnel) est la région du champ entre la région du champ proche réactif et la région du champ lointain où la distribution du champ dépend de la distance de l'antenne.

Lorsque l'antenne possède une taille maximale inférieure à la longueur d'onde, la région du champ lointain peut ne pas se former. La limite de cette région est la distance $0.62\sqrt{D^3/\lambda} \leq R < 2 D^2 / \lambda$.

La région du champ lointain, correspond à la zone où la distribution angulaire du champ électromagnétique ne dépend plus de la distance à l'antenne. Cette région débute à une distance $R \geq 2 D^2 / \lambda$ de l'antenne. Au sein de cette zone, les composantes du champ se présentent principalement sous forme transversale.

1.4.6. La densité de puissance de rayonnement

Les OEMs sont utilisées pour transmettre des informations d'un point à un autre dans des environnements sans fil ou des structures guidées. La puissance et l'énergie sont donc liées aux champs électromagnétiques [1]. La grandeur utilisée pour représenter la puissance associée aux OEMs est le vecteur de Poynting instantané, défini comme suit :

$$\vec{W} = \vec{e} \times \vec{h} \quad (1.7)$$

La puissance totale traversant une surface fermée s'obtient en intégrant la composante normale du vecteur de Poynting sur l'ensemble de cette surface, selon la formule suivante :

$$p = \oint_S \vec{w} \cdot \vec{ds} \quad (1.8)$$

La densité de puissance :

$$W_0 = \frac{P_{rad}}{4\pi r^2} \quad (1.9)$$

1.4.7. L'intensité de rayonnement

Dans une direction donnée, l'intensité du rayonnement représente la puissance rayonnée par l'antenne par unité d'angle solide. Ce paramètre est spécifique à la zone du champ lointain. Son expression est :

$$U = r^2 W_{rad} \quad (1.10)$$

1.4.8. La directivité (D)

La directivité mesure la capacité de l'antenne à concentrer l'énergie rayonnée dans une direction spécifique. L'équation de la directivité est donnée par :

$$D = \frac{U}{U_0} = \frac{4\pi U}{P_{rad}} \quad (1.11)$$

Dans le cas d'une source isotrope, la directivité vaut 1.

1.4.9. L'efficacité (η)

L'efficacité d'une antenne indique quelle proportion de l'énergie électrique fournie à l'antenne est effectivement rayonnée sous forme d'onde électromagnétique.

L'équation de l'efficacité est définie par :

$$e_0 = e_r e_c e_d \quad (1.12)$$

L'efficacité de réflexion est :

$$e_r = 1 - |\Gamma|^2 \quad (1.13)$$

e_c : Efficacité de conduction

e_d : Efficacité de diélectrique

1.4.10. La polarisation

La polarisation d'une antenne fait référence à la direction du champ électrique de l'OEM par rapport au sol [12].

1.4.10.1. Types de Polarisation

Il existe 03 types de polarisation : linéaire, circulaire et elliptique, comme indiqué sur la figure 1.4.

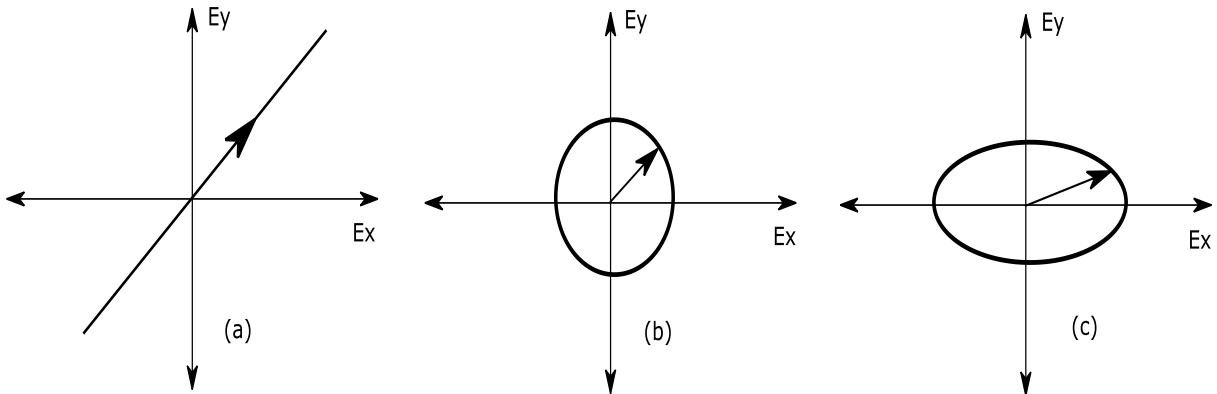


Figure 1.4. Types de polarisation a) Polarisation linéaire, b) Polarisation circulaire, c) Polarisation elliptique [12]

➤ **Polarisation linéaire :**

- Verticale : L'orientation du champ électrique de l'onde radio est verticale par rapport au sol.
- Horizontale : L'orientation du champ électrique est horizontale par rapport au sol.

➤ **Polarisation circulaire :**

- Droite (ou polaire circulaire droite) : Le champ électrique tourne dans le sens horaire, lorsqu'on regarde l'onde radio se déplacer vers soi.
- Gauche (ou polaire circulaire gauche) : L'orientation du champ électrique effectue une rotation dans le sens antihoraire.

➤ **Polarisation elliptique :** La polarisation elliptique est une combinaison de polarisations linéaires et circulaires. Dans ce cas, le champ électrique se déplace dans une ellipse au lieu d'une ligne droite (linéaire) ou d'un cercle (circulaire).

1.4.11. La bande passante (BP)

C'est la plage de fréquences sur laquelle l'antenne fonctionne efficacement. En communication sans fil, il est essentiel que l'antenne présente un coefficient de réflexion inférieur à -10 dB sur sa bande passante de fréquences [1].

L'équation de la largeur de bande peut être exprimée en pourcentage de la fréquence centrale :

$$BP = F_{max} - F_{min} \quad (1.14)$$

$$BP \% = 2 \frac{F_{max} - F_{min}}{F_{max} + F_{min}} \times 100 \quad (1.15)$$

$$F_c = \frac{F_{max} + F_{min}}{2} \quad (1.16)$$

Où F_{max} et F_{min} sont les fréquences maximale et minimale, respectivement, et f_c est la fréquence centrale.

1.4.12. Le gain (G)

Il représente l'efficacité avec laquelle une antenne concentre son rayonnement dans une direction spécifique par rapport à une antenne isotrope [1].

L'équation du gain est donnée par :

$$G = \frac{4\pi U}{P_{in}} \quad (1.17)$$

$$P_{in} = \frac{P_{rad}}{e_{cd}} \quad (1.18)$$

$$G = e_{cd} D \quad (1.19)$$

1.5. Classification des antennes

Depuis le début des communications radio, il y a plus d'un siècle, Un grand nombre d'antennes ont été mises au point. Celles-ci peuvent être divisées en différentes catégories en fonction d'un certain nombre de critères [13], comme présenté dans la figure 1.5.

- Les antennes à large bande et à bande étroite sont disponibles dans la catégorie de la bande passante ;
- Les antennes à polarisation linéaire, circulaire et elliptique sont disponibles dans la catégorie de la polarisation ;
- En ce qui concerne la résonance, elles peuvent être classées en antennes à ondes progressives et antennes résonnantes ;
- Concernant le nombre d'éléments, elles peuvent être divisées en antennes à éléments et antennes à réseaux.
- En ce qui concerne la forme et la géométrie, elles peuvent être filaires, à ouverture, planaires...etc

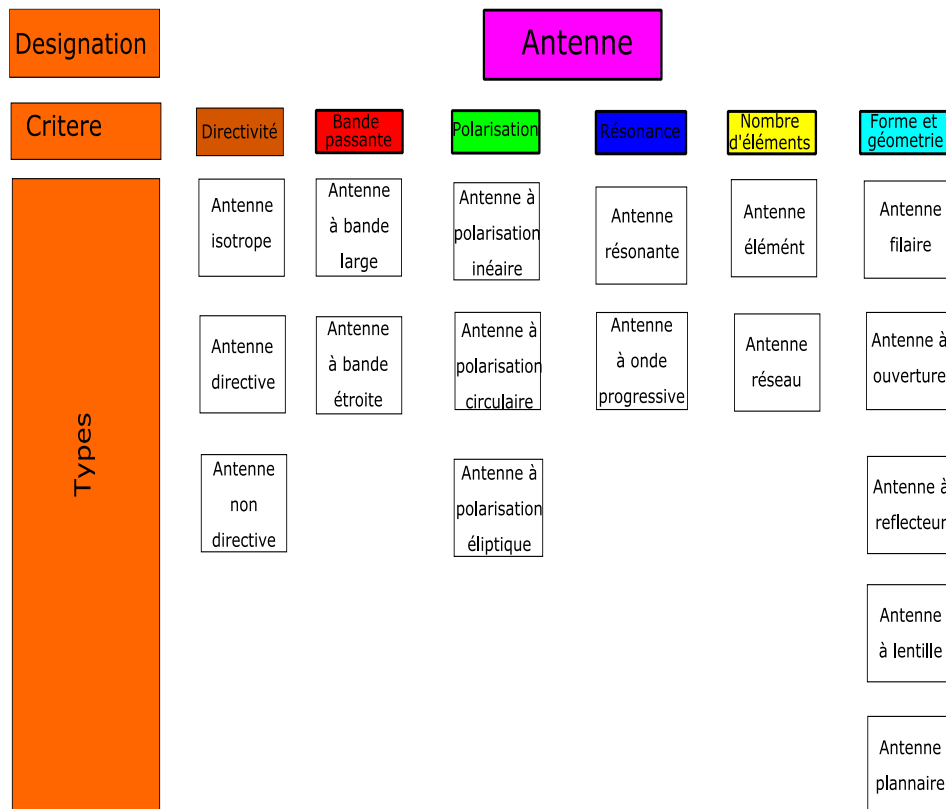


Figure 1.5. Classification des antennes

1.6. Etapes clés pour avoir une antenne fiable

Les étapes clés pour obtenir une antenne fiable peuvent varier en fonction des exigences spécifiques du projet et des caractéristiques de l'antenne [14], comme indiqué dans la figure 1.6.

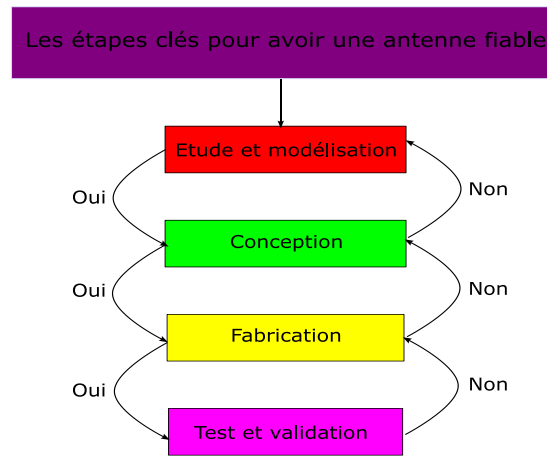


Figure 1.6. Etapes clés pour réaliser une antenne fiable

1.6.1. Étude et modélisation

La première étape consiste à établir le cahier des charges, qui est une analyse approfondie des besoins. Cette démarche permet d'identifier les objectifs, les bandes de fréquences ainsi que les performances, afin de poser des bases solides pour la conception d'une antenne répondant aux exigences de l'application. À partir des spécifications établies, une conception préliminaire de l'antenne est réalisée, en tenant compte de plusieurs critères, notamment le type d'antenne. Des outils de modélisation électromagnétique sont souvent employés pour orienter cette phase de conception [1].

1.6.2. Conception

Une fois cette conception préliminaire établie, des simulations électromagnétiques sont effectuées pour examiner si l'antenne fonctionnera tel que projetée et examiner s'il y a des problèmes avec l'antenne. Ces simulations peuvent donc être utilisées pour prédire le comportement en fonctionnement de l'antenne dans différentes conditions et contribuer à affiner la conception.

Les méthodes "full-wave" classiques, y compris la MOM qui est implémentée dans FEKO, FDTD qui est implémentée dans CST, FEM qui est implémentée dans HFSS, etc., sont basées sur des solutions numériques exactes des équations de Maxwell, qui décrivent le comportement des champs électromagnétiques. Ces méthodes sont largement appliquées pour modéliser et analyser le comportement de différentes structures antennaires. Par exemple, la MOM discrétise la surface de l'antenne en petits éléments, tandis que la FDTD divise l'espace en grille qui suit l'évolution temporelle des champs électromagnétiques [15].

Bien que ces techniques fournissent une explication mathématique détaillée du fonctionnement de l'antenne, des analyses de ce type deviennent limitées en raison de la complexité numérique de l'analyse des équations de Maxwell pour des antennes de grande taille ou à géométrie complexe [16].

1.6.3. Prototypage (Fabrication)

Ce processus permet de transformer le modèle numérique en un produit physique prêt à être utilisé. En fonction des dimensions de l'antenne et des matériaux, différentes techniques de fabrication peuvent être utilisées. Par exemple, une méthode de photolithographie chimique à base de perchlorure de fer est couramment utilisée pour graver des motifs complexes sur des substrats métalliques. L'impression 3D est une méthode de choix pour réaliser des prototypes de tailles variables, couche par couche, qui peut être appliquée même à des structures très complexes ou à des matériaux particuliers. En outre, du métal fin peut être découpé par laser, ou plus grossièrement – avec un jet d'eau. L'usinage CNC peut ensuite être utilisé pour sculpter des antennes à partir de blocs de matériaux, sans soucis de tolérances et de finition. Toutes ces techniques peuvent être employées de façon conjointe, de sorte que le prototype résultant soit conforme aux spécifications techniques et prêt à être testé [17].

1.6.4. Test et Validation

Suite à la réalisation du prototype d'antenne et le câblage des connecteurs RF, des tests expérimentaux du prototype doivent être établis pour vérifier plusieurs performances, le gain, la directivité, la BP, le diagramme de rayonnement et d'autres paramètres. Pour réaliser ces tests, on utilise des équipements de mesure de pointe tels que les Analyseurs de Réseau Vectoriels VNA, les analyseurs de spectre, les générateurs de fréquence ...etc. En plus des appareillages de laboratoires, les tests seront effectués dans les chambres anéchoïques pour éliminer les interférences électromagnétiques CEM [18].

Une fois les tests réalisés, Une comparaison sera réalisée entre les résultats obtenus et ceux des simulations permettant de s'assurer que l'antenne répond effectivement aux spécifications de bases qui étaient au cahier de charge et donc elle est conforme.

Le dispositif de mesure utilisé pour effectuer des mesures sur les antennes c'est la chambre anéchoïque. L'antenne sous test est une antenne réceptrice qui capte les signaux émis par l'antenne émettrice (sources d'ondes électromagnétiques). En outre, les matériaux absorbants présents dans la chambre anéchoïque servent à minimiser les interférences électromagnétiques, garantissant des mesures fiables ce qui permet une analyse précise des performances de l'antenne testée [19].

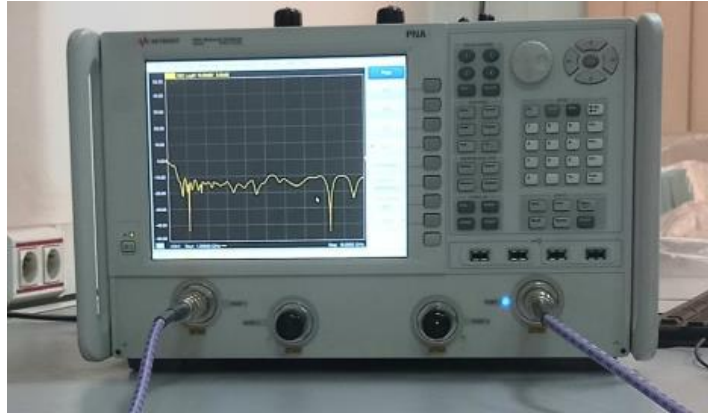


Figure 1.7. L'analyseur de réseaux vectoriels (VNA) de L'équipe RFA du CDTA

La mesure des paramètres S (Scattering parameters) S_{11} , S_{12} , S_{21} et S_{22} permet de mettre en évidence l'efficacité d'une transmission entre deux antennes. Elle peut être réalisée par un analyseur de réseaux vectoriels (VNA) (figure 1.7), est un instrument essentiel pour la caractérisation des antennes et des dispositifs haute fréquence. Il est doté de deux ports d'entrée auxquels sont connectées des antennes sondes, permettant ainsi d'analyser les paramètres de transmission et de réflexion des signaux. Cet équipement est particulièrement utile dans le cas d'échantillons comportant plusieurs antennes en circuit fermé, où il permet d'évaluer les performances de couplage, d'impédance et d'atténuation des interférences. Grâce à sa précision et à sa capacité à mesurer des paramètres complexes sur une large bande de fréquences [20].

1.7. Conclusion

Après avoir définir les antennes, leur historique, leur évolution, leur classification selon divers paramètres tel que les types, la forme et la géométrie ...etc, met en évidence leur diversité, ainsi que les paramètres principaux des antennes dans les systèmes de communication, des aspects clés tels que le diagramme de rayonnement, la directivité, l'efficacité, la polarisation, la largeur de bande, le gain, et l'impédance sont abordés. Ces généralités posent les bases pour comprendre les caractéristiques techniques à venir, que les prochains chapitres exploreront en détail.

Chapitre 02

Etat de l'art sur les antennes patchs

2.1. Introduction

Comme nous avons établi quelques bases en examinant les concepts fondamentaux et les propriétés générales des antennes dans le premier chapitre, il est temps d'étancher cette soif dans la technologie des antennes imprimées en particulier les antennes patch. Dans ce chapitre, nous nous concentrerons sur la construction de ces antennes en détail, en révélant les principes qui rendent ces antennes si indispensables dans la plupart des applications actuelles. Nous nous attacherons à comprendre les paramètres clés et les raisons qui font des antennes patch l'un des éléments les plus importants de l'environnement de communication contemporain.

2.2. Les antennes imprimées

2.2.1. Historique des antennes imprimées

Les antennes imprimées ont fait leur apparition pour la première fois en 1952 par les deux savants Greig et Engleman, suivi de Deschamps en 1953. Toutefois, seulement dans les années 1970 ont été mises en place les premières utilisations de ce genre d'antennes. Leurs dimensions réduites, leur profil bas et leur forme facilitent leur intégration dans de multiples systèmes, notamment dans les communications mobiles et personnelles [15, 21-22].

2.2.2. Avantages et inconvénients des antennes imprimées

Ce type d'antennes est basé sur la technologie de PCB, présente plusieurs avantages [23], entre autres, on peut mentionner :

- Un poids léger ;
- Une faible épaisseur et un encombrement réduit ;
- Une structure plane facilement adaptable aux surfaces courbes ;
- Une fabrication simplifiée ;
- Un coût réduit ;
- Une intégration aisée avec les circuits imprimés sur un même substrat ;
- La possibilité d'obtenir une polarisation linéaire ou circulaire.

Cependant, ce genre d'antennes comporte également quelques désavantages qui restreignent leur efficacité, tels que :

- Une BP limitée ;
- Un faible gain et une efficacité de rayonnement réduite ;
- Une forte influence de la qualité du substrat utilisé sur leurs performances ;
- Une limitation aux faibles puissances ;
- Rayonnement non désiré dû à l'alimentation et aux ondes de surface.

2.2.3. Types d'antennes imprimées

Depuis les années 80, un nombre important de conceptions d'antennes imprimées sont apparues dans la littérature. La plupart de ces conceptions ont également fait l'objet d'études analytiques et numériques et leur théorie a été développée afin de mieux analyser leurs performances. Les principales antennes imprimées sont les antennes patch, les monopoles et dipôles imprimés, les antennes à fente, les antennes à boucle et l'antenne PIFA [24].

2.3. L'antenne patch

Les antennes sous forme de patches font partie des antennes imprimées, parfois appelées microrubans ou imprimées (Patch ou microstrip en anglais). Sa réalisation ressemble à un circuit imprimé simple ou double face.

Les antennes patch conventionnelles sont largement utilisées en raison de leur faible encombrement. Elles sont conçues de manière à ce que le maximum du diagramme de rayonnement soit dirigé perpendiculairement à la surface de l'élément rayonnant. En fonction des applications, il existe une grande variété de formes d'éléments rayonnants, de types de substrats ainsi que de méthodes d'alimentation [21].

2.3.1. Composition de l'antenne patch

L'antenne patch tire son nom du fait que son élément rayonnant (Radiateur microruban) est un métal imprimé, généralement sous la forme d'une plaque métallique d'une forme géométrique (rectangulaire, elliptique ...etc.) qui est fixé sur un substrat isolant et Positionné au-dessus d'un plan de masse [25] comme indiqué dans la figure 2.1.

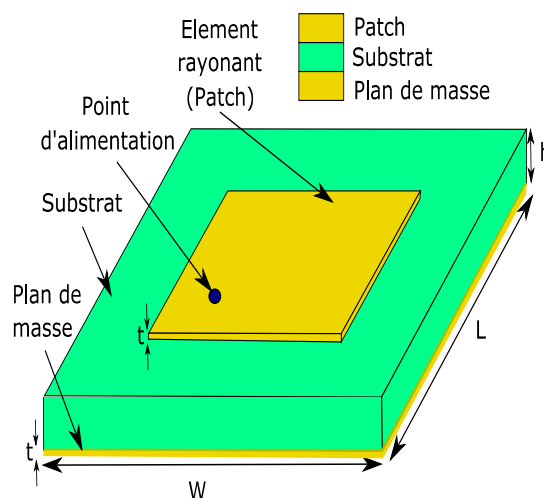


Figure 2.1. Géométrie de l'antenne patch [25]

2.3.1.1. L'élément rayonnant

Les éléments rayonnants des antennes patches peuvent en effet revêtir différentes formes géométriques, selon les besoins spécifiques de l'application et les performances recherchées avec une épaisseur t (généralement vaut 17.5 ou 35 μm en hyperfréquence et 9 μm en millimétrique). Les matériaux les plus couramment employés pour la fabrication des patches et des plans de masse sont généralement le cuivre, l'argent et l'or, en raison de leur excellente conductivité : le cuivre ($\sigma=5,7 \cdot 10^7 \text{ S/m}$), l'argent ($\sigma=6,2 \cdot 10^7 \text{ S/m}$) et l'or ($\sigma=4,1 \cdot 10^7 \text{ S/m}$) [21].

Parmi les formes les plus courantes, on trouve les rectangles, les cercles et les triangles ...etc.

2.3.1.2. Le substrat

Le substrat de l'antenne patch est la couche de matériau diélectrique sur laquelle l'antenne est construite. Les substrats sont utilisés dans les antennes patches principalement pour fournir une résistance mécanique à l'antenne [26], ils ont une influence majeure sur les performances de l'antenne [25], [27]. Il est caractérisé par :

- ✓ **La permittivité diélectrique (ϵ_r)** : qui affecte la vitesse de propagation des OMs à travers l'antenne, ce qui influence la longueur d'onde effective et donc la fréquence de résonance de l'antenne, généralement $1 \leq \epsilon_r \leq 12$.
- ✓ **La Perte tangentielle ($\tan\delta$)** : Les matériaux diélectriques ont souvent des pertes, mesurées par le coefficient de perte tangentielle. Des pertes élevées peuvent réduire l'efficacité de l'antenne et augmenter le bruit, $\tan\delta$ (de l'ordre de 10^{-3})
- ✓ **L'épaisseur (h)** : L'épaisseur du substrat est un paramètre important qui influence la fréquence de résonance et le diagramme de rayonnement de l'antenne. Les antennes à substrat mince ont souvent un meilleur rendement pour certaines applications.
- ✓ **La stabilité thermique** : Pour les applications soumises à des variations de température importantes, la stabilité thermique du substrat est essentielle pour garantir que les performances de l'antenne restent constantes dans des conditions différentes.
- ✓ **La rigidité mécanique** : Le substrat doit être suffisamment rigide pour maintenir la forme et les dimensions de l'antenne, en particulier dans des conditions où des vibrations ou des contraintes mécaniques sont présentes.

Les dimensions du substrat doivent être adéquates pour une antenne patch afin de réduire les effets de bord et d'éviter les perturbations dans la radiation de l'antenne. En règle générale, on sélectionne un substrat plus grand que le patch afin de rassembler tous les champs électromagnétiques.

La longueur du substrat (L_s) et la largeur du substrat (W_s) sont données par :

$$L_s = L + 6h \quad (2.1)$$

$$W_s = W + 6h \quad (2.2)$$

2.3.1.3. Le plan de masse

Situé sous le substrat, il agit comme un contrepoison électrique pour l'élément rayonnant même épaisseur que l'élément rayonnant (t), contribuant ainsi à la performance globale de l'antenne en fournissant un chemin de retour pour les courants parasites [1].

Généralement, Les mesures du plan de masse correspondent aux celles de substrat.

$$L_g = L_s \quad (2.3)$$

$$W_g = W_s \quad (2.4)$$

2.3.1.4. Le point d'alimentation

C'est le point où l'énergie RF est introduite dans l'antenne. Il peut être connecté à l'élément rayonnant par différentes techniques d'alimentation, telles que l'alimentation par ligne microruban, l'alimentation par sonde coaxiale, etc. Le choix du point d'alimentation dépend des exigences spécifiques de l'antenne et de l'application [28, 29].

2.4. Techniques d'alimentation

La sélection de la technique d'alimentation est primordiale dans la conception des antennes patches, car elle influe immédiatement sur le rayonnement et modifie les performances de l'antenne [1], [30]. Existante, deux grandes familles (avec contact et sans contact).

2.4.1. Alimentation avec contact

2.4.1.1. La ligne microruban

Il s'agit de la technique d'alimentation la plus utilisée pour concevoir des antennes, surtout les antennes patch. Elle se définit par une fine bande conductrice imprimée sur un substrat diélectrique. Elle sert à transmettre le signal RF de la source externe à l'antenne. Comme le montre la figure 2.2.

De plus, Ce type nécessite une modélisation relativement simple ainsi qu'une adaptation appropriée de l'impédance. Le principal désavantage de cette méthode d'excitation réside dans le rayonnement parasite de l'alimentation, ce qui provoque une dégradation des performances de l'antenne [31].

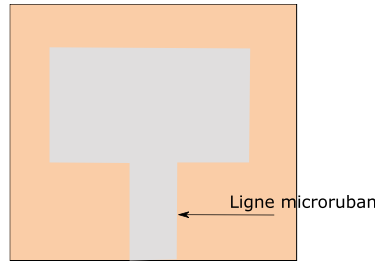


Figure 2.2. Exemple d'une antenne patch alimentée par une ligne microruban

L'impédance caractéristique (Z_0) d'une ligne microruban généralement vaut autour de 50Ω sur un substrat diélectrique peut être approximée par les équations suivantes [7] :

✓ Pour un rapport $W_l/h \geq 1$:

$$Z_0 \approx \frac{60}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \ln\left(\frac{8h}{W_l} + 0.25 \frac{W_l}{h}\right) \quad (2.5)$$

Où W_l est la largeur de la ligne et h est l'épaisseur du substrat.

✓ Pour un rapport $W_l/h < 1$:

$$Z_0 \approx \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \left(\frac{W_l}{h} + 1.393 + 0.667 \ln\left(\frac{W_l}{h} + 1.444\right) \right) \quad (2.6)$$

2.4.1.2. La sonde coaxiale

La sonde coaxiale est facile à mettre en œuvre en positionnant une ligne coaxiale perpendiculaire au plan de masse, comme illustrée en Figure 2.3. Le patch est connecté sur le conducteur central, tandis que le conducteur extérieur sera placé sur le plan de masse.

Ce type d'alimentation possède l'intérêt majeur de sa facilité de mise en place. Le principal avantage de l'excitation par sonde coaxiale réside dans le fait d'avoir l'alimentation positionnée sous l'élément réfléchissant et de faire usage d'une ligne entièrement non rayonnante, ce qui a pour effet de réduire largement le rayonnement indésirable.

Le principal inconvénient est lié à la limitation de la bande passante et à la complexité de la modélisation, notamment pour des substrats ayant une épaisseur électrique importante. Quant à la détermination des constantes de propagation d'une ligne coaxiale, elle se révèle effectivement complexe mais elle conduit à un modèle relativement simple si l'on se limite à un mode de propagation dominant [31].

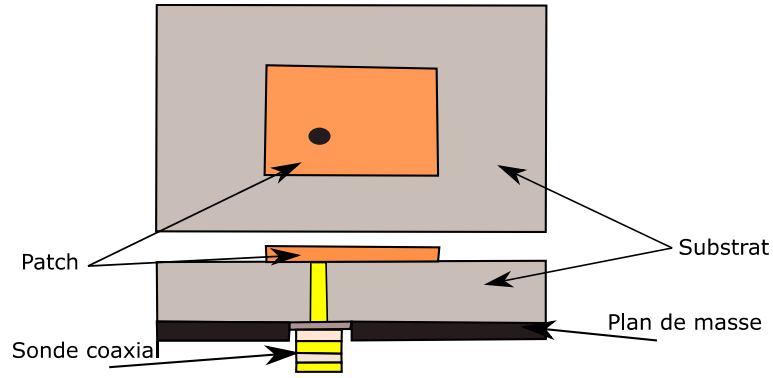


Figure 2.3. Exemple d'une antenne patch alimentée par une sonde coaxiale [31]

2.4.1.3. La ligne coplanaire (CPW)

C'est une structure de transmission de micro-ondes qui consiste en une piste conductrice centrale entourée de plans de masse sur le même substrat comme illustré dans la figure 2.4. Il est utilisé pour acheminer le signal RF vers les éléments rayonnants des antennes et est souvent utilisé dans les applications à large bande et les antennes intégrées [32].

