

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
Université 8 Mai 1945 – Guelma
Faculté des sciences et de la Technologie
Département d'Electronique et Télécommunications



**Mémoire de fin d'étude
pour l'obtention du diplôme de Master Académique**

Domaine : **Sciences et Technologie**
Filière : **Télécommunications**
Spécialité : **Systems des Télécommunications**

**ETUDE ET ANALYSE D'UNE ANTENNE MIMO 4×4 A
DEUX BANDES REJETEES POUR LES APPLICATIONS
ULTRA LARGE BANDE (ULB)**

Présenté par :

**MENDJEL INSSAF
KHELIL DORRA INES**

Sous la direction de :

Dr GUEBGOUB NASSIMA

Jun 2024

Remerciements

*La première et la dernière chose est pour **Allah** qui nous a donné la capacité suffisante pour mener à bien ce travail.*

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude envers notre superviseuse, Dr GUEBGOUB NASSIMA, pour ses précieux conseils, ses encouragements constants et son soutien patient tout au long de notre parcours en tant qu'étudiantes. Nous avons eu la chance exceptionnelle de bénéficier de la bienveillance et de la réactivité d'une superviseuse aussi dévouée à notre travail.

Nous souhaitons également remercier les membres du jury qui ont accepté de lire et d'évaluer notre travail. Un merci tout particulier à tous ceux qui nous ont soutenues pour mener à bien ce projet.

Dédicace

*Tout d'abord, je remercie le Dieu, notre créateur de m'avoir donné la force,
la volonté et le courage afin d'accomplir ce travail modeste.*

Je dédie ce travail

*à ma mère, la source de tendresse et la lumière qui guide mes routes et qui
m'emmène aux chemins de la réussite, pour tous ses sacrifices consentis et ses
précieux conseils, pour toute son assistance et sa présence dans ma vie.*

*A mon père que je le remercie énormément pour ses efforts, ses
conseils et sa surveillance.*

À mes chers frères et sœurs et mon homme

À tout ce que je connais sans exceptions.

A tous mes enseignants sans exception

*Enfin, j'offre mes bénédictions à tous ceux qui m'ont soutenu dans
l'accomplissement de ce travail.*

INSSAF

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

*À mes chers parents, que nulle dédicace ne puisse exprimer mes sentiments
les plus sincères, Pour leur patience inébranlable, leur soutien constant, leur
assistance,*

*En témoignage de mon profond amour et respect pour leurs grands
sacrifices*

À mes frères « Anis et Youssef ».

À mes chères cousines « Randa et Naila ».

*À mes cousins « Abdeslam ; Sami ; Haithem ; Rami ; Nazim ; Monder
et Walid ».*

A mes chères tantes

*Et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour que ce travail soit
Possible, je vous dis merci.*

DORRA

ملخص:

تمثل تقنية MIMO (Multiple Input, Multiple Output) تقدمًا كبيرًا في مجال التقنيات الهوائية، حيث تعزز أداء أنظمة الاتصالات اللاسلكية. تركز هذه الدراسة على تصميم وتحليل هوائي MIMO 4×4 ULB. تم تصميم هذا الهوائي خصيصًا لدمج نطاقين مرفوضين: 3-4 GHz لـ WiMAX و 5-6 GHz لـ WLAN. يبدأ التصميم بمونوبول دائري معدل مغذى بخط مايكروستريب، مُحسن لنطاق ترددات واسع. تم الحصول على النطاقات المرفوضة عن طريق إدخال فتحة بشكل على شكل حرف U على الرقعة وكعب طفيلي على شكل حرف T على حافتها العلوية. لتقليل الاقتران بين هوائيات ULB في نظام MIMO، تم ترتيبها بشكل متعامد. تم إضافة قطعة X على جانب الأرضية لتحسين العزل بشكل أكبر. تم إنتاج واختبار نموذج أولي بأبعاد 65×65×1.5 ملم³. أكدت النتائج المقاسة والمحاكاة أن هذا الهوائي مناسب تمامًا لتطبيقات ULB، مع رفض فعال لنطاقات WiMAX و WLAN. تقييم CST لمكاسب التنوع (DG) معامل ارتباط الغلاف (ECC) يظهر الأداء الممتاز للهوائي MIMO المقترح من حيث التنوع.

الكلمات المفتاحية: MIMO، ULB، الهوائي، النطاقات المرفوضة، الاقتران، العزل، DG، ECC، CST

Résumé :

La technologie MIMO représente une avancée significative dans le domaine des antennes, permettant d'améliorer les performances des systèmes sans fil. Cette étude se concentre sur la conception et l'analyse d'une antenne MIMO 4×4 ULB. Cette antenne est spécialement conçue pour intégrer deux bandes rejetées : 3-4 GHz pour WiMAX et 5-6 GHz pour WLAN. La conception démarre avec un monopôle circulaire modifié alimenté par une ligne micro ruban, optimisé pour une large bande de fréquences. Les bandes rejetées sont obtenues par l'introduction d'une fente en forme de U sur le patch et d'un stub parasite en forme de T sur le bord supérieur. Pour réduire le couplage entre les antennes ULB du système MIMO, elles sont disposées de manière orthogonale. Un stub en forme de X est ajouté du côté du plan de masse pour améliorer encore l'isolation. Un prototype de dimensions 65×65×1.5 mm³ a été construit et testé. Les résultats des tests mesurés et simulés confirment que cette antenne est bien adaptée aux applications ULB, avec une réjection efficace des bandes WiMAX et WLAN. L'évaluation par CST du gain de diversité (DG) et du coefficient de corrélation d'enveloppe (ECC) démontre les excellentes performances de l'antenne MIMO proposée en termes de diversité.

Mots-clés : MIMO, ULB, antenne, bandes rejetées, couplage, isolation, DG, ECC, CST.

Abstract:

The MIMO (Multiple Input, Multiple Output) technology represents a significant advancement in antenna technology, enhancing the performance of wireless systems. This study focuses on the design and analysis of a 4×4 UWB MIMO antenna. This antenna is specially designed to integrate two rejected bands: 3-4 GHz for WiMAX and 5-6 GHz for WLAN. The design begins with a modified circular monopole fed by a microstrip line, optimized for wideband frequencies. The rejected bands are achieved through a U-shaped slot on the patch and a T-shaped parasitic stub on the upper edge. To minimize coupling between the UWB antennas in the MIMO system, they are arranged orthogonally. An X-shaped stub is added on the ground plane side to further enhance isolation. A prototype measuring 65×65×1.5 mm³ was fabricated and tested. Both measured and simulated results confirm the antenna's suitability for UWB applications, effectively rejecting WiMAX and WLAN bands. Evaluation using CST demonstrates excellent diversity gain (DG) and envelope correlation coefficient (ECC) performance of the proposed MIMO antenna.

Keywords: MIMO, UWB, antenna, rejected bands, coupling, isolation, DG, ECC, CST

TABLE DES MATIERES

Remerciements	II
Dédicace.....	III
ملخص	V
Résumé	V
Abstract.....	VI
Liste des figures	X
Liste des tableaux	XI
Liste des abréviations	XIV
INTRODUCTION GENERALE	1

CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR LES ANTENNES PLANAIREES ULB

I.1. INTRODUCTION	3
I.2. LA TECHNOLOGIE ULB	3
I.2.1.Définition	3
I.2.2.Caractéristiques de la technologie ULB	3
I.2.2.1. Densité spectrale de puissance	3
I.2.2.2.Caractéristiques de pénétration	4
I.2.2.3. Capacité de canal	4
I.2.3. Les applications Ultra Large Bande	5
I.2.4.Avantages et inconvénients de l’ultra large bande	6
I.3. LES ANTENNES ULB	6
I.4.ANTENNE ULB EN TECHNOLOGIE IMPRIMEE	8
I.5. MOTIVATION POUR LA CONCEPTION D'UNE ANTENNE ULB	8
I.6. MONOPOLES PLANAIRESA PLAN DE MASSE REDUIT	8
I.6.1.Techniques d’élargissement de la bande passante	9
I.6.1.1.La technique de fente	10
I.6.1.2. La technique fractale.....	11

I.6.2. Technique de suppression des bandes	12
I.6.2.1. Insertion de fentes.....	13
I.6.2.2. Insertion des stubs parasite	14
I.7. CONCLUSION	15

CHAPITRE 2 : LES ANTENNES MIMO ULB

II.1. INTRODUCTION	17
II.2. LA TECHNOLOGIE MIMO	17
II.3. ARCHITECTURE MIMO	18
II.4. PRINCIPE DE LA TECHNIQUE MIMO	18
II.5. CANAL MIMO	19
II.6. CAPACITE D'UN MIMO	19
II.7. LES AVANTAGES DE LA TECHNOLOGIE MIMO	20
II.7.1. Augmenter la capacité du canal	21
II.7.2. Améliorer la fiabilité des canaux	21
II.7.3. Améliorer les performances anti-interférences	21
II.7.4. Améliorer la couverture.....	21
II.8. ANTENNES MIMO ULB	22
II.9. DEFIS DE CONCEPTION DES SYSTEMES D'ANTENNE MIMOULB	22
II.9.1. Isolation des antennes MIMO	23
II.9.2. Adaptation de la bande passante ULB	23
II.9.3. Miniaturisation.....	24
II.10. PERFORMANCES DES ANTENNES MIMO ULB	26
II.10.1. Couplage mutuel	26
II.10.2. Efficacité totale	26
II.10.3. Coefficient de corrélation d'enveloppe (ECC : Enveloppe Corrélation Coefficient). ..	26
II.10.4. Gain de Diversité (DG).....	27
II.11. CONCLUSION.....	27

CHAPITRE 3 : CONCEPTION ET ANALYSE D'UNE ANTENNE MIMO 4×4 ULB A DEUX BANDES REJETEES

III.1. INTRODUCTION	29
III.2. PRESENTATION DU LOGICIEL MICROWAVE STUDIO DE CST	29
III.2.1. L'interface CST	29
III.2.2. Avantages du logiciel CST.....	30
III.3. CONCEPTION D'UNE ANTENNEULB AVEC DEUX BANDESREJETEES.....	30
III.3.1. Etapes de conception	30
III.3.2. Antenne de base	32
III.3.2.1. Rejection de la bande WiMAX (3.3–3.6 GHz; 5.25–5.825 GHz)	34
III.3.2.2. Rejection de la bande WLAN (5.15–5.35 GHz; 5.725–5.825 GHz	36
III.3.2.3. Rejection des deux bandes WiMAX et WLAN	38
III.4.CONCEPTION D'UNE ANT MIMO ULB AVEC DEUX BANDES REJETEES	40
III.4.1. Première configuration.....	40
III.4.2. Amélioration de couplage entre l'antenne 1 et l'antenne 3 : 2 ^{ème} configuration.....	42
III.5. PERFORMANCES DE L'ANTENNE MIMOPROPOSEE.....	45
III.5.1.Coefficient de corrélation d'enveloppe (ECC: Envelope Correlation Coefficient.....	45
III.5.2. Gain de diversité (DG : Diversity Gain.....	45
III.6. REALISATION	46
III.6.1. Structure de l'antenne réalisée	46
III.6.2. Etapes de la mesure	47
III.6.3. Présentation et analyse des résultats	47
III.7. CONCLUSION	49
CONCLUSION GENERALE.....	51
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE.....	53

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1 : L'antenne ULB.....7
Tableau III.1 : Paramètres de l'antenne de départ.....31

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE I

Figure I.1 : Systèmes bande étroite — large bande — ultra-large bande.....	4
Figure I.2 : Application de la technologie ULB.....	5
Figure I.3 : Illustre l'idée générale de la coexistence de l'ULB avec des technologies à bande étroite et large bande	6
Figure I.4 : Quelques géométries d'antennes Monopôles planaires ULB.....	9
Figure I.5 : Antenne ULB avec des encoches sous forme L et I.....	11
Figure I.6 : Coefficient de réflexion de l'antenne, (a) sans et (b) avec les encoches.....	11
Figure I.7 : Antenne fractale circulaire ULB	12
Figure I.8 : Coefficient de réflexion de l'antenne pour plusieurs itérations	12
Figure I.9 : (a) Antennes ULB à deux bandes rejetées par utilisation de fentes [21], (b) Coefficient de réflexion S11.....	14
Figure I.10 : (a) Antenne MIMO ULB proposée par [21] avec trois bandes rejetées, (b) Coefficient de réflexion	15

CHAPITRE II

Figure II.1 : Schémas représentatifs du SISO, MISO, SIMO et MIMO	18
Figure II.2: Principe de la technique MIMO	19
Figure II.3 : (a) Antenne proposé par [27] avec EBG structure, (b) Coefficient de réflexion S11 et de transmission S21 de l'antenne MIMO proposée.....	24
Figure II.4 : (a) Antenne avec DGS, (b) Coefficient de réflexion, (c) Antenne MIMO 2×2, (d) Paramètres Sij.....	25

CHAPITRE III

Figure III.1 : L'interface graphique de logiciel CST Micro wave studio 2019	30
Figure III.2 : Etape de conception de l'antenne de départ.....	31
Figure III.3 : Les coefficients de réflexion S11 de quatre antennes.....	31

Figure III.4 : Antenne de base.....	32
Figure III.5 : S11 de l'antenne de base.....	32
Figure III.6: VSWR de l'antenne de base.....	33
Figure III.7: Efficacité de rayonnement de l'antenne de base	33
Figure III.8 : Le Gain de l'antenne de base	33
Figure III.9 : Antenne de base avec rejection de la bande WIMAX	34
Figure III.10: S11 de l'antenne de base avec la rejection de la bande WIMAX	34
Figure III.11: VSWR de l'antenne de base avec la rejection de la bande WIMAX	35
Figure III.12 : Gain de l'antenne avec la rejection de la bande WIMAX	35
Figure III.13: Antenne de base avec la rejection de la bande WLAN	36
Figure III.14: S11 de l'antenne de base avec la rejection de la bande WLAN.....	36
Figure III.15 : Taux d'onde stationnaire VSWR de la rejection de la bande WLAN	37
Figure III.16 : Gain de l'antenne avec la rejection de la bande WLAN.....	37
Figure III.17: Antenne de base avec double rejection.....	38
Figure III.18: S11 de l'antenne de base avec double rejection	38
Figure III.19: VSWR de l'antenne de base avec double rejection	38
Figure III.20 : Efficacité de rayonnement de l'antenne de base avec double rejection.....	39
Figure III.21 : Gain de l'antenne de base avec double rejection.....	39
Figure III.22 : Distribution de courant surfacique pour 3.5 GHz et 5.5 GHz de l'antenne de base avec double rejection.....	40
Figure III.23 : Antenne MIMO 4x4 UWB avec double rejection : 1ère configuration.....	41
Figure III.24 : Sii de l'antenne MIMO de la 1ère configuration.....	41
Figure III.25 : Isolation entre les ports (1 et 2), (2 et 3), (3 et 4), (1 et 4)	42
Figure III.26 : Isolation entre les ports (1 et 3), (2 et 4)	42
Figure III.27: Courant surfacique pour 2.8 GHz, 7.5 GHz et 8.6 GHz	42
Figure III.28 : Antenne MIMO 4x4 UWB avec double rejection.....	43
Figure III.29 : Sii de l'antenne MIMO de la 2ème configuration	43
Figure III.30 : Isolation entre les ports (1 et 2), (2 et 3), (3 et 4), (1 et 4)	44
Figure III.31 : Isolation entre les ports (1 et 3), (2 et 4)	44
Figure III.32 : Courant surfacique pour 2.8 GHz, 7.5 GHz et 8.6 GHz	44
Figure III.33 : Coefficient de corrélation d'enveloppe (ECC) de l'antenne MIMO proposée .	45
Figure III.34: Gain de diversité de l'antenne MIMO proposée	46

Figure III.35 : Prototype de l'antenne MIMO ULB avec rejection des deux bandes (WLAN et WIMAX).....	46
Figure III.36: Principe de mesure des paramètres S de l'antenne MIMO à 4 ports par un analyseur de réseaux vectoriel à deux ports.....	47
Figure III.37 : Mesure des paramètres de l'antenne MIMO réalisée par le VNA	47
Figure III.38 : Sii de l'antenne MIMO de la 2ème configuration	48
Figure III.39 : Isolation entre les ports (1 et 2) et/ou (2 et 3), (3 et 4), (1 et 4)	48
Figure III.40 : Isolation entre les ports (1 et 3) et/ou (2 et 4)	49

MIMO (Entrée Multiple, Sortie Multiple)

SISO (Entrée Unique, Sortie Unique)

MISO (Entrée Multiple, Sortie Unique)

SIMO (Entrée Unique, Sortie Multiple)

FCC (Commission Fédérale des Communications)

CST (Technologie de Simulation par Ordinateur)

IEEE (Institut des Ingénieurs Électriciens et Électroniciens).

SNR (Rapport Signal sur Bruit). **WiMAX** (Interopérabilité Mondiale pour l'Accès par Micro-ondes)

WLAN (Réseau Local Sans Fil)

ECC (Coefficient de Corrélacion d'Enveloppe)

ULB (Ultra-Large Bande)

DG (Diversity Gain)

INTRODUCTION GENERALE

L'évolution rapide des technologies de communication sans fil a conduit à une demande croissante de systèmes capables de transmettre des données à des débits élevés avec une fiabilité accrue. Dans ce contexte, la technologie Ultra Large Bande (ULB) et les antennes MIMO (Multiple Input Multiple Output) 4×4 émergent comme des solutions prometteuses [1-3]. La technologie ULB, caractérisée par l'utilisation d'une large gamme de fréquences, permet des transmissions de données à très haut débit avec une faible consommation d'énergie et une excellente résolution spatiale. Ses applications sont nombreuses, allant des communications sans fil à courte portée aux systèmes de localisation précis et aux radars [4].

Les antennes MIMO 4×4, quant à elles, utilisent plusieurs antennes pour émettre et recevoir des signaux simultanément, ce qui permet d'augmenter la capacité du réseau et d'améliorer la qualité du signal. En exploitant plusieurs chemins de propagation, la technologie MIMO améliore le débit de transmission et la fiabilité des communications, même dans des environnements complexes avec de nombreuses interférences [5, 6].

Ce mémoire se propose d'explorer la conception et l'analyse d'une antenne MIMO 4×4 à deux bandes rejetées pour les applications ULB. L'objectif principal est de développer une antenne compacte et efficace, capable de rejeter des bandes spécifiques pour éviter les interférences avec d'autres systèmes de communication. La conception de cette antenne implique l'utilisation de techniques avancées pour améliorer l'isolation entre les éléments de l'antenne et garantir une performance optimale sur une large bande de fréquences.

La structure de ce mémoire est organisée en trois chapitres principaux. Le premier chapitre introduit la technologie ULB et offre une vue d'ensemble des antennes planaires ULB. Le deuxième chapitre se concentre sur les antennes MIMO ULB, expliquant comment la technologie MIMO peut améliorer les performances des systèmes de communication sans fil, abordant leurs principes, avantages, et les défis liés à leur conception. Le troisième chapitre présente la conception et l'analyse d'une antenne MIMO 4×4 à deux bandes rejetées, incluant les résultats de simulations et de tests expérimentaux pour évaluer ses performances.