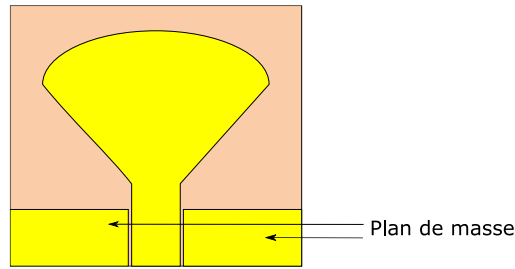


Figure 2.4. Exemple d'une ligne coplanaire CPW

L'impédance caractéristique (Z_0) d'une ligne CPW sans plan de masse en dessous peut être calculée comme suit [7] :

$$Z_0 \approx \frac{\frac{30\pi}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} K(k')}{K(k)} \quad (2.7)$$

$K(k')$: l'intégral elliptique du premier genre d'argument k'

$K(k)$: l'intégral elliptique du premier genre d'argument k

$$k = \frac{w_l}{w_l + 2s} \quad (2.8)$$

$$k' = \sqrt{1 - k^2} \quad (2.9)$$

2.4.1.3.1. Les variantes de CPW

Il y a trois catégories de lignes coplanaires [33] :

- **La ligne coplanaire de masse (GCPW) :** c'est une variante de CPW dans laquelle la piste centrale est également connectée à la masse. Cela améliore la BP et de réduit des pertes de propagation. (Figure 2.5)

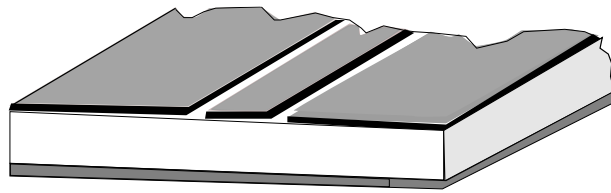


Figure 2.5. Ligne coplanaire de masse (GCPW) [32]

- **La ligne coplanaire à plan de masse fini (FCPW) :** c'est une variante du CPW standard où les plans de masse de chaque côté de la piste de signal sont de largeur finie et ne s'étendent pas indéfiniment.
- **La ligne coplanaire canalisée (CCPW) :** Le CCPW est une structure CPW où la piste de signal et les plans de masse sont placés dans une configuration canalisée. Cette variante est obtenue en creusant des rainures autour de la ligne centrale pour former une sorte de canal qui confine le champ électromagnétique.

2.4.2. Alimentation sans contact

2.4.2.1. Alimentation par couplage électromagnétique

L'alimentation par couplage de proximité repose sur un couplage électromagnétique entre une ligne microruban et le patch, similaire à un sandwich formé entre deux couches diélectriques, comme illustré sur la figure 2.6.

Le principal avantage de cette technique d'alimentation est d'obtenir une bande passante large atteignant jusqu'à 13% en augmentant globalement l'épaisseur de l'antenne. En revanche l'inconvénient principal de cette technique est les problèmes de mise en œuvre dus à la présence de deux substrats nécessitant un alignement exact [31].

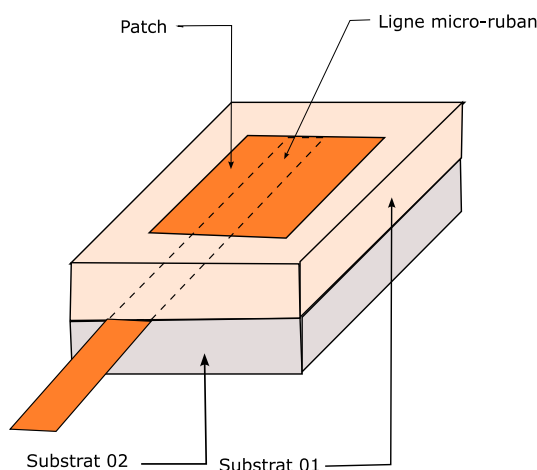


Figure 2.6. Alimentation par couplage électromagnétique [31]

2.4.2.2. Alimentation couplée par fente (ouverture)

La figure (2.7) représente l'alimentation couplée par fente.

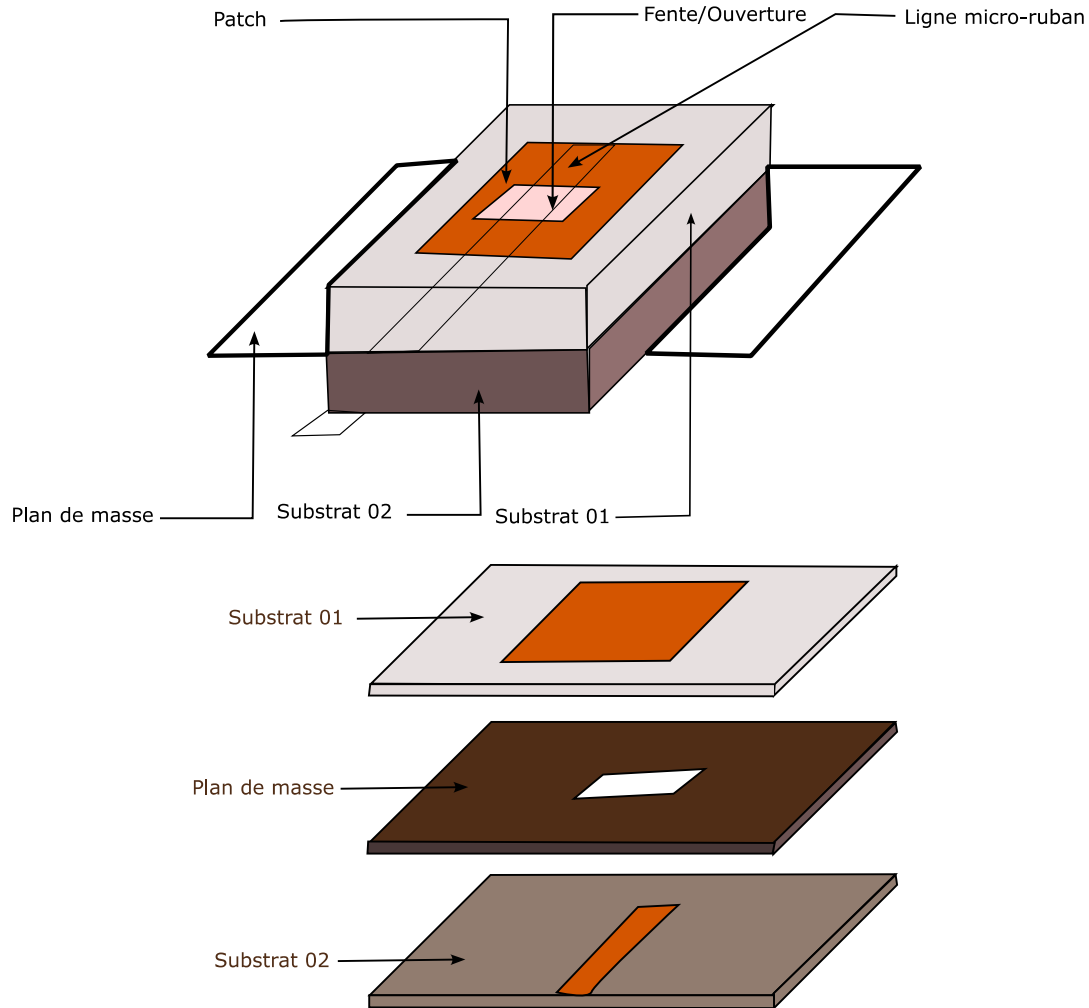


Figure 2.7. Alimentation couplée par fente (ouverture) [31]

Dans cette configuration, un plan de masse commun sépare la ligne microruban d'alimentation, placée sous l'élément imprimé. Le couplage électromagnétique entre l'élément rayonnant et la ligne microruban s'effectue via une fente pratiquée dans le plan de masse.

En général, deux substrats sont employés : un substrat inférieur en matériau à permittivité élevée, tandis que le substrat supérieur utilise un matériau à faible constante diélectrique afin d'optimiser le rayonnement du patch. Ce mode d'alimentation présente un rayonnement parasite réduit, mais sa conception est complexe en raison de l'intégration de multicouches, ce qui augmente l'épaisseur globale de l'antenne [31].

2.5. Circuit équivalent de l'antenne patch

Il est fort possible que l'on ait à faire face à un problème de déphasage d'impédance, lorsqu'une seule ligne d'alimentation est commune à une antenne reconfigurable. Faire appel au modèle de circuit

équivalent nous donne une bonne approche pour la résolution de ce problème en plaçant simplement un modèle montant unique pour les différentes parties de l'antenne. Afin de s'imposer cette valeur, il convient d'optimiser la modélisation de l'antenne. En général, l'antenne patch est similaire à une ligne de transmission ouverte [34].

La figure (2.8) représente le circuit équivalent d'une antenne patch.

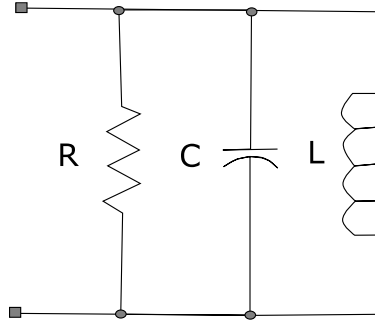


Figure 2.8. Circuit équivalent d'une antenne patch [34]

Un simple circuit équivalent d'une antenne patch peut être modélisé à l'aide d'un circuit RLC (Résistance, Inductance, Capacité) en parallèle (figure 2.13). Les composants de ce circuit représentent différentes caractéristiques électriques de l'antenne : la résistance R représente les pertes dues à la résistance des matériaux conducteurs et diélectriques de l'antenne, l'inductance L modélise l'effet inductif de la distribution de courant sur la surface de l'antenne, et la capacité C correspond à l'effet capacitif entre l'élément rayonnant de l'antenne et le plan de masse [34].

Les valeurs des composants R, L, et C peuvent être calculées à partir des dimensions géométriques de l'antenne et des propriétés des matériaux utilisés [34].

- **Capacité C :** La capacité est principalement due à l'espace entre le patch de l'antenne et le plan de masse sous-jacent. Elle peut être calculée par :

$$C = \frac{L_p W \epsilon_0 \epsilon_{eff}}{2h} \cos^{-2}\left(\frac{\pi y_0}{L_p}\right) \quad (2.10)$$

Avec :

L_p : la longueur du patch

W : la largeur du patch

ϵ_0 : la permittivité du vide

y_0 : la position du point d'alimentation

- **Inductance L :** L'inductance est calculée en fonction de la longueur et de la largeur du patch, ainsi que de la distribution du courant sur celui-ci. Une formule courante pour estimer L :

$$L = \frac{1}{(2\pi f)^2 C} \quad (2.11)$$

- **Résistance R** : Cette valeur peut être déterminée en tenant compte des pertes par rayonnement et par conduction dans le matériau du patch. Elle est souvent obtenue expérimentalement ou en utilisant des modèles mathématiques basés sur les dimensions de l'antenne et les propriétés des matériaux conducteurs.

$$R = \frac{Q}{2\pi f_c} \quad (2.12)$$

Avec Q : Facteur de qualité

$$Q = \frac{c\sqrt{\epsilon_{eff}}}{4fh} \quad (2.13)$$

2.6. Méthodes d'analyse des antennes patchs

L'analyse des antennes patch, repose sur plusieurs méthodes analytiques et numériques pour déterminer leurs caractéristiques telles que l'impédance d'entrée, le gain, la directivité, et le diagramme de rayonnement. Voici quelques-unes des méthodes couramment utilisées pour analyser les antennes patch [24].

2.6.1. Méthode de cavité

La méthode de cavité modélise l'antenne patch comme une cavité résonante à deux dimensions avec des parois parfaites le long des bords du patch et une ouverture partielle en haut et en bas, où se produit le rayonnement. Cette méthode suppose que les champs électromagnétiques à l'intérieur du patch se comportent comme ceux d'une cavité résonnante, et elle est utile pour calculer les fréquences de résonance, les champs de rayonnement et les pertes de rayonnement [24].

2.6.2. Méthode de la ligne de transmission

Cette méthode traite l'antenne patch comme une ligne de transmission interrompue aux extrémités. L'antenne peut être vue comme une ligne de transmission microruban avec des sections ouvertes à chaque extrémité, où l'énergie est rayonnée. Cette méthode est utilisée pour calculer l'impédance d'entrée, la longueur efficace du patch, et les fréquences de résonance [24].

2.6.3. Méthode Full Wave

Les méthodes full wave citées dans le premier chapitre, résolvent numériquement les équations intégrales électromagnétiques pour les courants de surface sur le patch et le plan de masse. Ces méthodes utilisent les équations de Maxwell complètes pour modéliser avec précision le

comportement électromagnétique complexe de l'antenne patch, y compris les couplages entre les différents éléments de l'antenne [24].

2.7. Champ de rayonnement de l'antenne patch

Le principe du rayonnement d'une antenne patch est basé sur le courant qui circule à travers un patch métallique qui se comporte comme une capacité. Lorsqu'un signal électrique est appliqué à l'antenne grâce à la méthode d'alimentation, le courant dans le patch induit autour de ce dernier un champ électromagnétique. Ce champ électromagnétique induit des ondes électromagnétiques qui rayonnent dans l'espace autour du patch et constituent le rayonnement de l'antenne (figure 2.9) [35].

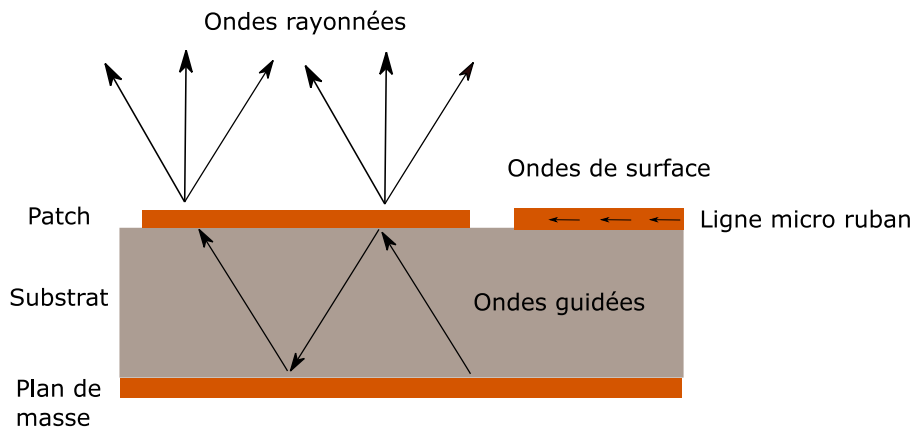


Figure 2.9. Principe de rayonnement d'une antenne patch [35]

Il y a principalement trois types d'ondes impliquées dans le fonctionnement d'une antenne patch :

- ✓ **Ondes rayonnées** : ce sont des ondes électromagnétiques qui sont émises par l'antenne dans l'espace libre. L'onde est produite chez l'antenne patch lorsque les courants de surface oscillent. Ces ondes sont responsables de la transmission et de la réception de signaux à distance.
- ✓ **Ondes de surface** : Ce sont des ondes qui sont produites tandis que l'onde est produite chez l'antenne, donc les ondes de surface. Contribuer aux pertes d'énergie, car une partie de l'énergie est absorbée et perdue. Ces ondes peuvent être en dessous car cela peut réduire le rendement de l'antenne à cause de cette énergie absorbée par l'antenne à l'intérieur du substrat si l'énergie est radiée.
- ✓ **Ondes guidées** : ce sont des ondes qui se propagent dans la structure de l'antenne patch elle-même. Les ondes sont confinées dans le substrat et entre le patch et le plan de masse. L'onde guidée détermine le mode résonant de l'antenne qui peut affecter la fréquence d'opération et la bande passante de l'antenne.

2.8. Les applications des antennes patch

Les antennes patch sont largement utilisées. On peut les trouver dans diverses applications telle que [23] :

2.8.1. Applications Biomédicales

- **Systèmes de surveillance de la pression artérielle** : Le document mentionne l'utilisation des antennes patch pour la surveillance sans contact de la pression artérielle avec un tonomètre artériel.
- **Traitement des tumeurs** : Les antennes patch sont utilisées pour induire l'hyperthermie dans le traitement des tumeurs.

2.8.2. Communication sans fil

- **Réseaux personnels sans fil (WPAN)** : Les antennes patch sont utilisées pour les réseaux personnels sans fil en médecine, où elles aident à identifier les symptômes et communiquer avec une station de base.
- **RFID** : Les antennes patch sont utilisées dans les systèmes RFID pour l'identification par radiofréquence.

2.8.3. Applications Satellites

- **GPS** : Les antennes patch à polarisation circulaire sont employées dans les systèmes de positionnement par satellite.

2.8.4. Applications en Télécommunications

- **WiMax** : Les antennes patch sont utilisées dans les équipements de communication basés sur la norme IEEE 802.16, permettant des communications à longue portée avec des débits élevés.
- **Télécommunications mobiles** : Les antennes patch sont également utilisées pour les communications mobiles et d'autres systèmes de télécommunication.

2.8.5. Applications Militaires

- **Systèmes de contrôle et de commande** : Elles sont intégrées dans des systèmes militaires pour le contrôle et la commande, ainsi que dans des équipements comme les missiles et les avions.

2.8.6. Instrumentation Environnementale

- **Radar et mesure de l'environnement** : Les antennes patch sont utilisées dans divers systèmes de radar et d'instrumentation environnementale.

2.9. Conclusion

Ce deuxième chapitre nous a permis de mieux approfondir nos connaissances sur les antennes patch et les facteurs qui influencent leur conception et leur fonctionnement. Ces connaissances sont essentielles pour le développement d'antennes plus efficaces pour satisfaire aux exigences continuellement croissantes des systèmes de communication actuels. C'est maintenant avec un bon bagage que nous nous attaquerons aux différentes méthodes d'analyse et d'optimisation des antennes patch dans les chapitres suivants.

Chapitre 03

Techniques d'amélioration de la BP et de rejet de bandes des antennes patchs

3.1. Introduction

Dans cette section, nous explorerons diverses approches visant à améliorer les performances des antennes patch. L'accent sera mis sur les techniques d'amélioration de la bande passante, telles que la modification de la forme, la géométrie fractale et l'intégration de fentes et d'encoches, qui permettent d'optimiser la réponse fréquentielle et d'élargir la plage de fonctionnement de l'antenne. Nous aborderons également le choix de la technologie des antennes patch ULB, leurs caractéristiques et applications en mettant en avant les critères de conception influençant leur efficacité. Par ailleurs, nous examinerons les différentes techniques de rejet des bandes indésirables, telles que l'intégration de résonateurs spécifiques et de cellules de métamatériaux, qui permettent de minimiser les interférences tout en préservant les performances globales de l'antenne. Ces différentes techniques jouent un rôle clé dans le développement d'antennes compactes, performantes et adaptées aux exigences des nouvelles générations de communications sans fil.

3.2. Techniques utilisées pour l'amélioration de la BP des antennes Patches

Concevoir une antenne patch pour des applications à BP large, telles que la technologie Ultra Large Bande (ULB), est une tâche assez difficile, car ce type d'antenne a de faibles bandes passantes par nature. Pour remédier à cela, il est devenu nécessaire d'utiliser des techniques d'optimisation qui ne nuisent pas à d'autres attributs louables de l'antenne, comme le gain, la directivité ainsi que la polarisation, en augmentant arbitrairement la largeur de bande. Parmi de telles techniques, on peut citer des modifications de la géométrie de l'antenne, l'usage de certains diélectriques, et trouver de nouvelles alternatives pour l'alimentation de l'antenne [26, 36-38].

3.2.1. L'usage des fentes et encoches

La technique des fentes et des encoches qui sont des découpes rectangulaires ou géométriques dans le patch rayonnant, parfois appelée DPS ou DMS. Ces découpes perturbent le champ électromagnétique et introduisent des résonances supplémentaires. En optimisant la forme et la taille des fentes, on peut élargir la BP et améliorer les caractéristiques de l'antenne [26].

Cet article [39] examine l'impact de la position du point d'alimentation sur la perte de retour et la bande passante d'une antenne patch pour des applications ULB, en utilisant des fentes au niveau du patch et des plans de masse.

Les dimensions de l'antenne primaire sont rectangulaires ($30 \times 20 \text{ mm}^2$), tandis que le substrat est en FR-4 ($h=0.8 \text{ mm}$). Elle est alimentée par une sonde coaxiale de 50Ω située au centre du patch. Une fois les encoches utilisées dans le radiateur et dans le plan de masse, on obtient un design similaire à celui d'un arbre et un plan de masse partiel, comme le montre la figure 3.1.

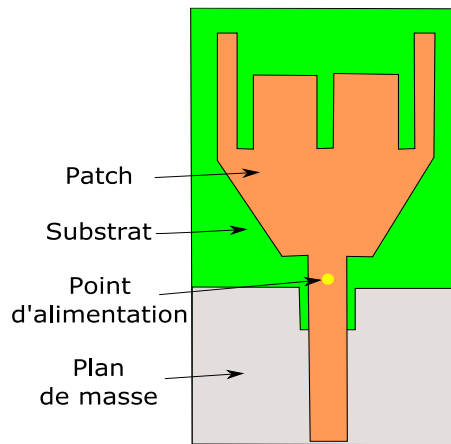


Figure 3.1. Géométrie de l'antenne proposée utilisant des fentes et encoches [39]

Grâce à l'étude de ce design, il est possible de créer une antenne patch qui fonctionne dans une plage de fréquences très étendue, allant de 3,15 à 22,8 GHz (19.65 GHz) comme exprimé dans la figure 3.2.

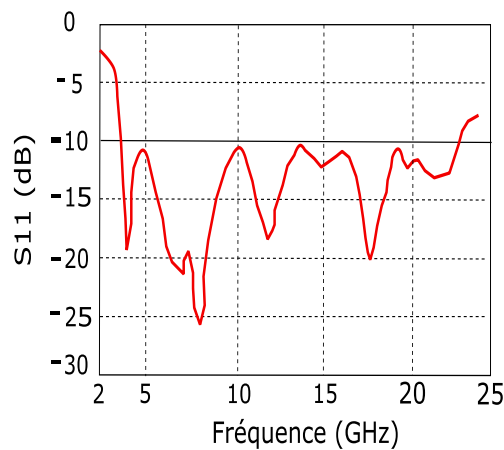


Figure 3.2. S11 du prototype utilisant des fentes et encoches [39]

3.2.2. L'alimentation CPW

Plusieurs patchs sont placés sur le même plan. Un patch principal est excité, et les autres agissent comme des éléments parasites, augmentant la BP [26].

Les auteurs de cet article [40] ont adopté la méthode CPW avec des fentes dans le patch. L'alimentation était avec une ligne microruban, pour une antenne patch initialement rectangulaire à plan de masse complet. Par la suite, trois encoches du patch ont été coupées et l'alimentation CPW a été utilisée, comme indiqué sur la figure 3.3.

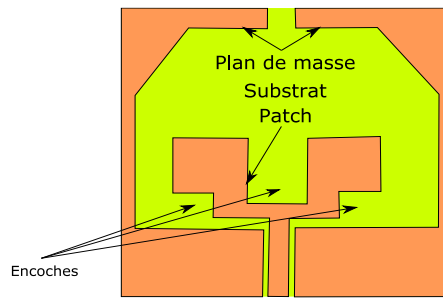


Figure 3.3. Géométrie de l'antenne proposée utilisant la technique CPW [40]

L'antenne simulée et fabriquée a une largeur de bande très étendue allant de 2,6 jusqu'à 13,04 GHz (BP = 10,44 GHz), tel que présenté à la figure 3.4. Elle a une bonne adaptation d'impédance, un gain et des diagrammes de rayonnement stables.

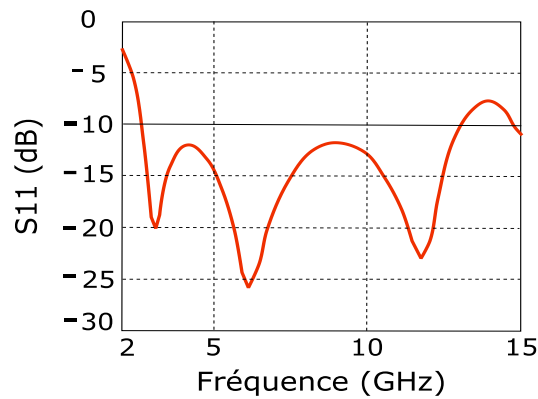


Figure 3.4. Coefficient de réflexion de l'antenne proposée utilisant la technique CPW [40]

3.2.3. Les Patchs parasites

Dans l'étude [41], le but est d'élargir la BP d'une antenne patch en introduisant des éléments supplémentaires, notamment des patchs parasites.

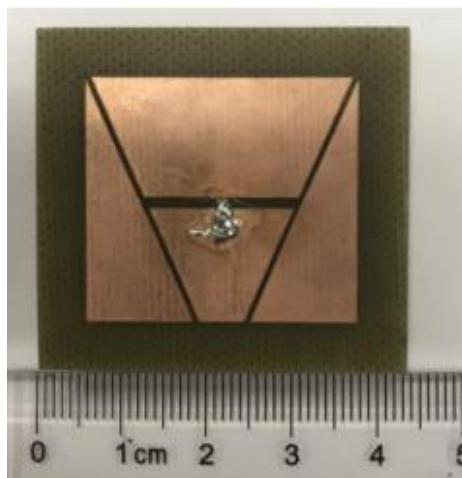


Figure 3.5. Photographie de l'antenne fabriquée utilisant des patchs parasites [41]

L'ajout de plusieurs patchs parasites à une antenne patch en forme de pyramide, excitée par une sonde coaxiale de $50\ \Omega$ comme illustré dans la figure 3.5, permet de générer deux nouvelles résonances, augmentant ainsi la bande passante.

- Elle présente une BP mesurée (pour laquelle $S_{11} < -10\ \text{dB}$) allant de 5,46 à 6,27 GHz, soit une augmentation de 13,8 % comme indiqué dans la figure 3.6.
- De bonnes performances en termes de diagrammes de rayonnement sont observées dans cette plage de fréquences.

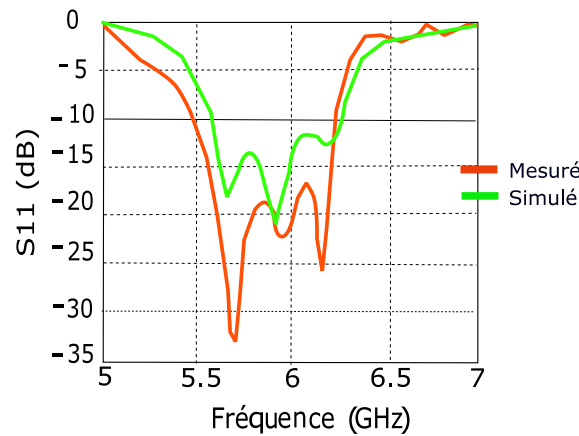


Figure 3.6. S_{11} de l'antenne proposée utilisant des patchs parasites [41]

3.2.4. Broche Court-circuit

L'ajout d'une broche de court-circuit ou par fois appelé via de court-circuit [42] sur l'antenne patch entraîne une diminution de la fréquence de résonance de l'antenne sans en réduire la taille [11-12]. Dans la référence [43], le chercheur a suggéré une méthode d'amélioration de la bande passante en fonction d'une caractérisation multimodale des antennes patch.

L'article de référence [42] présente la conception et l'évaluation d'une antenne patch ultra-miniaturisée de dimensions de $6 \times 7\ \text{mm}^2$ utilisant un substrat de Rogers RT/duroid 6202 avec une hauteur de 0.25 mm, utilisant des fentes au niveau d'élément rayonnant et dans le plan de masse, ainsi qu'un Via qui relie le radiateur et le plan de masse, ce qui donne le design illustré dans la figure 3.7.

L'analyse de cette antenne destinée au pacemaker sans fil, offrant une bande passante ultra-large de 3.04 GHz comme indiqué dans la figure 3.8, couvrant des fréquences de 0,79 à 3,83 GHz pour atteindre une couverture multi-bande, incluant les bandes ISM et WMTS.

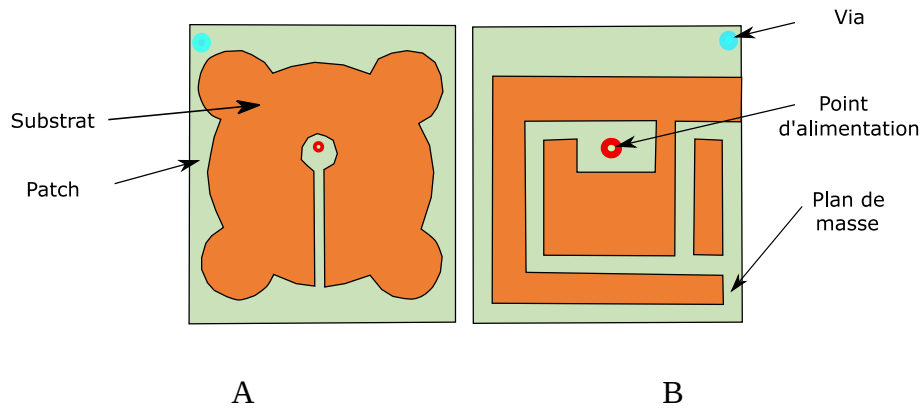


Figure 3.7. Géométrie de l'antenne proposée utilisant un Via A) Vue de face, B) Vue arrière [42]

Les performances ont été validées par des simulations dans un modèle de cœur homogène et des mesures expérimentales dans du porc haché, montrant une large bande passante, un gain acceptable, et des valeurs de SAR conformes aux normes de sécurité.

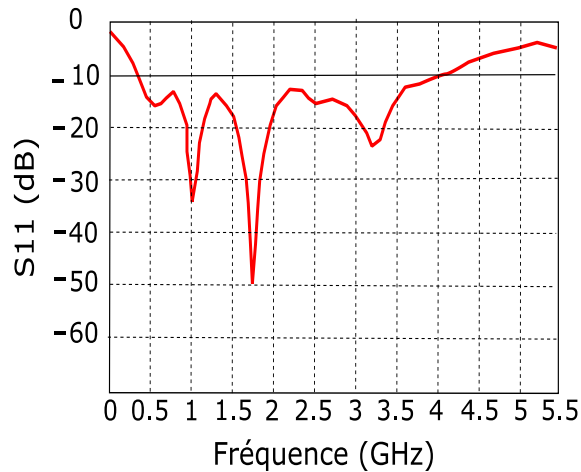


Figure 3.8. S11 de l'antenne proposée utilisant un Via [42]

3.2.5. Le choix de substrat

Il est important de choisir un substrat adéquat lors de la conception d'une antenne patch. En optant pour un matériau diélectrique adéquat pour le substrat, on peut améliorer certains paramètres essentiels tels que la largeur de bande, l'efficacité et le diagramme de rayonnement de l'antenne patch. De plus, en optant pour des milieux diélectriques adaptés, il est également possible de diminuer la propagation des ondes de surface. Une partie de la puissance totale disponible pour le rayonnement est consommée par les ondes de surface, ce qui altère les caractéristiques électriques de l'antenne [26].

Dans cet exemple [44], une conception d'une antenne patch rectangulaire opérant à 3,5 GHz, alimentée par une ligne microruban utilisant trois substrats différents avec des permittivités relatives variées : FR-4, RT-5880 et TLC-30. Les épaisseurs des substrats sont légèrement différentes.