- [1] S.-Y. Lin and H.-R. Huang, “Ultra-wideband MIMO antenna with enhanced isolation,” *Microw. and Opt. Tech. Lett.*, vol. 51, no. 2, pp. 570–573, Dec. 2008G.
- [2] A. Rajagopalan, “Increasing channel capacity of an ultra wide band MIMO system using vector antennas, *IEEE Trans. Antennas Propagat.*”, vol. 55, no. 10, pp. 2880–2887. Oct. 2007.
- [3] J. Ren, W. Hu, Y. Yin, and R. Fan, “Compact printed MIMO antenna for UWB applications”, *IEEE Antennas Wireless Propag Lett* 13 (2014), 1517–1520.
- [4] N. K. Kiem, H. N. B. Phuong, Q. N. Hieu, D. N. Chien, “ A Compact Printed 4×4 MIMO-UWB Antenna with WLAN Band Rejection“, *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium (APSURSI)*, Orlando, 7-13 July 2013, 2245-2246.
- [5] A. A. Ibrahim, J. Machac and R. M. Shubair, “Compact UWB MIMO antenna with pattern diversity and band rejection characteristics”, *Microwave and Optical Technology Letters*, Vol. 59, No. 6, pp 1460-1464, June 2017
- [6] M. S. Khan, A. Iftikhar, R. M. Shubair, A. Capobianco, B. D. Braaten and D. E. Anagnostou, ” Eight-Element Compact UWB-MIMO/Diversity Antenna With WLAN Band Rejection for 3G/4G/5G Communications”, *IEEE Open Journal of Antennas and Propagation*, vol. 1, pp. 196-206, 2020

Chapitre 1

**GENERALITES SUR LES ANTENNES
PLANAIREES ULB**

I.1. INTRODUCTION

Les systèmes ULB suscitent un intérêt depuis l'annonce par la FCC pour l'utilisation de la bande [3,1–10,6] GHz pour les applications de communication commerciales [1]. Les dernières conceptions d'antenne ULB se concentrent sur des petites antennes planaires en raison de leur facilité de fabrication et leur capacité à être intégré avec d'autres composants sur la même carte de circuits imprimés.

Ce chapitre vise à introduire la technologie des antennes planaires ULB, en mettant particulièrement l'accent sur les monopôles planaires ULB. Une analyse approfondie sera menée sur plusieurs aspects, notamment l'élargissement de la bande passante et les techniques pour rejeter des bandes lors de la conception de ces antennes, pour éviter les interférences du système ULB avec d'autre système à bande étroite comme le WLAN et le WiMAX.

I.2. LA TECHNOLOGIE ULB

I.2.1. Définition

Récemment, la FCC a défini le système ULB comme un signal avec une bande passante au minimum de 500 MHz où la bande passante relative est d'environ 20 % de la fréquence. Le système ULB utilise une impulsion très courte pour transmettre des données sur une bande passante jusqu'à 7,5 GHz. Un signal est dit ultra large bande si sa bande passante est au Minimum de 500 MHz, sa bande passante relative est supérieure à 0.2 [2].

$$Bp = 2 * \frac{f_h - f_i}{f_h + f_i} > 0.2 \quad (I.1)$$

Où f_h et f_i désignent respectivement les fréquences limites basse et haute du spectre de signal. La plupart des concepteurs des systèmes ULB adoptent une autre définition, à savoir une bande passante à -10 dB supérieure à 1.5 GHz (ou une bande passante fractionnelle supérieure à 0.25. Concernant la fréquence centrale du système) Un exemple pratique est un système radio centré à 2 GHz, de bande passante à -10 dB de 1.6 GHz. Les deux conditions ne sont pas nécessairement satisfaites simultanément.

I.2.2. Caractéristiques de la technologie ULB

I.2.2.1. Densité spectrale de puissance [3]

La densité spectrale de puissance est définie comme le carré du module de la transformée de Fourier du signal, divisé par le temps d'intégration. Plus précisément, on appelle densité spectrale de puissance la limite, lorsque T tend vers l'infini, de l'espérance mathématique du

carré du module de la transformée de Fourier du signal. Ainsi, si X est un signal et $T(X)$ sa transformée de Fourier, la densité spectrale de puissance est donnée par :

$$T_x = \frac{|X|^2}{\Delta T} \quad (I.2)$$

Un des avantages issus de l'étalement de l'énergie des signaux sur le spectre ULB est sa faible consommation d'énergie. L'antenne (ULB) aura une puissance maximale disponible de l'ordre de 0,5 mW en se conformant au masque spectral FCC (Figure I.1).

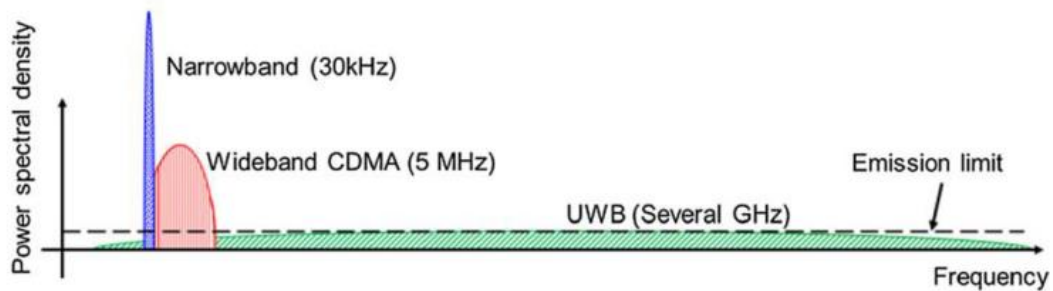


Figure I.1 : Systèmes bande étroite — large bande — ultra-large bande [4]

I.2.2.2. Caractéristiques de pénétration

Les systèmes ULB ont la capacité de pénétrer efficacement dans divers matériaux. Les fréquences basses qui font partie de la large gamme de fréquences de l'ULB possèdent des longueurs d'onde relativement élevées, ce qui permet aux signaux ULB de pénétrer dans différents matériaux. Cette caractéristique rend la technologie ULB compatible avec les communications à travers les murs et les radars à pénétration au sol (Ground Penetrating radar GPR), ainsi que dans le domaine médical [5]

I.2.2.3. Capacité de canal

La capacité du canal est le plus grand avantage de la technologie ULB. Le théorème de Shannon exprime la relation entre la capacité du canal, le rapport signal sur bruit et la bande passante du système ULB est donné par l'équation suivant :

$$C = B * \log 2 * (1 + SNR) \quad (I.3)$$

Où B : la bande passante du canal, SNR : est le rapport signal sur bruit sur toute la bande passante.

La capacité du canal augmente linéairement avec la bande passante, et elle diminue si le rapport signal sur bruit diminue de manière logarithmique. Le débit d'information augmente

rapidement en augmentant la bande passante du système de transmission et en améliorant le rapport signal sur bruit [6].

I.2.3. Les applications Ultra Large Bande

Il existe trois grandes catégories d'applications principales pour les systèmes ULB [7] :

- La détection ;
- La géolocalisation ;
- La communication sans fil.

Les deux premiers ne demandent pas un gros débit d'information, mais nécessitent une bonne précision sur de grandes distances et une robustesse aux trajets multiples, tandis que les communications sans fils peuvent tirer profit des très hauts débits à courte portée offerte par la technologie ULB.

Les bandes de fréquences pour ces applications sont :

- ✓ Bande de fréquence <1 GHz: radar GPR et radar "seethroughwall".
- ✓ Bande 1.99-10.6 GHz: Applications médicales (imagerie).
- ✓ Bande 3.1-10.6 GHz: Système de communications sans fil et applications liées à la localisation.
- ✓ Bande de fréquences 24 - 77 GHz : applications liées aux véhicules.

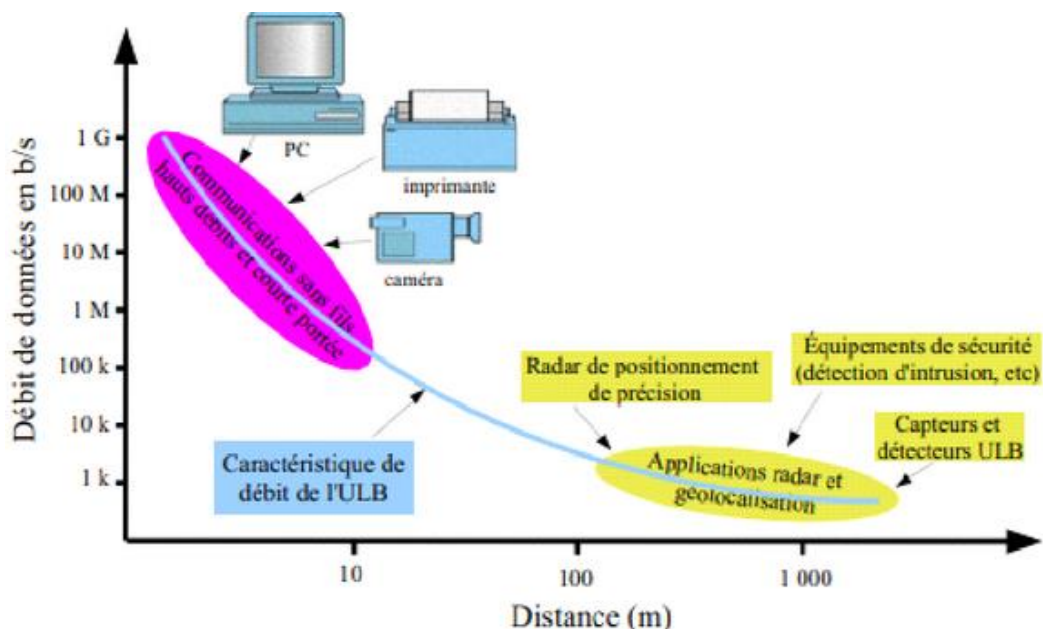


Figure I.2 : Application de la technologie ULB

I.2.4. Avantages et inconvénients de l'ultra large bande [8]

Avantage :

- Bonne capacité de pénétration dans les murs et obstacles.
- Réduction des évanouissements causés par les trajets multiples.
- Possibilité d'une architecture commune pour les applications de communications, de localisation et radar
- Meilleure utilisation du spectre, débits plus grands.

Inconvénient :

- Le principal inconvénient de cette technologie est l'existence d'interférence dû aux fréquences utilisées qui sont déjà employées par d'autres systèmes.

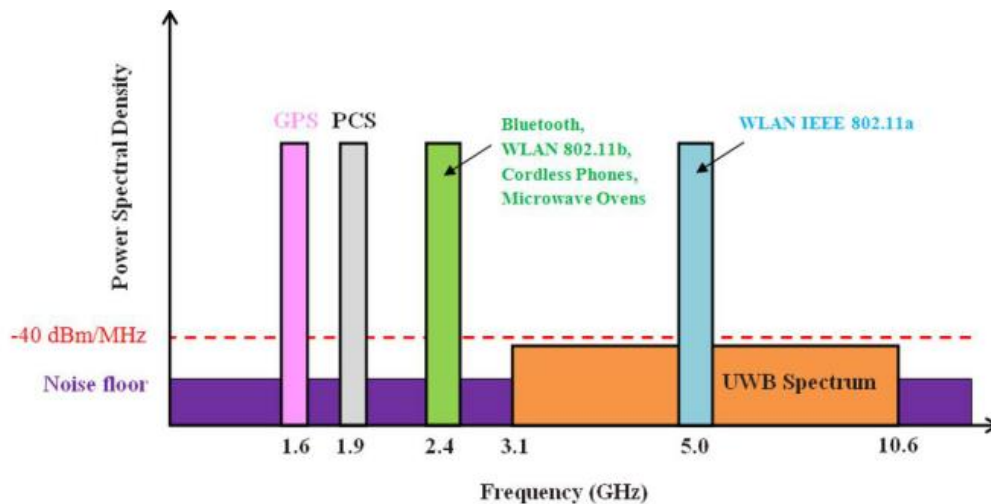


Figure I.3 : Illustre l'idée générale de la coexistence de l'ULB avec des technologies à bande étroite et large bande [2]

I.3. LES ANTENNES ULB [9]

Une fois que la technologie Ultra Large Bande (ULB) a été exposée, il est essentiel de se pencher sur les antennes ULB qui constituent les éléments clés de tout système sans fil. Les antennes ULB sont classées en fonction de certaines caractéristiques telles que leurs caractéristiques géométriques ou la spécificité du diagramme de rayonnement (antenne omnidirectionnelle ou directive). Ces antennes ont toutes des capacités d'adaptation sur de très grandes bandes de fréquences. Il est possible de classer les antennes ULB en trois catégories distinctes :

- Les antennes indépendantes de la fréquence** dont le diagramme de rayonnement, l'impédance d'entrée et la polarisation sont constantes sur une bande passante presque

infinie. Ces antennes peuvent être divisées en deux catégories : les antennes log-périodiques comme l'antenne log périodique trapézoïdale (circulaire) et les antennes équi-angulaires, comme les antennes spirales (logarithmiques, coniques, d'Archimède) ;

b) **Les antennes directives** comme les antennes à transition progressive (Exemple : l'antenne Vivaldi), les antennes cornet ;

c) **Les antennes élémentaires** qui peuvent être classées en deux catégories : les antennes volumiques (3D) ; comme l'antenne biconique, antenne discône et le monopole avec un plan de masse opposé ; et leurs dérivées bidimensionnelles (2D) (imprimées) comme l'antenne papillon (bow-tie) et le monopole à plan de masse réduit. Dans ce second type, on retrouve fréquemment dans la littérature des formes imprimées sur un diélectrique avec un plan de masse parallèle à l'élément rayonnant.

Le tableau suivant résume quelques antennes existantes ULB.

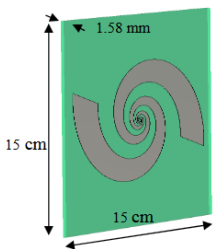


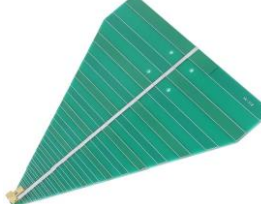
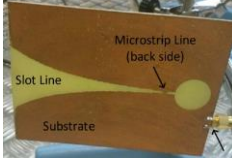



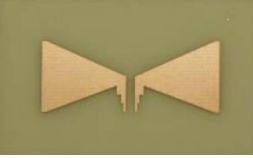

<p>Antennes indépendantes de la fréquence</p>	 <p>Ant. spirale log.</p>	 <p>Ant. spirale conique</p>	 <p>Ant. spirale d'Archimède</p>	 <p>Ant. dipôle log-périodique</p>
<p>Antennes directives</p>	 <p>Ant. Vivaldi</p>	 <p>Ant. Cornet</p>		
<p>Antenne élémentaire</p>	 <p>Ant. biconique</p>	 <p>Ant. Discône</p>	 <p>Ant. papillon.</p>	 <p>Monopole fractal</p>

Tableau I.1 : Quelques antennes ULB

I.4. ANTENNE ULB EN TECHNOLOGIE IMPRIMÉE [10]

Les antennes présentées précédemment sont assez encombrantes, d'où l'orientation des recherches vers des structures miniatures basées sur la technologie imprimée, d'où le nom des antennes planaires ULB. Ainsi, pour répondre aux besoins de miniaturisation et de simplification de la fabrication, l'utilisation de la technologie imprimée s'est avérée être une solution prometteuse. Cette approche a rapidement gagné en popularité en raison de ses nombreux avantages, notamment sa robustesse, sa capacité à réduire les coûts de fabrication et sa flexibilité en termes de formes géométriques.

Dans le cadre de cette étude, un large éventail de structures d'antennes en technologie imprimée est exploré et discutées pour les applications ULB.

I.5. MOTIVATION POUR LA CONCEPTION D'UNE ANTENNE ULB [11]

Les systèmes ULB fonctionnent à de faibles niveaux de puissance de transmission; la capacité du canal est proportionnelle à la bande passante, permettant des taux de transfert de données pouvant atteindre des centaines de Mbps ou plusieurs Gbps. Le signal ULB ne provoque pas d'interférences significatives avec les autres systèmes sans fil, assurant ainsi des solutions de communication hautement sécurisées et hautement fiables.

Le système ULB se caractérise par une large bande passante d'impédance, un diagramme de rayonnement directionnel ou omnidirectionnel stable, un gain constant dans la direction souhaitée, une polarisation constante désirée, une efficacité de rayonnement élevée, une réponse en phase linéaire, une petite taille, un profil bas et intégrable, ainsi qu'un faible coût et une faible complexité (installation, fabrication, matériaux et entretien).

Des travaux approfondis ont été déployés pour améliorer les performances de l'antenne ULB depuis la dernière décennie et sont toujours en cours. Dans la bande de fréquence ULB (3,1 GHz - 10,6 GHz), coexistent des systèmes à bande étroite tels que Wi-MAX (3,4 GHz - 3,69 GHz), WLAN (5,15 GHz - 5,35 GHz, 5,725 GHz - 5,825 GHz) et HIPERLAN (5,45 GHz - 5,725 GHz). Ces systèmes à bande étroite peuvent générer des interférences avec les systèmes UWB. Afin de minimiser ces interférences, les recherches ont proposé des antennes ULB dotées de caractéristiques de bande rejetée.

I.6. MONOPOLES PLANAIRES A PLAN DE MASSE REDUIT [11]

La famille des antennes monopôles imprimées à plan de masse réduit permettent, de son côté, d'avoir une large bande passante tout en gardant des performances en rayonnement stable et des diagrammes de rayonnement omnidirectionnels. La technologie imprimée permet d'avoir plus de liberté sur la forme géométrique des éléments rayonnants et de leur plan de masse. Cela permet d'ajouter des paramètres dans la conception afin d'augmenter la bande passante, contrôler la directivité ou aussi de réduire l'encombrement de l'antenne. Il existe principalement deux modes d'alimentation pour ces antennes : par ligne micro-ruban ou par guide coplanaire. Le couplage entre l'élément rayonnant et la ligne d'alimentation limite les courants de retour en direction du connecteur et facilite l'intégration de l'antenne. En réalité la longueur de ces lignes d'alimentation influe sur les performances de l'antenne. En plus, L'adaptation d'impédance est fortement tributaire de la distance entre la partie rayonnante et le plan de masse. Une des techniques employées pour optimiser la bande passante d'adaptation de l'antenne est de modifier à l'aide des marches d'escaliers (steps) ou d'encoches (notches) la partie de l'antenne en regard du plan de masse (figure I.4).

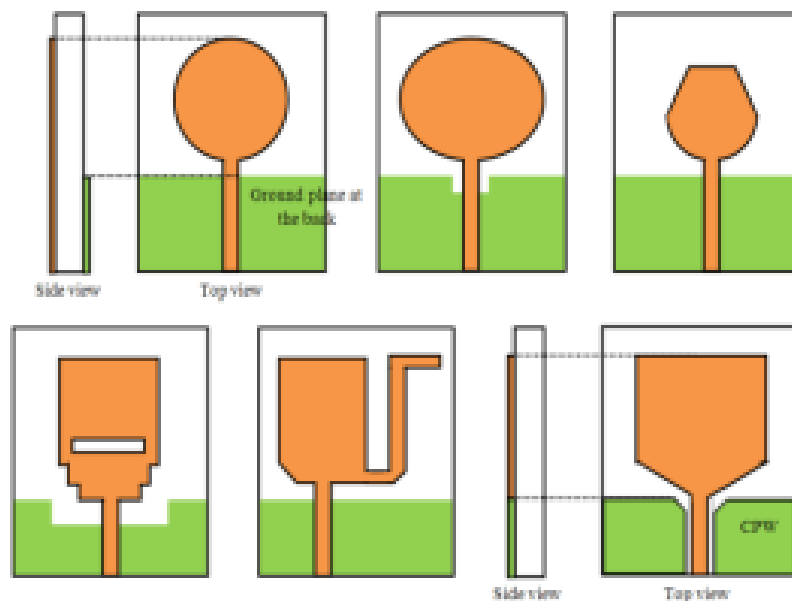


Figure I.4 : Quelques géométries d'antennes Monopôles planaires ULB [11]

I.6.1. Techniques d'élargissement de la bande passante

L'antenne micro-ruban (imprimée) est a priori présente un faible gain et une bande passante étroite. Pour répondre aux exigences imposées par un système de communication radiofréquence intégrant la technologie ULB, il sera nécessaire d'étendre la bande passante sans détruire les autres performances. Pour certaines applications, il sera possible d'améliorer le gain

de rayonnement de l'antenne. La réduction de la taille est également une considération à prendre en compte lors de la conception de cette antenne, ce qui permettrait de l'intégrer plus facilement dans les systèmes compacts et de réduire l'encombrement. Pour cela certaines techniques sont utilisées [12-13].