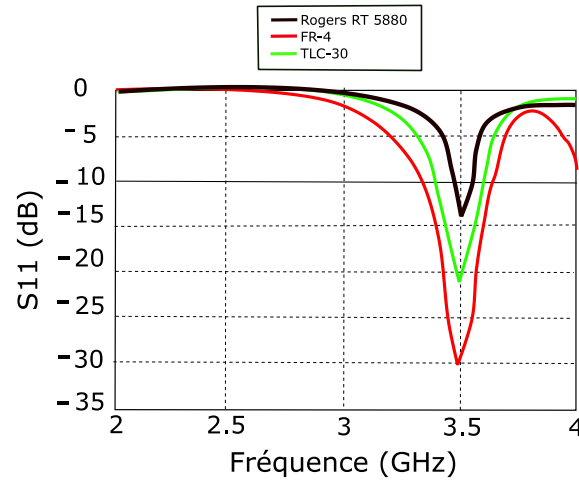


Figure 3.9. Comparaison du coefficient de réflexion pour les trois substrats [44]

Les coefficients de réflexion simulés pour divers substrats utilisés sont illustrés dans la figure 3.9.

Le tableau 3.1 présente les BPs ainsi que les gains obtenus lors de cette simulation.

Substrat	Permittivité	Epaisseur (mm)	Bande passante (MHz)	Gain (dBi)
FR-4	4,3	1.6	247,1	3,338
RT-5880	2,2	1.575	129,7	4,660
TLC-30	3	1.58	177,2	5,083

Table 3.1. Comparaison des performances d'une antenne rectangulaire fonctionnant à 3.5 GHz sur différents substrats [44]

Il semble que Le substrat FR-4 est souvent utilisé pour des applications à bas coût avec des exigences moindres en termes de performance (bande passante plus large mais avec un gain faible). On peut conclure que le FR-4 offre une BP large avec un gain faible.

Le substrat Taconic TLC se distingue par la meilleure performance globale, Cela signifie que les substrats qui présentent une faible permittivité offrent des performances satisfaisantes [45].

3.2.6. Les substrats ferrites

Pour remédier à l'inconvénient de la BP limitée de l'antenne patch, les chercheurs ont proposé l'usage de substrats ferrites dans cet exemple [46]. L'étude propose d'intégrer un film épais de ferrite en utilisant la technologie de l'impression épaisse (screen printing) pour améliorer les performances des antennes patch. Le choix du matériau ferrite s'est porté sur le grenat d'yttrium et de fer (YIG), une nano poudre qui possède des propriétés intéressantes pour ce type d'application.

Cette antenne est conçue pour fonctionner à 5.8 GHz et a été fabriquée en utilisant un substrat FR4 recouvert du film épais de YIG. Une amélioration a été constatée à la suite des résultats expérimentaux notamment en S11 et BP. L'inclusion du film de ferrite a permis d'améliorer la perte de retour de 100 % et d'élargir la bande passante de 0.26 GHz 0.40 GHz avec un décalage de fréquence de résonance, comme illustré dans le tableau 3.2.

Paramètre	AG seulement (Simulation)	AG seulement (Mesure)	AG +YIG (Mesure)
F_r	5.8	5.6	5.6
S11 (dB)	-25.25	-17.86	-35.74
BP (GHz)	0.26	0.26	0.40

Tableau 3.2. Comparaison des performances de l'antenne proposée avant et après l'ajout du substrat ferrite (YIG) [46]

3.2.7. La technique DGS

Le principe de cette technique est d'introduire des défauts dans le plan de masse d'une antenne pour influencer les caractéristiques électromagnétiques, comme l'impédance et le gain, sans augmenter les dimensions de l'antenne. En modifiant la forme du plan de masse, on peut améliorer les performances des antennes [18-19].

Dans cette étude [47], il est démontré que l'application de la DGS sans optimisation permet d'augmenter :

- La BP à 8,91%.
- Le gain à 3,92%.

Un autre exemple [48], une antenne patch est réalisée sur un substrat ROGERS RT/Duroid 6002, et la structure du patch est modifiée pour adopter une forme en Y, extraite d'un patch rectangulaire classique avec l'utilisation de la technique de la DGS fonctionnant à 28 GHz. Cette géométrie a pour but d'améliorer les performances de l'antenne par rapport à un patch rectangulaire standard.

La DGS a modifié la distribution du courant de surface sur le patch et le plan de masse, contribuant à ces améliorations sans affecter le gain ou la directivité, qui sont restés constants. Comme indiqué sur le tableau 3.3.

Cela montre que, la DGS est capable d'améliorer les performances d'une antenne patch, notamment en augmentant la capacité de transmission et la réception des signaux à différentes fréquences (bande passante) sans influencer les autres performances.

Paramètre	Avant DGS	Après DGS
F_r (GHz)	27.97	28
S11 (dB)	-46.97	-56.95
BP (GHz)	1.33	1.38
Directivité (dBi)	7.67	7.67
Gain (dBi)	7.6	7.6
VSWR	1.032	1.0028
Impédance d'entrée (Ω)	48.7	50
Efficacité de rayonnement (%)	0.98	0.98

Tableau 3.3. Comparaison des performances de l'antenne avant et après l'implémentation de la DGS [48]

3.2.8. La géométrie Fractale

Cette étude [49], présente la conception d'une antenne patch à motif fractal modifié, visant à surmonter l'une des principales limitations des antennes : la bande passante étroite. Le design proposé dans cet article améliore cette contrainte en offrant une BP de 85,42 % autour de la fréquence de résonance de 1,844 GHz.

La figure 3.10 présente le prototype final de l'antenne patch à géométrie fractale qui a été proposée.



Figure 3.10. Prototype de l'antenne patch proposée utilisant la géométrie fractale [49]

La figure 3.11 présente les résultats de l'analyse du coefficient de réflexion de cette antenne. En raison des défauts de fabrication présents dans le prototype de fabrication, les résultats de la simulation et les résultats expérimentaux diffèrent, car la conception est complexe et la fabrication a été réalisée manuellement [49].

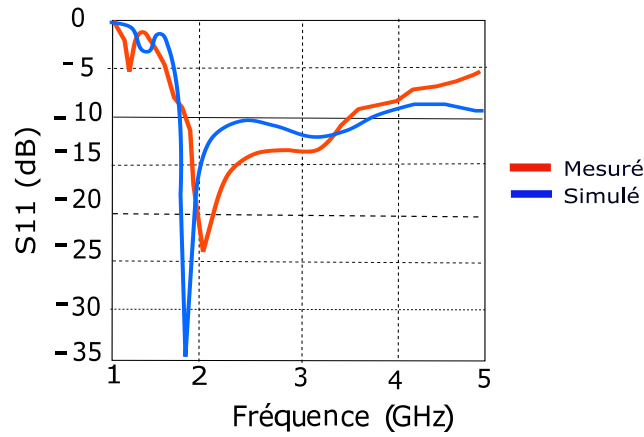


Figure 3.11. Comparaison entre le S11 simulé et mesuré du prototype final [49]

3.2.9. L'usage des composants actifs

Un autre aspect est présenté dans cette étude [50] qui est l'intégration d'un tunnel d'air, qui non seulement offre un chemin pour les ondes électromagnétiques, mais sert également d'espace pour les composants de réglage de fréquence. Les composants actifs comme les varactors permettent d'ajuster la fréquence des deux modes TM_{10} TM_{20} indépendamment, ce qui donne à l'antenne une capacité de reconfiguration de fréquence. Cela permet une synchronisation quasi-parfaite de l'ajustement des deux modes, améliorant la flexibilité de l'antenne.

Avec ce design, l'antenne peut obtenir une BP large, soit de 4,28 à 5,37 GHz. La FBP de l'antenne est de 7,9 % à 13,1 %, le gain et l'efficacité n'étant pas non plus compromis, étant de l'ordre de 6,2 à 8 dBi et de 82 % à 93 %, respectivement.

3.2.10. Les techniques d'optimisation computationnelles

Une technique d'optimisation computationnelle est une méthode algorithmique qui vise à déterminer les valeurs optimales des variables d'un système dans le but d'obtenir le meilleur résultat possible en fonction de certains critères [51-53]. Il y a de nombreuses techniques d'optimisation telles que PSO [54], GA [46], DE [55], ... etc.

Les algorithmes génétiques (GA) sont des méthodes d'optimisation inspirées de la sélection naturelle. Dans la même étude citée en référence [47], et dans la deuxième partie de cet article, Les chercheurs ont utilisé une méthode d'optimisation qui est la GA afin d'améliorer l'efficacité de conception de l'antenne patch utilisant la technique DGS. Cette optimisation a permis une augmentation considérable des performances :

- La bande passante a augmenté de 84%, soit une amélioration beaucoup plus significative que celle obtenue avec la DGS seule.

- Le gain de l'antenne a augmenté de 50,86%, ce qui représente une amélioration substantielle de la puissance du signal.

Ces résultats soulignent l'efficacité de GA pour explorer un grand espace de conception et trouver des solutions optimales qui améliorent considérablement les performances des antennes patch, notamment la bande passante.

3.2.11. Les outils de l'IA

Les algorithmes d'optimisation conventionnels nécessitent généralement une configuration manuelle des hypers paramètres des algorithmes, qui ne peuvent pas être appris automatiquement. En revanche, l'utilisation des outils de l'IA à savoir les technologies de ML ou DL comme l'apprentissage par renforcement profond (DRL), ANN, ... ect [56].

L'ANN est un modèle informatique inspiré du fonctionnement du cerveau humain, conçu pour traiter des informations de manière non linéaire. Il est composé de plusieurs neurones artificiels, organisés en couches, qui collaborent pour accomplir des tâches comme la reconnaissance de motifs, la classification, ou la prédiction [53].

Dans le présent document [53], une méthode a été recommandée pour la conception d'une antenne à patch afin de concevoir une antenne patch empilée basée sur un réseau de neurones artificiels préformés avec l'aide d'un optimiseur de particules d'essaim (PSO). Une telle méthode permet d'avoir une charge computationnelle bien plus faible, donc d'accélérer le processus de conception. Les dimensions de l'antenne pour atteindre les fréquences de résonance, ainsi que la bande passante souhaitée par l'utilisateur, peuvent également être dérivées en utilisant un ANN préformé.

Une telle bande passante définie par l'utilisateur peut être réalisée sans difficulté. La méthode de conception proposée a été confirmée par la mise en œuvre, la fabrication et le test d'un certain nombre d'antennes patch empilées. L'objectif majeur de ce travail était la mise au point d'un logiciel guidée par ordinateur qui pourrait être fourni à l'industrie pour la fabrication rapide d'antennes patch empilées devant travailler dans la bande X et Ku.

3.3. Résumé des techniques d'amélioration de la BP des antennes patches

Le tableau 3.4 présente les diverses méthodes pour améliorer la performance des antennes patches. Chaque critère représente une ou plusieurs méthodes et techniques qui peuvent être utilisées soit de manière unique, soit en combinaison, afin d'améliorer les performances des antennes.

Techniques d'optimisation de la BP des antennes patch							
Critère	La géométrie	Le type d'alimentation	Le type de substrat	Court-circuit	Les composants actifs	Les techniques d'optimisation Computationnelles	Les outils de l'IA
Type	Patch parasite DGS, DPS et La géométrie fractale	CPW Double ou Multi alimentation	La permittivité l'épaisseur Les couches ferrites	Broche, Vias, PIN	Varactors, diodes ...	PSO, GA, DE...	ANN, CNN...
Avantages	- Améliore la résonance multiple - Permet d'élargir la BP	- Faible perte d'insertion - Adaptation d'impédance plus facile en conservant les dimensions avec CPW - Plus de flexibilité avec multi-alimentation	- Meilleure gestion des pertes et du rendement	- Permet le contrôle de la résonance - Miniaturisation et augmentation de la performance globale	- Ajustement de la fréquence de résonance - Contrôle dynamique de la BP possible	- Exploration automatique d'une large gamme de paramètres - Accélère l'optimisation des antennes	- Analyse rapide des données complexes - Réduction du temps de conception - Optimisation précise des performances
Inconvénients	- Perturbation des performances à cause des discontinuités	Déséquilibre possible dans la distribution du courant, entraînant une dégradation de la polarisation et une diminution de l'efficacité rayonnante.	- Matériaux coûteux (couches ferrites) - Perte accrue dans certains substrats - Dépendance des caractéristiques thermiques	- Complexité de la mise en œuvre	- Consommation d'énergie accrue - Coût de fabrication plus élevé	- Temps de calcul élevé pour des algorithmes plus complexes - Risque d'overfitting si mal implémenté	- Besoin d'un grand ensemble de données pour un apprentissage efficace - Dépendance des performances de calcul

Tableau 3.4. Différentes techniques et méthodes d'amélioration de la BP pour les antennes patchs

Ces techniques peuvent être résumées en sept principaux critères permettant d'améliorer les performances des antennes patch notamment la BP, en examinant des facteurs tels que la forme, l'alimentation, les matériaux, les courts-circuits, les composants électroniques et les outils d'optimisation. L'usage de fentes et encoches est une méthode très simple mais offrent une dégradation de performances. L'alimentation CPW offre une meilleure adaptation de la résistance et une plus grande adaptabilité, mais elle peut entraîner un déséquilibre du courant, même si ces substrats spéciaux ou des couches à base de fer peuvent être coûteux et sont affectés par la température. Les composants actifs tels que les diodes ou les varactors aident à gérer efficacement la tension, mais rendent la conception plus complexe et augmentent la consommation d'énergie. Les techniques d'optimisation telles que PSO et GA explorent une large gamme de paramètres, tandis que

les outils d'IA, comme les ANN et CNN, offrent une analyse rapide et une optimisation précise, malgré un risque de sur apprentissage et des besoins en calculs élevés.

3.4. La technologie ULB

3.4.1. Historique

L'appellation Ultra Wide Band (UWB), ou Ultra Large Bande (ULB), a été officiellement adoptée par le ministère de la Défense des États-Unis en 1989. Le premier brevet concernant l'utilisation d'ULB dans les télécommunications a été déposé par G.F. Ross en 1973, mais à cette époque, la plupart des recherches étaient confidentielles et menées sous la direction du gouvernement américain [57].

Ce n'est qu'en 1994 que la fin de la confidentialité entourant les travaux menés sur ULB a attiré un intérêt sérieux, à la fois des chercheurs et de l'industrie. Les premières recherches sur les systèmes ULB ont été menées en 1992 par P. Withington et L. Fullerton ; ces travaux ont porté sur ce qui est maintenant appelé Radio Impulsionnelle (IR). Ces systèmes sont en mesure de transférer des données à des débits très élevés, c'est-à-dire plusieurs gigabits par seconde, puisque les impulsions sont très brèves [57].

En 1998, la FCC a publié un avis public pour encourager à considérer le déploiement des systèmes ULB, en particulier pour les utilisations civiles. Un an plus tard, en 2000, la FCC a publié une proposition de règlement sur les avantages possibles des systèmes ULB. Elle a approuvé l'attribution d'une bande de 7,5 GHz comprise entre [3,1 - 10,6 GHz], avec une diminution considérable de la DSP, limitée à -41,3 dBm/MHz, ce qui rend les systèmes ULB très utiles pour un certain nombre d'industries et applications commerciales [57].

3.4.2. Avantages et inconvénients

L'ULB offre principalement des avantages :

- ✓ **BP large** : L'ULB utilise des bandes passantes larges, ce qui permet de transmettre des données à des débits élevés. Cela le rend adapté pour les applications nécessitant un transfert rapide de données, comme la diffusion vidéo en haute définition ou le transfert de fichiers volumineux.
- ✓ **consommation d'énergie faible**: En comparaison avec d'autres technologies sans fil, l'ULB peut souvent utiliser une faible puissance, ce qui peut prolonger la durée de vie des dispositifs alimentés par batterie.
- ✓ **Environnements complexes** : L'ULB peut être utilisé dans une variété d'environnements, y compris à l'intérieur et à l'extérieur, et peut être efficace même dans des environnements où

d'autres technologies sans fil rencontrent des difficultés, comme les environnements urbains denses.

Inconvénients de l'ULB

- ✓ **Coexistence avec d'autres applications.**
- ✓ **Portée limitée :** En raison de sa nature à large bande passante, l'ULB peut avoir une portée limitée par rapport à d'autres technologies sans fil, ce qui signifie qu'il peut ne pas être aussi efficace pour les communications à longue distance.
- ✓ **Sensibilité aux obstructions :** Comme d'autres technologies sans fil à haute fréquence, l'ULB peut être sensible aux obstructions physiques telles que les murs et les bâtiments, ce qui peut réduire sa portée et sa fiabilité dans certains environnements.
- ✓ **Complexité de la conception des antennes ULB :** La conception d'antennes ULB peut être plus complexe que pour d'autres technologies sans fil en raison de la nécessité de gérer une BP large et d'atténuer les interférences avec les systèmes coexistants sur le spectre.

3.5. Antennes patches ULB

Les antennes ULB sont très recherchées tant dans les milieux académiques qu'industriels en raison de leur utilisation potentielle dans les systèmes de communication sans fil. Contrairement à la plupart des autres catégories d'antennes, telles que les antennes à ouverture, qui ont généralement l'aptitude à couvrir une large gamme de fréquences, les antennes patch sont habituellement conçues et optimisées pour fonctionner efficacement à une fréquence spécifique ou dans une plage très limitée de fréquences [59].

La technologie des antennes patch ULB représente une avancée significative dans le domaine des communications sans fil, en combinant les caractéristiques des antennes patch avec les exigences spécifiques des bandes de fréquence ULB.

3.5.1. Applications des antennes ULB

Différents domaines peuvent être envisagés pour l'application des antennes ULB, cette technologie commençant à s'introduire partout [32]. On peut principalement les définir en trois grands domaines:

- **Multimédia :** Ce domaine est l'utilisation des technologies ULB pour les dispositifs multimédias, permettant d'engranger des débits de données élevés (ordinateurs portables, téléviseurs, appareils photos numériques, ...) pour d'autres dispositifs de communication ayant besoin de transférer rapidement et fidèlement des données.

- **Localisation** : Les solutions ULB sont également utilisées pour la localisation précise d'objets ou de personnes. Grâce à leur bonne résolution et à leur capacité à fournir des mesures précises, les systèmes de localisation utilisant l'ULB sont déployés dans des environnements complexes tels que les hôpitaux, le secteur logistique ou les milieux industriels où la précision est de mise.
- **Réseaux de capteurs** : Ce domaine regroupe l'usage de la technologie ULB au sein des réseaux de capteurs, souvent mobilisés dans des applications de surveillance et de sécurité. Les réseaux de capteurs déployés dans des infrastructures critiques, pour la gestion des catastrophes, les systèmes de secours d'urgence, ... etc, sont favorisés grâce aux atouts de l'ULB pour le raccordement d'un nombre élevé d'utilisateurs avec une large portée de couverture et une transmission de données fiable.

3.6. La contrainte principale de la technologie ULB

La technologie ULB devient intéressante, car elle permet l'exploitation d'une large plage de fréquences, dépassant les limitations traditionnelles des bandes étroites. Elle permet de transmettre des données en utilisant une très large bande passante, ce qui lui confère des avantages majeurs dans des environnements nécessitant une haute capacité de transfert d'informations, comme les systèmes de communication sans fil à haute performance [60].

Cependant, bien que la technologie ULB offre des avantages considérables dans les domaines industriels et académiques, elle présente également des inconvénients majeurs, notamment en termes d'interférences. À cause de la grande étendue spectrale utilisée, les interférences proviennent d'autres applications à bandes étroites sous licence coexistantes telles que WLAN (5,15-5,85 GHz), la norme IEEE 802.11a (5,15-5,35 GHz et 5,72-5,82 GHz), WiMAX (3,3-3,6 GHz), HIPERLAN ou WLAN (5,15-5,82 GHz), UIT-R (7,5-8,7 GHz), applications en bande C (4-8 GHz) et bande X pour les communications par satellite en liaison descendante (7,10-7,76 GHz) ... ect [61].

Les interférences de ces applications désignent une contrainte qui peut entraîner une dégradation de la qualité des signaux et des perturbations importantes, nécessitant des solutions technologiques avancées pour réduire ces interférences et garantir une communication fiable [62].

3.7. Notion de bande rejetée (Notch)

La conception d'une antenne performante représente un défi majeur. Les recherches préliminaires dans le domaine de la conception d'antennes planaires ULB avec les caractéristiques optimales ont donc été menées en utilisant diverses techniques telles que mentionnées dans le troisième chapitre. Et puisque le spectre de l'ULB est un spectre sans licence.

Afin de minimiser les interférences dans les communications ULB, il est préférable d'atténuer les bandes de fréquences qui se chevauchent. Traditionnellement, cette atténuation est obtenue en reliant l'antenne à des filtres à bande étroite permettant de supprimer les interférences potentielles.

La figure 3.12 décrit un tel système d'antenne à fréquence rejetées. La réponse spectrale du filtre coupe-bande révèle qu'il laisse passer la gamme de fréquences ULB sauf la bande de fréquence coupée. Toutefois, cette approche ne permet pas d'obtenir une compacité suffisante et augmente en même temps la complexité et le coût des systèmes d'extrémité RF. C'est pourquoi il est préférable d'utiliser des antennes ULB dotées de fonctions de réjection de bande. Ces types d'antennes sont développés en y introduisant des structures résonantes à bande étroite.

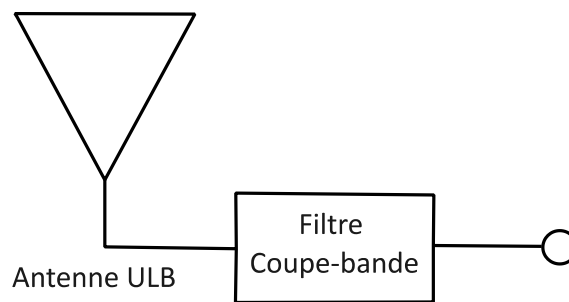


Figure 3.12. Système d'antenne ULB avec rejet de bandes utilisant un filtre coupe-bande [62]

La solution alternative, est la capacité de couper une ou plusieurs bandes étroites sous licence des applications dont elles existent déjà dans le spectre ULB sans altérer les caractéristiques fondamentales, c'est ce qui est appelé bande rejetée ou « notch » en anglais [61-62].

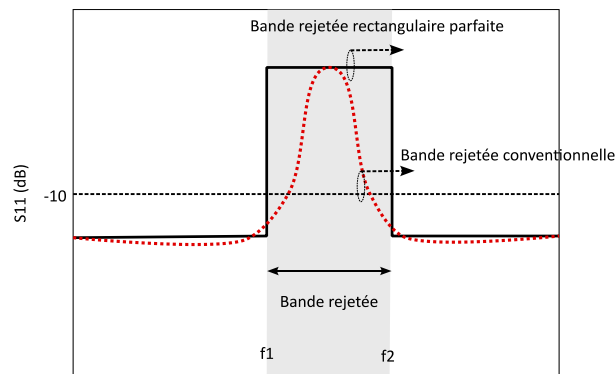


Figure 3.13. Comparaison entre les bandes rejetées conventionnelles et les bandes rejetées rectangulaire [62]

La bande rejetée conventionnelle peut arrêter les interférences avec une faible sélectivité, n'est pas adaptée au rejet de larges bandes d'interférence, telles que la bande WLAN. Pour éliminer les interférences causées par les bandes indésirables, une bande rejetée rectangulaire à haute sélectivité est nécessaire puisqu'elle présente un rejet efficace de toute la bande indésirable [63]. La figure 3.13 illustre une comparaison typique entre une bande rejetée conventionnelle et rectangulaire.

3.8. Techniques de rejet des bandes pour les antennes patches ULB

Différentes méthodes ont été développées pour supprimer les bandes non désirées. Le but de toutes ces techniques est d'améliorer la fiabilité du patch tout en gardant ses spécificités ULB [63]. Parmi ces techniques on peut citer les fentes dans le patch, dans le plan de masse ou dans la ligne de d'alimentation, les structures résonnantes, l'intégration de composants actifs ...ect. Chacune de ces techniques a des avantages et des inconvénients en fonction des contraintes spécifiques du système et de la conception [64], [65], [66]. Quelques méthodes de rejet de bandes des antennes patches seront mises en place sur la base d'analyse des performances étudiées notamment le S11, le VSWR et le gain.

3.8.1. Les fentes et encoches (Slot) (DPS et DMS)

C'est la méthode la plus simple, plusieurs travaux de recherche ont exploré l'utilisation de fentes et d'encoches comme méthode efficace pour créer des bandes rejetées dans les prototypes d'antennes patch ULB [66].

Les fentes et les encoches implantées dans le patch (DPS) ou dans la ligne d'alimentation (DMS) sont nombreuses. Par exemple dans [67], une antenne ULB avec une bande rejetée pour l'application WLAN a été obtenue en gravant une fente en forme d'anneau en "C", de demi-longueur d'onde, sur le patch rayonnant. Dans [68] une antenne ULB avec une bande de WLAN a été rejetée par une fente en forme de U gravée sur la ligne d'alimentation. L'article [69] Présente un développement d'une antennes ULB avec deux bandes rejetées, 5G (4.5–5.5 GHz) et pour le service fixe par satellite (FSS) dans la bande C (3.3–4.2 GHz) en créant des fentes sur la surface de rayonnement de l'antenne, ainsi qu'en ajoutant une boucle ouverte en arc (ASOL) pour la bande 5G....

Dans cet exemple [70], une conception d'une antenne patch ULB a été présentée intégrant deux bandes rejetées. Un patch rectangulaire gravé sur un substrat en FR4, alimentée par une ligne microruban de 50 Ω . Le patch rectangulaire comporte des encoches arrondies à chaque coin et une fente sur le plan de masse. Les bandes rejetées, correspondant aux bandes WLAN et la liaison descendante-satellite en bande X, sont obtenues en insérant des fentes dans le patch et dans la ligne d'alimentation. Comme indiqué dans la figure 3.14.

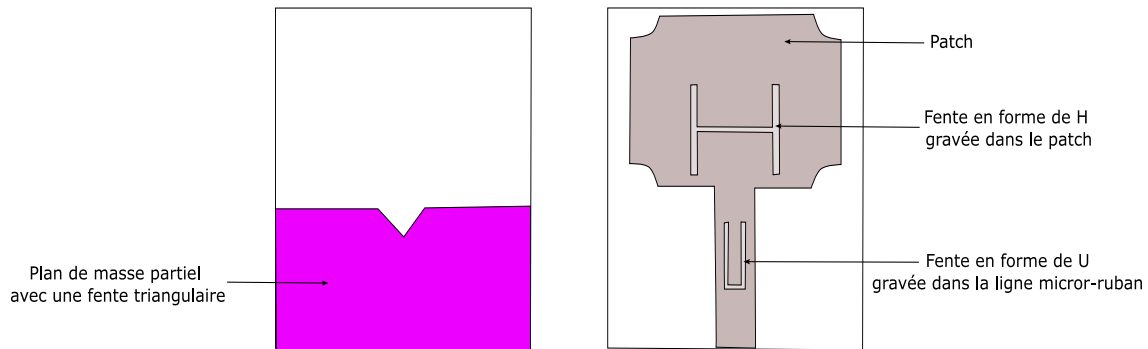


Figure 3.14. Géométrie de l'antenne patch ULB avec deux bandes rejetées en prototype d'antenne ULB utilisant les fentes H et U [70]

Les résultats de mesures du S11 démontrent une concordance entre les simulations et les mesures expérimentales. On observe deux bandes coupées (ou rejetées) :

- $F_{n1} = 5.6 \text{ GHz}$, 4 dB dans la bande (4.8 à 6 GHz)
- $F_{n2} = 7.8 \text{ GHz}$, 4.1 dB dans la bande (7.2 à 7.4 GHz)

Un léger écart des fréquences par rapport aux simulations, ce qui est fréquemment observé dans la fabrication d'antennes en générale. Comme il est présenté dans la figure 3.15.

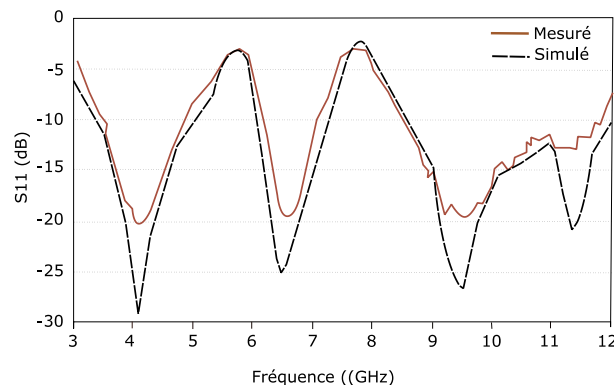


Figure 3.15. Comparaison entre le S11 mesuré et simulé du prototype d'antenne ULB avec deux bandes rejetées utilisant les fentes H et U [70]

La figure 3.16 présente le gain simulé de ce prototype indiquant un gain acceptable avec une atténuation dans les deux bandes suscitées :

- -0.5 dBi à F_{n1}
- -1.2 dBi à F_{n2}

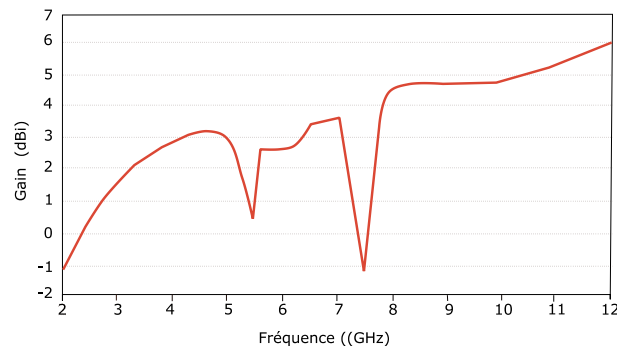


Figure 3.16. Gain simulé du prototype d'antenne ULB avec deux bandes rejetées utilisant les fentes H et U [70]

3.8.2. La structure DGS

L'article [71] présente une antenne patch ULB compacte en forme de fourche conçue ULB avec des caractéristiques triple bande rejetées. L'antenne, dont les dimensions sont de $42 \times 24 \times 1,6 \text{ mm}^3$, fonctionne dans une plage de fréquences allant de 3,1 à 11 GHz, à l'exception des bandes à encoche. Trois fentes en forme de U et deux fentes en forme de U étendu sont incorporées dans la structure DGS (Figure 3.17), ce qui entraîne des bandes rejetées dans les bandes à 3,3-3,7 GHz pour WiMAX, 5,15-5,825 GHz pour WLAN, et 7,1-7,76 GHz pour la communication par satellite en bande X comme illustré dans les figures 3.18 du S11 et figure 3.19 du gain en fonction de la fréquence.

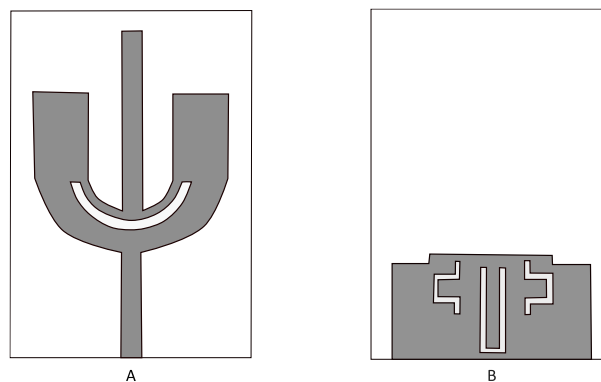


Figure 3.17. Géométrie de l'antenne patch ULB avec trois bandes rejetées utilisant la DGS [71]

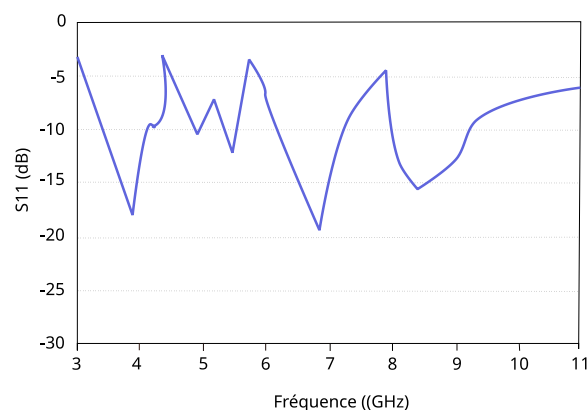


Figure 3.18. S11 de l'antenne patch ULB avec trois bandes rejetées utilisant la DGS [71]

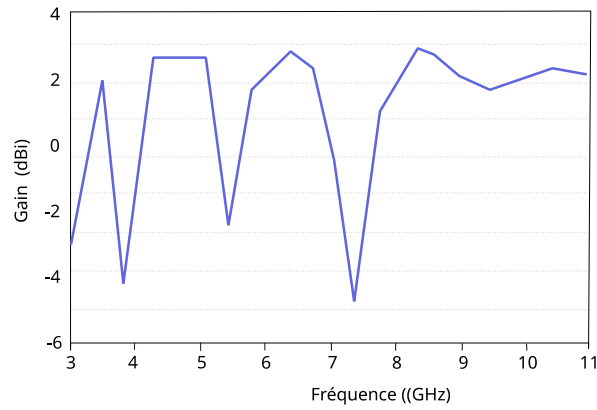


Figure 3.19. Gain de l'antenne patch ULB avec trois bandes rejetées utilisant la DGS [71]

3.8.3. L'usage des stubs

Les stubs introduisent une bande rejetée dans l'antenne en modifiant la distribution du courant et en affectant l'impédance dans la gamme de fréquences ciblée. Lorsque le courant traverse l'antenne, le stub est conçu pour créer une résonance destructrice. Cela réduit drastiquement la radiation effective de l'antenne dans cette plage de fréquences, créant ainsi une bande de réjection [72-73].

Un exemple [74] d'une antenne patch à fente elliptique avec deux bandes rejetées est proposé pour des applications ULB. L'antenne est composée d'un radiateur à fente elliptique et d'une structure de DGS permettant d'obtenir une BP large de 3,42 à 11,79 GHz. Deux bandes rejetées, l'une pour le WLAN (5,02–5,97 GHz) et l'autre pour la bande X (7,23–7,72 GHz), sont obtenues en gravant une fente en forme de S dans la ligne microruban et en ajoutant un stub parasitaire en forme de C au-dessus de la DGS.

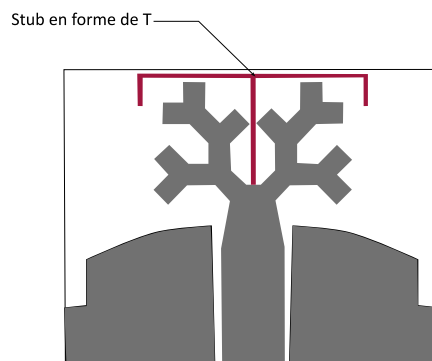


Figure 3.20. Géométrie de l'antenne proposée avec une bande rejetée utilisant un stub en forme de T [74]

Dans cet exemple [56], une ligne CPW a été utilisée pour alimenter une antenne patch compacte, un élément rayonnant fractal intégrant un stub qui est élément parasite en forme de T plié (FTSE) comme indiqué dans la figure 3.20.

Le nombre de cellules fractales influence l'adaptation d'impédance, tandis que le FTSE permet d'ajuster la fonction de rejet de bande. Les paramètres de l'antenne ont été optimisés grâce à des simulations et des mesures, démontrant une bande de fréquence de 2,94 à 11,17 GHz, avec une bande rejetée entre 3,3 et 4,2 GHz comme illustré dans la figure 3.21.

La figure 3.22 présente un gain négatif pour la bande de fréquence rejetée, ce qui montre également que ce type de conception avec une telle géométrie permet d'intégrer efficacement la fonction de rejet de bande dans une antenne ULB tout en conservant des dimensions compactes et une large bande passante.

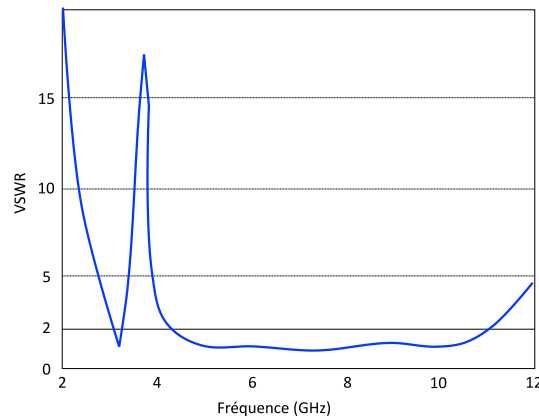


Figure 3.21. Taux d'ondes stationnaire de l'antenne proposée avec une bande rejetée utilisant un Stub en forme de T [74]

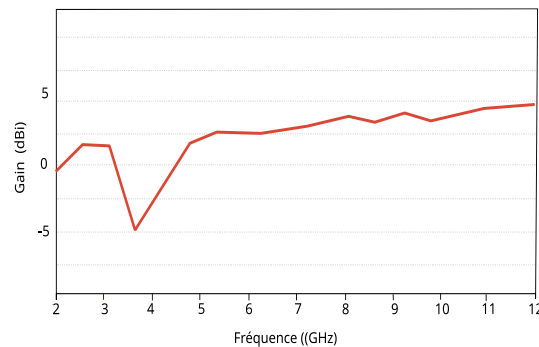


Figure 3.22. Gain de l'antenne proposée avec une bande rejetée utilisant un Stub en forme de T [74]

3.8.4. Les résonateurs sous forme d'anneau (SSR)

La forme de l'anneau lui permet de résonner à des fréquences spécifiques, créant ainsi une bande rejetée. Cela permet de bloquer certaines fréquences (la bande de fréquence de la 5G) sans affecter la largeur de bande globale de manière significative [75].

Un résonateur en forme d'anneau (SSR) qui peut être gravée dans le plan de masse partiel d'une antenne patch rectangulaire, alimentée par une ligne microruban ou l'élément rayonnant de l'antenne en forme de U, comme illustré dans la figure 3.23.

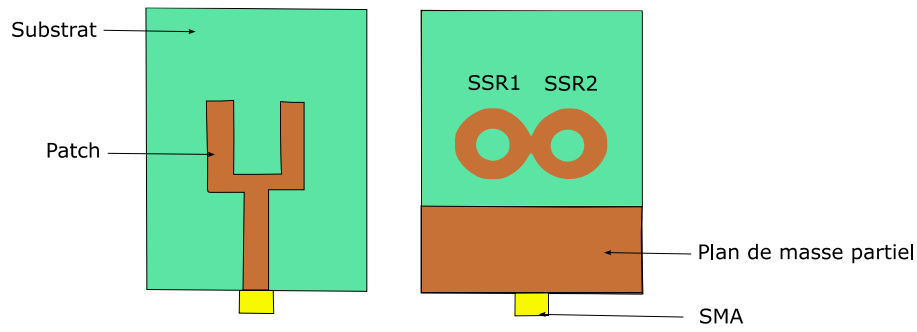


Figure 3.23. Géométrie de l'antenne patch ULB utilisant les résonateurs SSRs [75]

Cette conception offre une antenne ULB avec une bande rejetée de 4.2 à 5 GHz comme indiqué sur la figure 3.24. Avec une diminution significative au niveau de la bande rejetée, illustré dans la figure 3.25 qui présente l'efficacité de rayonnement en fonction de la fréquence.

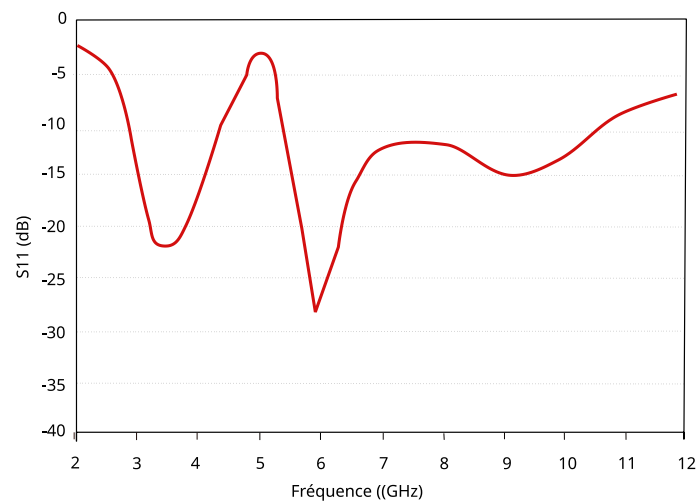


Figure 3.24. S11 de l'antenne ULB avec deux bandes rejetées utilisant les résonateurs SSRs [75]

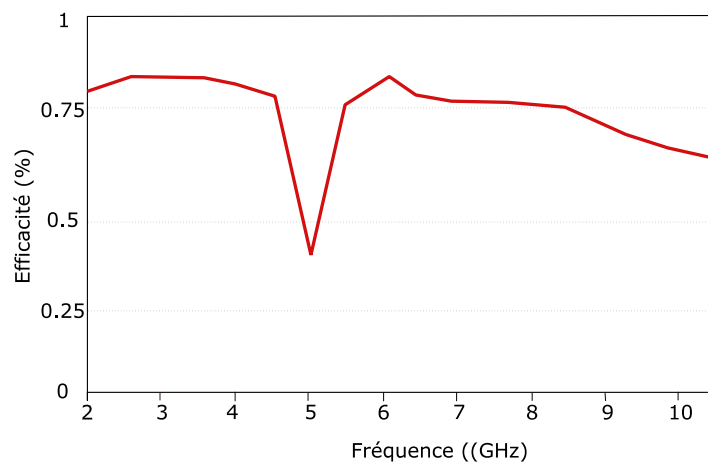


Figure 3.25. L'efficacité de rayonnement de l'antenne patch ULB avec deux bandes rejetées utilisant les résonateurs SSRs [75]

3.8.5. Les structures EBG

Les structures EBG fonctionnent comme des filtres de réjection de bande dans les antennes. Elles se forment lorsqu'un patch métallique est connecté au radiateur via une broche de court-circuit. Le principe repose sur une résonance due à la structure EBG, qui peut être modélisée par un résonateur LC comme le montre la figure 3.26 qui présente le modèle d'un EBG et son circuit équivalent [63]. La fréquence de résonance f_r est donnée par :

$$f_r = \frac{\sqrt{LC}}{2\pi} \quad (3.1)$$

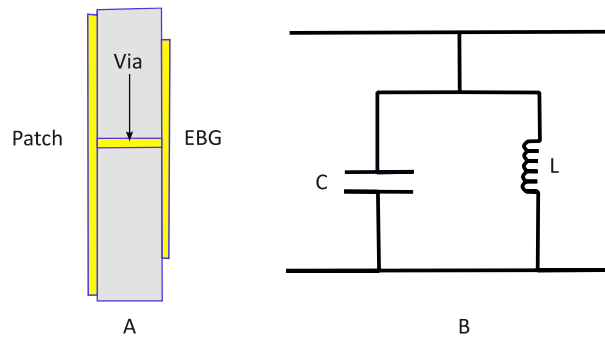


Figure 3.26. Modèle d'un EBG A) Structure EBG, B) circuit équivalent de l'EBG [63]

Cette structure EBG est responsable de la création de la bande de réjection étroite à f_r . Elle absorbe le courant provenant d'une zone spécifique du radiateur, ce qui génère une réjection de bande à la fréquence de résonance. Une seule structure EBG suffit pour créer une bande rejetée. Cependant, pour des réjections plus sélectives et efficaces, plusieurs structures EBG peuvent être utilisées. En ajustant la longueur, la largeur et la position de ces structures, il est possible de régler la fréquence et la sélectivité des bandes rejetées [63].

L'article [63] porte sur la conception d'une antenne ULB qui présente trois bandes rejetées dans les fréquences 5G, WLAN, et satellite (liaison descendante). L'objectif consiste à assurer le fonctionnement de l'antenne sur une vaste gamme de fréquences tout en filtrant sélectivement certaines bandes spécifiques.

La figure 3.27 présente une antenne microruban rectangulaire excitée via une CPW au plan de masse, quatre EBG sont intégrés dans le plan de masse et sont reliées au radiateur par des Vias de court-circuit. La bande de 5G est rejetée par EBG1 et EBG2 et La bande de WLAN est rejetée par EBG3 et EBG4.

Le S_{11} de cette structure est présenté dans la figure 3.28, où il existe deux bandes rejetées rectangulaires dans les bandes de la 5G et du WLAN dépassant -5dB pour chacune, démontrant l'efficacité de cette technique pour rejeter des bandes indésirables.

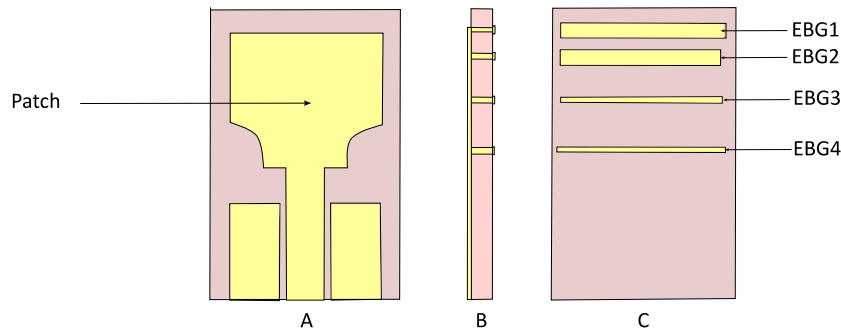


Figure 3.27. Géométrie de l'antenne patch ULB avec double bandes rejetées utilisant les EBG A) Vue de face, B) Vue latérale, C) Vue arrière [63]

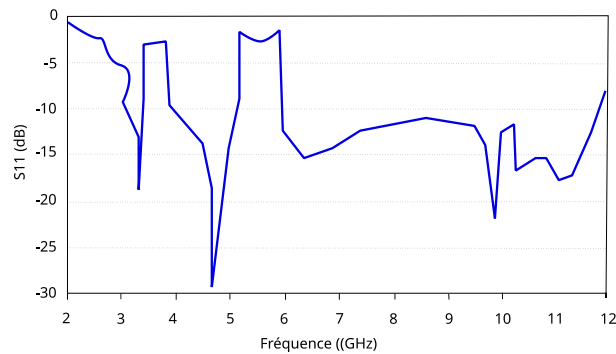


Figure 3.28. Le S_{11} pour l'antenne patch avec deux bandes rejetées utilisant 4 EBG dans le plan de masse [63]

3.8.6. Les métamatériaux

Plusieurs structures périodiques ont été réalisées pour exhiber des propriétés de métamatériaux sur une certaine gamme de fréquences. Ces structures ont suscité un grand intérêt et ont été largement étudiées et améliorées. Elles sont utilisées dans de nombreux des dispositifs RF, micro-ondes et photoniques pour obtenir des propriétés intéressantes. Le concept des MTM a également été appliqué à la conception de divers types d'antennes avec des performances améliorées :

- Un gain élevé ;
- Une meilleure efficacité ;
- Une miniaturisation des antennes.

Les métamatériaux sont des matériaux artificiellement conçus pour offrir des propriétés matérielles non disponibles dans le commerce. Ils existent trois types :

- **Épsilon-négatif (ENG)** : Matériau avec uniquement une permittivité négative.
- **Mu-négatif (MNG)** : Matériau avec uniquement une perméabilité négative.

- **Double-négatif (DNG) :** Matériau avec $\epsilon_r < 0$ et $\mu_r < 0$.

Il existe deux types d'antennes qui utilisent les MTM :

1. **Antennes basées sur les MTM :** Celles-ci utilisent des substrats ENG, MNG ou DNG.
2. **Antennes inspirées des MTM :** Celles-ci utilisent des cellules MTM telles que les SRR, CSRR, structures oméga, etc.,

Les antennes basées sur les MTM sont principalement théoriques et n'existent pas encore en pratique. Les antennes inspirées des MTM, bien que ne faisant pas appel aux propriétés négatives des MTM, utilisent des cellules MTM et sont analysées en utilisant les théories associées [24].

Plusieurs études de recherche ont prouvé l'efficacité des cellules métamatériaux dans le rejet de bandes indésirables en exploitant leurs caractéristiques telles que [63], [76-77].

Sur le même exemple précédant [63], et afin de rejeter la troisième bande (bande X liaison montante), les auteurs ont utilisé deux SRR (SRR1 et SRR2) dans le plan de masse comme indiqué sur la figure 3.29.

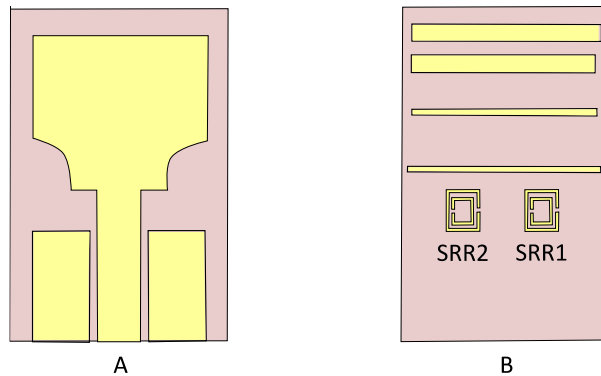


Figure 3.29. Géométrie de l'antenne patch ULB avec trois bandes rejetées utilisant les EBGs ET les SRRs A) Vue de face, B) Vue arrière [63]

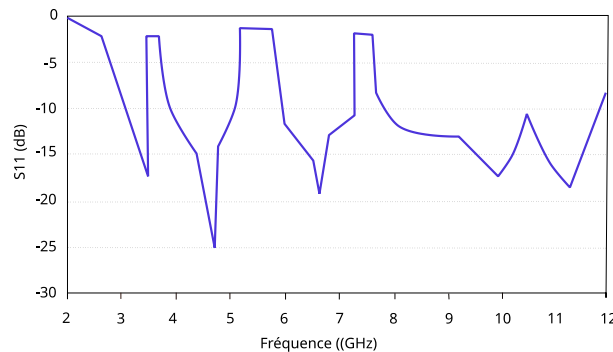


Figure 3.30. S11 de l'antenne patch ULB avec trois bandes rejetées utilisant les EBGs ET les SRRs [63]

Selon la figure 3.30, il y a trois bandes rectangulaires rejetées, dont la troisième est utilisée pour rejeter la bande X-liaison montante à partir de l'analyse du S11 du prototype. De plus, l'étude du gain

de cette structure a confirmé que l'utilisation de cellules métamatériaux est efficace en raison d'un gain négatif de près de -12 dB à la fréquence centrale F_n de la troisième bande rejetée, en comparaison avec les deux premières bandes causées par l'utilisation des EBGs, comme le montre la figure 3.31.

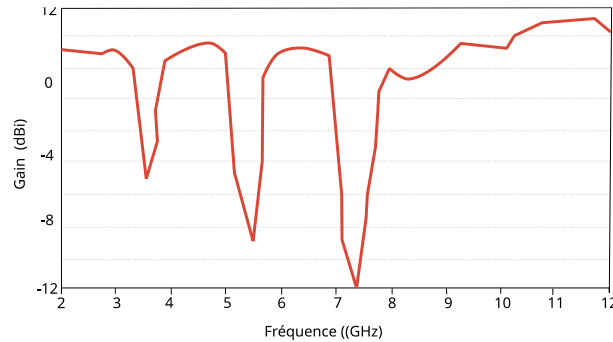


Figure 3.31. Gain de l'antenne patch ULB avec trois bandes rejetées utilisant les EBGs et les SRRs [63]

Un autre article [76] présente une antenne patch ULB à faible coût et profil bas, conçue pour réduire les interférences dans les bandes étroites comme le WLAN et les communications par satellite (bande X). La technique consiste à intégrer quatre cellules SRR près de la ligne d'alimentation (figure 3.32-A) pour créer des bandes rejetées à WLAN et trois cellules CSRR dans le plan de masse partiel (figure 3.32-B) pour rejeter la bande X (satellites).

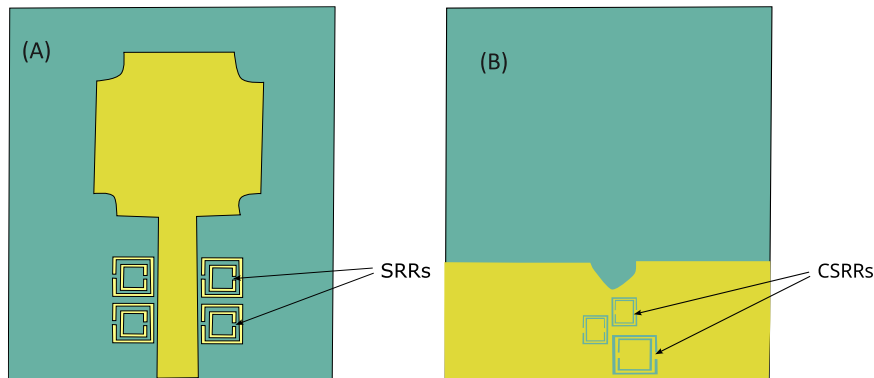


Figure 3.32. Géométrie de l'antenne patch ULB A) Vue dessus, B) Vue de dessous [76]

Cette conception offre une antenne ULB avec deux bandes rejetées (5.15-5.35 GHz et 5.725-5.85 GHz pour le WLAN) et la bande X (7.9-8.4 GHz pour les satellites) comme indique la figure 3.33 qui présente un S11 de -5 dB aux fréquences centrales des deux bandes. La figure 3.34 du gain de démontre qu'il existe des valeurs négatives dans les deux bandes rejetées.

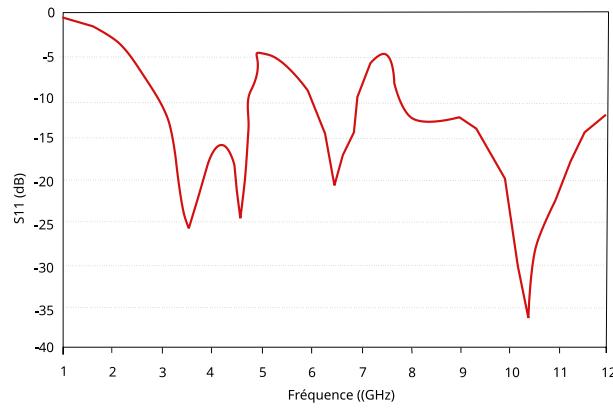


Figure 3.33. S11 de l'antenne ULB avec deux bandes rejetées utilisant 4 SRRs et 3 CSRRs [76]

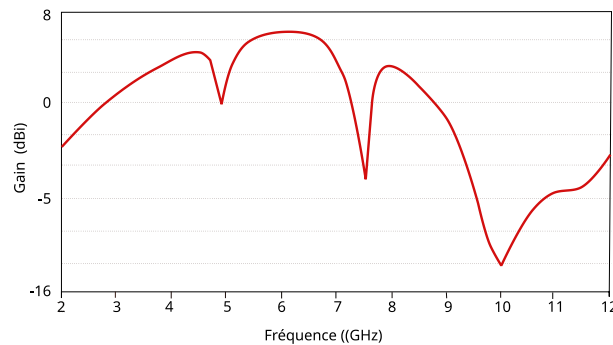


Figure 3.34. Gain de l'antenne patch ULB avec deux bandes rejetées utilisant 4 SRRs et 3 CSRRs [76]

3.8.7. Les outils de l'IA

Le réseau neuronal artificiel (ANN) est de plus en plus utilisé dans le domaine de l'ingénierie électromagnétique. Étant donné sa rapidité et sa précision supérieure par rapport aux techniques de simulation classiques [78], les ANN sont particulièrement efficaces pour modéliser des problèmes non linéaires et complexes, et ont été appliqués à la conception d'antennes au cours des dernières décennies. Cependant, la littérature sur la modélisation d'antennes ULB avec les ANN reste limitée. Ce type de modélisation, rarement abordé dans la littérature, vise à faciliter le travail des concepteurs d'antennes en fournissant des prédictions utiles sur les performances des antennes à bande interdite ULB.

L'article [78] propose une nouvelle modélisation ANN pour analyser les antennes patch ULB à fentes, permettant de prédire simultanément la bande passante ULB et le comportement de rejet de trois bandes de fréquences. Cet article propose une modélisation multi-paramétrique pour une antenne ULB à l'aide de réseaux neuronaux artificiels (ANN). L'objectif est de prédire la bande d'impédance ULB et les fréquences d'arrêt multi-bandes. Deux modèles neuronaux sont développés et testés à l'aide de huit algorithmes différents. Le modèle avec deux couches cachées, ayant une erreur quadratique moyenne de 27,51 kHz, s'avère être le plus efficace.

Les modèles optimisés sont validés avec un jeu de données supplémentaire. Une antenne prototype est fabriquée et caractérisée, avec une concordance entre les résultats simulés et expérimentaux.

L'article présente aussi l'évolution géométrique de l'antenne avec l'ajout de fentes sous forme de U comme présenté dans la figure 3.35 pour rejeter certaines bandes d'interférences (WiMAX, LTE, C-band). L'optimisation géométrique aboutit à une antenne qui rejette trois bandes spécifiques tout en maintenant une large bande passante. Pour modéliser cette antenne, 1195 modèles paramétriques sont générés et utilisés pour entraîner les réseaux neuronaux. Les performances de deux configurations de modèles ANN sont comparées, l'une avec une seule couche cachée et l'autre avec deux couches. Le modèle à deux couches est plus performant, validé par l'analyse du S11 illustré dans la figure 3.36.

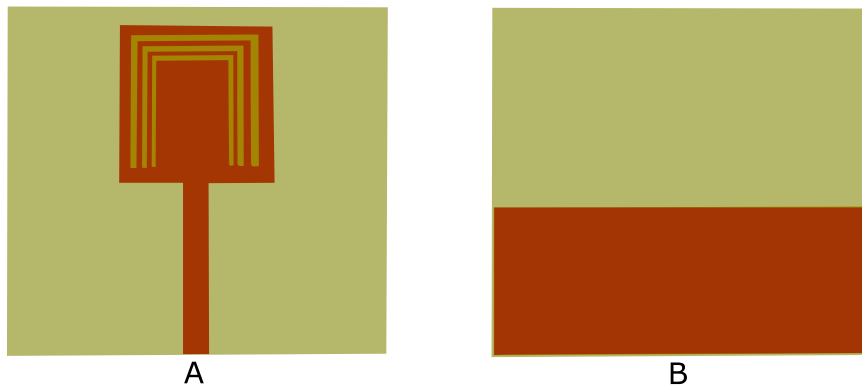


Figure 3.35. Géométrie de l'antenne patch ULB avec trois bandes rejetées utilisant l'ANN [78]

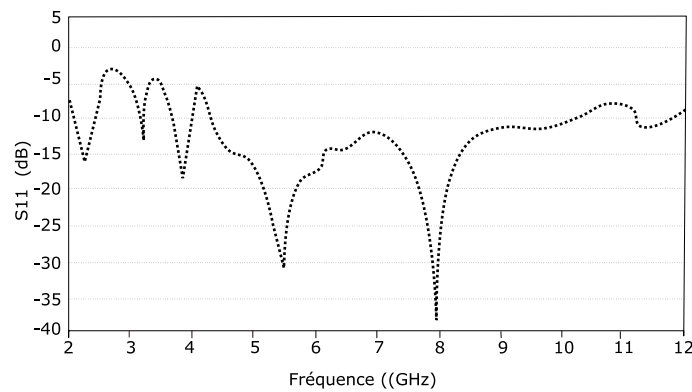


Figure 3.36. S11 de l'antenne patch ULB avec trois bandes rejetées utilisant l'ANN [78]

Un autre exemple [79], qui présente une approche pour prédire la bande de fréquence rejetée d'une antenne ULB utilisant des réseaux de neurones artificiels (ANN). L'antenne conçue a une BP de 11.5 GHz, de 3,85 GHz à 12,38 GHz, et la technique ANN est utilisée pour prédire la fréquence de coupure dans cette bande.

L'antenne proposée dans cet article est conçue avec un substrat FR4-epoxy ($\epsilon_r = 4,3$) et un plan de masse partiel pour assurer une bonne bande passante d'impédance. Le patch circulaire est gravé avec une fente en anneau pour introduire une caractéristique de bande de coupure comme illustré dans la

figure 3.37. Les dimensions physiques de l'anneau et les paramètres électriques influencent directement la fréquence de coupure, et cette relation est utilisée pour établir un modèle ANN.

L'ANN est entraîné à partir d'un ensemble de données générées par simulation avec HFSS, contrôlé via MATLAB à l'aide d'un script VB. Un total de 360 simulations a été réalisé en variant les paramètres géométriques et les constantes diélectriques. L'ANN utilise une architecture à deux couches cachées avec 25 neurones chacune, optimisée à l'aide de l'algorithme Levenberg-Marquardt (LM). Le modèle est ensuite évalué par la méthode de validation croisée en k-fold, avec un $k = 10$.