Parmi ces techniques, l'insertion de fente au niveau de l'élément rayonnant et la découpe en «marches d'escaliers » de ce dernier [14]. L'utilisation d'un plan de masse partiel favorise également l'élargissement de la bande passante [15]. Infliger une courbure au plan de masse partiel avec insertion d'encoche peut également avoir un effet considérable nous permettant d'atteindre les objectifs fixés [16].

Dans le paragraphe suivant, nous allons citer deux techniques intéressantes : la modification de patch rayonnant par l'insertion de fentes et l'utilisation des géométries fractales.

I.6.1.1. La technique de fente

Actuellement, la multiplication et la diversité des standards de communications radio-mobiles tels que : GSM, DCS, UMTS, WLAN, Bluetooth, TV Numérique,.....etc. ont créé un besoin pressant pour des antennes compactes multifréquences et/ou large bande permettant notamment d'assurer la compatibilité des différentes normes ou accéder à de nombreux services à partir du même appareil ce qui incité les chercheurs à trouver des modèles d'antennes de plus en plus complexes faisant généralement appel à des structures court-circuitées ou avec des fentes rayonnantes qui permettent d'abaisser les modes supérieurs. Nous définissons une "fente" comme une ouverture découpée dans une surface conductrice métallique obligeant les courants de surface à allonger leur trajet pour la contourner. L'insertion de fente dans l'élément rayonnant constitue une solution intéressante pour la réduction de taille des antennes. Lorsque les courants circuleront sur l'élément rayonnant, l'insertion d'une fente pourra créer de nouvelles résonances, permettant de détendre la bande de fonctionnement de l'antenne. Le choix de la forme et de la longueur de ces fentes détermineront les fréquences de fonctionnement de l'antenne et les impédances d'entrée [17]

Dans la référence [18], les auteurs ont proposé un modèle d'antenne ULB. Basé sur une structure de microstrip planaire évolutive, intégrant des fentes en forme de L et de I pour améliorer la bande de l'antenne de 2,39 GHz à 13,78 GHz. Cette compacte antenne (36 mm × 23 mm) est adaptée aux systèmes de communication ULB et aux communications sans fil.

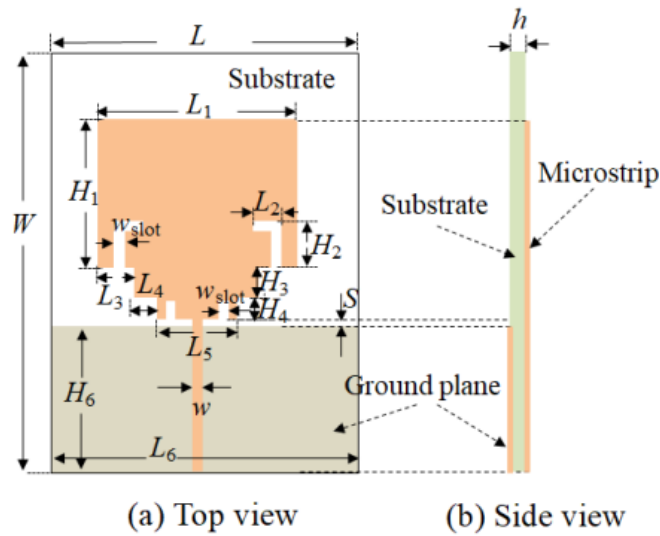


Figure I.5 : Antenne ULB avec des encoches sous forme L et I [18]

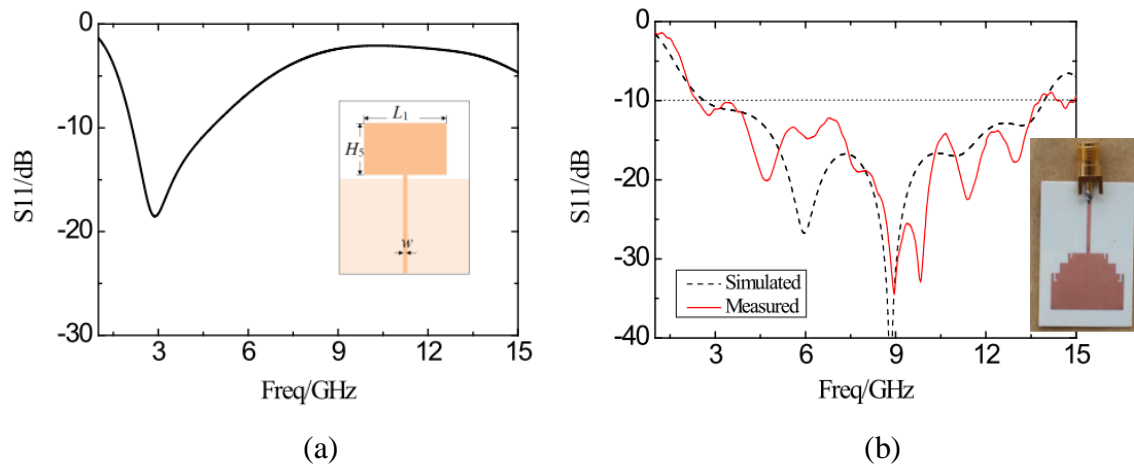


Figure I.6 : Coefficient de reflexion de l'antenne [18],

(a) sans les encoches, (b) avec les encoches

I.6.1.2. La technique fractale

Le périmètre d'une antenne joue un rôle crucial dans la détermination de sa fréquence de résonance. Une solution intéressante pour augmenter le périmètre d'une antenne est d'utiliser des formes fractales. Les formes fractales, telles que celles de Von Kock, de Hilbert et de Sierpinsky [9], permettent à d'obtenir un fonctionnement large bande. C'est vraiment fascinant de voir comment les mathématiques peuvent être appliquées à la conception des antennes.

Une antenne fractale avec un patch modifié intégrant des anneaux circulaires, a été proposée par [19], offrant une bande de fonctionnement simulée de 8,3 GHz, un gain simulé de 2,47 à 7,73 dB, et une efficacité de 98%. Le prototype construit, mesurant $40 \times 24,5 \times 1,6 \text{ mm}^3$, a démontré une bande passante d'impédance mesurée de 7,33 GHz, une efficacité de 92%, et un

gain de 6,52 dB, ce qui le rend idéal pour des applications telles que WLAN, WiMAX et les bandes C et X.

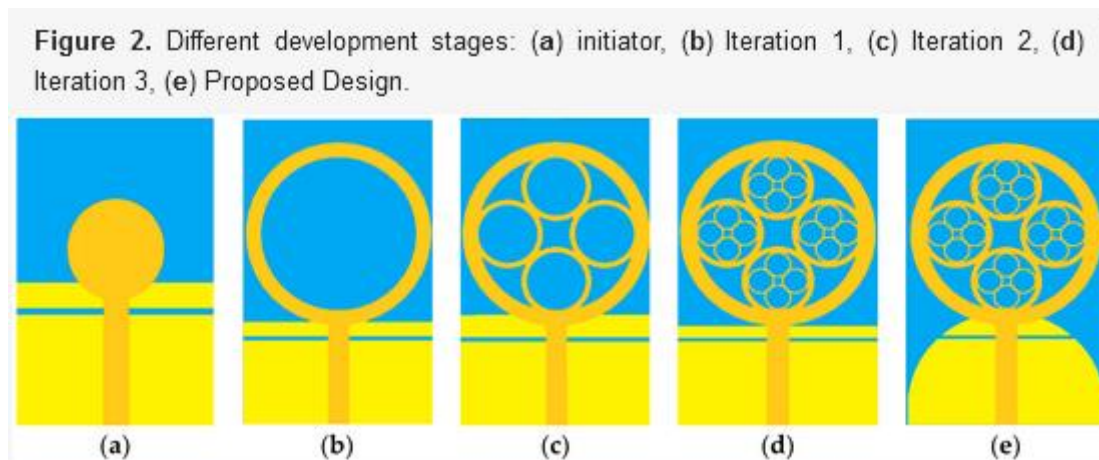


Figure I.7 : Antenne fractale circulaire ULB [19]

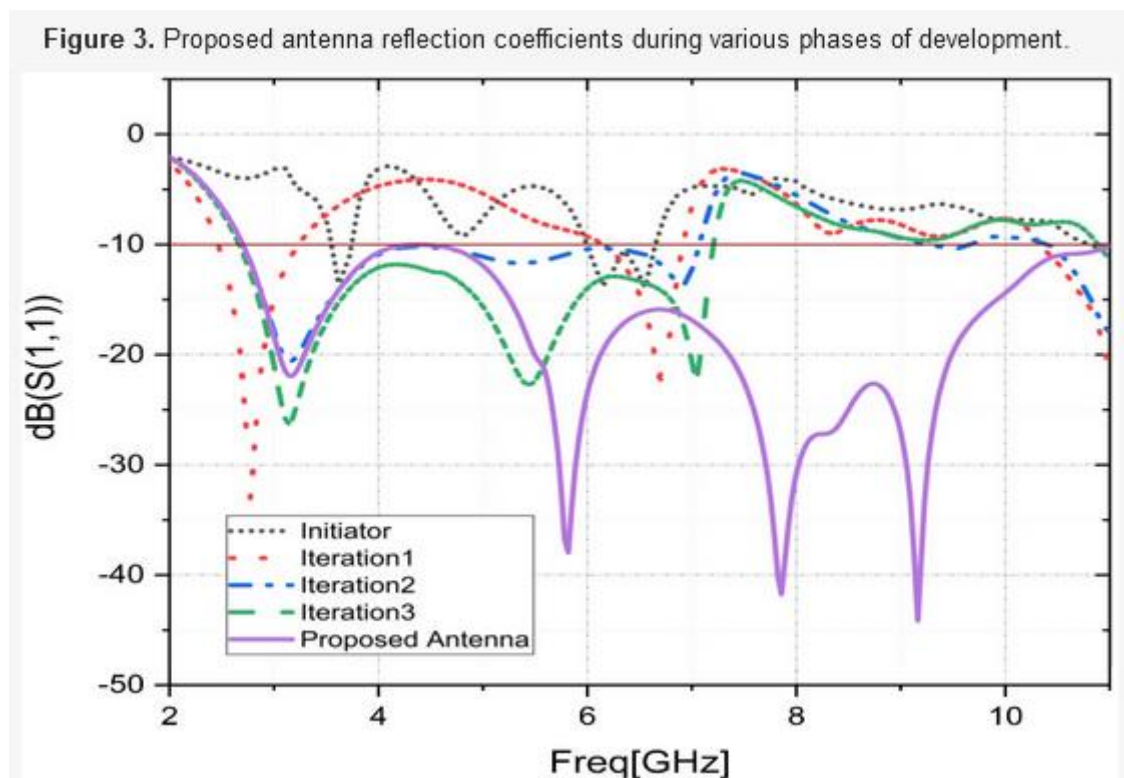


Figure I.8 : Coefficient de reflexion de l'antenne [19], pour plusieurs itérations

I.6.2. Technique de suppression des bandes [20]

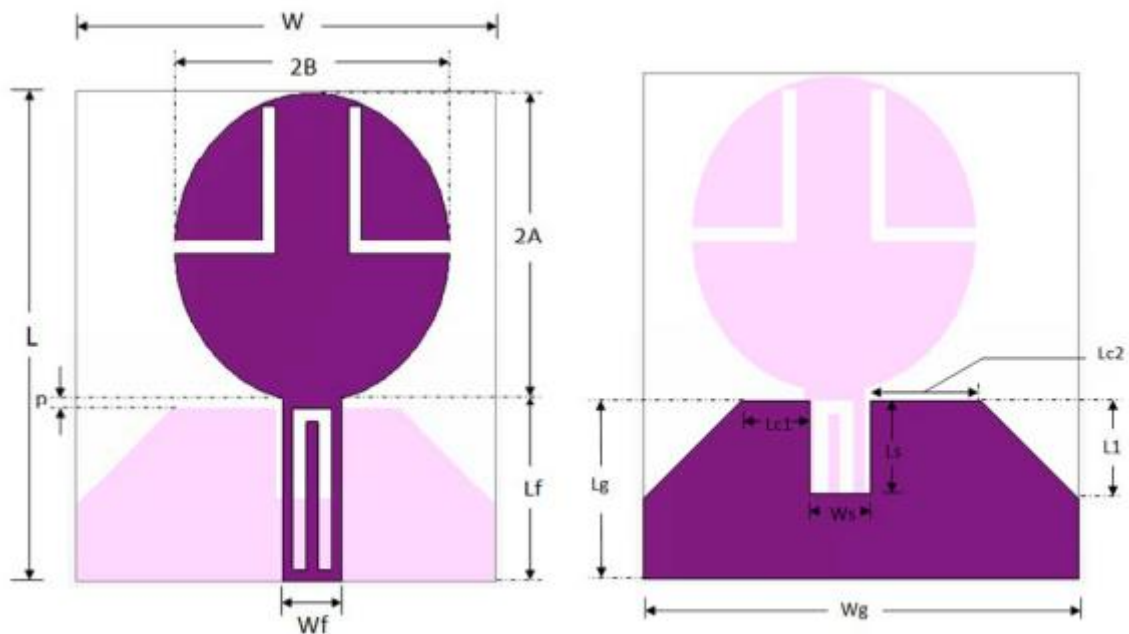
Dans la bande ULB (3,1 GHz à 10,6 GHz), de nombreux systèmes de communication à bande étroite fonctionnent en dessous de 10,6 GHz, pouvant ainsi interférer avec les systèmes ULB tels que le Wi-MAX (3,4 GHz - 3,69 GHz), l'IEEE WLAN 802.11a (5,15 GHz - 5,35 GHz, 5,725 GHz - 5,825 GHz) et le système sans fil HIPERLAN (5,45 GHz - 5,725 GHz). Pour éviter ces interférences, il est possible d'intégrer un filtre avec des caractéristiques d'arrêt de bande aux

antennes ULB, permettant de couper les fréquences interférentes. Dans la littérature, plusieurs conceptions d'antennes coupe-bande ou à bande rejetée ont été développées. Dans la section suivante, nous illustrons deux techniques : l'insertion des fentes et l'insertion des stubs parasites.

I.6.2.1. Insertion de fentes [20]

Les systèmes ULB utilisent de courtes impulsions de l'ordre de la picoseconde, répétées à une fréquence pouvant atteindre plusieurs giga impulsions par seconde, offrant ainsi une très large bande passante avec un niveau de puissance d'émission très faible. Cela permet aux systèmes ULB de coexister avec d'autres systèmes électroniques. Pour éviter certaines interférences avec les systèmes existants, certains concepteurs ont proposé d'utiliser l'antenne elle-même comme un filtre coupe-bande. En ajoutant des fentes ou des éléments parasites sur ou à proximité de l'élément rayonnant, il est possible de désadapter l'antenne sur une sous-bande spécifique, dont les caractéristiques (fréquence centrale et largeur) sont déterminées par le positionnement et les dimensions de ces éléments.

Dans la référence [20], les auteurs ont proposé un monopôle elliptique ULB, fonctionnant de 2,75 à 15,3 GHz avec deux bandes rejetées adaptées aux WiMAX (3-4 GHz) et WLAN (5-6 GHz). Ces deux bandes ont été coupées par l'insertion des fentes en forme de L sur le patch et une autre fente en forme de U inversé sur la ligne d'alimentation.



(a)

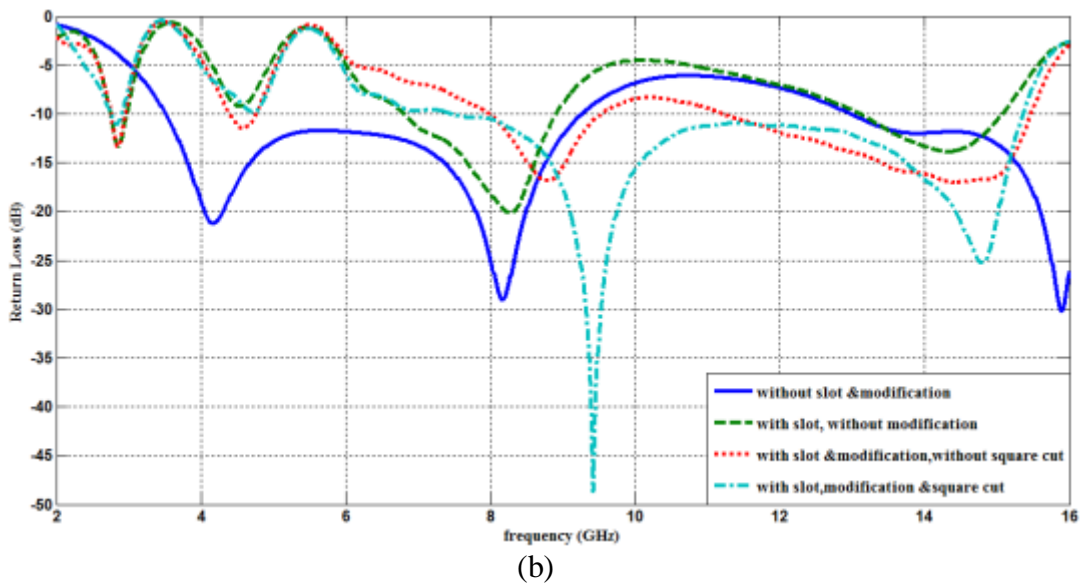
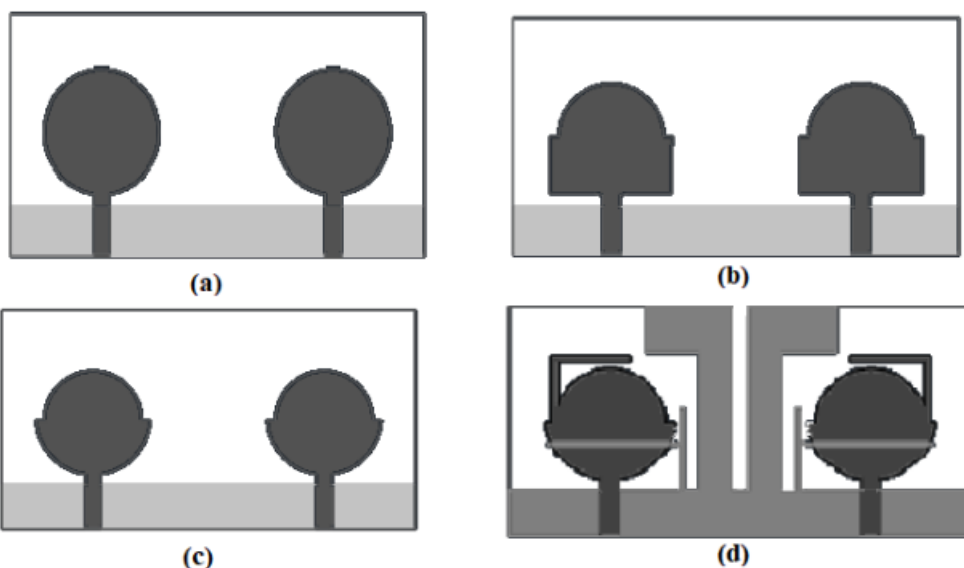


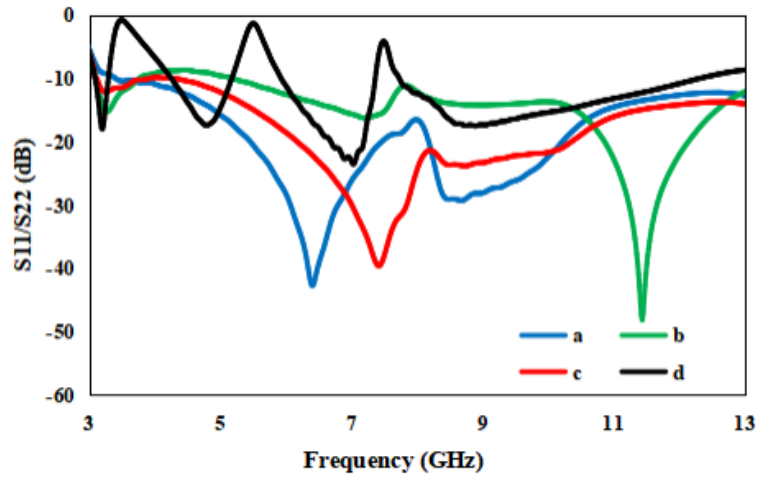
Figure I.9 : (a) Antennes ULB à deux bandes rejetées par utilisation de fentes [21]
 (b) Coefficient de réflexion S11

I.6.2.2. Insertion des stubs parasite [20]

Une autre méthode couramment utilisée, similaire à la précédente, consiste à insérer des stubs parasites agissant comme un filtre coupe-bande, créant ainsi une structure résonante. Cela provoque une modification brusque de l'impédance dans la bande filtrée. L'antenne proposée par [22] est un exemple, présentant une antenne MIMO 2x2 ULB, mesurant $18 \times 34 \text{ mm}^2$ et opérant dans une bande de 3,07 GHz à 12,40 GHz, avec trois bandes rejetées pour WiMAX, WLAN et les bandes X [22].