La performance du modèle ANN est évaluée à travers des critères statistiques, le MSE et le MAPE. Le modèle atteint une MAPE totale de 0,125 et un coefficient de régression $R = 1$, indiquant une excellente précision dans la prédiction de la fréquence de coupure. Les résultats prédits par l'ANN sont comparés aux résultats théoriques et simulés, montrant une correspondance étroite.

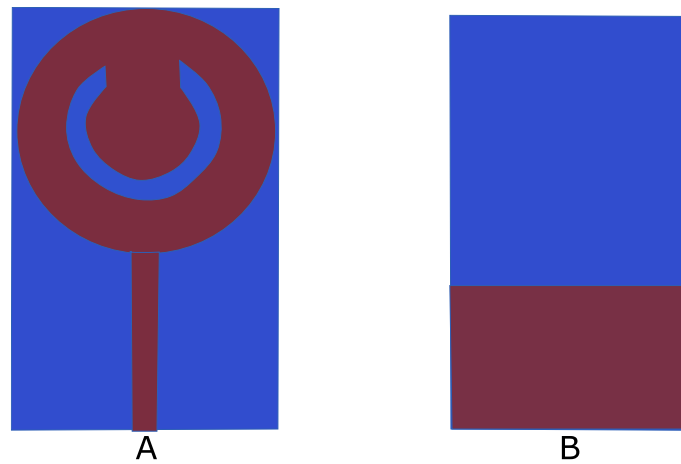


Figure 3.37. Géométrie de l'antenne patch ULB avec une bande rejetée utilisant l'ANN [79]

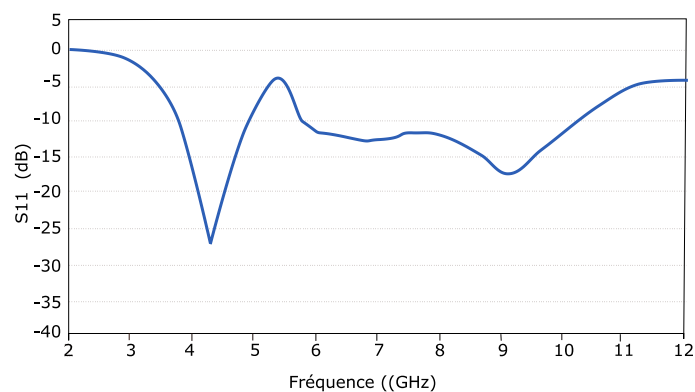


Figure 3.38. S11 de l'antenne patch ULB avec une bande rejetée utilisant l'ANN [79]

Les résultats de la simulation électromagnétique des caractéristiques de retour de l'antenne (S11) montrent que l'antenne couvre la bande de 3,85 GHz à 12,38 GHz, avec une bande de coupure de 5,1 GHz à 6,0 GHz (figure 3.38). Cette validation confirme que l'antenne est adaptée aux applications ULB tout en évitant les interférences avec les autres technologies sans fil.

3.9. Résumé des techniques pour rejeter des bandes pour les antennes patchs ULB

On peut regrouper les différentes techniques utilisées pour le rejet de bandes indésirables dans les antennes patch ULB en cinq grandes familles comme illustré dans le tableau 3.5.

Techniques utilisées pour le rejet de bandes indésirables pour les antennes patch ULB					
Critère	La géométrie	Les éléments parasites	Les EBGs	Les Métamatériaux	Les outils de l'IA
Type	DPS, DMS DGS	Stubs	Résonateurs avec ou sans broches de court-circuit (Vias).	SRR, CSRR...ect	ANN
Avantages	- Simplicité de mise en œuvre - Réduction du coût global	- Flexibilité - Bon contrôle des fréquences rejetées	- Bonne sélectivité - Potentiel d'amélioration de la bande rejetée	- Excellentes performances de rejet de bande - Intégration possible avec d'autres technologies avancées	- Réduction du temps de conception et d'optimisation - Capacité d'analyse des grandes données pour des conceptions complexes
Inconvénients	- Modification de la géométrie pouvant dégrader les performances globales (gain, diagramme de rayonnement) - Réduction potentielle de la bande passante	- Risque d'augmentation des pertes - Peut dégrader l'adaptation de l'antenne	- Complexité d'intégration et de fabrication - Peut occuper plus d'espace - Coût plus élevé	- Difficile à concevoir des cellules DNG - Sensible aux variations de paramètres géométriques	- Appliquées principalement à des conceptions simples (ex. fentes, encoches) - Dépendance à la qualité des données pour des résultats précis

Tableau 3.5. Différentes techniques utilisées pour le rejet de bandes indésirables pour les antennes patch ULB

Chaque technique a ses propres avantages et inconvénients, le changement de la forme et l'usage des éléments parasites est une approche simple et facile à intégrer. Mais des moyens plus simples

comme des EBGs ou des métamatériaux fonctionnent mieux pour bloquer des bandes de fréquences indésirables. Les retombées positives de l'IA sont passionnantes, notamment pour accélérer la phase de planification et proposer de meilleures solutions justes pour les méthodes simples (fentes et encoches).

3.10. Conclusion

Ce troisième chapitre a été consacré à une analyse détaillée des diverses procédures et techniques par lesquelles la bande passante des antennes patch peut être élargie, en citant les méthodes les plus efficaces et les plus innovantes d'élargir la BP, ainsi que les différentes méthodes employées pour atténuer les interférences des bandes étroites indésirables des applications dans le spectre ULB. L'analyse de ces approches met en évidence l'importance de solutions innovantes, telles que l'intégration de structures résonantes, de géométries fractales et de cellules de métamatériaux, afin d'optimiser les performances des antennes tout en assurant une sélectivité efficace contre les interférences.

Chapitre 04

Contributions et Travaux réalisés

4.1. Introduction

Après avoir étudié les concepts fondamentaux des antennes, en particulier des antennes patchs qui, malgré leur popularité, souffrent d'une limitation de la bande passante, diverses méthodes et techniques ont été examinées afin d'optimiser cette dernière et de développer des antennes patchs à large bande. La technologie ULB a été choisie non seulement pour son potentiel industriel, mais également pour son intérêt académique. Cependant, l'une des problématiques majeures liées à cette technologie réside dans les interférences provoquées par les nombreuses applications à bande étroite coexistant dans le spectre ULB. Après une analyse approfondie des différentes techniques permettant de rejeter les bandes indésirables, il devient pertinent de réaliser une conception spécifique.

Ce dernier chapitre sera consacré à une étude approfondie portant sur la conception, la fabrication et l'analyse des performances de deux antennes ULB intégrant des techniques de réjection de bandes spécifiques. La première est une antenne patch ULB compacte exploitant les propriétés des métamatériaux afin d'améliorer ses caractéristiques de filtrage tout en maintenant une taille réduite. La seconde est une antenne microruban à réseau de dipôles logarithmiquement périodique (MLPDA), optimisée par l'ajout de stubs, qui jouent un rôle clé dans l'élimination sélective des fréquences indésirables.

4.2. Antenne patch ULB avec deux bandes rejetées

La procédure de conception de l'antenne proposée comprend plusieurs étapes essentielles qui garantissent un développement efficace et optimal de l'antenne.

4.2.1. L'étude

4.2.1.1. Cahier des Charges

Le projet consiste à réaliser une antenne patch ULB miniature intégrant deux bandes rejetées, destinée à des applications dans les communications sans fil et qui doit répondre aux points suivants :

- **Impédance d'entrée** : 50Ω , cette impédance standard est requise pour assurer une bonne adaptation avec les équipements de communication et minimiser les pertes par réflexion.
- **Type d'antenne** : Antenne patch (Microruban)
- **Dimensions de l'antenne** : 20 mm x 20 mm (compacité recherchée). Après l'examen approfondi des travaux antérieurs et des recherches dans le domaine des antennes patch ULB compactes avec des bandes rejetées.
- **Bande passante ULB** : 3.1 GHz à 10.6 GHz (standard ULB).
- **Coefficient de réflexion** : $S_{11} < -10 \text{ dB}$ dans la bande passante (sauf dans les bandes rejetées).

- **Taux d'onde stationnaire : (VSWR) < 2** dans la bande passante (sauf dans les bandes rejetées).
- **Gain** : stable sur la bande ULB, avec une réduction marquée dans les bandes rejetées.
- **Efficacité** : Maximisée dans la bande ULB, avec des pertes dans les bandes de rejet.
- **Bandes rejetées** :
 - Bande WLAN : 5.15 GHz - 5.85 GHz
 - Bande X (Satellite-DL) : 7.2 GHz – 7.8 GHz

4.2.2. La Conception

4.2.2.1. Le choix d'outil de simulation

Le software CST Studio est particulièrement adapté à la simulation d'antennes patches ULB miniatures avec des bandes rejetées en raison de son efficacité dans le domaine temporel, de sa facilité de modélisation des structures complexes comme les métamatériaux, et de sa rapidité pour gérer de larges plages de fréquences. Bien que HFSS et FEKO soient également des outils performants, le CST est souvent préféré pour la conception d'antennes ULB compactes, en particulier pour des projets qui exigent rapidité, précision, et une interface conviviale [80].

4.2.2.2. Le choix de substrat

Le substrat FR-4 est largement disponible sur le marché et compte parmi les matériaux les plus utilisés dans les processus de fabrication de circuits imprimés (PCB). Sa large disponibilité signifie qu'il est facilement accessible et que nous pouvons le trouver à des prix raisonnables, ce qui est un avantage significatif pour les projets de recherche et de développement. Ce substrat présente une épaisseur (h) de 1.5 mm, permittivité relative (ϵ_r) de 4,3 et un Tangent de pertes ($\tan \delta$) de 0,025.

4.2.2.3. Le choix de la méthode d'alimentation

La technique de CPW a été choisie en raison de ses nombreux avantages. Tout d'abord, le CPW facilite une meilleure adaptation d'impédance, ce qui est essentiel pour réduire les pertes de signal et améliorer le rendement de l'antenne sur la bande ULB. De plus, cette méthode permet une intégration facile avec d'autres circuits microélectroniques, ce qui est particulièrement avantageux pour des applications miniaturisées. En outre, le CPW évite les problèmes d'alignement souvent rencontrés lors de la fabrication à double face, ce qui garantit une précision accrue dans la construction de l'antenne. Ce choix répond donc aux exigences de miniaturisation tout en assurant des performances optimales, rendant le CPW idéal pour notre conception d'antenne de dimensions réduites, inférieures ou égales à 20 mm x 20 mm².

4.2.2.4. Le choix de connecteur

Le choix d'un connecteur SMA pour la conception d'une antenne patch ULB est justifié par ses excellentes performances en haute fréquence et son adéquation avec les caractéristiques de l'antenne. Le connecteur SMA avec une BP de 18 GHz, est un standard largement utilisé pour les applications RF et micro-ondes, notamment en raison de sa capacité à fonctionner jusqu'à 18 GHz, couvrant ainsi largement la bande de fréquences d'une antenne ULB. Avec une impédance d'entrée de 50 Ω . En outre, son faible coefficient de réflexion, caractérisé par un VSWR de 1,2:1, garantit une transmission de puissance efficace et une réduction des interférences, ce qui est important pour maintenir les performances de l'antenne sur une large gamme de fréquences.

4.2.2.5. La conception de l'antenne ULB

Utilisant le logiciel CST Studio Suite version 2022, pour simuler et optimiser notre design. Le processus a commencé par la conception d'un patch elliptique gravé sur un substrat rectangulaire aux dimensions spécifiques ($L \times W$). Cette antenne est alimentée par une ligne CPW avec une impédance caractéristique de 50 Ω , aux dimensions ($L_g \times W_g$), et est connectée avec un connecteur SMA comme illustré dans la figure 4.1 (a).

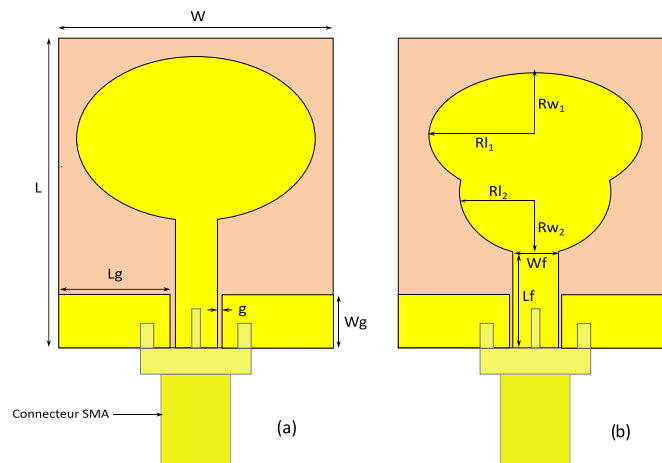


Figure 4.1. Géométrie de l'antenne ULB a) Patch elliptique b) patch à double ellipses

Paramètre	Valeur (mm)	Paramètre	Valeur (mm)
L	19	Rw1	2
W	18	Rl2	2.5
Lf	6.38	Rw2	2
Wf	3	g	0.2
Lg	7.3	t	0.035
Wg	3.5	h	1.5
Rl1	3.5		

Tableau 4.1. Paramètres de l'antenne patch ULB

La conception du patch et de CPW repose sur des équations électromagnétiques clés (Eq. 2.7, 2.8 et 2.9) présentées dans le deuxième chapitre de notre étude. Par la suite, on a ajouté une deuxième ellipse au design précédent, comme illustré dans la figure 4.2 (b), afin d'améliorer la BP de l'antenne.

Une optimisation des différents paramètres a été réalisée pour concevoir une antenne couvrant l'intégralité du spectre ULB, et les valeurs correspondantes sont présentées dans le tableau 4.1. La comparaison des S11 est présentée dans la figure 4.2 montre que le design final, illustré en figure 4.1(b), offre une bande passante de 7.5 GHz, allant de 3 à 10.5 GHz, avec un S11 inférieur à -15 dB, couvrant ainsi tout le spectre ULB et répondant aux exigences des applications dans cette plage de fréquences.

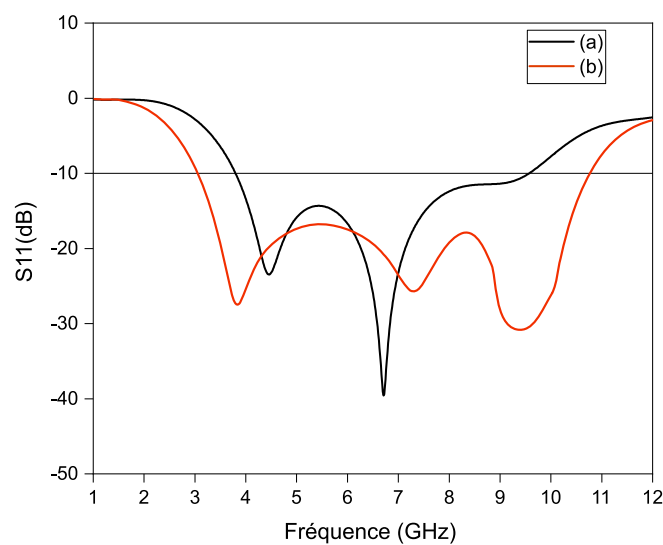


Figure 4.2. Comparaison des Coefficients de Réflexion : antenne patch elliptique et antenne patch à double ellipses

4.2.3. Les bandes rejetées

4.2.3.1. Le choix de la technique de rejet des bandes indésirables

L'usage de cellules à métamatériaux permet non seulement de minimiser l'interférence des bandes de fréquences indésirables, mais cette offre une flexibilité dans le design, et permettent de concevoir des antennes plus compactes tout en maintenant des performances élevées.

4.2.3.2. La conception de la cellule unitaire à métamatériaux

Il existe de nombreux types de cellules à métamatériaux, tels que CSRR, SRR...ect, comme mentionné dans le chapitre précédant. Dans cette étude nous avons élaboré la conception d'une cellule unitaire sous forme de résonateur en boucle ouverte (hairpin) ($L_m \times W_m$) gravée dans un substrat FR-4 de ($L_u \times W_u$) de $5 \times 5 \text{ mm}^2$, comme illustré dans la figure 4.3.

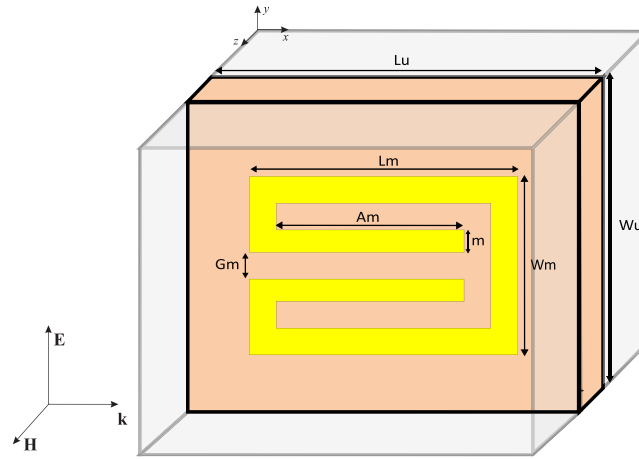


Figure 4.3. Cellule unitaire à métamatériaux en 3-D

Le principe de fonctionnement de la cellule

Une onde électromagnétique plane incidente dans la direction x s'approche de la cellule unitaire, le champ magnétique étant orienté le long de l'axe z et le champ électrique le long de l'axe y . Des conducteurs électriques parfaits servent de parois le long de l'axe y (sur les côtés orientés xz). Cette configuration facilite la conception d'anneaux qui résonnent près de la fréquence souhaitée et permet la caractérisation des métamatériaux par le calcul des paramètres S et la récupération des caractéristiques électromagnétiques effectives ϵ_{eff} et μ_{eff} [63].

ϵ_{eff} (permittivité effective) : désigne la permittivité relative effective d'un matériau, qui est une mesure de la capacité du matériau à stocker de l'énergie électrique lorsqu'un champ électrique est appliqué. C'est une manière d'exprimer la façon dont un matériau interagit avec les champs électriques par rapport au vide.

μ_{eff} (perméabilité effective) : qui désigne la perméabilité relative effective d'un matériau, qui est Cette mesure caractérise la capacité d'un matériau à développer des champs magnétiques lorsqu'il est soumis à un champ magnétique. C'est une manière d'exprimer la façon dont un matériau interagit avec les champs magnétiques par rapport au vide.

Extraction des perméabilités de la cellule

Pour étudier l'impact des métamatériaux, nous utilisons une technique standard de récupération des paramètres pour calculer la perméabilité magnétique effective [81], [82].

Le logiciel CST Studio est utilisé pour acquérir les composantes réelles et imaginaires de la perméabilité magnétique, comme l'illustre la figure 4.4. Il est évident que la représentation plane de la structure métamatérielle présente une gamme de fréquences caractérisée par une perméabilité négative pour une bande spécifique.

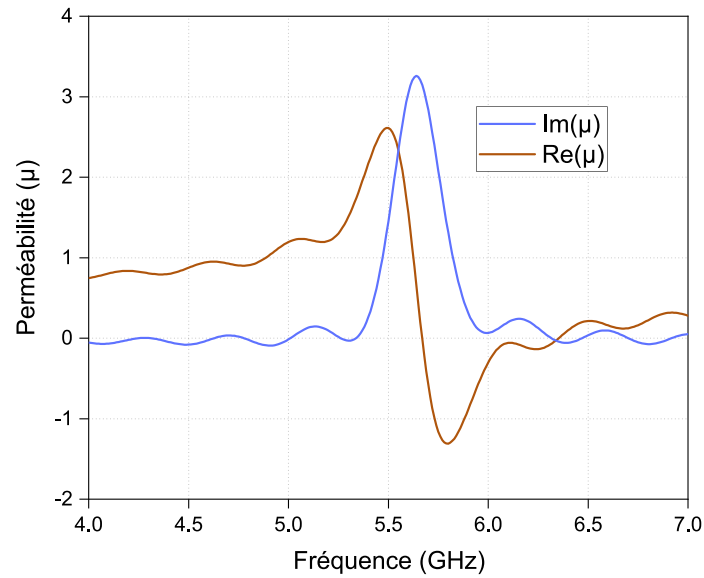


Figure 4.4. Perméabilité de la cellule à métamatériaux

Cette évaluation est une estimation. Néanmoins, la simulation et l'extraction de la perméabilité fournissent une indication raisonnable de la présence de propriétés métamatérielles, même au niveau des cellules individuelles.

Etude de l'effet de la modification de longueur de cellule

La figure 4.5 présente une extraction de la perméabilité de la cellule à métamatériaux, y compris ses parties réelles et imaginaires, pour différentes longueurs de cellules unitaires L_m .

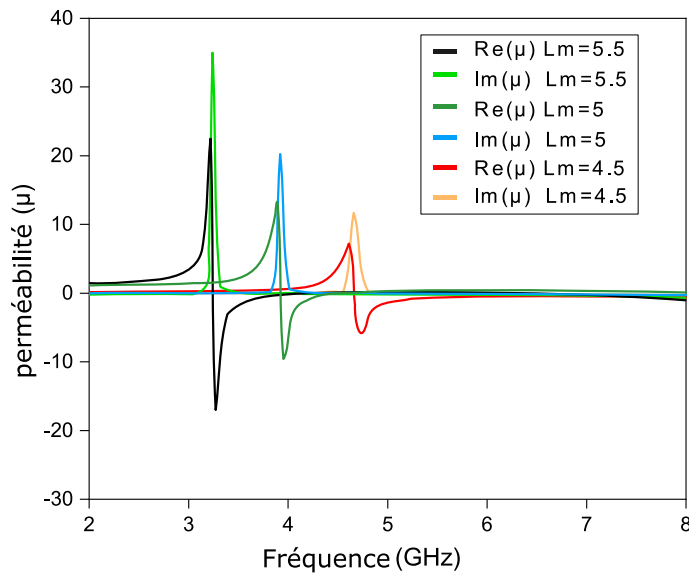


Figure 4.5. Perméabilité de la cellule à métamatériaux pour différentes valeurs de L_m

Les résultats indiquent une influence directe des modifications de la longueur de la cellule unitaire sur la fréquence à laquelle l'effet de bande se manifeste. Cela facilite non seulement la conception des résonateurs, mais offre également une autre justification aux résultats obtenus.

Une corrélation importante est observée dans cette étude paramétrique entre la longueur de la cellule unitaire et sa fréquence. La fréquence des bandes observées dans les métamatériaux est inversement liée à la longueur de la cellule, ce qui indique son extensibilité et renforce notre compréhension de l'influence des paramètres de conception, notamment en ce qui concerne la perméabilité négative.

4.2.3.3. La première bande rejetée (WLAN)

L'antenne patch ULB conçue couvre une large plage de fréquence, ce qui engendre des interférences de nombreuses applications à bandes étroites tels que WLAN, 5G sous 6GHz, WiMax...ect. Pour garantir une performance optimale, nous avons intégré des métamatériaux afin de rejeter efficacement les bandes de fréquences indésirables. Deux cellules à métamatériaux, désignées sous les noms de M1 et M2 identiques et symétriques, ont été intégrées au-dessus du plan de masse avec une distance (d) comme illustré à la figure 4.6.

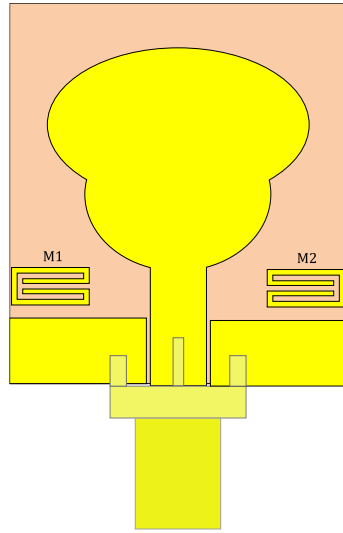


Figure 4.6. Géométrie de l'antenne ULB avec l'insertion de deux cellules à métamatériaux M1 et M2

Les cellules de métamatériaux, fondées sur des résonateurs en boucle ouverte, occupent une place cruciale dans la transformation de la réponse électromagnétique des systèmes d'antennes. En capitalisant sur les propriétés distinctives de ces matériaux, notre conception peut sélectivement filtrer une bande de fréquences désirée en ajustant les dimensions de la cellule.

La fréquence centrale de la bande rejetée F_n pour une constante diélectrique effective donnée est donnée par :

$$F_n = \frac{c}{L_m \sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (4.1)$$

$$\epsilon_{eff} = \frac{1 + \epsilon_r}{2} \quad (4.2)$$

Où

L_m : est la longueur du résonateur.

c : est la vitesse de la lumière.

La Figure 4.7 met en évidence un comportement de rejet impressionnant avec une atténuation de -4 dB à la fréquence centrale (f_{n1}) de 5,6 GHz de la première bande indésirable WLAN [5,2 5,8] GHz. Cela démontre une capacité notable à éliminer efficacement les signaux non désirés dans cette plage de fréquences.

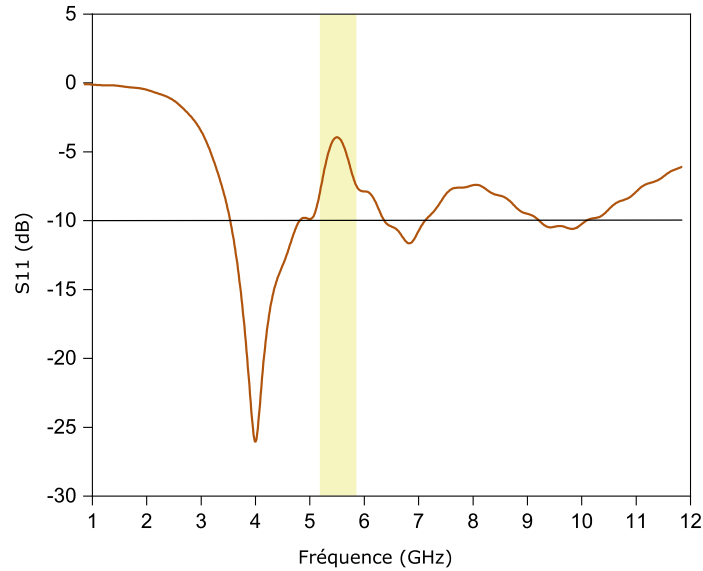


Figure 4.7. S11 de l'antenne ULB avec deux cellules à métamatériaux M1 et M2

4.2.3.4. L'effet de stubs rectangulaire

L'intégration des métamatériaux M1 et M2 a engendré un changement significatif dans l'adaptation de l'antenne, notamment dans la bande de fréquences dépassant les 7 GHz. Pour résoudre ce problème, nous avons opté pour l'incorporation de deux stubs rectangulaires de dimensions ($a \times b$), positionnés en opposition à ces métamatériaux et connectés au plan de masse. Cette approche est illustrée dans la figure 4.8.

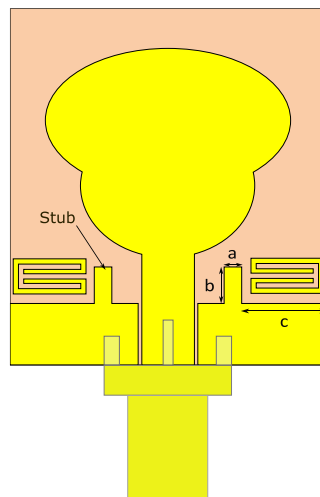


Figure 4.8. Géométrie de l'antenne ULB avec l'insertion de deux stubs

La figure 4.9 permet de visualiser le coefficient de réflexion du design après l'intégration des deux stubs. Cette courbe met en évidence l'amélioration de l'adaptation dans les hautes fréquences, démontrant que l'ajout des stubs permet de contrôler efficacement le comportement du signal. En particulier, ces éléments de résonance supplémentaires contribuent à l'ajustement précis des limites de la première bande rejetée.

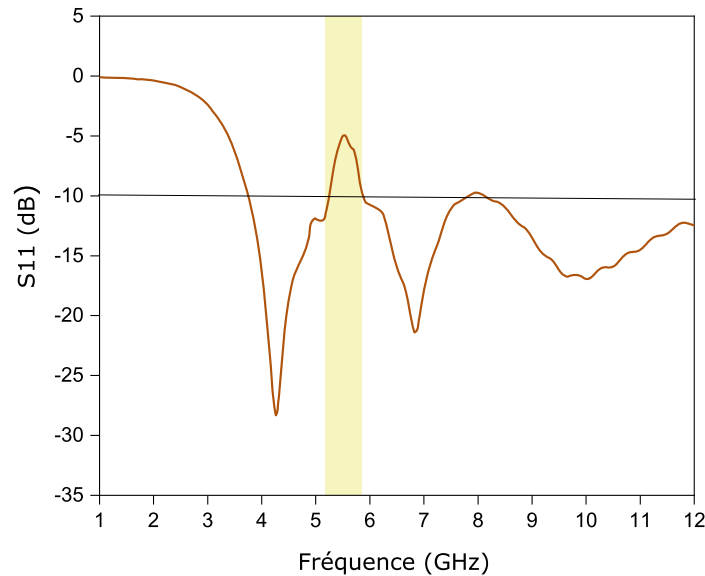


Figure 4.9. S11 l'antenne ULB avec l'insertion de deux stubs

4.2.3.5. La deuxième bande rejetée (Bande X de satellite DL)

Dans cette dernière phase de conception, nous entamons l'intégration de deux cellules supplémentaires de métamatériaux, désignées sous les noms M3 et M4, avec des dimensions différentes de celles des cellules précédentes, M1 et M2, dans le but de permettre le rejet d'une autre bande de fréquences indésirable. Ces nouvelles cellules sont disposées au-dessus des métamatériaux M1 et M2. Cette disposition précise est représentée de manière explicite sur la figure 4.10.

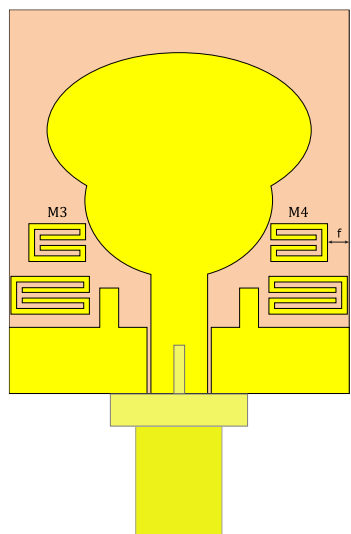


Figure 4.10. Géométrie de l'antenne ULB avec l'insertion de deux cellules à métamatériaux M3 et M4

Cette intégration induit un rejet significatif dans la deuxième bande ciblée, qui est la bande de liaison descendante satellite [7,2-7,8] GHz, atteignant un S_{11} d'environ -4 dB à la fréquence centrale $f_{n2}=7,6$ GHz. De plus, une optimisation significative de l'adaptation de cette antenne est observée dans les fréquences dépassant 12 GHz, comme le démontre clairement la Figure 4.11.

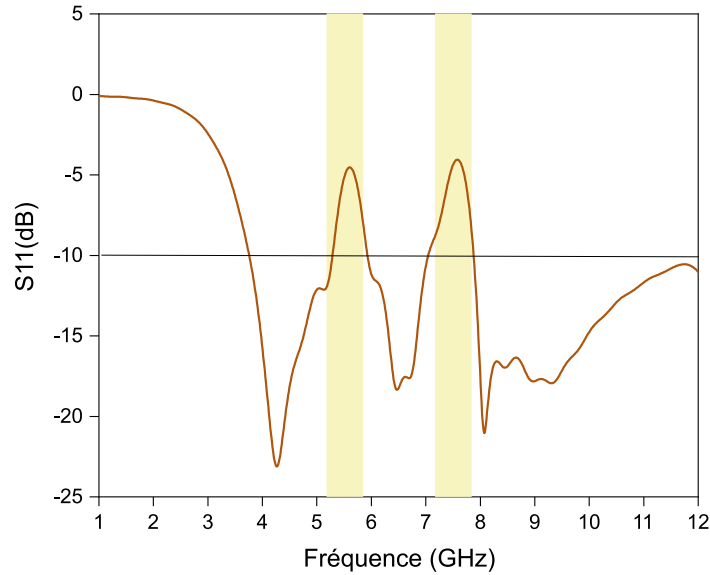


Figure 4.11. S_{11} ULB avec l'insertion de deux cellules à métamatériaux M3 et M4

Pour faciliter la compréhension des spécifications de la conception, le tableau 4.2 présente des informations détaillées sur les dimensions et les paramètres optimisés du design final de l'antenne ULB avec deux bandes rejetées qui est présenté dans la figure 4.12.

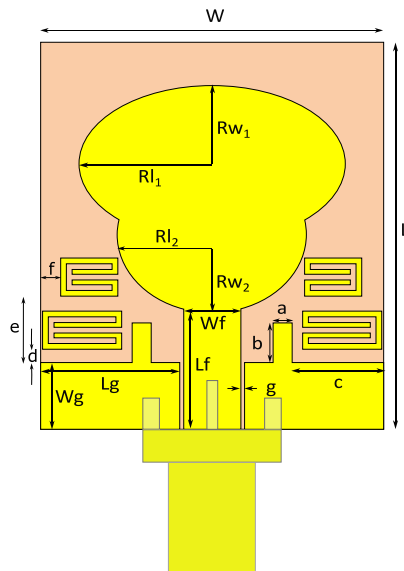


Figure 4.12. Géométrie du design final

Ces dimensions et paramètres optimisés jouent un rôle important dans la détermination des caractéristiques de performance de l'antenne, garantissant un fonctionnement efficace dans la gamme de fréquences ULB.

Paramètre	Valeur en mm	Paramètre	Valeur en mm	Paramètre	Valeur en mm
a	1	f	1.1	$L_m (M3, M4)$	3
b	2.08	M	0.2	$A_m (M3, M4)$	2.1
c	4.8	G_m	0.3	W_m	2
d	0.5	$L_m (M1, M2)$	4.15		
e	6.1	$A_m (M1, M2)$	3.25		

Tableau 4.2. Différents paramètres des cellules à métamatériaux

4.2.4. La fabrication du prototype final

Afin de valider expérimentalement le concept décrit précédemment, un modèle expérimental de l'antenne a été mis au point utilisant la technique de la gravure chimique en suivant différentes étapes identiques à la réalisation d'un PCB.

Tout d'abord, un masque contenant le design final de l'antenne qui est conçu précédemment, est généré par impression sur un film transparent. Le substrat utilisé est un FR4 recouvert d'une couche de cuivre sur une seule face est soigneusement nettoyé afin d'éliminer toutes les impuretés susceptibles d'altérer l'adhérence du masque ou d'affecter le processus de gravure. Ce nettoyage est essentiel pour garantir une gravure de qualité.

Ensuite, le masque du motif de l'antenne est appliqué sur la surface cuivrée du substrat. Pour cela, une technique d'impression par transfert thermique. Une fois le masque réalisé, la plaque est immergée dans un bain contenant du perchlorure de cuivre ($CuCl_2$), un produit chimique qui dissout toutes les parties du cuivre qui n'ont pas été recouvertes. La durée du processus de gravure est généralement de 10 à 30 minutes, en fonction de la taille du cuivre et de la dilution de la solution. À cet effet, il convient d'accorder une attention particulière à l'étape actuelle du processus, car le temps de gravure ne doit pas être dépassé, car une gravure excessive peut ruiner certaines parties du diagramme d'antenne. Une fois que le cuivre indésirable a été rasé et que la plus grande partie du métal incriminé a été enlevée, la carte sort du bain et est lavée à l'eau courante pour arrêter l'action chimique.

Enfin, la dernière étape consiste à retirer le masque protecteur, dévoilant ainsi le motif de l'antenne patch. Le substrat est ensuite séché et inspecté afin de vérifier qu'il est exempt de tout défaut. Le prototype final est représenté dans une figure 4.13.

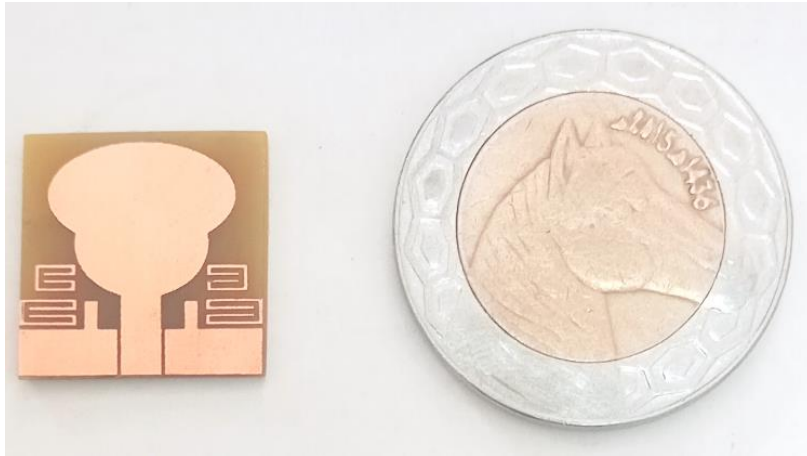


Figure 4.13. Vue du prototype final réalisé

4.2.5. Test et validation des résultats

4.2.5.1. Coefficient de réflexion

Après avoir soudé le connecteur SMA, Le prototype est évalué à travers plusieurs tests et mesures, notamment en termes de S11, de gain et diagramme de rayonnement. Ces tests ont été effectués au laboratoire (RFA) Radio fréquences et Antennes (Division TELECOM) du Centre de Développement des Technologies Avancées (CDTA) pour évaluer les performances électriques de l'antenne proposée. Nous avons utilisé un analyseur de réseau vectoriel Keysight N5224A, comme illustré dans la Figure 4.14, pour effectuer ces mesures et obtenir des données précises sur les caractéristiques électriques de l'antenne.

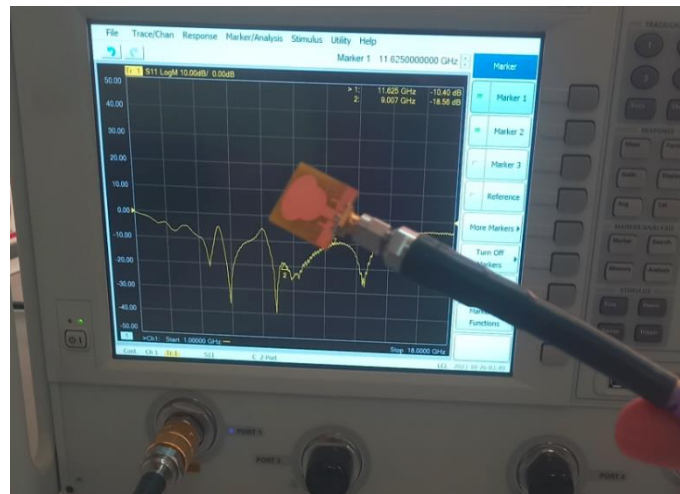


Figure 4.14. Vue expérimentale de mesure du S11 de l'antenne proposée

La Figure 4.15 met en évidence une comparaison entre les courbes simulées et mesurées du S11 de l'antenne proposée. Cette comparaison révèle une corrélation significative, confirmant ainsi la fiabilité et la précision du modèle de simulation une bande passante ULB avec deux bandes rejetées

à F_{n1} et F_{n2} . Cependant, une légère variation est observée, principalement attribuable aux pertes du substrat utilisé et aux soudures du connecteur SMA.

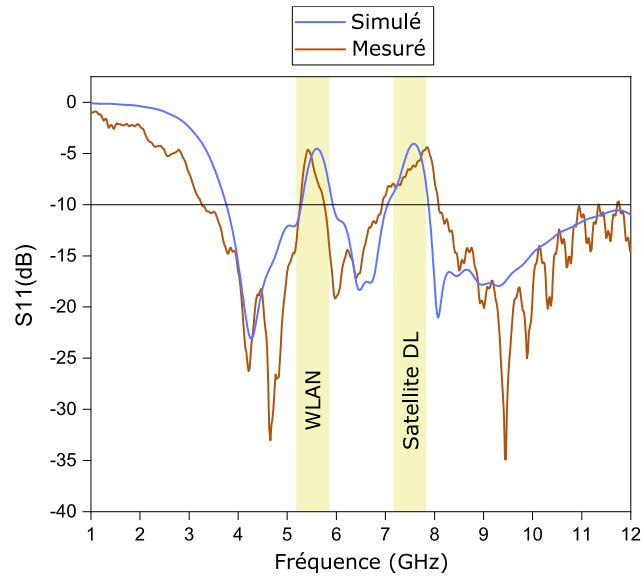


Figure 4.15. Comparaison entre le S11 simulé et mesuré de l'antenne proposée

4.2.5.2. Le gain

La figure 4.16 présente les résultats du gain mesuré et simulé, démontrant une bonne correspondance entre les deux courbes avec peu de variation. Nous remarquons que le gain demeure stable sur l'ensemble de la gamme ULB atteignant une valeur maximale de 3,7 dBi à 10,3 GHz. Ce pic est accompagné d'une diminution significative à f_{n1} (-3,8 dBi) et f_{n2} (-3,7 dBi). Cette réduction observée confirme l'efficacité de la technique des métamatériaux dans le rejet des radiations dans les deux bandes de fréquences (WLAN et la bande X satellite DL).

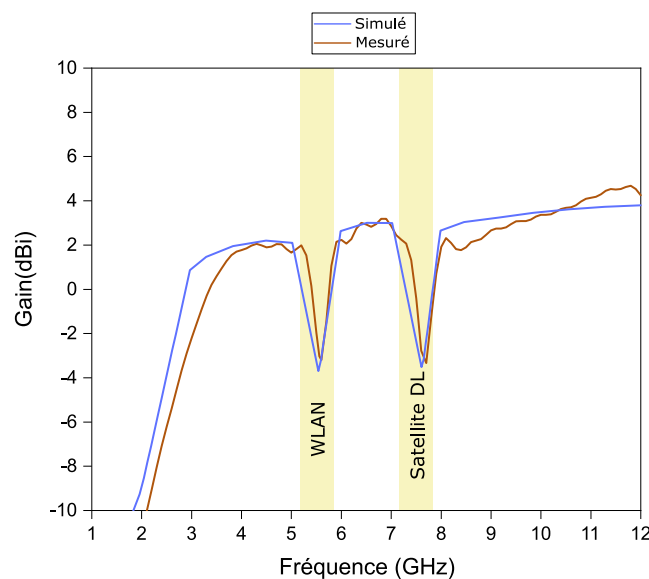


Figure 4.16. Gain obtenu par simulation et par mesure pour l'antenne proposée

4.2.5.3. Le diagramme de rayonnement

L'analyse du diagramme de rayonnement de l'antenne ULB proposée avec des bandes à double bandes rejetées est effectuée. Des mesures sont réalisées à la fois dans le plan E (plan YZ) et dans le plan H (plan XZ) aux fréquences de 4,3 GHz, 6,6 GHz et 9 GHz.

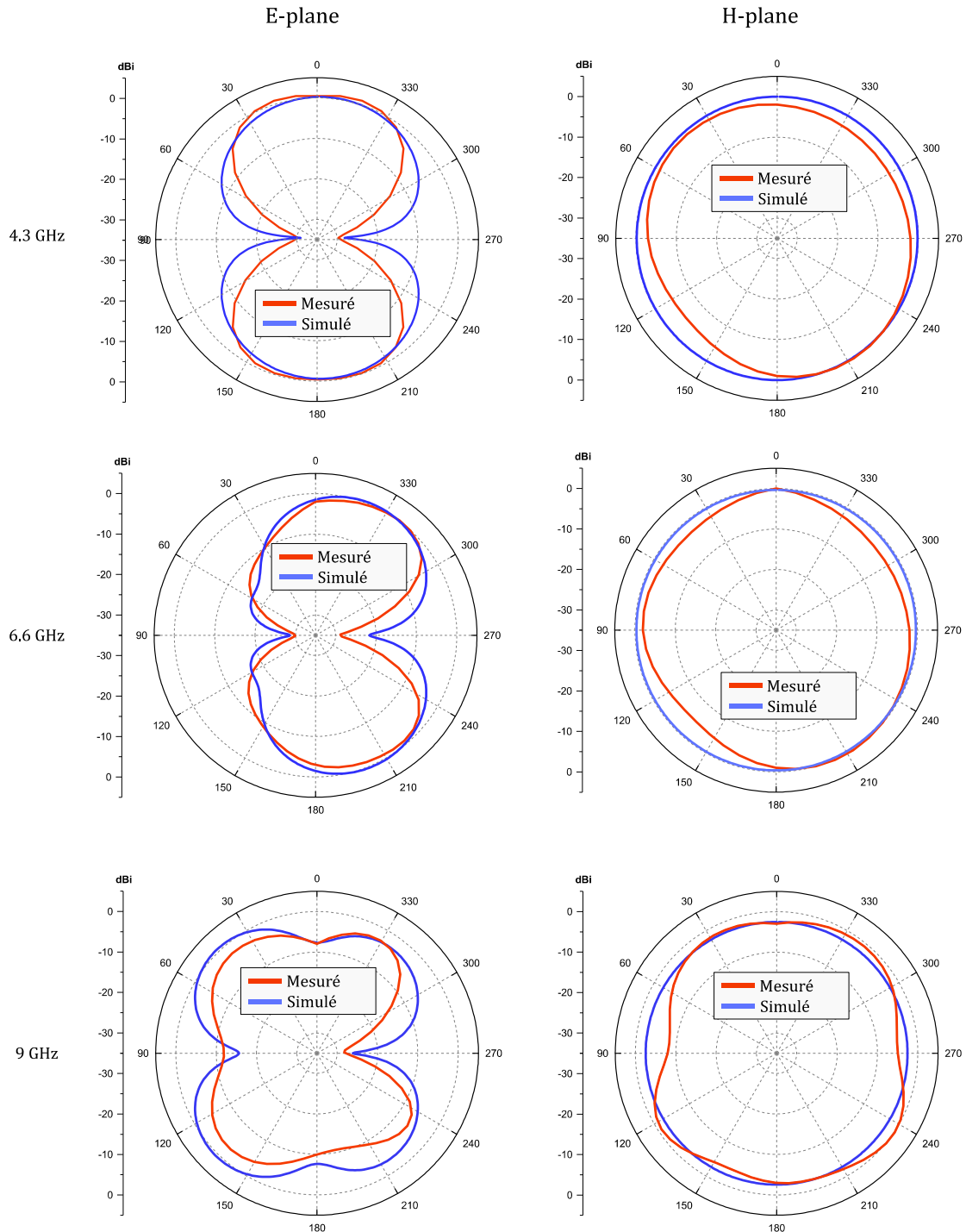


Figure 4.17. Diagramme de rayonnement simulé et mesuré de l'antenne proposée à 4,3GHz, 6,6GHz et 9GHz

Sur la figure 4.17, une comparaison entre les diagrammes de rayonnement simulés et mesurés est présentée. Les résultats montrent des caractéristiques bidirectionnelles dans le plan E et des

caractéristiques omnidirectionnelles dans le plan H pour toutes les fréquences d'intérêt. Les changements minimes observés aux hautes fréquences sont attribués aux pertes de puissance du substrat.

Pour mesurer le gain et le diagramme de rayonnement de l'antenne proposée, nous avons commencé par connecter une antenne parabole (qui présente un gain élevé) à un générateur de fréquence. Ce générateur fonctionne dans une plage de fréquences de 0 à 13 GHz. L'antenne réceptrice, qui est notre antenne proposée, est connectée à un puissance-mètre relié à un ordinateur pour enregistrer les données. Les deux antennes (émettrice et réceptrice) sont placées à la même hauteur et sont séparées par une distance d , qui correspond à la limite de la distance du champ lointain, calculée comme mentionné dans le premier chapitre, afin de respecter les conditions de mesure en champ lointain comme illustré dans la figure 4.18.



Figure 4.18. Montage de mesure du gain et du diagramme de rayonnement de l'antenne proposée

Pour la mesure du gain, nous avons d'abord relevé la valeur de la puissance initiale sur le puissance-mètre, avant que l'antenne émettrice ne transmette un signal. Ensuite, nous avons activé le générateur pour émettre des signaux dans une plage de fréquences allant de 2 GHz à 12 GHz, avec un pas de 0,5 GHz. Ainsi, nous avons pris 24 points de mesure en enregistrant la puissance reçue à chaque fréquence par l'antenne patch ULB. En appliquant l'équation de Friis, nous avons pu calculer le gain de l'antenne réceptrice :

$$G_r = \frac{P_r}{P_{t G_t}} \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2 \quad (4.3)$$

Avec:

G_r : Le gain de l'antenne réceptrice.

P_r : Le gain de l'antenne émettrice.

P_t : La puissance transmise.

d : L'écart entre les deux antennes (Antenne émettrice et antenne sous test).

λ : La longueur d'onde.

G_t : Le gain de l'antenne émettrice.

Pour le diagramme de rayonnement, l'antenne patch ULB a été placée sur une table tournante. Nous avons fait tourner la table par incréments de 10° pour chaque mesure, enregistrant la puissance reçue à chaque position angulaire. Cela a permis d'obtenir des mesures à 36 points autour de l'antenne, couvrant un angle de 360° pour les fréquences 4,3 GHz, 6,6 GHz et 9 GHz pour le plan azimutal (H) et le plan d'élévation (E) toujours avec la relation de Friis pour calculer la puissance reçue pour chaque point de mesure.

L'ensemble du processus a été réalisé dans une mini chambre anéchoïque toujours en laboratoire (RFA) Radio fréquences et Antennes (Division TELECOM) du Centre de Développement des Technologies Avancées (CDTA), pour garantir des résultats fiables et précis, en éliminant les réflexions parasites et les interférences. Ce cadre de mesure idéal nous a permis d'obtenir des résultats optimaux pour caractériser le comportement et la performance de notre antenne patch ULB en termes de gain et de rayonnement.

4.2.5.4. La distribution du courant

Afin de fournir une illustration plus complète des caractéristiques distinctives associées aux bandes rejetées, la figure 4.19 présente les distributions de courant simulées aux fréquences centrales f_{n1} et f_{n2} .

Les représentations graphiques révèlent une concentration notable de courants autour des cellules à métamatériaux M1 et M2, démontrant ainsi des caractéristiques de rejet efficaces dans la bande de fréquences WLAN. Simultanément, dans la bande descendante du satellite, les courants se concentrent principalement autour des métamatériaux M3 et M4, ce qui confirme que ces 4 cellules à métamatériaux sont responsables du rejet des deux bandes rejetées.

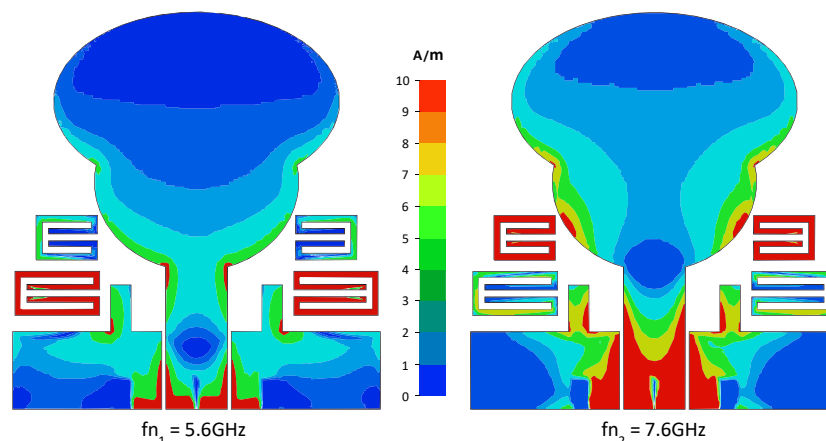


Figure 4.19. Distribution du courant pour l'antenne proposée aux fréquences centrales des bandes rejetées

4.2.6. Résumé de la procédure de la conception du prototype final

La figure 4.20 présente un organigramme illustrant les différentes étapes du processus de conception de cette antenne ULB avec deux bandes rejetées.

Le processus de conception d'une antenne ULB avec deux bandes rejetées commence par la création d'un patch elliptique, qui est ensuite développé en utilisant deux ellipses pour maximiser la largeur de bande et la stabilité en fréquence. Pour introduire la première bande rejetée, deux métamatériaux (M1 et M2) sont insérés, ce qui peut causer une désadaptation d'impédance. Pour corriger cela, deux stubs rectangulaires sont ajoutés, améliorant l'adaptation d'impédance et garantissant de bonnes performances sur le reste du spectre ULB. Enfin, deux autres métamatériaux (M3 et M4) sont intégrés pour rejeter une seconde bande de fréquences, permettant ainsi d'éliminer des interférences indésirables tout en maintenant les caractéristiques ULB de l'antenne.

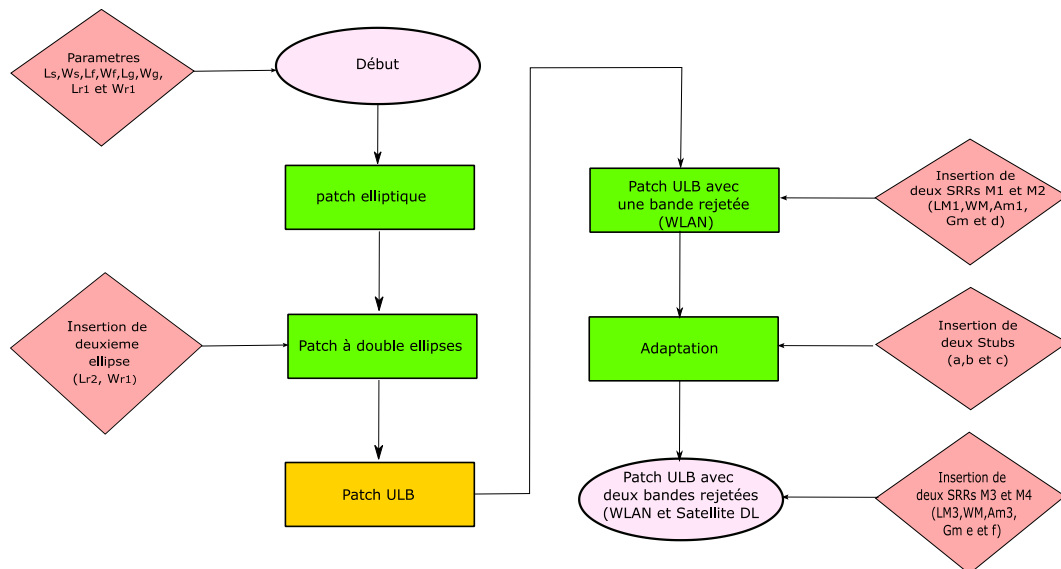


Figure 4.20. Procédure de conception de l'antenne proposée

4.2.7. Comparaison avec d'autres travaux similaires

Le Tableau 4.3 présente une comparaison des travaux connexes avec l'antenne proposée.

Dans le Tableau 4.3, une comparaison complète de notre étude avec d'autres travaux connexes est présentée, mettant en évidence des aspects distinctifs tels que les dimensions, la plage de fréquences, les bandes rejetées, les techniques employées, la complexité et la technologie de conception de chaque conception.

Notre conception démontre une compacité impressionnante. Une autre caractéristique distinctive de la conception proposée est la simplicité de la technique de rejet utilisée, basée sur les métamatériaux. En plus d'autres caractéristiques, la conception adopte une configuration simple face (CPW). Ce choix

non seulement simplifie la construction, mais améliore également la praticité et la facilité d'intégration dans divers systèmes d'antennes.

Référence	Dimensions (mm ³)	Bande de fréquence (GHz)	Bandes rejetées (GHz)	Techniques utilisées	Complexité	Technologie de conception
[83]	28x18x0.8	[3.5 – 12]	[5.1 – 6.0] [7.83– 8.47]	fentes	Faible	Microruban
[84]	24.6 x 38.1 x1.5	[3– 7.5]	[3.3–3.7] [5.15–5.825]	fentes et résonateurs	Elevée	Microruban
[85]	42x50x1.6	[2– 11]	[3.3– 3.8] [5.15– 5.825] [7.1–7.9]	(EBG) bande interdite électromagnétique	Elevée	Microruban
[63]	20x26x1.52	[3.1– 11.8]	[3.4– 3.9] [5.15 – 5.82] [7.25 – 7.75]	EBG et résonateurs	Elevée	CPW
[86]	40 × 30 × 0.81	[2.85– 11.52]	[3.39 – 3.82] [5.13– 5.40] [5.71– 5.91]	Métamateriaux	Faible	Microruban
Ce travail	18x19x1.5	[3– 12]	[5.2– 5.8] [7– 8]	Résonateur à boucle ouverte (Metamateriaux)	Faible	CPW

Tableau 4.3. Comparaison des travaux connexes avec l'antenne proposée

4.3. Antenne ULB-MLPDA avec deux bandes rejetées rectangulaires

Dans la deuxième partie de nos travaux on a réalisé une antenne microruban à réseau de dipôles logarithmiques périodiques ultra large bande (ULB-MLPDA) avec deux bandes rejetées rectangulaires, utilisant des Stubs rectangulaires fins.

La structure MLPDA est choisie en raison de sa BP large intrinsèque et de sa taille compacte, adaptées aux systèmes ULB. L'insertion de deux paires De Stubs rectangulaires, chacune connectée à la ligne d'alimentation, permet de rejeter deux bandes de fréquences spécifiques. La conception proposée conserve une taille compacte tout en assurant un rejet de bande efficace aux fréquences WiMAX et WLAN.

4.3.1. L'antenne ULB-MLPDA

L'antenne à réseau de dipôles logarithmiques périodiques (LPDA) microruban [87], [88] ou imprimée [89], [90] dérive de la LPDA filaire conventionnelle, en intégrant ses principes de conception pour une fabrication sur PCB. La LPDA filaire repose sur un système de dipôles répétés et espacés logarithmiquement pour assurer une large bande passante, tandis que la version imprimée utilise des chemins gravés sur une surface non conductrice. Cette modification permet une conception d'antenne

plus compacte, économique et facile à intégrer, tirant parti de la précision de fabrication des circuits imprimés (PCB). La MLPDA conserve les caractéristiques essentielles de son homologue filaire, offrant une large couverture en fréquence tout en s'intégrant parfaitement aux systèmes électroniques modernes.

La conception a été initiée avec une géométrie trapézoïdale sur un substrat en FR-4. Le substrat FR-4 a été choisi car il est couramment utilisé dans les applications électroniques. La simulation de l'antenne a été réalisée dans CST Studio. L'antenne est composée d'éléments dipolaires placés sur le substrat. L'emplacement de ces dipôles a été guidé par une fonction logarithmique pour calculer la longueur (L) et la largeur (W) de chaque élément, en maintenant les parties supérieure et inférieure de l'antenne.

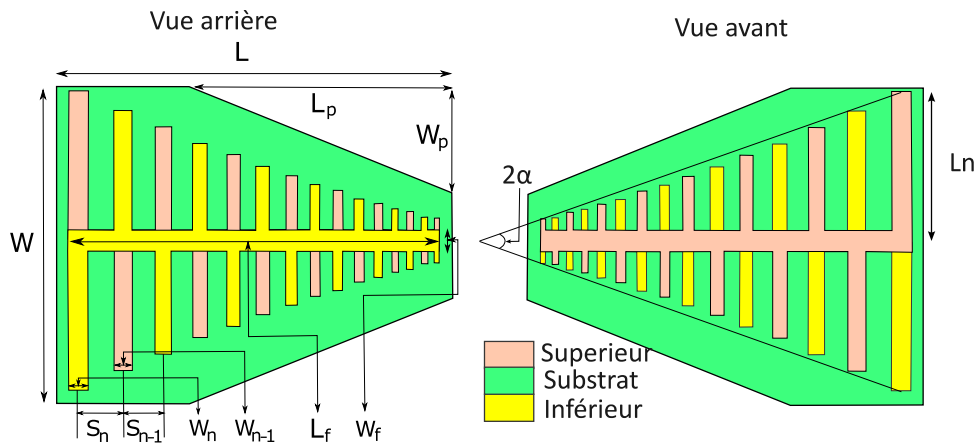


Figure 4.21. Géométrie de l'antenne ULB-MLPDA proposée

Pour obtenir l'adaptation d'impédance requise pour le spectre ULB, une distance prédéterminée S_i a été utilisée pour séparer les éléments dipolaires. En appliquant un facteur d'échelle τ , des ajustements supplémentaires ont été effectués sur les dipôles L_i , W_i et la distance de séparation S_i pour avoir des meilleures performances de l'antenne dans la plage de fréquences souhaitée.

En utilisant les formules citées dans les références [88], [90].

$$\tau = \frac{S_{n-1}}{S_n} = \frac{L_{n-1}}{L_n} = \frac{W_{n-1}}{W_n} \quad (4.4)$$

Cette équation est utilisée pour calculer l'angle d'ouverture α

$$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{1-\tau}{4\sigma}\right) \quad (4.5)$$

La constante d'espacement σ est donnée par

$$\sigma = \frac{S_n}{2L_n} \quad (4.6)$$

De plus, la conception intègre deux lignes d'alimentation microrubans, positionnées en haut et en bas de l'antenne. Ces lignes d'alimentation sont essentielles pour assurer une transmission et une réception efficaces du signal, comme illustré dans la figure 4.21. Les valeurs des paramètres de l'antenne sont résumés dans le tableau 4.4.