(a)



(b)

Figure I.10 : (a) Antenne MIMO ULB proposée par [22] avec trois bandes rejetées, (b) Coefficient de réflexion

I.7. CONCLUSION

Nous avons commencé notre chapitre en abordant la technologie ULB et leurs différentes caractéristiques, leurs avantages et inconvénients et leurs applications. Ensuite nous avons également examiné les antennes ULB en se concentrant spécifiquement sur les monopôles planaires ULB en technologie imprimée. Nous avons examiné en détail plusieurs aspects cruciaux, tels que l'extension de la bande passante et les techniques pour supprimer des bandes. Cette compréhension approfondie des concepts et des méthodes présentés jettera une base solide pour la poursuite de notre exploration dans les chapitres suivants.

Chapitre 2

LES ANTENNES MIMO ULB

II.1. INTRODUCTION

Récemment, les antennes ULB ont suscité un intérêt considérable en raison de leur large bande passante et de leur haut débit de données. Cependant, les antennes ULB présentent certains inconvénients liés à l'évanouissement par trajets multiples [22]. Pour pallier ce problème, des solutions efficaces telles que la technologie MIMO ont été proposées. En combinant la technologie ULB avec les antennes MIMO, il est possible non seulement d'améliorer les caractéristiques de l'antenne telles que la capacité du canal et le taux de transmission, mais aussi de surmonter les défis posés par l'évanouissement par trajets multiples [22].

L'objectif du chapitre est de présenter le système MIMO, leur principe, leurs caractéristiques et leurs avantages. Une analyse approfondie sera menée sur les antennes MIMO ULB, en examinant les défis de conception et l'évaluation de leurs performances.

II.2. LA TECHNOLOGIE MIMO

Apparus dans les années 90, les systèmes de communication MIMO (Multiple Input Multiple Output), introduits dans des articles de chercheurs des laboratoires Bell Labs (Fanchini, 1998) et (Tela tar, 1999) sont devenus un sujet de recherche majeur dans le domaine des communications sans fil. La technologie MIMO s'est rapidement intégrée aux normes de connectivité réseau sans fil les plus importantes, telles que le 802.11n et le 3GPP, en offrant une connectivité rapide et fiable. Les travaux de J. Fanchini (Fanchini, 1998) ont démontré que l'utilisation de multiples antennes offre un avantage en exploitant les trajets multiples, réduisant ainsi la probabilité d'erreurs de transmission. Le but étant d'augmenter le débit et la portée des réseaux sans fil, elles se basent sur l'utilisation de plusieurs antennes aussi bien du côté de l'émetteur que celui du récepteur. La mise en place d'une telle structure permet au système utilisé d'atteindre des débits importants et cela sans changer la largeur de la bande allouée au signal ni sa puissance d'émission.

La technologie MIMO permet de :

- Augmenter le débit linéairement avec le nombre d'antenne à la réception.
- Contrer l'évanouissement du canal.
- Minimiser la probabilité d'évanouissement et d'atténuation du signal.

II.3. ARCHITECTURE MIMO [23]

En raison du nombre d'antennes existant dans les différents dispositifs d'antennes, nous pouvons distinguer plusieurs configurations (systèmes). Cependant, ces architectures et particulièrement l'architecture MIMO, utilisent différentes fonctions de traitement du signal telles que la technique de combinaison, le codage spatio-temporel, le multiplexage spatial etc. Ceci afin de permettre une meilleure performance du dispositif antenne.

Lorsqu'un système MIMO comprend seulement, une seule antenne à l'émission et plusieurs antennes à la réception, il est nommé SIMO (Single Input Multiple Output). De même, lorsqu'il comprend plusieurs antennes à la réception et une seule antenne à l'émission, il est nommé MISO (Multiple Input Single Output).

Finalement, si les deux côtés comptent une antenne chacun, le système est dit SISO (Single Input Single Output)

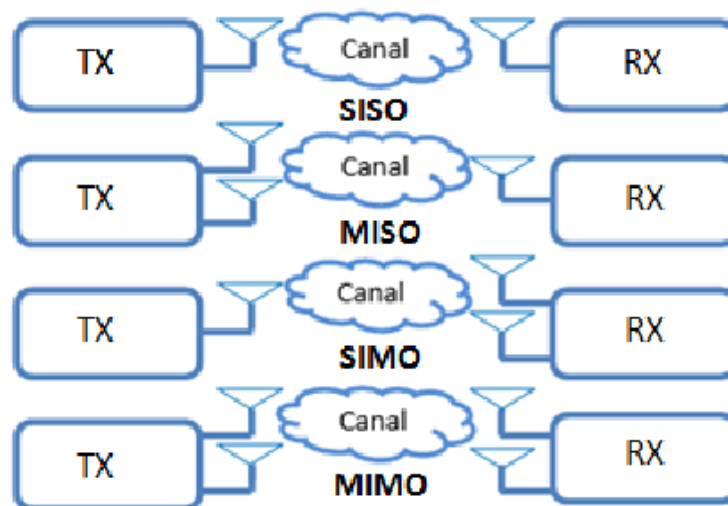


Figure II.1 : Schémas représentatifs du SISO, MISO, SIMO et MIMO

II.4. PRINCIPE DE LA TECHNIQUE MIMO [20]

La technologie MIMO utilise plusieurs antennes d'émission et de réception pour envoyer et recevoir des données. Les données transmises seront divisées en plusieurs sous-signaux et envoyées respectivement via plusieurs antennes de transmission. Plusieurs antennes de réception captent ces sous-signaux et les recombinent en données originales. Cette technologie permet de transmettre plusieurs flux de données sur la même bande de fréquences, augmentant ainsi l'efficacité spectrale et la capacité du système.

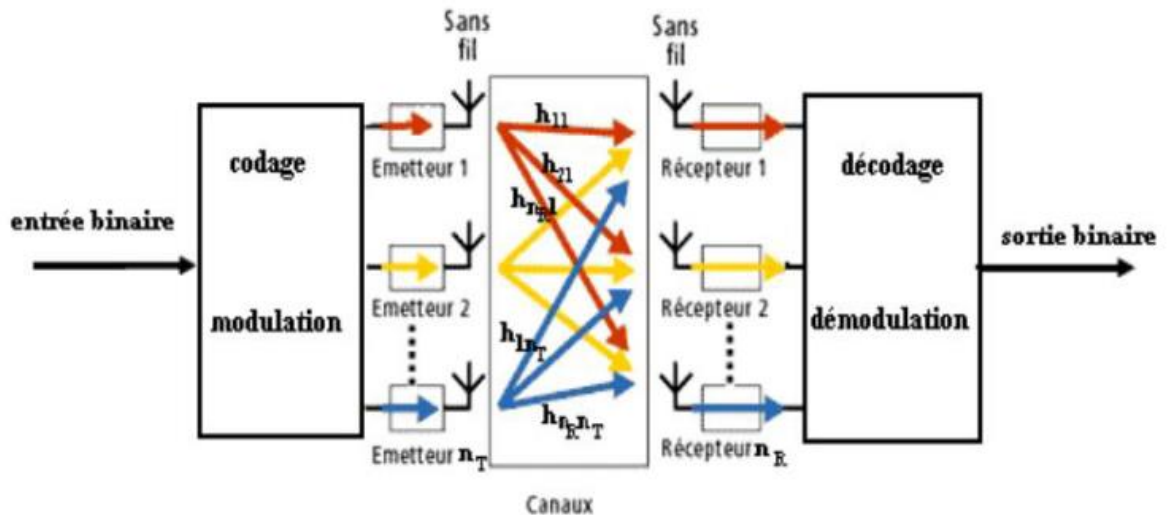


Figure II.2: Principe de la technique MIMO

II.5. CANAL MIMO [24]

La technologie MIMO est un concept important dans la technologie de communication sans fil. Il peut améliorer considérablement la capacité et la fiabilité des canaux sans fil et améliorer la qualité de la communication sans fil. La technologie MIMO a été largement utilisée dans divers systèmes de communication sans fil et est devenu un élément important de la technologie de communication sans fil moderne.

Une liaison multi capteurs est définie comme un système de transmission avec n_{TX} antennes d'émission et n_{RX} antennes de réception. En considérant une liaison en bande étroite, le canal de propagation, peut être modélisé par une matrice complexe H de dimension $n_{TX} \times n_{RX}$. Chaque élément h_{ij} de la matrice H représente l'affaiblissement complexe de transmission entre l'antenne de réception i et l'antenne d'émission j . Soit X le vecteur contenant les différents signaux appliqués aux antennes d'émission, soit Y le vecteur contenant les signaux reçus. En l'absence de bruit, le signal reçu s'exprime sous la forme:

$$Y = HX + n \quad (\text{II.1})$$

II.6. CAPACITE D'UN MIMO [25]

La notion de capacité de canal a été introduite par Claude Shannon en 1948. Dans le cas d'une liaison entre deux antennes, la capacité exprimée en bit/s/Hz est donné par l'équation :

$$C_{SISO} = \log_2(1 + \rho) \quad \text{bps.Hz}^{-1} \quad (\text{II.2})$$

Avec ρ le rapport signal à bruit en linéaire et C la capacité. Cette définition met en évidence deux propriétés fondamentales. D'une part, la capacité croît avec rapport signal à bruit. D'autre part, plus le rapport signal à bruit est important, plus l'accroissement de la capacité est coûteuse en terme de puissance.

L'accroissement de la capacité d'un système de communication MIMO repose sur la transmission simultanée des données sur les canaux virtuels précédents. Le nombre de canaux est directement lié au nombre de valeurs propres significatives de la matrice $H.H'$. Ainsi, plus le nombre de valeurs propres sera élevé, plus la capacité sera potentiellement augmentée.

On considère un système MIMO composé de m_t antennes à l'émission et de m_r antennes à la réception. On note x le vecteur de taille m_t contenant les symboles envoyés et y le vecteur contenant les m_r symboles reçus. La relation qui relie et s'écrit alors :

$$y = Hx + n \quad (\text{II.3})$$

Où H est la matrice du canal de taille $m_t \times m_r$ et n est le vecteur de bruit. La capacité du canal MIMO s'écrit alors :

$$C = \log_2(\det(I_{m_r} + \rho H Q H^*)) \quad (\text{II.4})$$

Dans cette formule I_{m_r} est la matrice identité, ρ est le rapport signal sur bruit et Q est la matrice de corrélation des symboles émis. Lorsque l'émetteur n'a aucune connaissance du canal, La capacité totale de la transmission MIMO est définie comme la somme de la capacité de chaque canal virtuel. La capacité maximale atteignable, a pour expression :

$$C = \sum_{i=1}^{m_t} \log_2(1 + \frac{\rho}{m_t} \lambda_i) \quad (\text{II.5})$$

λ_i : Sont les valeurs propres de la matrice H^*H .

Lorsque l'émetteur connaît le canal, la capacité maximale possible est donnée par l'algorithme de water-filling.

II.7. LES AVANTAGES DE LA TECHNOLOGIE MIMO [26]

Lorsqu'un signal radio est réfléchi, plusieurs copies du signal sont produites, chacune étant un flux spatial. La technologie MIMO permet à plusieurs antennes de transmettre et de recevoir plusieurs flux spatiaux en même temps et peut distinguer les signaux envoyés vers ou depuis différentes directions spatiales. L'application de la technologie MIMO fait de l'espace une ressource qui peut être utilisée pour améliorer les performances et augmenter la couverture des systèmes sans fil. Augmenter le débit de données du système pour la même puissance rayonnée

totale et la même largeur de bande de canal. Dans la section suivante, nous citons les cinq principaux avantages du MIMO.

II.7.1. Augmenter la capacité du canal

L'utilisation des systèmes MIMO est un moyen efficace d'améliorer l'efficacité spectrale. Plusieurs flux spatiaux peuvent être envoyés et reçus simultanément entre le point d'accès MIMO et le client MIMO. La capacité du canal peut augmenter linéairement à mesure que le nombre d'antennes augmente. Par conséquent, le canal MIMO peut être utilisé pour augmenter de manière exponentielle la capacité du canal sans fil. Sans augmenter la bande passante et la puissance d'émission de l'antenne, l'utilisation du spectre peut être augmentée de façon exponentielle.

II.7.2. Améliorer la fiabilité des canaux

Grâce au gain de multiplexage spatial et au gain de diversité spatiale fournis par le canal MIMO, plusieurs antennes peuvent être utilisées pour supprimer l'évanouissement du canal. L'application de systèmes multi-antennes permet de transmettre simultanément des flux de données parallèles, ce qui peut considérablement surmonter l'évanouissement des canaux et réduire le taux d'erreur sur les bits.

II.7.3. Améliorer les performances anti-interférences

La technologie MIMO peut réduire les interférences entre les utilisateurs et améliorer les performances anti-interférences du réseau grâce à plusieurs antennes et à la technologie de séparation spatiale.

II.7.4. Améliorer la couverture

La technologie MIMO peut améliorer la couverture du système car la technologie MIMO peut utiliser plusieurs antennes pour la transmission de données, améliorant ainsi la distance de transmission du signal et la capacité de pénétration. Pendant la transmission, si certaines antennes sont affectées par un blocage ou une atténuation, d'autres antennes peuvent toujours continuer à transmettre des données, améliorant ainsi la couverture du signal.

II.7.5. Adaptez-vous à divers environnements de canaux

La technologie MIMO peut s'adapter à une variété d'environnements de canaux. En effet, la technologie MIMO peut utiliser plusieurs antennes pour la transmission de données, s'adaptant ainsi aux changements dans divers environnements de canaux. Au cours du processus de

transmission, différents environnements de canaux peuvent avoir des impacts différents sur la transmission du signal, tels que l'effet multi trajet, l'effet Doppler, etc. La technologie MIMO peut s'adapter aux changements dans divers environnements de canaux en utilisant plusieurs antennes.

II.8. ANTENNES MIMO ULB [27]

Récemment, il y a une demande pour augmenter le débit de données des systèmes de communication sans fil existants. L'application de techniques de diversité, supposant le plus souvent deux antennes dans un terminal mobile, peut améliorer le débit et la fiabilité des données sans sacrifier le spectre supplémentaire ni la puissance transmise dans des environnements à forte diffusion. Les systèmes MIMO ULB peuvent augmenter d'avantage la capacité de canal par rapport aux systèmes MIMO classiques pour les applications à bande étroite. Pour lutter contre le problème d'évanouissement dû à la propagation par trajets multiples dans un système de communication sans fil ULB d'intérieur (Indoor), un système d'antenne en diversité ULB est un candidat prometteur. Cependant, pour qu'une antenne MIMO soit mise en œuvre dans un dispositif portable multifonctionnel, les défis suivants doivent être pris en compte lors de la conception de ces antennes.

II.9. DEFIS DE CONCEPTION DES SYSTEMES D'ANTENNE MIMO ULB [27]

Dans un système MIMO, plusieurs antennes émettent et reçoivent simultanément des flux de données, ce qui augmente la capacité et la robustesse du réseau. L'amélioration du couplage entre les éléments d'un système MIMO (Multiple Input Multiple Output) est essentielle pour augmenter l'efficacité des communications sans fil. La disposition des antennes est cruciale : elles doivent être placées de manière à minimiser les interférences tout en maximisant l'espacement. Des réseaux d'adaptation d'impédance sont utilisés pour ajuster chaque antenne à son environnement, réduisant ainsi les pertes de signal. Des matériaux avancés, comme les diélectriques et les métas matériaux, aident à contrôler la propagation des ondes et à limiter les interférences. Enfin, des algorithmes de traitement du signal numérique compensent les effets de couplage et optimisent les schémas de transmission en temps réel. Grâce à ces stratégies, les systèmes MIMO deviennent plus performants, capables de supporter des débits de données plus élevés et de fournir des communications plus fiables, même dans des environnements complexes.

Pour optimiser mieux le système MIMO, plusieurs challenges ont été employés lors de la conception des antennes MIMO ULB.

II.9.1. Isolation des antennes MIMO

Le couplage mutuel entre antennes est une préoccupation majeure lors de la conception de systèmes MIMO. Le couplage mutuel influe non seulement sur l'efficacité de l'antenne, mais également sur la corrélation. Les antennes d'un système MIMO doivent être isolées les unes des autres. L'objectif typique de la conception est d'avoir au moins 20 dB d'isolation entre les lignes d'antenne (définie comme une perte d'insertion entre deux lignes d'antenne).

Il y a plusieurs façons de procéder. La méthode classique consiste à utiliser des boîtiers de blindage. Une méthode plus sophistiquée que le blindage des vias/pistes consiste à utiliser des structures à bande interdite électromagnétique, ce qui est particulièrement indiqué pour les systèmes à haute fréquence [28]

Le travail de N. KUMAR et al. [28] présente une nouvelle structure compacte EBG uni planaire pour améliorer l'isolation dans le plan H d'un système d'antenne MIMO 2×2 pour le WLAN (5,8 GHz). La structure EBG, gravée sur le plan de masse, réduit le couplage de 5,6 dB et permet une distance centre à centre de $0,45\lambda_0$. Une bande métallique entre les patches rayonnants améliore l'isolation de 16,2 dB (Figure II.3).

II.9.2. Adaptation de la bande passante ULB

L'affaiblissement de retour (S_{11} en dB) doit être inférieur à -10 dB, de 3,1 à 10,6 GHz, de sorte que la largeur de bande d'impédance couvre l'intégralité de l'ULB. L'amélioration simultanée de la largeur de bande d'isolation et d'impédance dans une structure d'antenne unique est l'un des défis les plus difficiles rencontrés dans la conception d'un système d'antenne MIMO ULB.

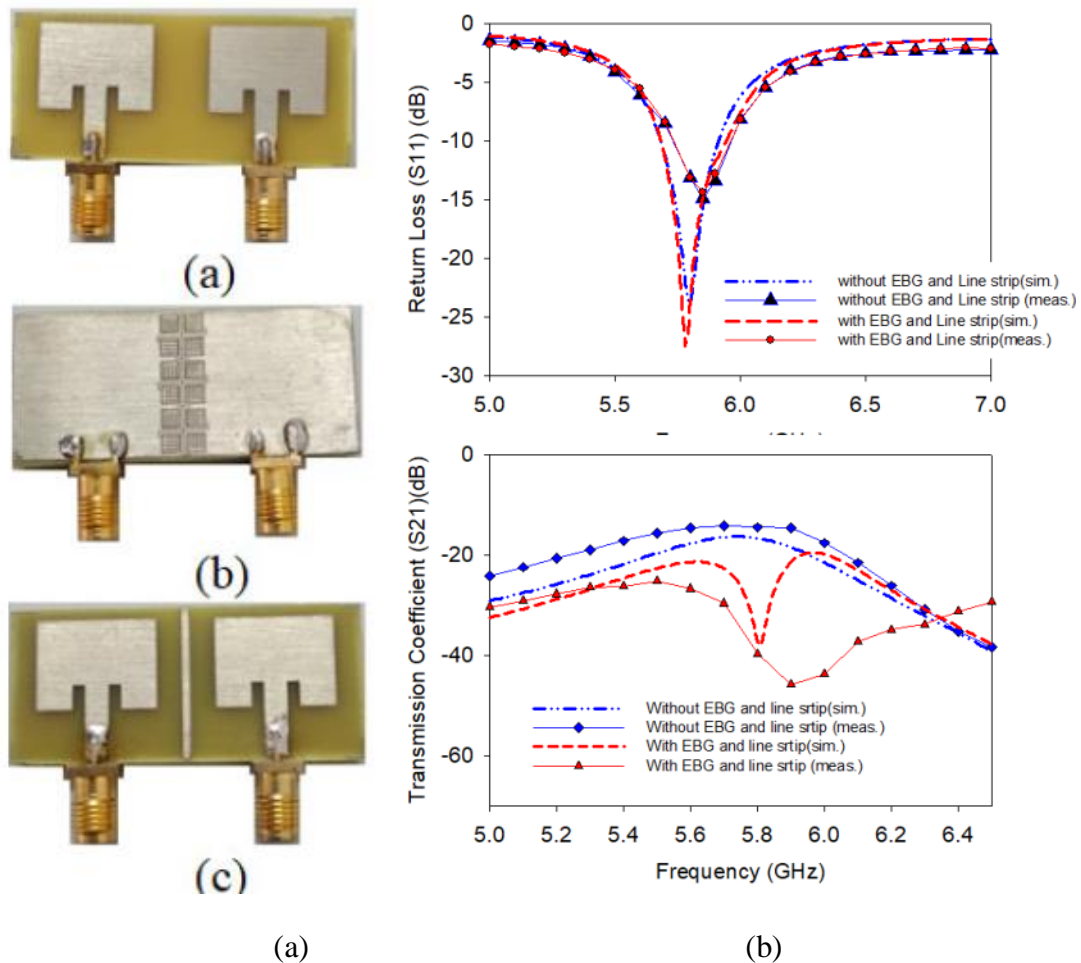


Figure II.3 : (a) Antenne proposé par [28] avec EBG structure, (b) Coefficient de réflexion S11 et de transmission S21 de l'antenne MIMO proposée

II.9.3. Miniaturisation

Récemment, MIMO a été adapté aux téléphones mobiles, qui utilisent diverses technologies de communication telles que WCDMA, WiMAX, WLAN et ULB afin de réaliser une transmission de données à haut débit. De toute évidence, une telle application nécessite une antenne MIMO large bande compacte en raison de l'espace limité disponible dans les périphériques sans fil.

Récemment, les structures au sol défectées (DGS) ont été introduites pour améliorer les caractéristiques de performances des antennes, telles que la réduction de taille, l'amélioration du gain et la largeur de bande passante, et sont également utilisées pour réduire le couplage mutuel entre les éléments d'antenne. Un exemple d'une antenne MIMO ULB compacte, miniaturisée grâce à une structure de masse défectueuse (DGS), a été proposé par V. K. Gupta [29].

L'antenne, qui comprend deux patches carrés inversés alimentés par une ligne micro-ruban et gravés sur un substrat, mesure 48 x 36 x 1,57 mm³.

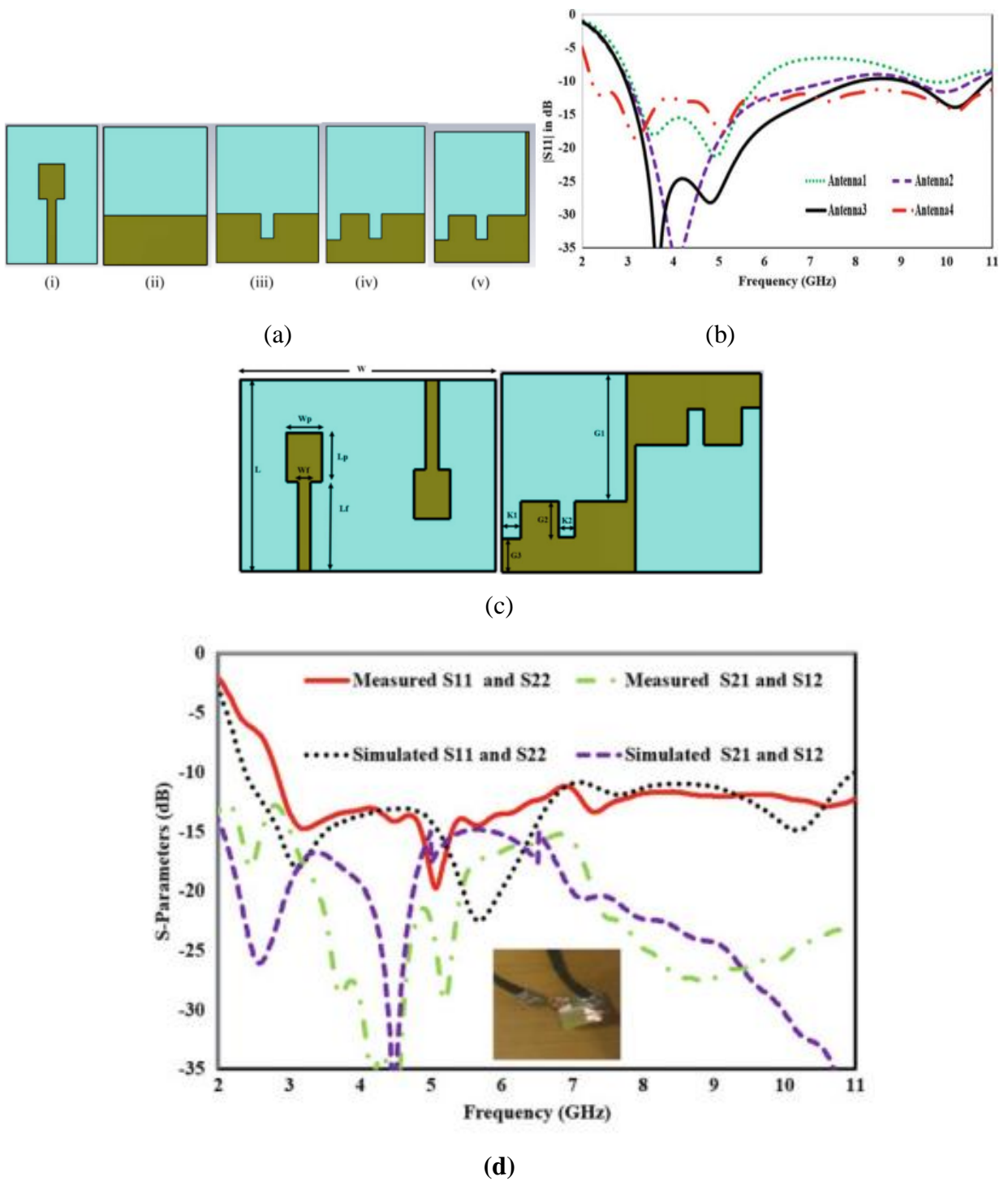


Figure II.4 : (a) Antenne avec DGS, (b) Coefficient de réflexion, (c) Antenne MIMO 2x2, (d) Paramètres S_{ij} [29]

II.10. PERFORMANCES DES ANTENNES MIMO ULB [30]

II.10.1. Couplage mutuel

Quand deux antennes sont près l'une de l'autre, et que l'une ou les deux sont excitées, une partie de l'énergie a tendance à se dissiper dans l'autre antenne et plus particulièrement dans son impédance de charge. Cet échange d'énergie est une conséquence du couplage mutuel. Il dépend des caractéristiques de rayonnement des antennes, de la distance entre les antennes, de leur orientation et de leur nature.

II.10.2 Efficacité totale

Dans les systèmes de communication entre mobiles, le diagramme de rayonnement de l'antenne joue très souvent un rôle mineur, c'est surtout l'efficacité totale de l'antenne (ou gain moyen (MG) de l'antenne) qui est le paramètre le plus important. Elle nous renseigne sur les performances de la liaison sans fil. Ceci est aussi valable pour les systèmes SIMO (diversité) et MIMO. L'efficacité totale d'une antenne est définie comme étant le rapport entre la puissance rayonnée et la puissance incidente sur son port d'alimentation. Elle prend en compte aussi bien les pertes de réflexion dues à la désadaptation entre le câble coaxial et le port d'alimentation de l'antenne que les pertes ohmiques et diélectriques de l'antenne. Elle peut être calculée à partir de l'intégration des diagrammes de rayonnement dans tout l'espace (II.6) ou bien à partir des paramètres S et de l'efficacité rayonnée η_{ray} de l'antenne (II.7).

$$\eta_{tot} = MG = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^\pi G_\theta(\theta, \varphi) + G_\varphi(\theta, \varphi) \sin\theta d\theta d\varphi}{4\pi} \quad (II.6)$$

Où $G_\theta(\theta, \varphi)$ et $G_\varphi(\theta, \varphi)$ sont les gains des antennes dans les directions θ et φ .

$$\eta_{tot} = \eta_{tot}(1 - |S_{11}|^2) \quad (II.7)$$

II.10.3. Coefficient de corrélation d'enveloppe (ECC : Enveloppe Corrélation Coefficient)

Le coefficient de corrélation d'enveloppe (Enveloppe Corrélation Coefficient (ECC)) est considéré comme un indicateur clé de la performance. Une valeur faible d'ECC entre deux ports signifie une diaphonie faible lors d'une opération simultanée. Cela signifie également une meilleure performance en termes de diversité dans le cas d'une utilisation en MIMO. L'ECC peut être calculé à partir des diagrammes de rayonnement de l'antenne par la formule (II.8).

$$\rho_{ij} = \frac{|\vec{F}_i^* \vec{F}_j^* d\Omega|^2}{\iint |\vec{F}_i|^2 d\Omega \iint |\vec{F}_j|^2 d\Omega} \quad (II.8)$$

où $d\Omega = \sin(\theta) d\theta d\phi$ et F_i est le champ lointain rayonné par le port numéro i . Dans le cas d'antennes sans perte, et en supposant que les ondes entrantes soient uniformément réparties, le ECC peut être calculé à partir des paramètres S de l'antenne à l'aide de la formule (II.9), qui se simplifie dans le cas d'une antenne à deux ports, à la formule (II.10).

$$\rho_{ij} = \frac{\sum |S_{11} \times S_{ij}|^2}{\prod_{m=ij} (1 - \sum |S_{nm}|^2)} \quad (\text{II.9})$$

$$\rho_{ij} = \frac{|S_{11} \times S_{12} + S_{21} \times S_{22}|^2}{(1 - |S_{11}|^2 - |S_{12}|^2) \times (1 - |S_{21}|^2 - |S_{22}|^2)} \quad (\text{II.10})$$

II.10.4. Gain de Diversité (DG)

Une approximation du gain de diversité par sélection dans le cas d'une antenne à 2 ports i , j , à un niveau de probabilité d'interruption de 1% peut être calculée à partir de l'ECC par la formule (I.11):

$$G_{ij} = 10 \sqrt{(1 - |\rho_{ij}|^2)} \quad (\text{II.11})$$

Où, l'hypothèse des ondes entrantes uniformément réparties n'est pas toujours garantie, ni l'hypothèse que les antennes sont sans perte.

Ce gain de diversité n'est vraiment significatif que si toutes les antennes du système ont une efficacité totale égale à 100% ce qui est loin d'être évident en pratique. Ainsi le gain en diversité réaliste d'un système (DSG : Gain de Diversité du système) doit également prendre en compte l'efficacité totale de chaque antenne. En supposant que toutes les antennes du système sont identiques, le DSG sera alors :

$$DSG = \eta_{tot} \times DG \quad (\text{II.12})$$

II.11. CONCLUSION

Pour conclure ce chapitre, nous avons examiné en détail les principes, les caractéristiques et les avantages des systèmes MIMO. Nous avons discuté de l'intégration de la technologie MIMO avec les antennes ULB comme une solution efficace pour améliorer la capacité du canal et le taux de transmission, tout en surmontant les limitations de l'évanouissement par trajets multiples dans les systèmes ULB. Nous avons également exploré les défis de conception spécifiques aux antennes MIMO ULB, notamment l'isolation entre les antennes, l'adaptation de la bande passante et la miniaturisation. En conclusion, nous avons présenté les paramètres essentiels pour l'évaluation d'un système MIMO, tels que le gain de diversité (DG) et le coefficient de corrélation d'enveloppe (ECC).

Chapitre 3

**CONCEPTION ET ANALYSE D'UNE
ANTENNE MIMO 4×4 ULB A DEUX
BANDES REJETEES**

III.1. INTRODUCTION

Avec l'essor des nouveaux services de communication sans fil, la demande de solutions ultra-large bande à faible coût et de petite taille augmente considérablement. Les antennes ULB sont constamment demandées car une seule antenne large bande peut être utilisée pour diverses applications. Cependant, en raison de l'environnement multi trajets, les antennes ULB sont confrontées au problème de l'évanouissement du signal. Pour surmonter cette difficulté, les antennes à entrées et sorties multiples ultra-large bande (ULB-MIMO) sont envisagées.

Dans ce chapitre, nous proposons une structure d'antenne MIMO ULB 4×4 avec deux bandes rejetées (WiMAX et WLAN). L'antenne de base est un monopôle planaire de forme circulaire modifié pour mieux s'adapter au spectre ULB. Le rejet des deux bandes est réalisé en insérant une fente en forme de U sur le patch et un stub parasite en forme de T sur son bord supérieur. Pour minimiser le couplage, les quatre antennes ULB sont disposées orthogonalement les unes par rapport aux autres, dans la première configuration. Pour améliorer l'isolation entre les antennes et réduire le couplage mutuel, un stub en forme de X est inséré du côté du plan de masse, complétant ainsi la version finale de l'antenne. Les résultats de simulation sont obtenus à l'aide du logiciel de simulation électromagnétique CST MWS (Computer Simulation Technology Micro Wave Studio). Enfin, un prototype d'antenne est réalisé pour valider nos résultats.

III.2. PRESENTATION DU LOGICIEL MICROWAVE STUDIO DE CST

CST STUDIO est une entreprise allemande créée en 1992. À la suite de diverses études, la première version de CST Micro-wave studio est apparue en 1998. La conception magnétique est l'objectif de cette dernière. Elle permet d'analyser rapidement et de manière précise des appareils à haute fréquence tels que les antennes, les filtres, etc. CST Micro-wave studio est un outil spécialisé pour la simulation en 3D des composants à haute fréquence basé sur la résolution des équations de MAXWELL suivant la technique des intégrales finies (FIT, Finit Intégration Technique). Comme tous les simulateurs 3D, l'avantage de cet outil est la possibilité de traiter toutes sortes de structures homogènes quelle que soit la technologie employée. [31]

III.2.1. L'interface CST

Comprend une fenêtre principale divisée en différentes parties (Figure III.1). La barre d'outils est située au sommet de l'interface et représente un ensemble de raccourcis depuis la barre de menu.

Sur le côté gauche de l'interface, on trouve l'arbre de navigation qui permet d'accéder aux éléments structuraux et aux résultats de simulation.

Le planning de travail est situé au centre de l'interface.

- La liste des paramètres comprend tous les paramètres employés lors de la simulation.
- Un signal de réussite pour chaque étape simulée, sinon, un signal d'erreur.

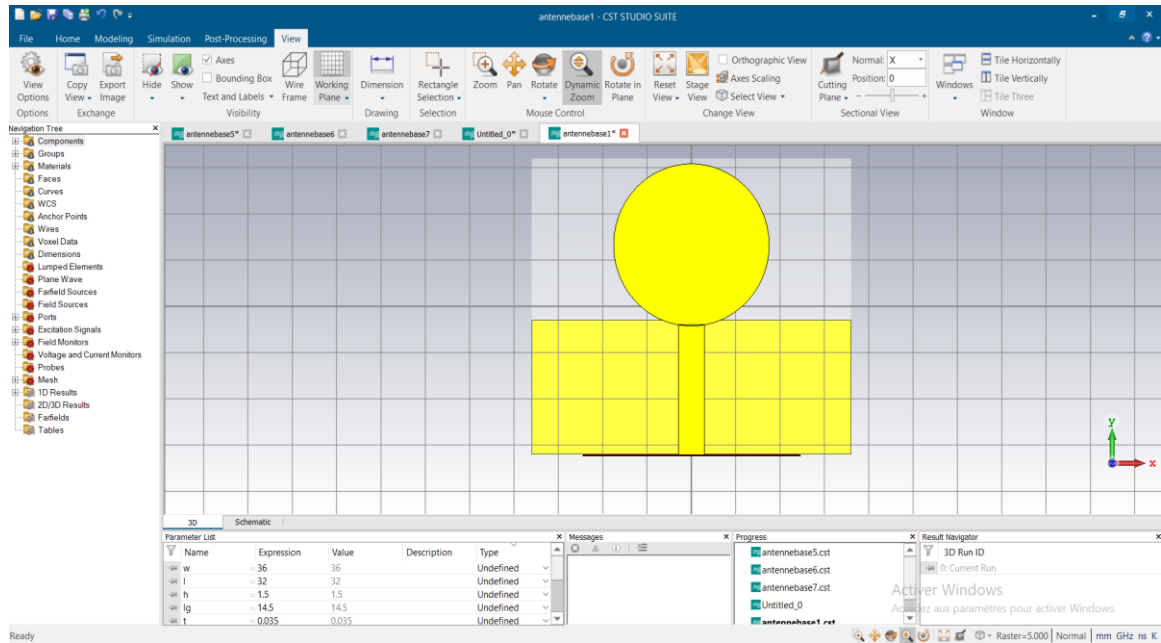


Figure III.1: L'interface graphique de logiciel CST Micro wave studio 2019

III.2.2. Avantages du logiciel CST

- La capacité de traiter avec précision et rapidité toutes les structures homogènes et inhomogènes (antennes, structures planaires, structures multicouches, filtres et coupleurs)
- Permet de calculer divers paramètres tels que : paramètres S, diagramme de rayonnement, distribution du courant...
- Le traitement s'étend sur une large plage de fréquences, contrairement à d'autres simulateurs.