La figure 4.22 présente le S_{11} pour la conception proposée de l'antenne ULB-MLPDA, illustrant son adaptation d'impédance sur une plage de fréquences allant de 1 à 11,7 GHz. Dans cette figure, l'antenne démontre une excellente adaptation d'impédance entre environ 2 GHz et 11,48 GHz, où la valeur de S_{11} reste inférieure à -15 dB, indiquant une réflexion minimale et un transfert de puissance efficace. Cette large bande couvre l'ensemble du spectre UWB (3,1 à 10,6 GHz).

Paramètre	Valeur	Paramètre	Valeur	Paramètre	Valeur
L	75 mm	W_f	4 mm	τ	0.86
W	60 mm	L_p	50 mm	L_{15}	26.3 mm
h	1.5 mm	W_p	20 mm	S_0	1 mm
t	0.035 mm	w_1	1 mm	α	10.63
N	15 mm	S_1	0.6 mm	σ	0.18
L_f	70 mm	L_p	50 mm		

Tableau 4.4. Paramètres de la conception finale de l'antenne ULB-MLPDA

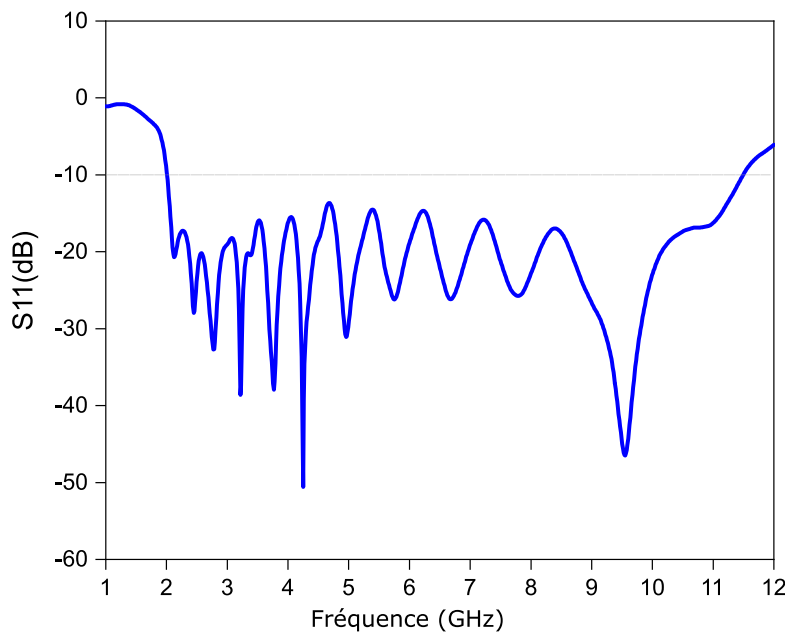


Figure 4.22. S_{11} de l'antenne proposée

4.3.2. Les bandes rejetées

Pour répondre au spectre ULB et atténuer les interférences provenant des applications à bande étroite existantes, une technique simple est proposée : l'ajout d'éléments stub à la région active de l'antenne. Cette méthode illustre la pratique consistant à ajouter une partie d'accordage directement sur

l'antenne, ce qui peut supprimer les bandes de fréquences indésirables tout en préservant l'opérabilité de la bande ULB [91].

Un choix soigneux de la conception de l'élément additionnel permet de supprimer le fonctionnement des dispositifs indésirables émettant à des fréquences proches, sans effet néfaste sur les performances de l'antenne miniaturisée.

4.3.2.1. Analyse du courant de surface

Pour déterminer la région active dans le spectre de réjection de cette antenne à l'aide de l'analyse du courant de surface [92], une évaluation complète des distributions de courant sur les composants de l'antenne aux fréquences centrales F_n de la bande à rejeter est nécessaire.

Dans une antenne MLPDA, le courant de surface varie le long des dipôles en fonction de la fréquence, chaque dipôle résonnant à une longueur d'onde différente. En analysant la topographie de la distribution du courant, les zones de force électrique amplifiée suggèrent l'existence de pôles magnétiques dynamiques. En observant la propagation à travers différents niveaux sonores, il est possible de déterminer précisément quels sons l'antenne spéciale ne capte pas.

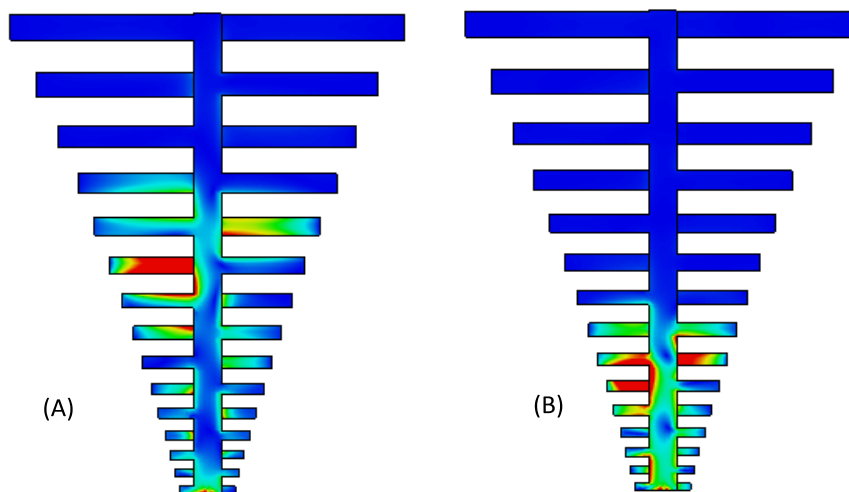


Figure 4.23. Distribution du courant de surface de l'antenne ULB MLPDA proposée à F_{n1} et F_{n2}

La figure 4.23 illustre la distribution du courant de surface aux fréquences centrales F_{n1} et F_{n2} , correspondant respectivement aux bandes WLAN et WiMAX. La visualisation met en évidence des zones distinctes de concentration du courant, révélant une paire d'éléments dipolaires associés à chaque fréquence centrale.

4.3.2.2. La première bande rejetée (WiMAX)

Un Stub rectangulaire S_1 est introduit dans la conception. Ce Stub est ajouté à la ligne d'alimentation microruban supérieure, s'étendant depuis le bord du substrat sur une distance d_{S1} . Il possède une longueur L_{S1} et une largeur W_{S1} . L'idée principale de cette modification est d'exploiter la capacité du

talon rectangulaire à influencer la réponse en fréquence de l'antenne en créant une bande d'arrêt au-dessus de -10 dB, comme illustré dans la figure 4.24.

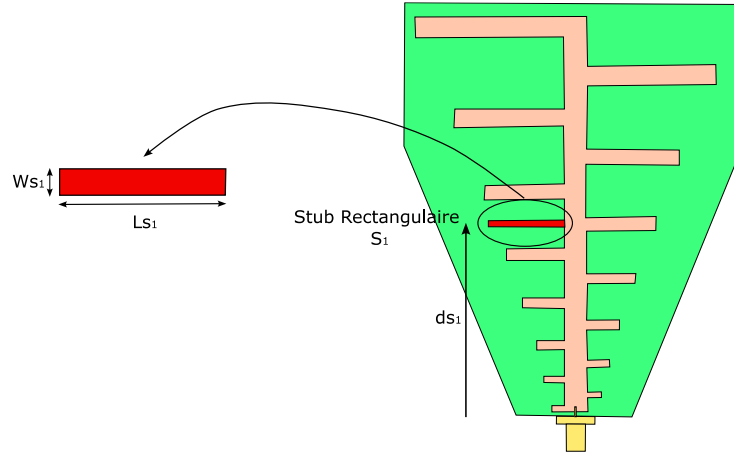


Figure 4.24. Géométrie du design avec l'ajout du premier stub rectangulaire S1

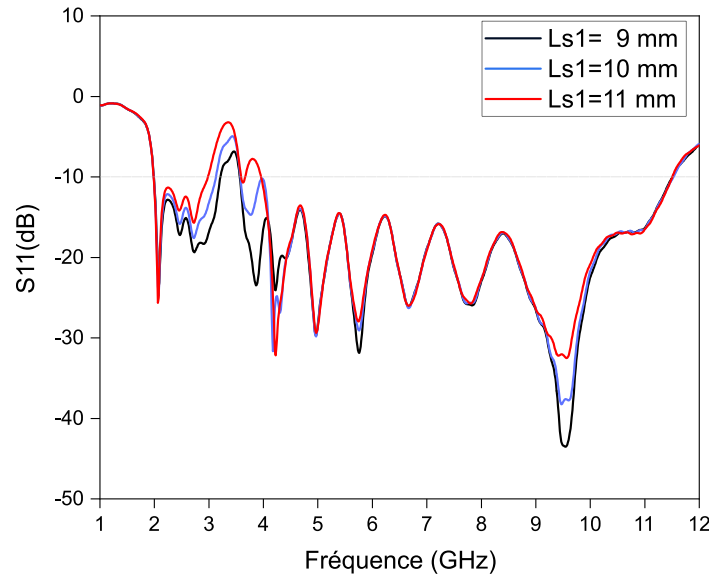


Figure 4.25. S11 de l'antenne ULB MLPDA avec Stub S1 pour différentes valeurs de L_{s1}

La figure 4.25 illustre la réponse en fréquence de l'antenne ULB MLPDA avec différentes valeurs de L_{s1} . À mesure que la valeur de L_{s1} augmente, la fréquence rejetée se déplace vers des valeurs plus basses, indiquant que L_{s1} joue un rôle important dans le contrôle des caractéristiques de résonance et de rejet. Cela suggère que l'ajustement de L_{s1} peut être une méthode efficace pour affiner les performances de rejet de bande du design. Cette relation peut être exprimée mathématiquement comme suit :

$$F_n = \frac{c}{L_{s1}\sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (4.7)$$

4.3.2.3. La bande rejetée rectangulaire

Les méthodes conventionnelles de rejet de bande sont capables de réduire les interférences, mais elles souffrent souvent d'une faible sélectivité, les rendant inefficaces pour rejeter de larges bandes d'interférences. Cette limitation a suscité un intérêt pour le développement d'antennes ULB présentant des propriétés de rejet de bande, essentielles pour gérer les interférences provenant de bandes indésirables [63].

Afin d'obtenir les meilleures performances, une bande avec un haut degré de sélectivité est nécessaire pour assurer une bonne réjection des interférences. Cela peut être réalisé en insérant un stub supplémentaire, configuré pour couvrir la même bande, ce qui améliore le degré d'atténuation et renforce la réjection des interférences dans la fréquence contrôlée.

Dans la conception, un autre stub rectangulaire S_2 est ajouté. Ce stub est connecté à la ligne d'alimentation microruban supérieure, qui s'étend de ds_2 depuis le bord du substrat, comme illustré dans la figure 4.26.

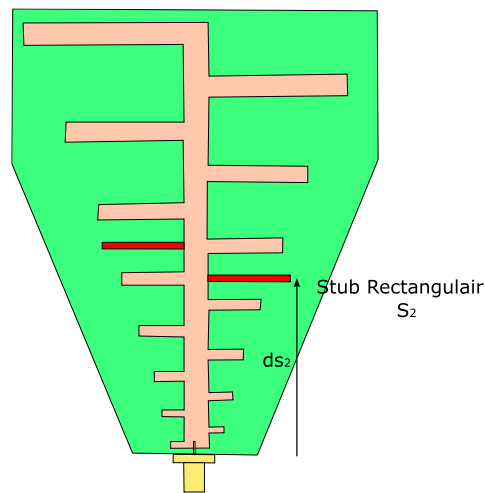


Figure 4.26. Géométrie du design avec l'ajout du deuxième tenon rectangulaire S_2

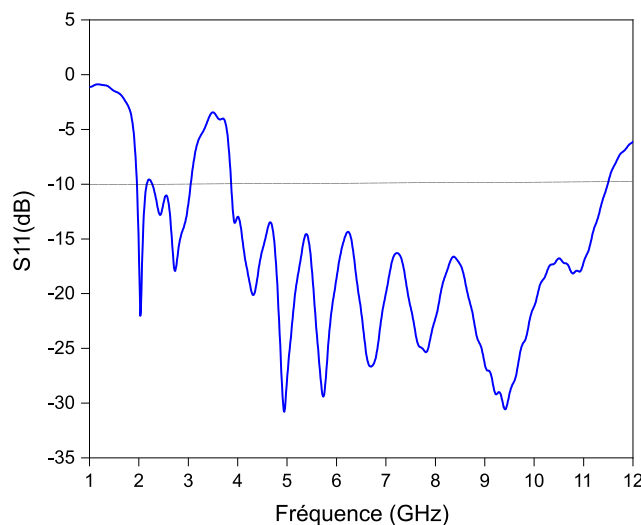


Figure 4.27. Coefficient de réflexion de l'ULB-MLPDA proposé avec deux excroissances S_1 et S_2 .

La figure 4.27 montre comment le stub, de longueur L_{s2} et de largeur W_{s2} , forme une bande rectangulaire rejetée.

4.3.2.4. La deuxième bande rejetée (WLAN)

Pour améliorer les performances de réjection de bande, deux éléments supplémentaires, S_3 et S_4 , sont intégrés à la ligne d'alimentation microruban supérieure, comme illustré dans la figure 4.28. L'élément S_3 est conçu pour générer une réjection de bande conventionnelle, tandis que l'élément S_4 introduit une réjection de bande rectangulaire, comme démontré dans la figure 4.29. Cette configuration permet un contrôle précis des bandes rejetées, supprimant efficacement les interférences dans la bande WiMAX.

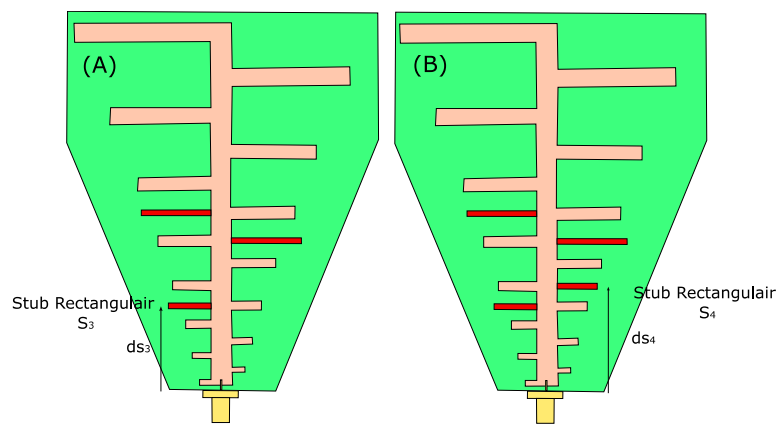


Figure 4.28. Géométrie de la conception ajoutant, a) le troisième stub rectangulaire S_3 , b) le quatrième stub rectangulaire S_4

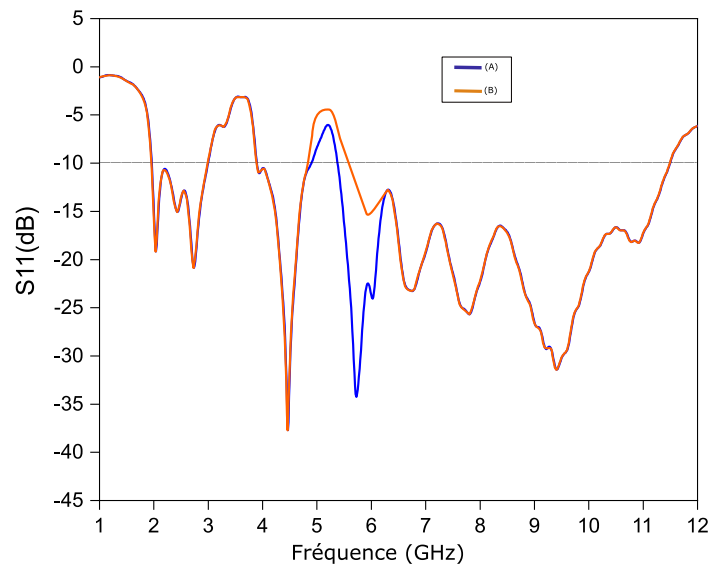


Figure 4.29. S_{11} de l'ULB-MLPDA proposé avec les Stubs S_3 et S_4

Le tableau 4.5 présente les paramètres finaux optimisés des quatre stubs. Ces paramètres sont ajustés pour affiner la réponse de l'antenne, garantissant une suppression précise des interférences dans les

bandes de fréquences ciblées. Chaque stub est optimisé pour apporter une contribution unique à la conception globale, en équilibrant compacité et haute performance.

Parametre	Valeur (mm)	Parametre	Valeur (mm)
W_{s1}, W_{s2}, W_{s3} and W_{s4}	0.8	L_{s3}	6.5
L_{s1}	11	D_{s3}	16.5
D_{s1}	33.5	L_{s4}	5.5
L_{s2}	11.7	D_{s4}	20
D_{s2}	29		

Tableau 4.5. Paramètres optimisés finaux des Stubs

4.3.3. Fabrication du prototype et mesure

L'antenne ULB-MLPDA proposée avec les bandes WLAN et WiMAX rejetées, a été fabriquée avec succès en utilisant la technique de photolithographie. Les vues de dessus et de dessous de l'antenne fabriquée sont présentées dans la figure 4.30.

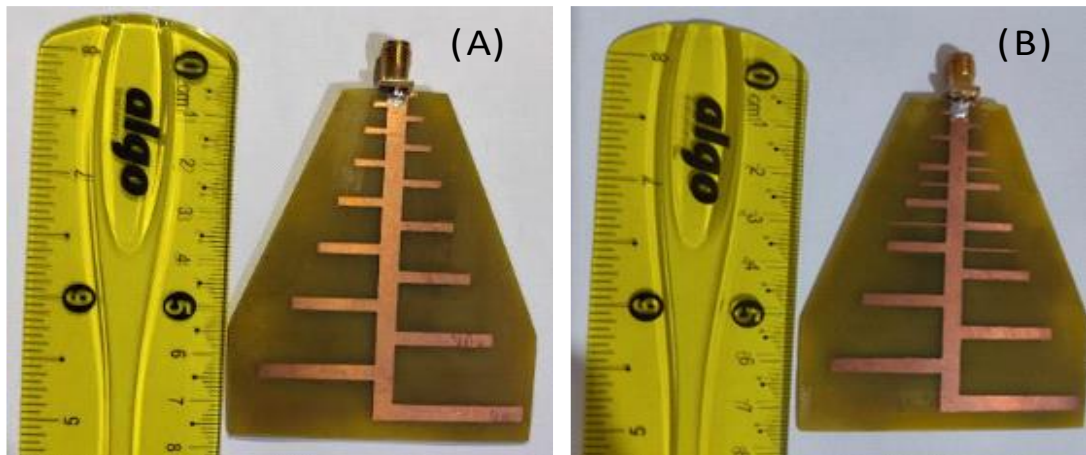


Figure 4.30. Prototype de l'antenne ULB-MLPDA réalisée avec deux bandes rejetées rectangulaires :A) Vue de dessus, B) Vue de dessous

4.3.3.1. La Coefficient de réflexion (S11)

Après avoir soudé le connecteur SMA, le paramètre S11 de l'antenne proposée a été mesuré à l'aide d'un VNA. La figure 4.31 illustre le banc de mesure utilisé pour l'évaluation du S11 avec le VNA.



Figure 4.31. Mesure du S11 de l'antenne proposée

Dans la figure 4.32, les courbes S11 mesurées et simulées de l'antenne ULB-MLPDA proposée sont présentées, montrant un très bon accord. Les résultats confirment que, hormis les bandes rejetées, la conception de l'antenne permet efficacement le passage uniquement des bandes autorisées dans la région rectangulaire, avec une adaptation d'impédance adéquate allant de 2 GHz à 11,7 GHz. Cela indique que les éléments rectangulaires sont capables de supprimer les bandes indésirables. Les légères variations entre les résultats mesurés et simulés peuvent être dues au processus de soudure du connecteur SMA ainsi qu'aux tolérances de fabrication.

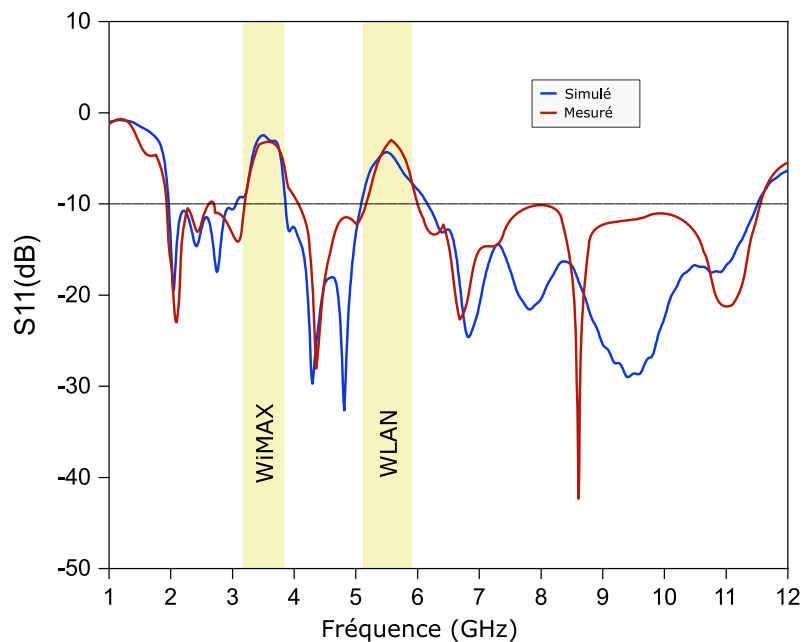


Figure 4.32. Coefficient de réflexion simulé et mesuré de l'antenne ULB-MLPDA avec deux bandes rejetées rectangulaires proposée

4.3.3.2. Le gain

La figure 4.33 illustre l'antenne proposée, qui a réussi à obtenir une performance de gain stable d'environ 6 dBi en moyenne sur la bande de fréquences de fonctionnement. Cependant, aux bandes rejetées, le gain diminue considérablement, atteignant -4 dBi à F_{n1} et -5 dBi à F_{n2} , indiquant ainsi que le rejet de bande est bien réalisé. De plus, il existe une bonne correspondance entre les valeurs de gain mesurées et celles simulées.

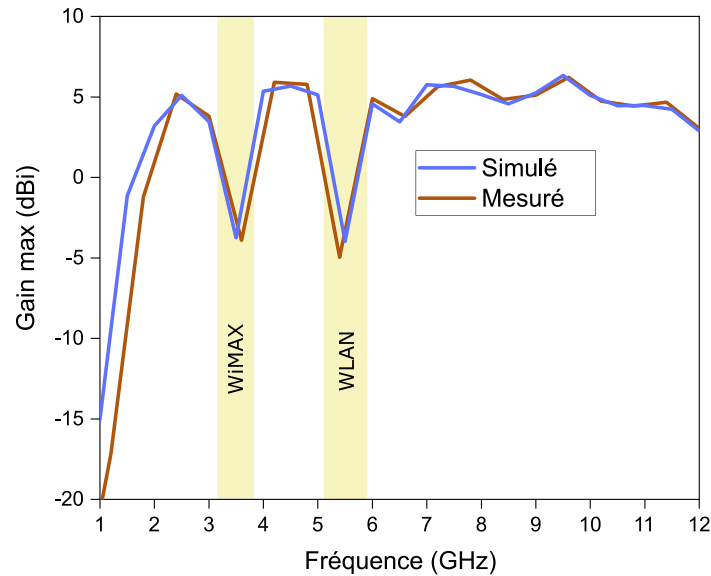


Figure 4.33. Gain obtenu par simulation et par mesure pour l'antenne proposée

4.3.3.3. Le diagramme de rayonnement

Les diagrammes de rayonnement du prototype d'antenne ULB-MLPDA, obtenus à la fois par mesures et par simulations, ont été normalisés et sont représentés dans la figure 4.34. Les résultats présentent des caractéristiques reconnaissables d'un rayonnement end-fire (Longitudinal) à 2,4 GHz, 4 GHz et même à 10 GHz. Ces diagrammes apparaissent dans le plan transverse xz (plan E) et le plan longitudinal yz (plan H), ce qui indique de bonnes performances aux basses, moyennes et hautes fréquences sur l'ensemble de la bande de fréquences.

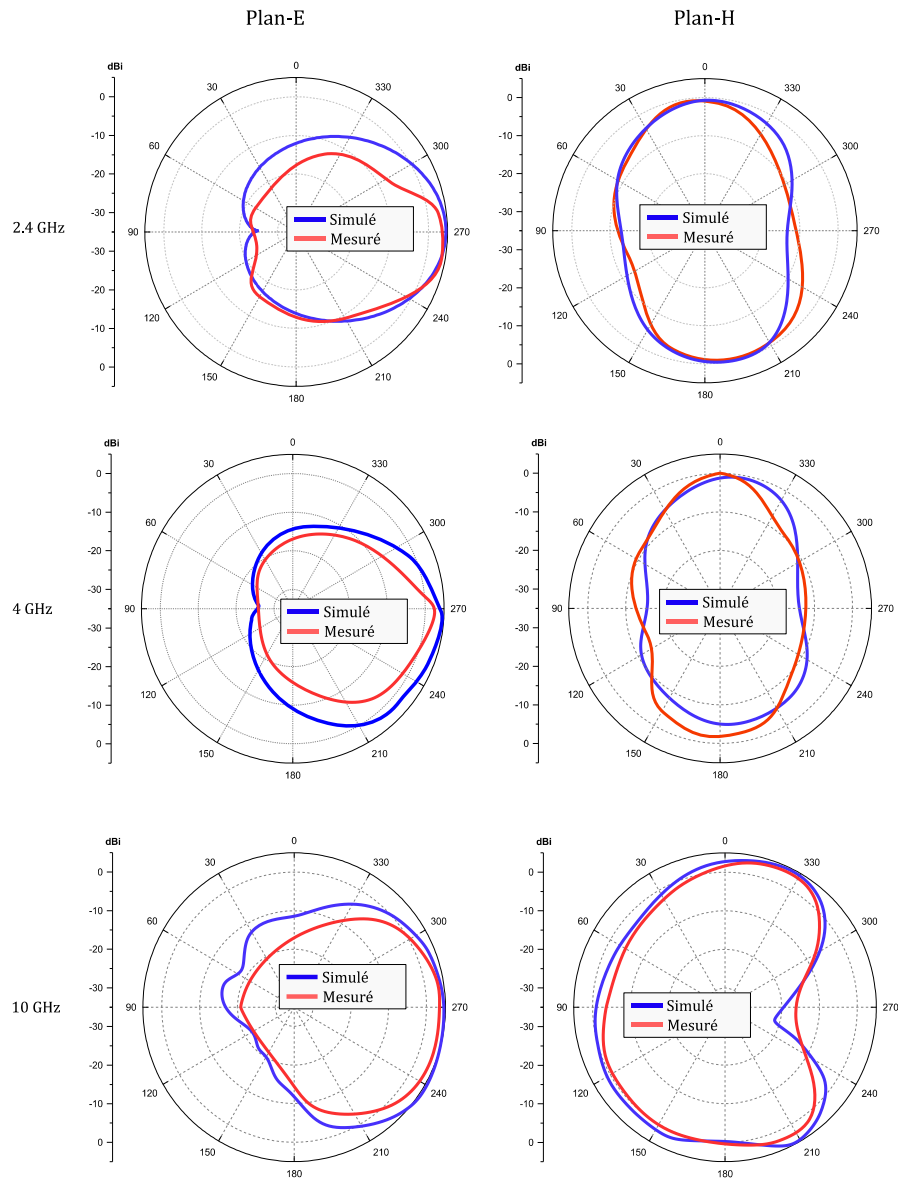


Figure 4.34. Diagramme de rayonnement simulé et mesuré de l'antenne proposée dans le plan E et le plan H à 2.4, 4 et 10 GHz.

4.3.3.4. La distribution du courant

Les distributions du courant dans l'antenne MLPDA proposée aux deux fréquences centrales F_{n1} et F_{n2} sont illustrées à la figure 4.35. Le courant est principalement confiné aux éléments Stub 1 et Stub 2, qui jouent un rôle majeur dans le rejet de la première bande. De la même manière, les éléments Stub 3 et Stub 4 présentent une densité de courant plus élevée, indiquant qu'ils participent également à l'acceptation ou au rejet de la seconde bande. Il ressort donc clairement de ces résultats que les stubs remplissent efficacement leur fonction en matière de rejet de bande.

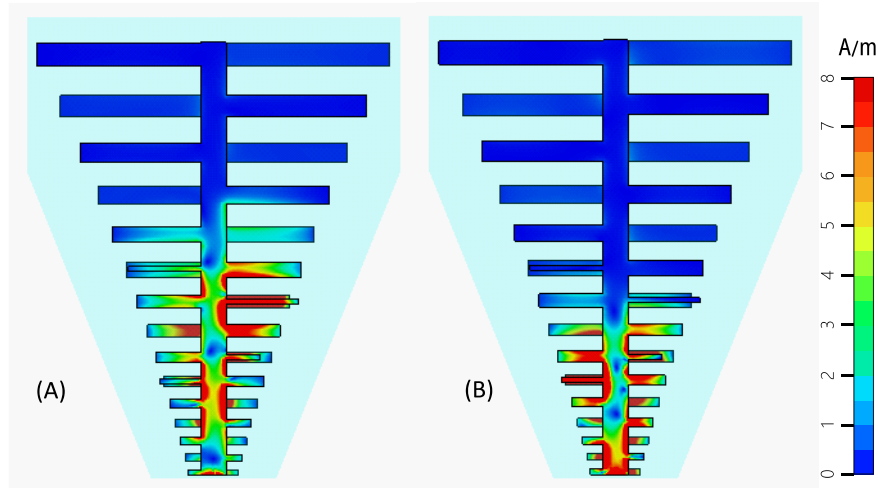


Figure 4.35. Distribution du courant de l'antenne proposée: A) à F_{n1} , B) à F_{n2}

4.3.4. Comparaison avec des travaux similaires

Le tableau 4.6 présente une comparaison entre notre design et d'autres conceptions similaires. L'antenne proposée couvre une large gamme de fréquences de fonctionnement [2 - 11,7] GHz, ce qui en fait l'une des conceptions offrant la plus grande bande passante pour des dimensions comparables. Bien que son gain moyen soit légèrement inférieur, atteignant 6 dBi, elle assure une excellente réjection des interférences avec des réductions de gain de -4 dBi et -5 dBi pour les bandes rejetées WiMAX et WLAN, respectivement. Contrairement à d'autres approches utilisant des géométries fractales effilées ou en méandre, ou encore des conceptions basées sur des lignes parallèles, l'intégration d'extensions rectangulaires garantit une fabrication simple et fiable. Cet équilibre entre compacité, large bande passante et réjection efficace des bandes indésirables confirme la pertinence de cette antenne pour les applications ULB modernes nécessitant une suppression précise des interférences.