III.3. CONCEPTION D'UNE ANTENNE ULB AVEC DEUX BANDES REJETEES

III.3.1. Etapes de conception

L'antenne de départ est une antenne circulaire avec un plan de masse partiel, qui est utilisée dans plusieurs applications ULB pour sa simple géométrie et la largeur de sa bande. La figure III.2 représente les étapes de conception de l'antenne de départ, elle est alimentée par une ligne Micro ruban de longueur L_f et de largeur W_f , son impédance est de 50Ω . Le substrat utilisé

de type FR-4 ($\epsilon_r=4.3$, $\tan(\delta)=0.025$), d'épaisseur H. Les dimensions de l'antenne sont illustrées par le tableau III.1.

W_s	L_s	H	L_g	T	W_f	l_f	R_r	g_1	W_{ge}
32.5	32.5	1.5	14.5	0.035	2.9	14	8.75	1	31

Tableau III.1 : Paramètres de l'antenne de départ

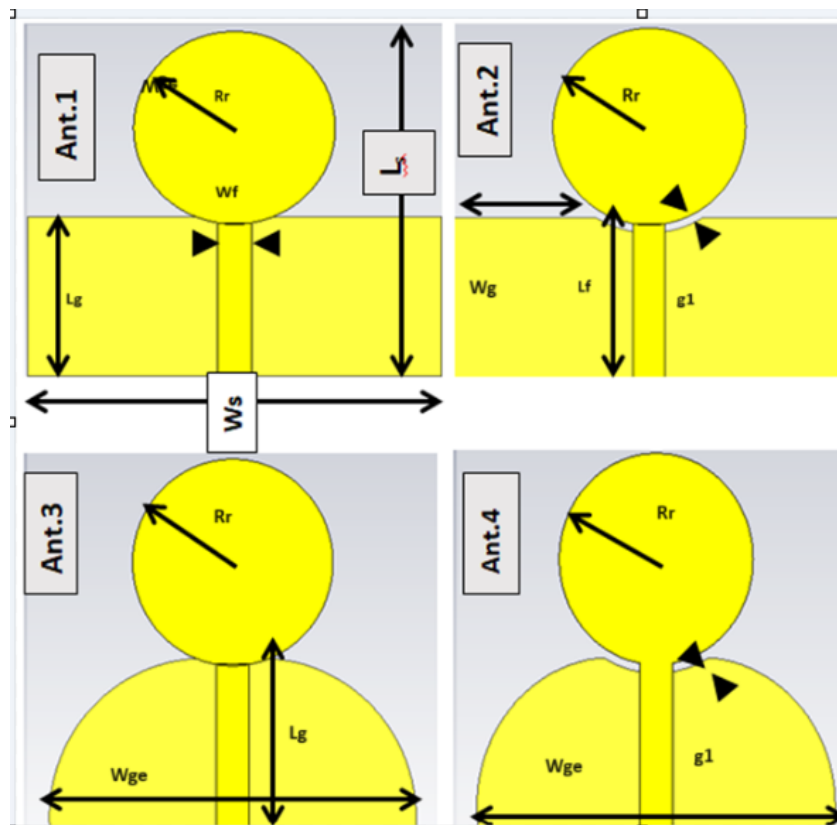


Figure III.2 : Etape de conception de l'antenne de départ

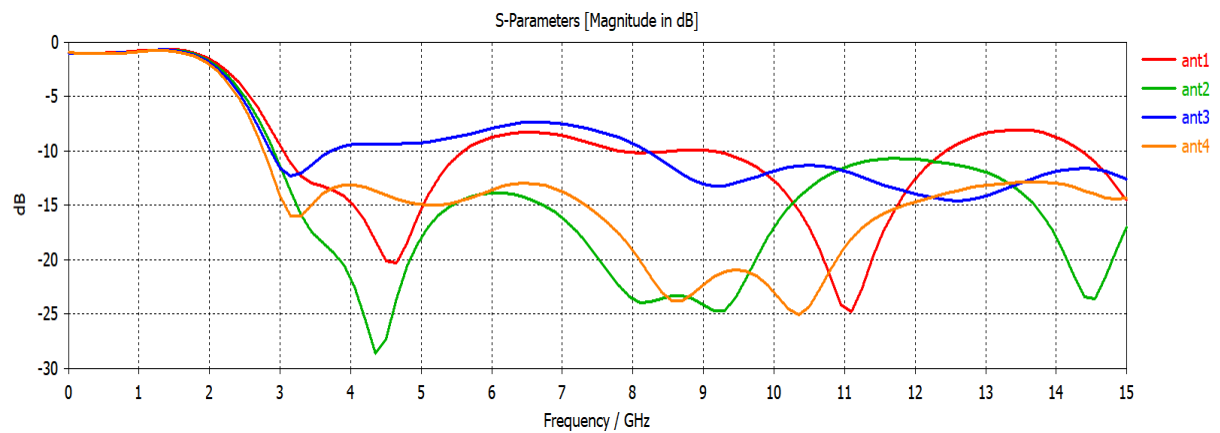


Figure III.3 : Les coefficients de réflexion S11 de quatre antennes

La structure a été optimisée et simulée par le logiciel CST. La figure III.3 représente le coefficient de réflexion S11 pour quatre configurations (Ant1, Ant2, Ant3, Ant4). Ant.2 a une fente en arc encastrée dans le bord moyen-supérieur du plan de masse, tandis que le plan de masse d'Ant.3 est modifié pour prendre des formes semi-elliptiques. En raison de la fente d'arc encastrée, Ant.2 et Ant.4 ont une meilleure adaptation d'impédance sur une large bande ($VSWR \leq 2$) qu'Ant.1 et Ant.3, respectivement. En raison du couplage avec le bord inférieur du radiateur supérieur, une petite fente dans le plan de masse est essentielle pour exciter la résonance intermédiaire de l'ULB. Ainsi, une large bande de fréquences peut être couverte par de telles structures. Ant.4 couvre une très large bande (≥ 2.8 GHz) où la bande passante est étendue par rapport aux Ant1, Ant2 et Ant3, couvrant ainsi toute la gamme ULB.

III.3.2. Antenne de base

Pour améliorer encore l'adaptation avant de mettre en œuvre une technique de rejet de bande sur l'antenne, la partie supérieure du patch circulaire est modifiée en tronquant une partie du bord supérieur ainsi que deux parties à gauche et à droite. Les valeurs optimisées de L_a et L_b sont : 9.5 mm et 6 mm, respectivement.

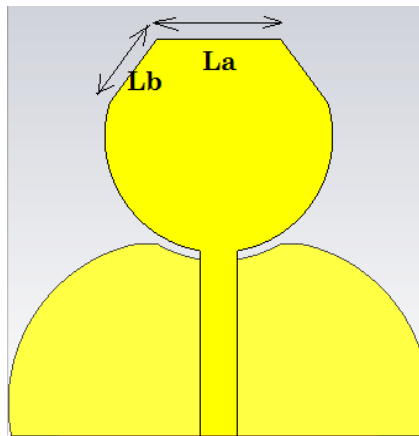


Figure III.4 : Antenne de base

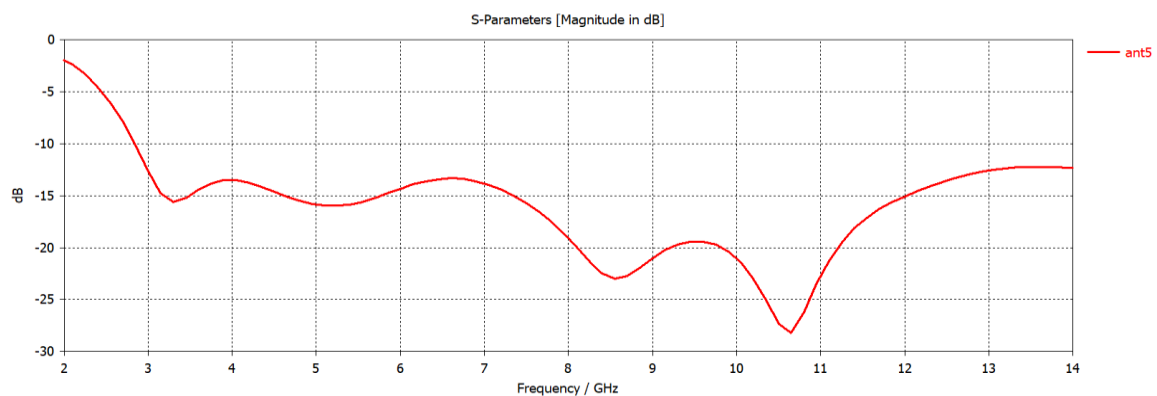


Figure III.5 : S11 de l'antenne de base

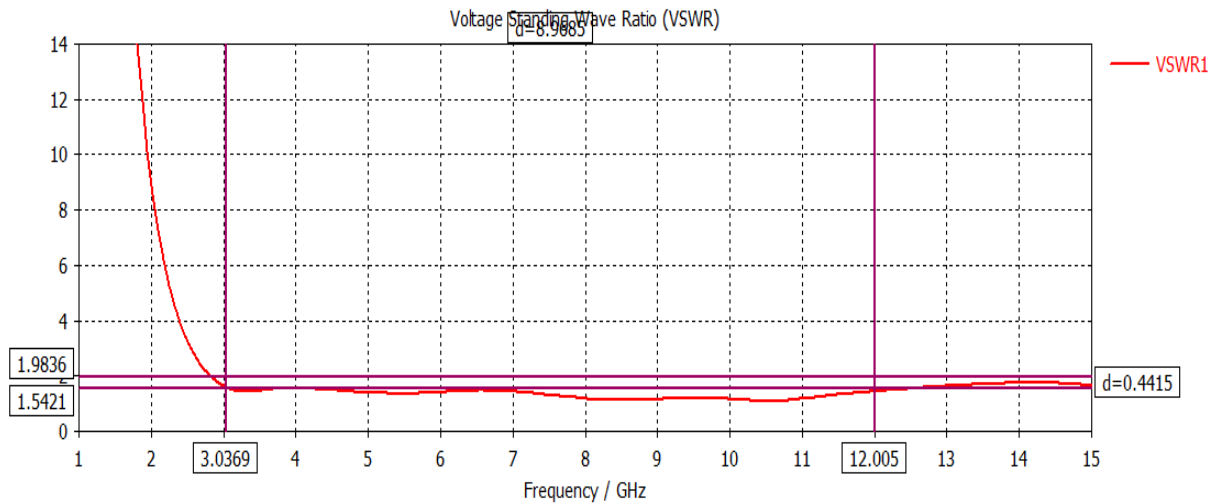


Figure III.6 : VSWR de l'antenne de base

L'antenne de base présente de bonnes performances avec une adaptation d'impédance ($S_{11} < -10$ dB) à partir de 2,8 GHz, correspondant bien à un $VSWR \leq 1,54$ sur l'ensemble de la bande ULB [3,1 GHz - 10,6 GHz].

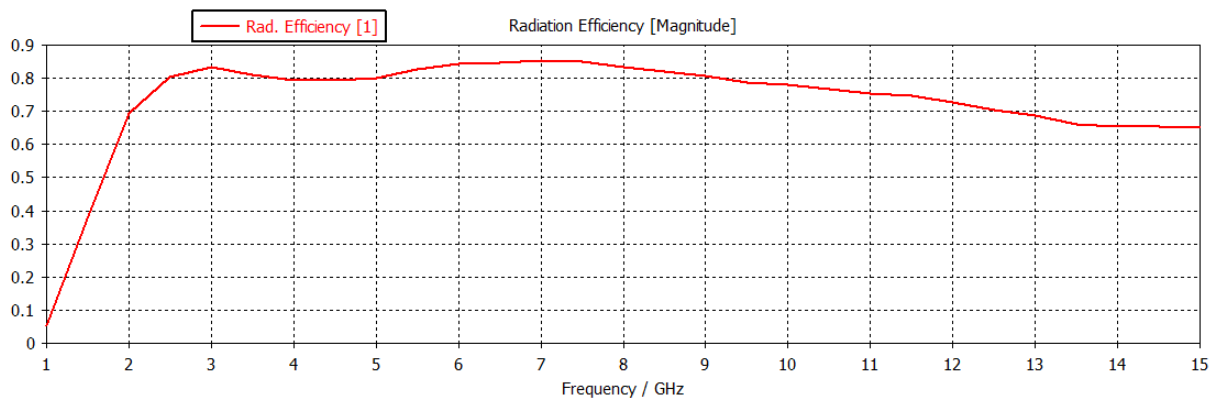


Figure III.7 : Efficacité de rayonnement de l'antenne de base

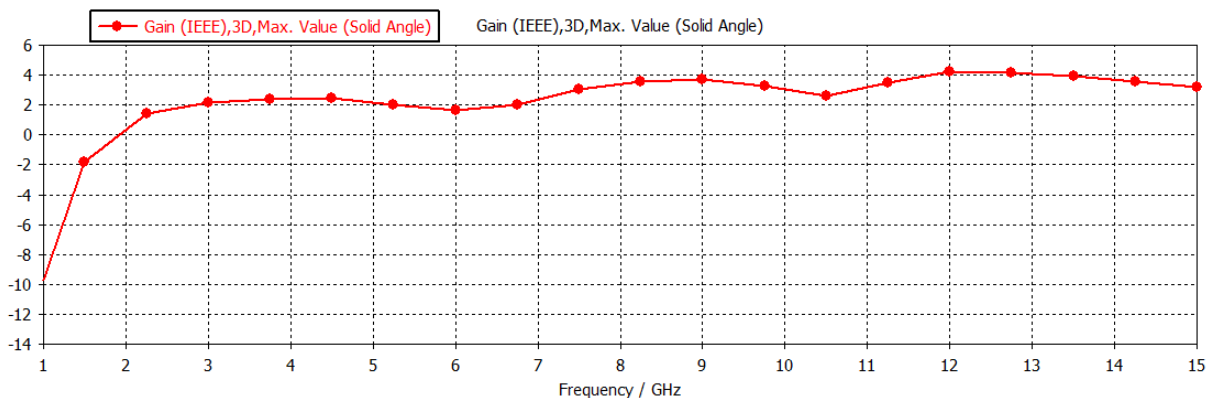


Figure III.8 : Gain de l'antenne de base

La figure III.5 montre une efficacité de rayonnement entre 85% et 75% sur presque toute la bande ULB. Le gain de l'antenne en fonction de la fréquence est représenté par la figure III.8. On observe un gain varie entre 2 et 3.8 dB sur toute la bande ULB.

D'après les résultats précédents, nous pouvons conclure que l'antenne de base est bien adaptée aux applications ULB.

III.3.2.1. Rejection de la bande WiMAX (3.3–3.6 GHz; 5.25–5.825 GHz)

Après avoir conçu l'antenne ULB bien adaptée, le rejet de la bande WiMAX (3.3-5.825GHz) est réalisé en insérant un stub parasite en forme de T sur le bord supérieur du patch. La résonance rejetée (f_{rr1}) est contrôlée en ajustant la longueur des talons (L_{stub}). L'équation (III.1) montre la relation de f_{rr1} avec L_{stub} .

$$f_{rr1} = \frac{c_0}{4L_{stub}\sqrt{\epsilon_e}} \quad (III.1)$$

Où $\epsilon_e = (\epsilon_r + 1)/2$: constante diélectrique effective

D'après l'équation (III.1), la longueur $L_{stub} = 13.16\text{mm}$ pour $f_{rr1} = 3.5\text{GHz}$. Par contre, la longueur optimisée est égale 11.96mm pour la rejection de la bande WiMAX.

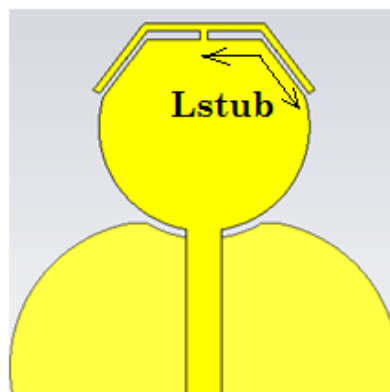


Figure III.9 : Antenne de base avec rejection de la bande WIMAX

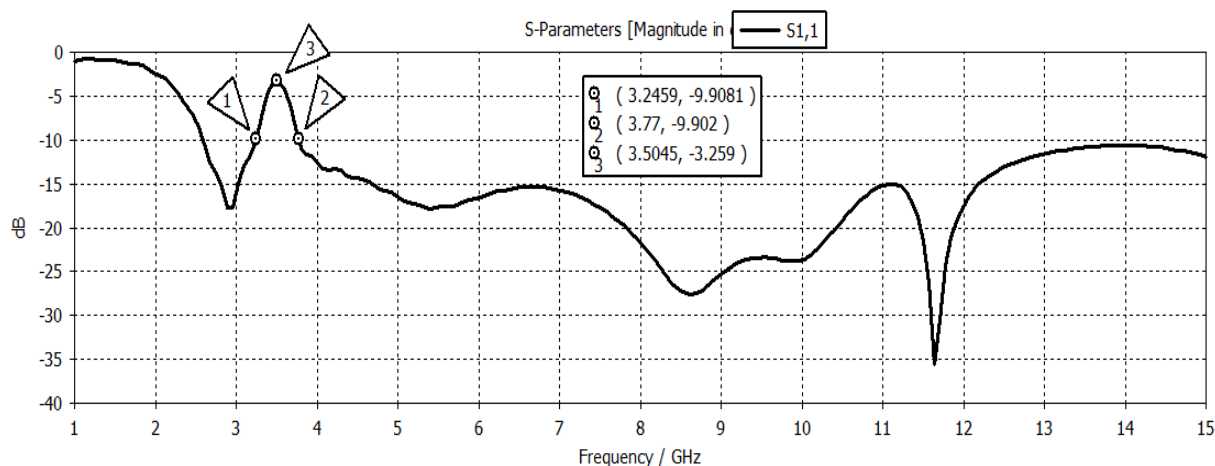


Figure III.10 : S11 de l'antenne de base avec la rejection de la bande WIMAX

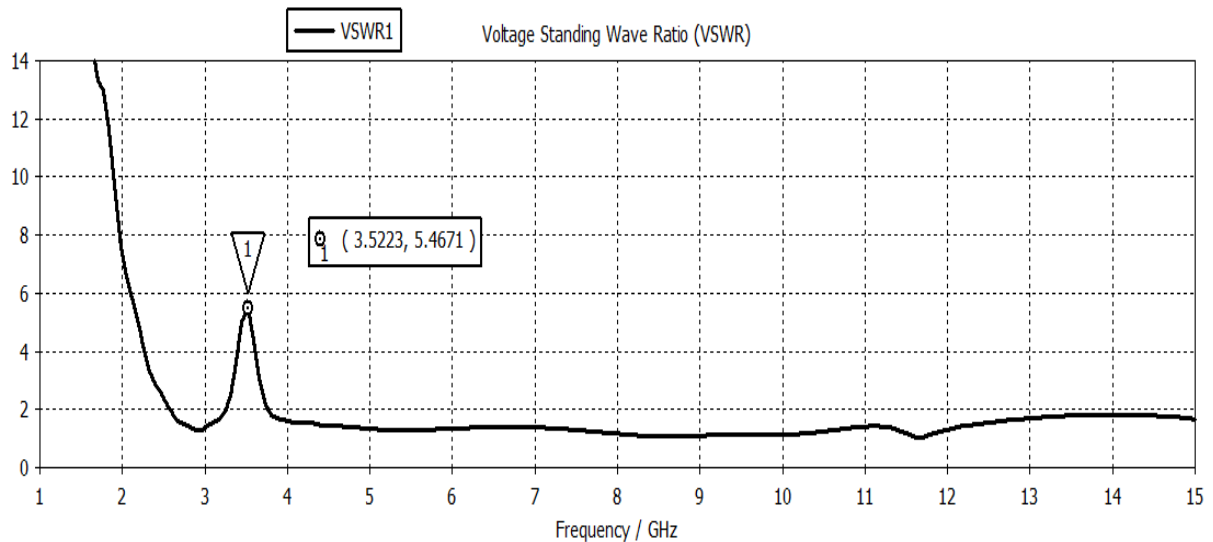


Figure III.11 : VSWR de l'antenne de base avec la rejection de la bande WIMAX

La figure III.10 montre que l'antenne est conçue pour rejeter efficacement une bande de 3.2 à 3.7 GHz avec une fréquence centrale 3.5 GHz correspondant bien à la bande WiMAX (autour de 3,5 GHz). Le VSWR est élevé et égale 5.5 à 3.5 GHz, ce qui est cohérent avec la rejection de la bande WiMAX (Figure III.11).

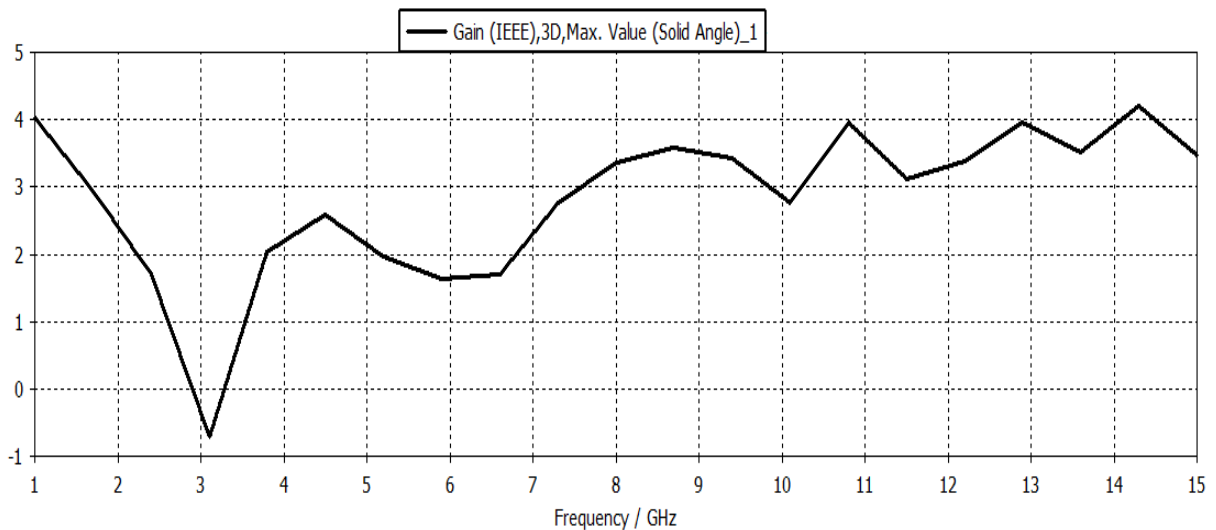


Figure III.12 : Gain de l'antenne avec la rejection de la bande WIMAX

La courbe du gain en fonction de la fréquence indique que l'antenne conçue avec l'insertion du stub parasite n'émet pas à la fréquence de 3,5 GHz (Gain < 0).

III.3.2.2. Rejection de la bande WLAN (5.15–5.35 GHz; 5.725–5.825 GHz)

Le rejet de bande WLAN (5.15–5.82 GHz) est réalisé en insérant une fente en forme de U sur le patch. La résonance rejetée (f_{rr2}) est contrôlée en ajustant la longueur de la fente (L_{slot}). L'équation (III.2) montre la relation de f_{rr2} avec L_{slot} .

$$f_{rr2} = \frac{c_0}{2L_{slot}\sqrt{\epsilon_e}} \quad (\text{III.2})$$

D'après la formule (III.2), $L_{slot} = 16.75\text{mm}$ pour $f_{rr2} = 5.5\text{GHz}$. Tandis que, la valeur optimisée par la simulation est égale à 18.6mm pour la rejection de la bande WLAN (5.15–5.82GHz)

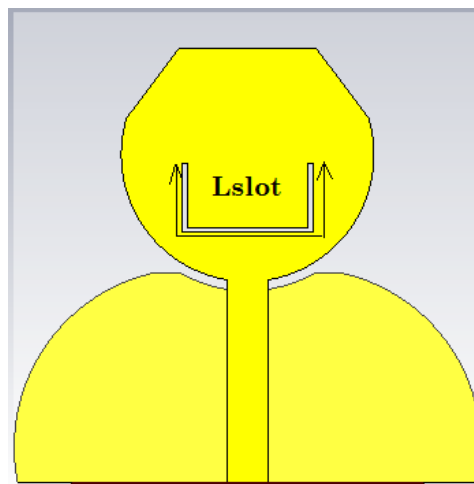


Figure III.13: Antenne de base avec la rejection de la bande WLAN

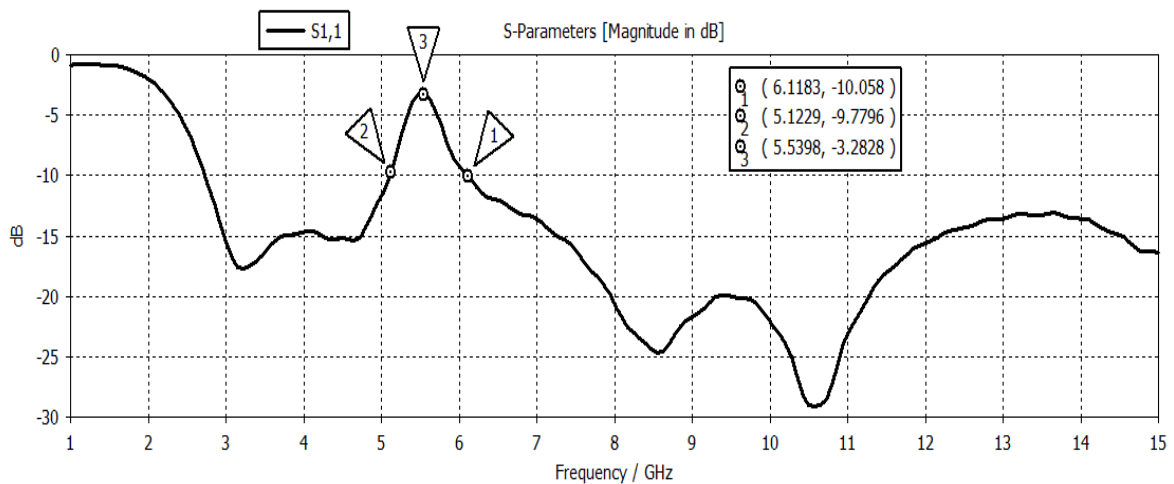


Figure III.14: S11 de l'antenne de base avec la rejection de la bande WLAN

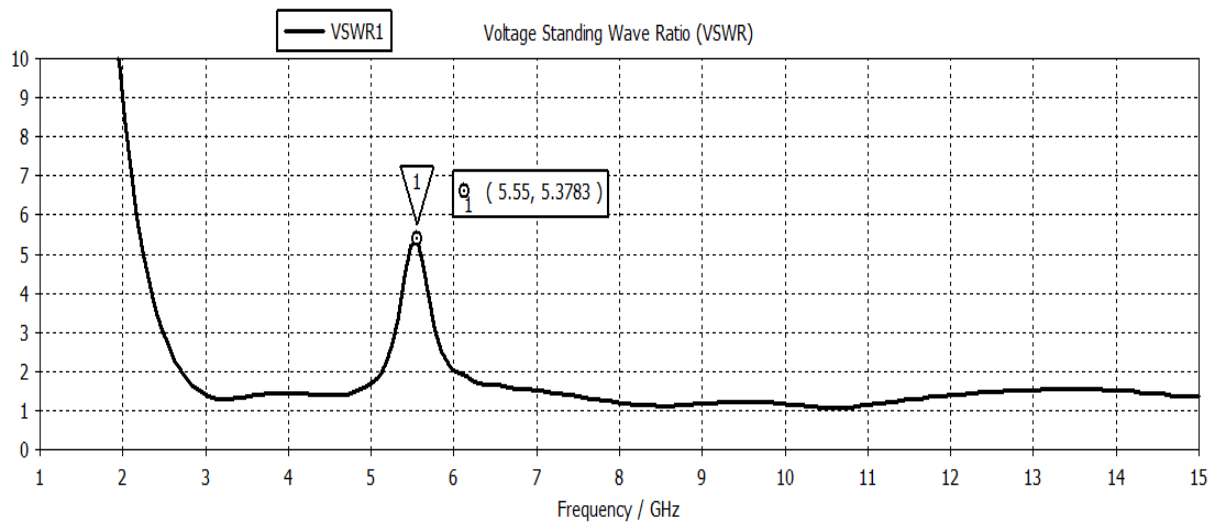


Figure III.15 : Taux d'onde stationnaire VSWR de la rejection de la bande WLAN

D'après la figure III.14, on observe à 5,5 GHz que S11 augmente et dépasse les -5 dB dans la bande [5,1 GHz - 6,1 GHz], ce qui indique une réjection efficace de la bande WLAN. La figure III.15 montre et confirme un comportement satisfaisant pour le rejet de la bande WLAN avec un VSWR de 5,3 à 5,5 GHz et ≤ 2 sur toute la bande ULB.

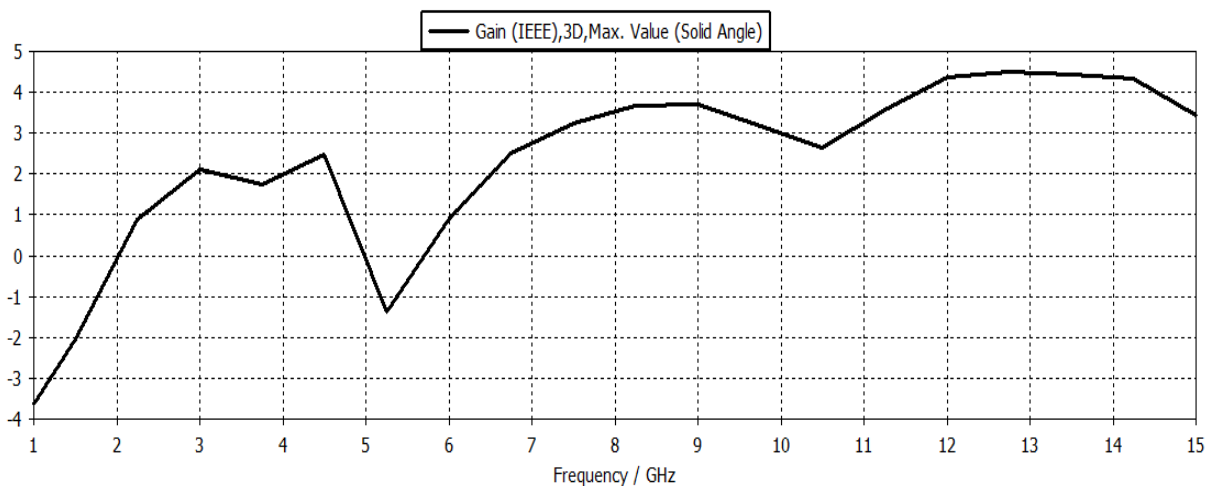


Figure III.16 : Gain de l'antenne avec la rejection de la bande WLAN

La courbe du gain (Figure III.16) en fonction de la fréquence indique que l'antenne conçue avec l'insertion de la fente en forme de U sur le patch, n'émet pas à la fréquence de 5,5 GHz (Gain < 0).

III.3.2.3. Rejection des deux bandes WiMAX et WLAN

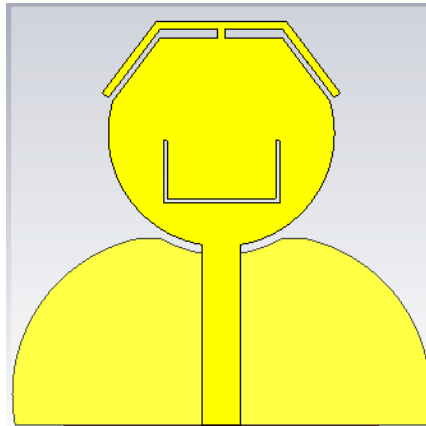


Figure III.17 : Antenne de base avec double rejection

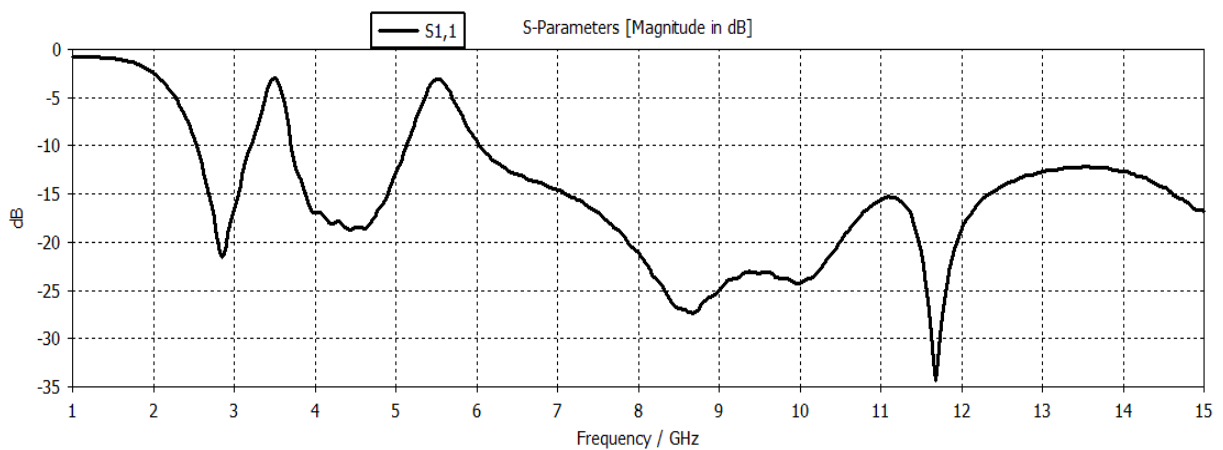


Figure III.18 : S11 de l'antenne de base avec double rejection

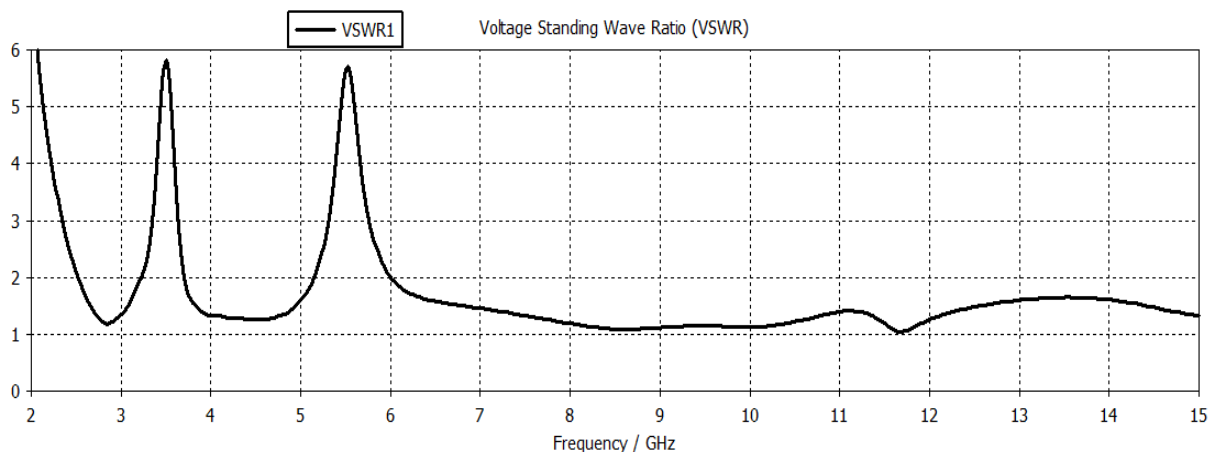


Figure III.19 : VSWR de l'antenne de base avec double rejection

Les courbes du coefficient de réflexion S11 et du VSWR (Figure III.18 et III.19) présentent des creux marqués autour de 3,5 GHz et 5,5 GHz, fréquences typiquement associées aux bandes WiMAX et WLAN respectivement. Cela suggère que l'antenne est spécifiquement

conçue pour rejeter ces bandes de fréquences sans compromettre l'adaptation d'impédance pour le spectre ULB. La présence de ces creux indique que l'antenne est efficace pour atténuer les interférences dans ces bandes particulières, tout en restant adaptée à d'autres applications de la technologie ULB.

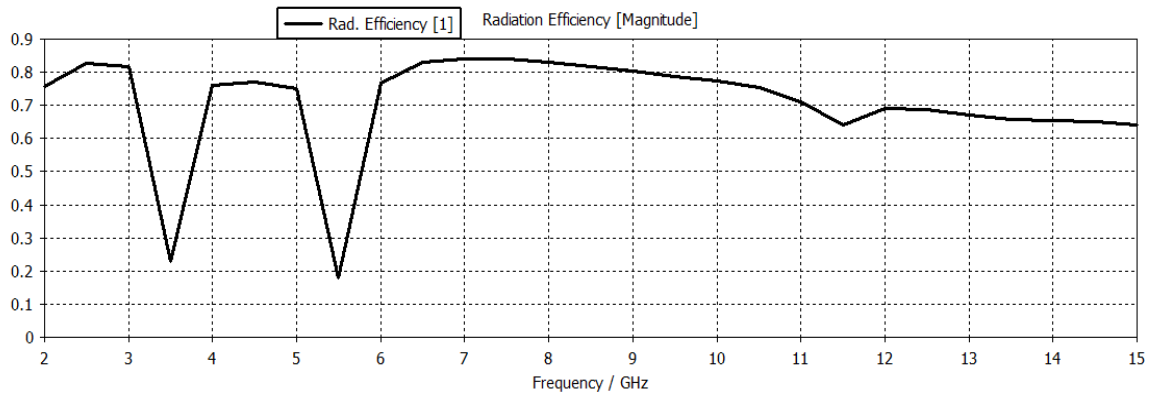


Figure III.20 : Efficacité de rayonnement de l'antenne de base avec double rejection

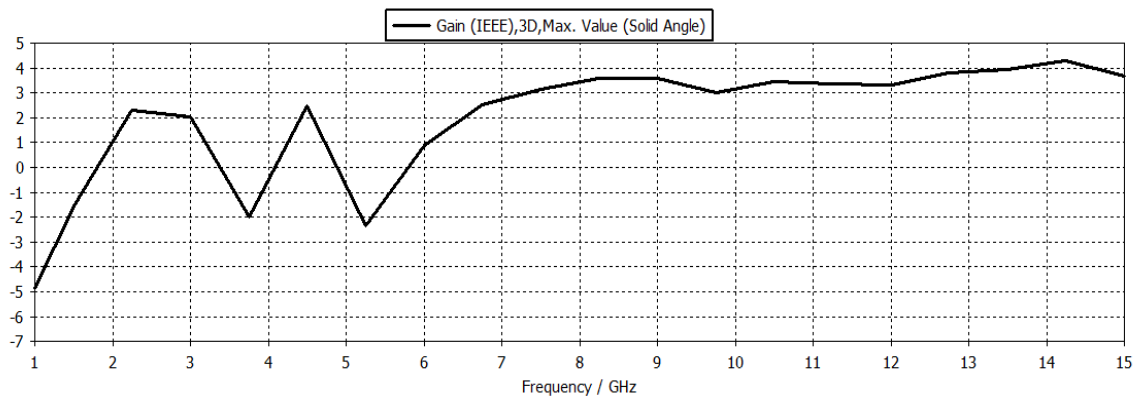


Figure III.21 : Gain de l'antenne de base avec double rejection

La courbe de la figure III.20 montre une forte diminution de l'efficacité de rayonnement de l'antenne autour de 3,5 GHz et 5.5 GHz, atteignant 22% et 18%, respectivement. Même remarque pour le gain (figure III.21). Cela indique une atténuation significative du signal, signifiant une réjection efficace de deux bandes WiMAX et WLAN.