Ref	Dimensions (mm ³)	Spectre de fréquence (GHz)	Gain moyen (dBi)	Technique De rejection	Bandes rejectées	Gain à F_n (dBi)	Alure de bande rejetée
[92]	100x 44.1x0.75	3.08-10.86	8	Évasement sous-sectionnel	WiMAX WLAN	3 7.5	conventionnelle
[93]	100x 44.1x0.75	2.81-10.59	7.4	Évasement sous-sectionnel avec une géométrie fractale	WiMAX WLAN	7 6.5	conventionnelle
[94]	Substrat multi couches	2.5 - 6.2	7	Lignes parallèles à bandes (RPS)	WLAN	-4	conventionnelle
Ce travail	75x60x1.5	2 – 11.7	6	Stubs Rectangulaires	WiMAX WLAN	-4 dBi -5 dBi	rectangulaire

Tableau 4.6. Comparaison des performances de l'antenne proposée avec des travaux similaires existants

4.4. Conclusion

Dans ce dernier chapitre, nous avons présenté les principales contributions et travaux réalisés au cours de cette recherche. Deux antennes imprimées ont été conçues, fabriquées et mesurées : la première est une antenne élément sous forme de patch compacte ULB intégrant deux bandes rejetées conventionnelles à l'aide de cellules à métamatériaux, tandis que la deuxième sous forme de réseau de dipôles ULB-MLPDA avec deux bandes rejetées rectangulaires obtenues par l'ajout de Stubs rectangulaires. Les résultats obtenus ont mis en évidence un bon appariement d'impédance et des performances de rayonnement constantes, démontrant ainsi l'efficacité des techniques employées pour le rejet des interférences.

Par ailleurs, La diminution significative du gain dans les bandes rejetées confirme la performance du mécanisme d'atténuation des interférences, tandis que La cohérence observée entre les résultats de la simulation et les mesures expérimentales valide la conception, malgré de légères différences attribuées aux tolérances de fabrication et aux imperfections des connecteurs. Grâce à leur structure simple, leur taille compacte et leurs performances élevées, les antennes proposées constituent des candidates prometteuses pour les systèmes de communication modernes nécessitant un fonctionnement en large bande avec une atténuation efficace des interférences.

Conclusion Générale et Perspectives

Conclusion Générale

Cette thèse présente une étude approfondie de la conception et de la réalisation de deux antennes imprimées pour des applications ultra-large bande (ULB), en mettant particulièrement l'accent sur la gestion des interférences grâce à l'intégration de métamatériaux et de Stubs pour le rejet des bandes indésirables, telles que celles utilisées par les technologies WiMAX et WLAN et autres applications à bandes étroites qui existent dans le spectre ULB.

À travers l'analyse des principes fondamentaux des antennes et l'examen des différentes technologies de conception, nous avons montré que les antennes patch, bien que populaires en raison de leurs caractéristiques telles que la compacité et la facilité de fabrication, nécessitent des solutions innovantes pour répondre aux défis des systèmes de communication modernes. L'intégration de métamatériaux et de Stubs dans les conceptions d'antennes ULB s'avère être une approche prometteuse pour améliorer leurs performances en termes de rejet de bande et de BP.

En outre, cette thèse a permis de démontrer l'importance de la simulation électromagnétique dans le processus de conception, de la validation expérimentale à la fabrication, soulignant ainsi la nécessité d'un rapprochement entre la théorie et les applications réelles. En étudiant les différents modèles de résonateurs et en abordant les diverses méthodes pour étendre la bande passante des antennes, nous avons identifié des solutions adaptées pour les besoins croissants des technologies de communication moderne.

Enfin, cette recherche ouvre la voie à de futures investigations visant à affiner la conception des antennes ULB, en introduisant notamment des structures résonantes et des métamatériaux de plus en plus sophistiqués. Ces approches pourront jouer un rôle clé dans la miniaturisation et l'optimisation des antennes pour les générations futures de systèmes de communication. Les avancées obtenues dans cette thèse contribuent ainsi à une meilleure compréhension des défis actuels et des solutions possibles dans le domaine des antennes pour des applications ULB.

Perspectives

Une des principales perspectives de ce travail est la conception d'une antenne patch avec des bandes rejetées rectangulaires, visant à améliorer les performances tout en optimisant le temps de simulation.

Les outils de simulation actuels demandent un temps de calcul important à chaque itération, en particulier pour les structures miniatures. Cette contrainte ralentit considérablement le processus d'optimisation, rendant l'exploration de nouvelles configurations plus laborieuse. L'augmentation de la complexité des modèles et la nécessité d'une haute précision accentuent encore cette problématique, soulignant le besoin de méthodes plus rapides et efficaces pour l'optimisation des

conceptions. Cette contrainte devient particulièrement critique lorsqu'il s'agit d'explorer un large espace de paramètres pour affiner la réponse en fréquence de l'antenne. La réduction du temps de simulation pourrait ainsi être abordée par l'adoption de méthodes plus efficaces, comme l'utilisation de modèles d'approximation ou de techniques d'accélération numérique.

Parmi les approches envisageables, l'intelligence artificielle, notamment à travers les réseaux neuronaux artificiels et les algorithmes d'apprentissage automatique, pourrait jouer un rôle clé. En développant un modèle prédictif entraîné sur un ensemble de simulations préalables, il serait possible d'estimer rapidement les performances de l'antenne sans nécessiter un recalcul complet à chaque modification des paramètres. Cette approche permettrait non seulement un gain de temps considérable, mais aussi une optimisation plus fine des caractéristiques de l'antenne.

Enfin, la combinaison des techniques avancées telles que les métamatériaux et les stubs avec les méthodes d'intelligence artificielle, notamment les réseaux neuronaux et les algorithmes d'apprentissage automatique, pourrait considérablement accélérer le processus de conception en réduisant le temps de simulation nécessaire à chaque itération. Cette approche permettrait non seulement d'améliorer les performances de l'antenne, mais aussi de rendre sa conception plus adaptable aux exigences des communications modernes, où la maîtrise du spectre et la réjection des interférences jouent un rôle clé.

- [1] Balanis, C. A. (2016). Antenna theory : analysis and design. John wiley & sons.
- [2] Garg, R. (2001). Microstrip antenna design handbook. Artech house.
- [3] Kumar, G., & Ray, K. P. (2003). Broadband microstrip antennas. Artech house.
- [4] Thiruvankadam, S., Parthasarathy, E., Palaniswamy, S. K., Kumar, S., & Wang, L. (2021). Design and performance analysis of a compact planar MIMO antenna for IoT applications. *Sensors*, 21(23), 7909.
- [5] Souai, S. (2021). Réseaux d'antennes miniatures super-directifs reconfigurables basses fréquences pour l'IoT (Doctoral dissertation, Université Côte d'Azur).
- [6] Brizard, B. (2022). Conception d'un sous-réseau d'antennes à résonateur diélectrique pour radar à synthèse d'ouverture destiné à la mesure de masse de neige. Ecole Polytechnique, Montreal (Canada).
- [7] Pozar, D. M. (2021). Microwave engineering: theory and techniques. John wiley & sons.
- [8] James, J. R., & Hall, P. S. (Eds.). (1989). Handbook of microstrip antennas (Vol. 28, No. 1). IET.
- [9] Modak, S., Daasari, S., Shome, P. P., & Khan, T. (2023). Switchable/tunable band-notched characteristics in UWB and UWB-MIMO antennas: A comprehensive review. *Wireless Personal Communications*, 128(3), 2131-2154.
- [10] Patil, A. M., & Sharma, S. (2025). A Review on Tunable UWB Antenna with Triple-Band Notch Using EBG Structure. *Artificial Intelligence and Information Technologies*, 530-534.
- [11] Majed, M. (2022). Contribution à l'étude de nouveaux concepts d'antennes planaires agiles, grand gain et très large bande : Intégration dans des systèmes rayonnants industriels de forte puissance (Doctoral dissertation, Université de Limoges).
- [12] Gamouh, S., & Chaabi, A. (2017). Etude des metamateriaux et leurs applications dans les systèmes micro-ondes (Doctoral dissertation, Université Frères Mentouri-Constantine 1).
- [13] Kraus, J. D., & Marhefka, R. J. (2002). Antennas for all applications. Antennas for all applications.
- [14] Kamil, A. (2011). Conception d'une antenne patch ultra-large bande (3.1 GHz-10.6 GHz) (Doctoral dissertation, Institut National de la Recherche Scientifique (Canada)).
- [15] Garg, R. (2001). Microstrip antenna design handbook. Artech house.
- [16] Montone, M. (2023). Full-wave discontinuous Galerkin time-domain methods for semiconductor device simulation (Doctoral dissertation, Université Côte d'Azur).
- [17] Chen, Z. N., & Volakis, J. L. (2007). Broadband planar antennas for high-speed wireless communications. *Antenna engineering handbook*.
- [18] Stutzman, W. L., & Thiele, G. A. (2012). Antenna theory and design. John Wiley & Sons.
- [19] Khadka, S. (2017). Evaluation of Radio Anechoic Chamber

- [20] Garnier, B. (2021). Développement de structures textiles communiquant en champs proches (NFC) pour le transfert d'énergie et de données autour du corps humain (Doctoral dissertation, Université de Lille).
- [21] GUERROUI, M. (2022). Conception d'une nouvelle antenne pour une application GPR (Doctoral dissertation).
- [22] Waterhouse, R. (Ed.). (2008). Printed antennas for wireless communications. John Wiley & Sons.
- [23] Hire, M. R., & Ahire, C. S. (2022, February). A Review on Microstrip Patch Antenna Design and its Applications. In Proceedings of the 3rd International Conference on Contents, Computing & Communication (ICCCC-2022).
- [24] Khan, M. U., Sharawi, M. S., & Mittra, R. (2015). Microstrip patch antenna miniaturisation techniques : a review. IET Microwaves, Antennas & Propagation, 9(9), 913-922.
- [25] S. Soltane, Etude et Caractérisation d'antennes imprimées pour système ultra-large bande, in, Université de Biskra, 17/11/2015.
- [26] Kumar, A., Gupta, N., & Gautam, P. C. (2016). Gain and bandwidth enhancement techniques in microstrip patch antennas-a review. International Journal of Computer Applications, 148(7).
- [27] A.K. Bhattacharyya, Long rectangular patch antenna with a single feed, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 38 (1990) 987-993.
- [28] Milligan, T. A. (2005). Modern antenna design. John Wiley & Sons.
- [29] Saunders, S. R., & Aragón-Zavala, A. A. (2007). Antennas and propagation for wireless communication systems. John Wiley & Sons.
- [30] O. KAID, Conception et modélisation d'une antenne pour les communications ULB, in, USTO Oran, Avril 2013.
- [31] Bouttout, S. (2020). Modélisation des résonateurs microrubans à configurations simples et empilées par une analyse tridimensionnelle en utilisant une méthode intégrale (Doctoral dissertation, Université de Batna 2).
- [32] Chami, A. (2011). Miniaturisation et intégration d'antennes imprimées pour systèmes communicants ULB pulsés (Doctoral dissertation, Université Nice Sophia Antipolis).
- [33] Leonard, R. F. (1990). NASA developments in solid state power amplifiers. Solid State Technology Branch of NASA Lewis Research Center Second Annual Digest, June 1989-June 1990.
- [34] Koc Polat, H., Geyikoglu, M. D., & Cavusoglu, B. (2020). Modeling and validation of a new reconfigurable patch antenna through equivalent lumped circuit-based design for minimum tuning effort. Microwave and Optical Technology Letters, 62(6), 2335-2345.
- [35] James, J. R., & Hall, P. S. (Eds.). (1989). Handbook of microstrip antennas (Vol. 1). IET.

- [36] Akinola, S., Hashimu, I., & Singh, G. (2019, December). Gain and bandwidth enhancement techniques of microstrip antenna: a technical review. In 2019 International Conference on Computational Intelligence and Knowledge Economy (ICCIKE) (pp. 175-180). IEEE.
- [37] Soliman, M. M., Faisal, M. M. A., Uddin, E. M. J., Hakim, M. L., Rahman, M., Billah, M. M., & Saddam, M. N. C. (2019, March). Analytical Review of Bandwidth Enhancement Techniques of Microstrip Patch Antenna. In 2019 IEEE 5th International Conference for Convergence in Technology (I2CT) (pp. 1-5). IEEE.
- [38] Mishra, B., Verma, R. K., Yashwanth, N., & Singh, R. K. (2022). A review on microstrip patch antenna parameters of different geometry and bandwidth enhancement techniques. *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, 14(5), 652-673.
- [39] Ahmed, M. F., Kabir, M. H., & Islam, A. Z. M. T. (2024). Impact of Feed Point Position on Patch Antenna's Return Loss and Bandwidth for UWB Applications. *Journal of Multidisciplinary Applied Natural Science*, 4(1), 30-38.
- [40] Gautam, A. K., Yadav, S., & Kanaujia, B. K. (2013). A CPW-fed compact UWB microstrip antenna. *IEEE Antennas and Wireless propagation letters*, 12, 151-154.
- [41] Da Xu, K., Xu, H., Liu, Y., Li, J., & Liu, Q. H. (2018). Microstrip patch antennas with multiple parasitic patches and shorting vias for bandwidth enhancement. *IEEE Access*, 6, 11624-11633.
- [42] Mishra, S. N., Konhar, D., Mishra, D., & Mishra, R. K. (2019). On the possibility of linear polarization in elliptical microstrip patch antenna. *Microwave and Optical Technology Letters*, 61(4), 1048-1051.
- [43] Sun, C. (2019). A design of compact ultrawideband circularly polarized microstrip patch antenna. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 67(9), 6170-6175.
- [44] Ramli, N., Noor, S. K., Khalifa, T., & Abd Rahman, N. H. (2020). Design and performance analysis of different dielectric substrate based microstrip patch antenna for 5G applications. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 11(8).
- [45] Zhu, F., Gao, S., Ho, A. T., Abd-Alhameed, R. A., See, C. H., Brown, T. W., ... & Xu, J. (2013). Multiple band-notched UWB antenna with band-rejected elements integrated in the feed line. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 61(8), 3952-3960.
- [46] Hasan, I. H., Hamidon, M. N., Ismail, A., Ismail, I., Mekki, A. S., Kusaimi, M. A. M., ... & Osman, R. (2018). YIG thick film as substrate overlay for bandwidth enhancement of microstrip patch antenna. *IEEE Access*, 6, 32601-32611.
- [47] Purnamasari, P. D., & Zulkifli, F. Y. (2021, December). Optimization of defected ground structure (DGS) using genetic algorithm for gain enhancement of microstrip antenna. In 2021 IEEE Asia-Pacific Conference on Applied Electromagnetics (APACE) (pp. 1-4). IEEE.

- [48] Awan, W. A., Zaidi, A., & Baghdad, A. (2019, April). Patch antenna with improved performance using DGS for 28GHz applications. In 2019 international conference on wireless technologies, embedded and intelligent systems (WITS) (pp. 1-4). IEEE.
- [49] Khanna, A., Srivastava, D. K., & Saini, J. P. (2015). Bandwidth enhancement of modified square fractal microstrip patch antenna using gap-coupling. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 18(2), 286-293.
- [50] Tang, S. C., Wang, X. Y., Zheng, S. Y., Pan, Y. M., & Chen, J. X. (2021). Frequency-reconfigurable dielectric patch antenna with bandwidth enhancement. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 70(4), 2510-2519.
- [51] Evans, J. (2017). *Optimization algorithms for networks and graphs*. CRC Press.
- [52] Gosavi, A. (2015). *Simulation-based optimization* (Vol. 62). Berlin: Springer.
- [53] Sarkar, D., Khan, T., Talukdar, F. A., & Antar, Y. M. (2023). Computational intelligence paradigms for UWB antennas: a comprehensive review of analysis, synthesis and optimization. *Artificial Intelligence Review*, 56(1), 655-684.
- [54] Jain, S. K. (2016). Bandwidth enhancement of patch antennas using neural network dependent modified optimizer. *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, 8(7), 1111-1119.
- [55] Mishra, S., Chattopadhyay, S., & Gangopadhyaya, M. (2015, October). A comparative study of DE, PSO and BFO for optimisation of Rectangular Microstrip Patch Antenna with inset feed parameter. In 2015 International Conference and Workshop on Computing and Communication (IEMCON) (pp. 1-7). IEEE.
- [56] Sarker, N., Podder, P., Mondal, M. R. H., Shafin, S. S., & Kamruzzaman, J. (2023). Applications of Machine Learning and Deep Learning in Antenna Design, Optimization and Selection: A Review. *IEEE Access*.
- [57] Nadir, H. (2018). *Contribution à la conception d'antennes ultra large bande impulsionnelles d'encombrement réduit* (Doctoral dissertation, Université de Limoges).
- [58] Duroc, Y. (2007). *Contribution au développement de modèles orientés système pour les antennes des communications ultra large bande* (Doctoral dissertation, Institut National Polytechnique de Grenoble-INPG).
- [59] Nawaz, M. I., Huiling, Z., Nawaz, M. S. S., Zakim, K., Zamin, S., & Khan, A. (2013, August). A review on wideband microstrip patch antenna design techniques. In 2013 International Conference on Aerospace Science & Engineering (ICASE) (pp. 1-8). IEEE.
- [60] Galvan-Tejada, G., Peyrot-Solis, M., & Aguilar, H. (2015). *Ultra Wideband Antennas*. CRC Press.

- [61] Kumar, G., & Kumar, R. (2019). A survey on planar ultra-wideband antennas with band notch characteristics: Principle, design, and applications. *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, 109, 76-98.
- [62] Wang, L. T., Xiong, Y., He, M., & Kheir, M. (2019). Review on UWB bandpass filters. In *UWB Technology-Circuits and Systems* (pp. 1-24). London, United Kingdom: IntechOpen.
- [63] Abbas, A., Hussain, N., Lee, J., Park, S. G., & Kim, N. (2020). Triple rectangular notch UWB antenna using EBG and SRR. *IEEE Access*, 9, 2508-2515.
- [64] Sharma, P. K., Singh, P., & Sharma, M. (2017). A review of micro-strip patch antenna for UWB frequency range. *International Journal of Engineering Trends and Technology*, 50(2), 96-102.
- [65] Jahanbakht, M., & Neyestanak, A. A. L. (2012). A survey on recent approaches in the design of band notching UWB antennas.
- [66] Shome, P. P., Khan, T., & Laskar, R. H. (2019). A state-of-art review on band-notch characteristics in UWB antennas. *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, 29(2), e21518.
- [67] Syed, A., & Aldhaheeri, R. W. (2016). A very compact and low profile UWB planar antenna with WLAN band rejection. *The Scientific World Journal*, 2016(1), 3560938.
- [68] Alhegazi, A., Zakaria, Z., Shairi, N. A., Salleh, A., & Ahmed, S. (2018). Compact UWB filtering-antenna with controllable WLAN band rejection using defected microstrip structure. *Radioengineering*, 27(1), 110-117.
- [69] Mahfuz, M. H., Islam, M. R., Habaebi, M. H., Sakib, N., & Hossain, A. Z. (2022). A notched UWB microstrip patch antenna for 5G lower and FSS bands. *Microwave and Optical Technology Letters*, 64(4), 796-802.
- [70] Awad, N. M., & Abdelazeez, M. K. (2018). Multislot microstrip antenna for ultra-wide band applications. *Journal of King Saud University-Engineering Sciences*, 30(1), 38-45.
- [71] Elhabchi, M., Srifi, M. N., & Touahni, R. (2017). A tri-band-notched UWB planar monopole antenna using DGS and semi arc-shaped slot for WIMAX/WLAN/X-band rejection. *Progress In Electromagnetics Research Letters*, 70, 7-14.
- [72] Ellis, M. S., Arthur, P., Ahmed, A. R., Kponyo, J. J., Andoh-Mensah, B., & John, B. (2021). Design and circuit analysis of a single and dual band-notched UWB antenna using vertical stubs embedded in feedline. *Heliyon*, 7(12).
- [73] Naser-Moghadasi, M., Sadeghzadeh, R. A., Sedghi, T., Aribi, T., & Virdee, B. S. (2013). UWB CPW-fed fractal patch antenna with band-notched function employing folded T-shaped element. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 12, 504-507.
- [74] Devana, V. K. R., & Rao, A. M. (2023). Design and analysis of dual band-notched UWB antenna using a slot in feed and asymmetrical parasitic stub. *IETE Journal of Research*, 69(1), 284-294.

- [75] Mahfuz, M. H., Islam, M. S., Rafiqul, I. M., Habaebi, M. H., & Sakib, N. (2021). Design of UWB microstrip patch antenna with variable band notched characteristics. *TELKOMNIKA (Telecommunication Computing Electronics and Control)*, 19(2), 357-363.
- [76] Hassain, Z. A. A., Ali, M. M., & Azeez, A. R. (2019). Single and Dual Band-Notch UWB Antenna Using SRR/CSRR Resonators. *J. Commun.*, 14(6), 504-510.
- [77] Rahman, M., & Park, J. D. (2018). The smallest form factor UWB antenna with quintuple rejection bands for IoT applications utilizing RSRR and RCSRR. *Sensors*, 18(3), 911.
- [78] Sarkar, D., Khan, T., & Laskar, R. H. (2020). Multi-parametric ANN modelling for interference rejection in UWB antennas. *International Journal of Electronics*, 107(12), 2068-2083.
- [79] Aguni, L., Chabaa, S., Ibnyaich, S., & Zeroual, A. (2021). Predicting the notch band frequency of an ultra-wideband antenna using artificial neural networks. *TELKOMNIKA (Telecommunication Computing Electronics and Control)*, 19(1), 1-8.
- [80] Sumithra, P., & Thiripurasundari, D. (2017). Review on computational electromagnetics. *Advanced Electromagnetics*, 6(1), 42-55.
- [81] Chen, X., Grzegorzcyk, T. M., Wu, B. I., Pacheco Jr, J., & Kong, J. A. (2004). Robust method to retrieve the constitutive effective parameters of metamaterials. *Physical review E*, 70(1), 016608.
- [82] Li, J., Zhao, J. B., Liang, J. J., Zhong, L. L., & Hong, J. S. (2018). Metamaterial-Based Planar Compact MIMO Antenna with Low Mutual Coupling. *Microwave Journal*, 61(5).
- [83] W.-A. Li, Z.-H. Tu, Q.-X. Chu, and X.-H. Wu, "Differential stepped- slot UWB antenna with common-mode suppression and dual sharp- selectivity notched bands," *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol. 15, pp. 1120-1123, Oct. 2016.
- [84] Gao, G., He, L., Hu, B., & Cong, X. (2015). Novel dual band-notched UWB antenna with T-shaped slot and CSRR structure. *Microwave and Optical Technology Letters*, 57(7), 1584-1590.
- [85] Jaglan, N., Kanaujia, B., Gupta, S. D., & Srivastava, S. (2016). Triple band notched UWB antenna design using electromagnetic band gap structures. *Progress In Electromagnetics Research C*, 66, 139-147.
- [86] Jeong, M. J., Hussain, N., Bong, H. U., Park, J. W., Shin, K. S., Lee, S. W., ... & Kim, N. (2020). Ultrawideband microstrip patch antenna with quadruple band notch characteristic using negative permittivity unit cells. *Microwave and Optical Technology Letters*, 62(2), 816-824.
- [87] Sari, P., Firdausi, A., & Hakim, G. P. (2020, September). The design of log periodic dipole array microstrip antenna at frequency 28 GHz. In *2020 2nd International Conference on Broadband Communications, Wireless Sensors and Powering (BCWSP)* (pp. 140-143). IEEE.
- [88] Zoubiri, B., Fortas, I., Ayad, M., & Tebache, S. (2024). 2 to 18 GHz MLPDA Employs Tapered Balun Feed Structure. *Microwave Journal*, 67.

- [89] Almtrod, A. A. A., & Kubík, Z. (2022). Design a Compact Printed Log-Periodic Biconical Dipole Array Antenna for EMC Measurements.
- [90] Donelli, M., Manekiya, M., Mulloni, V., Marchi, G., & Mendicino, R. (2022). A compact ultra-wide band printed log-periodic antenna using a bow-tie structure. *Progress In Electromagnetics Research C*, 124, 43-52.
- [91] Ellis, M. S., Arthur, P., Ahmed, A. R., Kponyo, J. J., Andoh-Mensah, B., & John, B. (2021). Design and circuit analysis of a single and dual band-notched UWB antenna using vertical stubs embedded in feedline. *Heliyon*, 7(12).
- [92] Sahoo, S., Mishra, G. P., Jena, M. R., & Mangaraj, B. B. (2020). Sub-sectional tapered printed-LPDA design with WLAN, WiMAX notch bands for UWB communication systems. In *ICICCT 2019—System Reliability, Quality Control, Safety, Maintenance and Management: Applications to Electrical, Electronics and Computer Science and Engineering* (pp. 717-727). Springer Singapore.
- [93] Jena, M. R., Sahoo, S., Mishra, G. P., & Mangaraj, B. B. (2021). Miniaturised band notched printed LPDA design with meander fractal dipole for UWB communication. *International Journal of Electronics*, 108(1), 21-44.
- [94] Yang, Z. (2021, May). A Printed Log-periodic Dipole Array Antenna with Band Notched Characteristics. In *2021 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT)* (pp. 1-3). I

Résumé

Les communications sans fil connaissent une expansion rapide, nécessitant des solutions innovantes face à la hausse des besoins en débits élevés et à la saturation du spectre. La technologie ultra-large bande (ULB) se présente comme une alternative prometteuse. Dans le cadre de cette thèse, deux nouvelles antennes ULB ont été proposées : une antenne élémentaire patch à doubles ellipses alimentée par une ligne coplanaire (CPW) et une antenne microruban réseau de dipôles logarithmiquement périodique (MLPDA) alimenté par deux lignes microrubans.

Étant donné que les systèmes ULB peuvent générer des interférences avec les applications existantes (WiMAX, WLAN, bande X, etc.), l'intégration de mécanismes de bandes rejetées s'avère essentielle. Pour y remédier, des cellules à métamatériaux sous forme de résonateurs en boucle ouverte ont été placées près du patch de la première antenne, tandis que des stubs rectangulaires ont été connectés à la ligne microruban de la seconde antenne. Ces techniques permettent de rejeter les bandes WLAN et Satellite DL (bande X) pour l'antenne patch, ainsi que les bandes WiMAX et WLAN pour l'antenne MLPDA. Les performances des antennes ont été analysées via des simulations sous CST Studio, puis validées par des mesures expérimentales. Les résultats obtenus montrent une bonne concordance entre simulations et expérimentations, confirmant l'efficacité des solutions proposées pour répondre aux exigences des communications sans fil modernes en termes de large bande et de rejet d'interférences.

Mots clés : antenne patch, microruban, ULB, CPW, Métamatériaux, Stubs, bandes rejetées.

Abstract

Wireless communications are expanding rapidly, requiring innovative solutions in the face of rising demand for high data rates and spectrum saturation. Ultra-wideband (ULB) technology is a promising alternative. In this thesis, two new ULB antennas were proposed: an elementary patch antenna with double ellipses fed by a coplanar line (CPW) and a logarithmically periodic microstrip dipole array antenna (MLPDA) fed by a microstrip line.

Since ULB systems can generate interference with existing applications (WiMAX, WLAN, X-band, etc.), the integration of rejected band mechanisms is essential. To remedy this, metamaterial cells in the form of open-loop resonators were placed near the patch of the first antenna, while rectangular stubs were connected to the microstrip feed line of the second antenna. These techniques make it possible to reject the WLAN and Satellite DL (X-band) bands for the patch antenna, and the WiMAX and WLAN bands for the MLPDA antenna. The performance of the antennas was analysed using simulations in CST Studio, then validated by experimental measurements. The results obtained show good agreement between simulations and experiments, confirming the effectiveness of the proposed solutions in meeting the requirements of modern wireless communications in terms of broadband and interference rejection.

Keywords: Patch antenna, microstrip, UWB, CPW, Metamaterials, Stubs, rejected bands.

ملخص

تتوسع الاتصالات اللاسلكية بسرعة، مما يتطلب حلولاً مبتكرة في مواجهة الطلب المتزايد على معدلات البيانات العالية وتشبع الطيف. تعد تقنية النطاق العريض جداً (ULB) بديلاً واعداً. في هذه الأطروحة، تم اقتراح هوائيين جديدين من هوائيات النطاق العريض جداً (ULB): هوائي رقعة أولية مع قطع ناقص مزدوج يغذيه دليل موجي مستوي (CPW) وهوائي مصفوفة دوري لوغاريتمي شريطي (MLPDA) يغذيه شريط دقيق.

نظراً لأن أنظمة ULB يمكن أن تولد تداخلاً مع التطبيقات الحالية (WiMAX، WLAN، WLAN، النطاق X، إلخ)، فإن دمج آليات النطاق المرفوض أمر ضروري. ولمعالجة ذلك، تم وضع خلايا المواد الخارقة على شكل مرنانات ذات حلقة مفتوحة بالقرب من رقعة الهوائي الأول، بينما تم توصيل وصلات فرعية مستطيلة على خط التغذية بالشريط الدقيق للهوائي الثاني. أتاحت هذه التقنيات إمكانية رفض نطاقات WLAN والرابط السفلي الساتلي (النطاق X) للهوائي الرقعة، ونطاقات WiMAX و WLAN للهوائي المصفوفة. تم تحليل أداء الهوائيات باستخدام عمليات المحاكاة في CST Studio، ثم تم التحقق من صحة أداء الهوائيات باستخدام القياسات التجريبية. أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها توافقاً جيداً بين المحاكاة والتجارب، مما يؤكد فعالية الحلول المقترحة في تلبية متطلبات الاتصالات اللاسلكية الحديثة من حيث النطاق العريض ورفض التداخل.

كلمات مفتاحية: هوائي رقعة، شريط دقيق، نطاق ترددي فائق الاتساع، دليل موجي مستوي، مواد خارقة، وصلة فرعية، نطاقات مرفوضة.