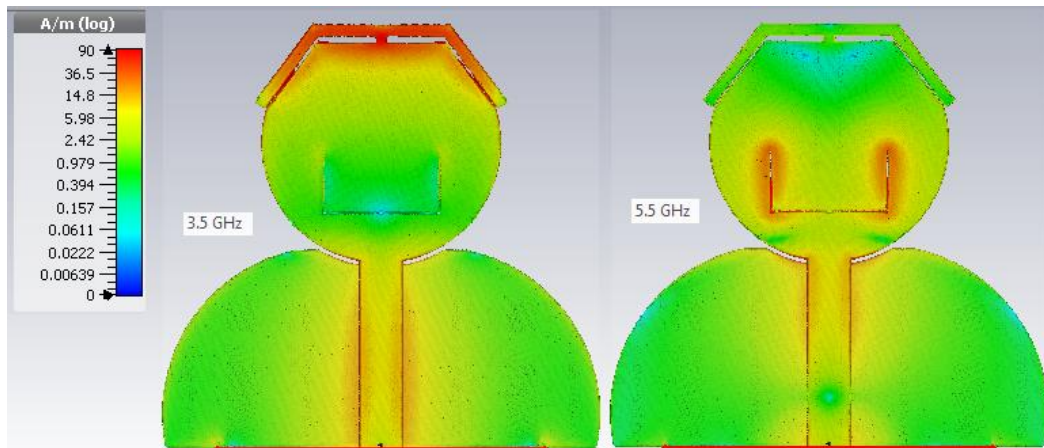


Figure III.22 : Distribution de courant surfacique pour 3.5 GHz et 5.5 GHz de l'antenne de base avec double rejection

La figure III.22 illustre les distributions de courant de surface de l'antenne pour les fréquences 3,5 GHz et 5,5 GHz. Ces figures montrent les effets de double rejet respectivement en f_{r1} pour la bande WiMAX et en f_{r2} pour la bande WLAN. À $f_{r1} = 3,5$ GHz, le courant de surface est fortement concentré le long du bord supérieur du patch et dans les talons en L du stub. Cependant, ces courants circulent dans des directions opposées, ce qui entraîne une interférence destructrice. Par conséquent, l'antenne ne résonne pas et ne rayonne pas sur la bande WiMAX. De même, à $f_{r2} = 5,5$ GHz, le courant est fort le long des bords gauche et droit de la fente en U, circulant également dans des directions opposées. En raison de ce courant opposé circulant autour de la fente, l'antenne ne résonne pas et aucun rayonnement ne se produit sur la bande WLAN. Ainsi, l'antenne subit des interférences aux deux fréquences et réussit à rejeter simultanément les deux bandes WiMAX et WLAN.

III.4. CONCEPTION D'UNE ANT. MIMO ULB AVEC DEUX BANDES REJETEES

III.4.1. Première configuration

A partir de l'antenne de base précédente, nous avons conçues une configuration MIMO à quatre antennes avec quatre ports, imprimées sur le même substrat FR4 de dimensions $2L_s \times 2W_s$, comme indiqué sur la figure III.23. Pour minimiser le couplage, les quatre antennes ULB sont disposées orthogonalement les unes par rapport aux autres.

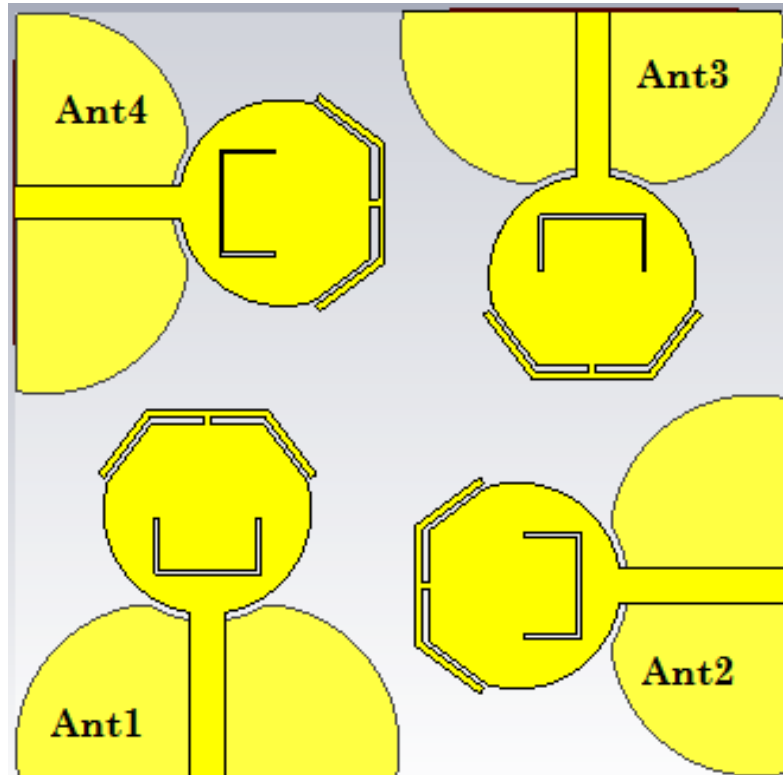


Figure III.23 : Antenne MIMO 4x4 ULB avec double rejection : 1^{ère} configuration

a/ Coefficients de réflexion S_{ii}

Les résultats de simulation présentés dans la figure III.24, montrent une bonne adaptation de la bande passante de l'antenne MIMO 4x4 double rejection sur toute la bande d'intêt.

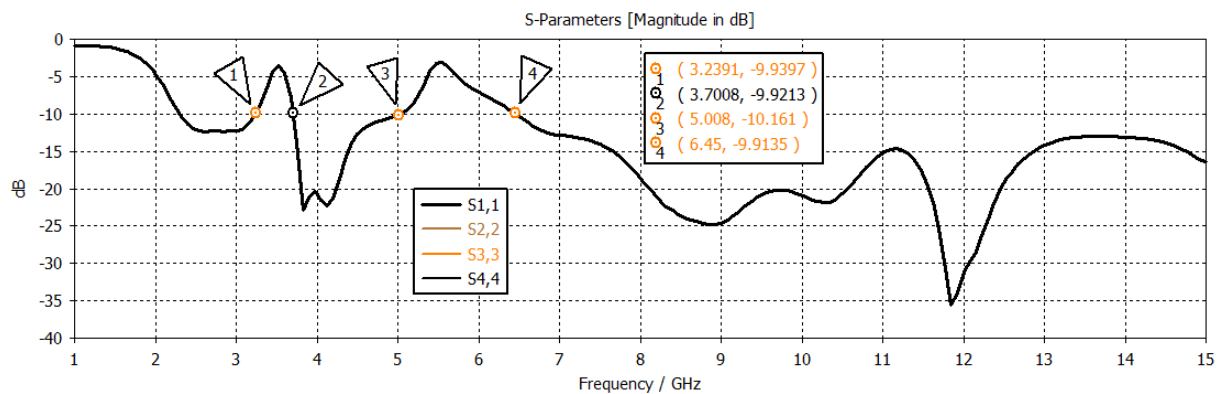


Figure III.24 : S_{ii} de l'antenne MIMO de la 1^{ère} configuration

b/Coefficients de transmission S_{ij}

Les résultats de simulation présentés dans la figure III.25 montrent une bonne isolation entre les ports (1 et 2), (2 et 3), (3 et 4), (1 et 4) avec un $S_{ij} \leq -22$ dB. Cependant, on observe également un couplage entre les ports (1 et 3) et (2 et 4), avec un $S_{ij} \leq -15,5$ dB comme indiqué

sur la figure III.26. En effet, lorsque l'une ou les deux de ces antennes sont excitées, une partie de l'énergie tend à se dissiper dans l'autre antenne, ce qui explique l'apparition de ce couplage mutuel entre les ports 1-3 et 2-4.

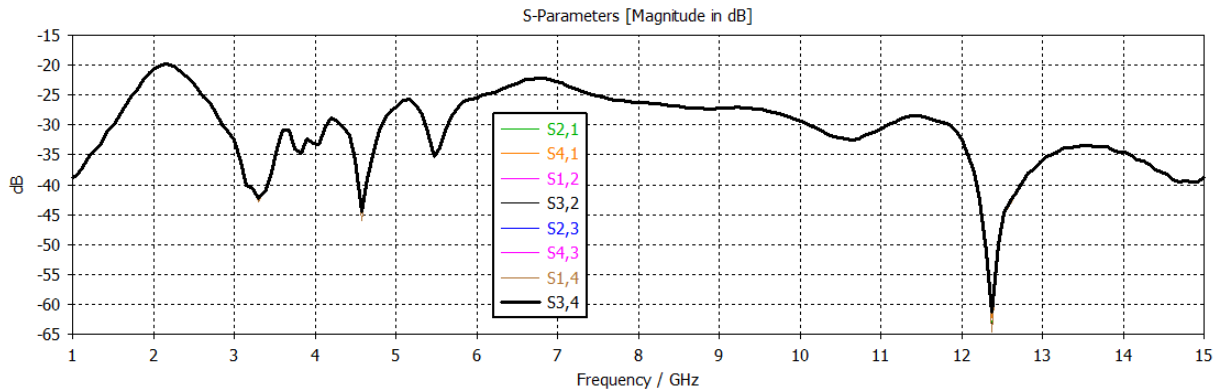


Figure III.25 : Isolation entre les ports (1 et 2), (2 et 3), (3 et 4), (1 et 4)

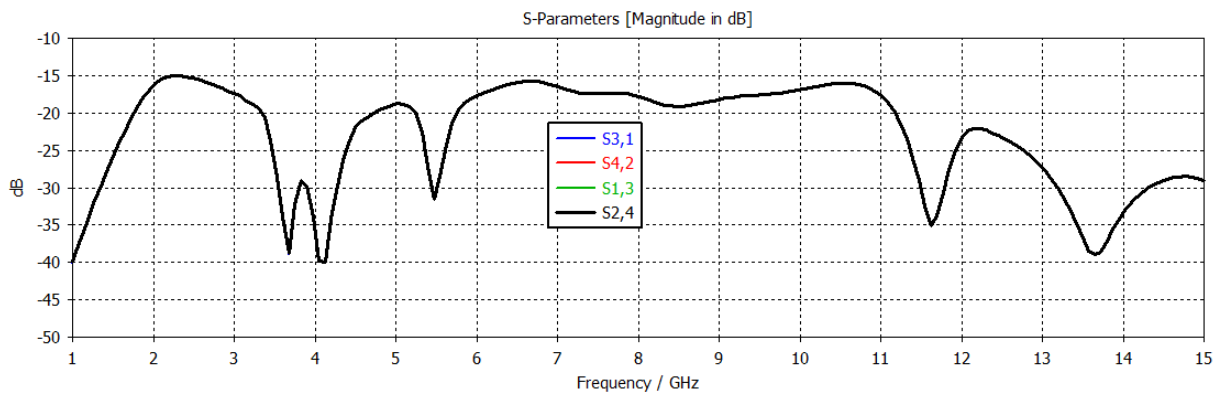


Figure III.26 : Isolation entre les ports (1 et 3), (2 et 4)

c/ Distribution de courant surfacique aux fréquences : 2.8 GHz, 7.5 GHz et 8.6 GHz

Les résultats de la figure III.27 de courant surfaciques aux fréquences : 2.8 GHz, 7.5 GHz et 8.6 GHz montrent un faible courant sur les bords extérieurs de l'antenne 3, quand le port1 est excité.

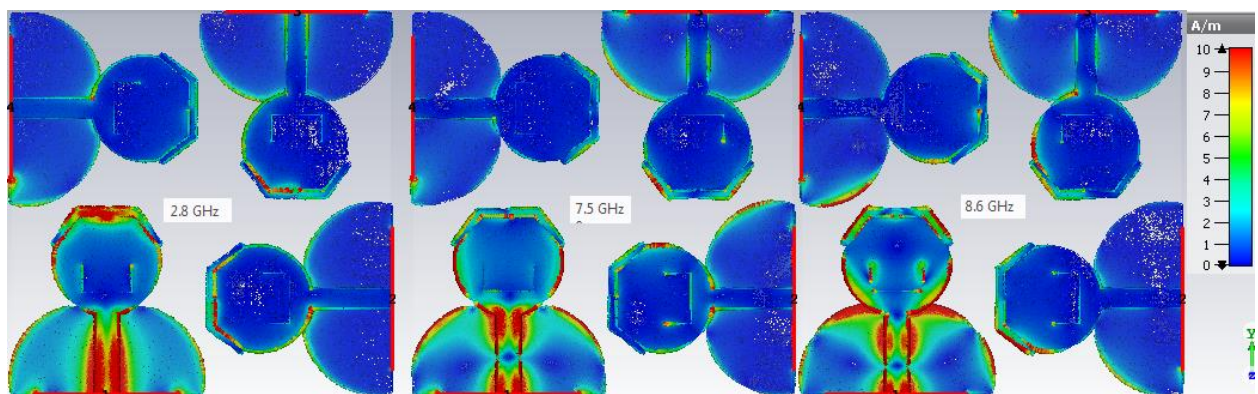


Figure III.27 : Courant surfacique pour 2.8 GHz, 7.5 GHz et 8.6 GHz

III.4.2. Amélioration de couplage entre l'antenne 1 et l'antenne 3 : 2^{ème} configuration

Pour améliorer l'isolation entre les deux antennes disposée en diagonales (Ant.1 et Ant.3 ou Ant.2 et Ant.4), en réduisant le couplage mutuel, nous avons inséré deux stubs croisé formant un X d'épaisseur : $d=1\text{mm}$ et de longueur : $L_{\text{stub}}=16\text{mm}$, côté du plan de masse, comme illustré sur la figure III.28.

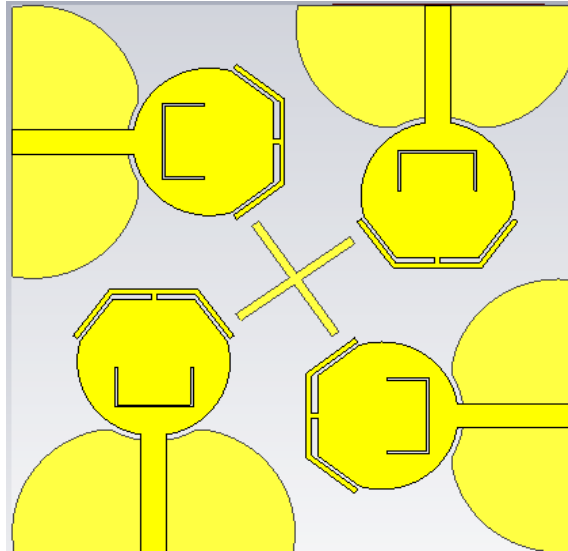


Figure III.28 : Antenne MIMO 4x4 UWB avec double rejection

a/ Coefficients de réflexion S_{ii}

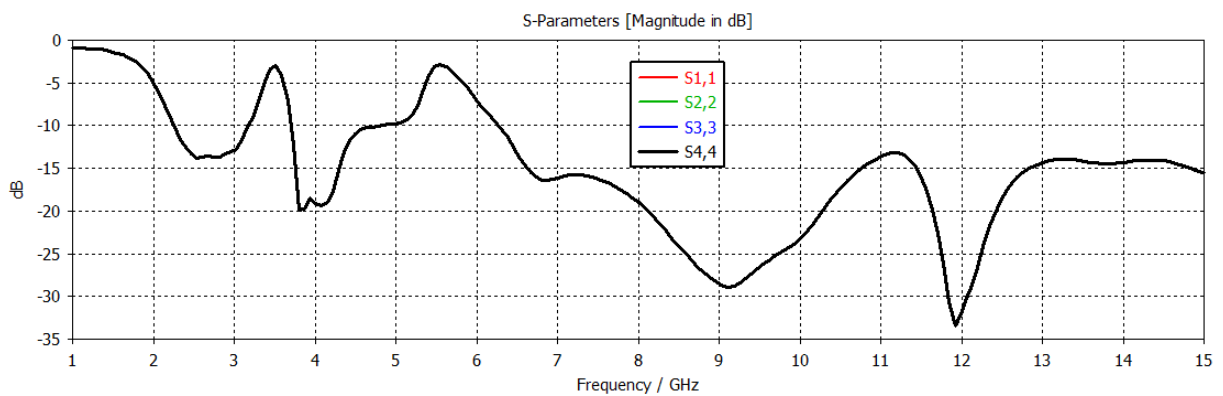


Figure III.29 : S_{ii} de l'antenne MIMO de la 2^{ème} configuration

Les résultats de simulation présentés dans la figure III.29, montrent une bonne adaptation de la bande passante de l'antenne MIMO 4x4 double rejection sur toute la bande d'intérêt.

b/ Coefficients de transmission S_{ij}

Les résultats de simulation présentés dans la figure III.30 montrent une réduction de couplage mutuel entre les différents ports avec un $S_{ij} \leq -23.7\text{ dB}$ sur toute la bande d'intérêt. On

observe aussi, des valeurs acceptables pour le couplage entre les ports (1 et 3) et (2 et 4) avec un $S_{ij} \leq -18.7$ dB (figure III.31). Ce qui montre la performance en terme d'isolation de l'antenne MIMO 4x4 ULB à double rejection.

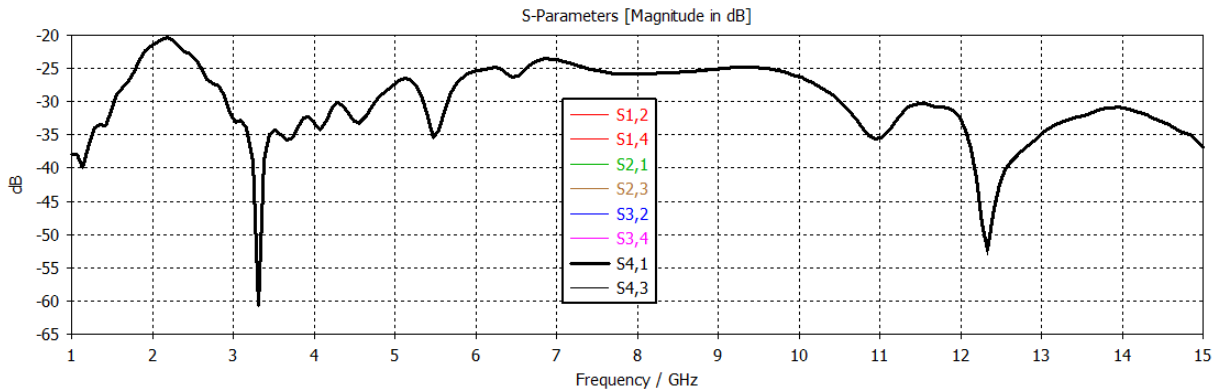


Figure III.30 : Isolation entre les ports (1 et 2), (2 et 3), (3 et 4), (1 et 4)

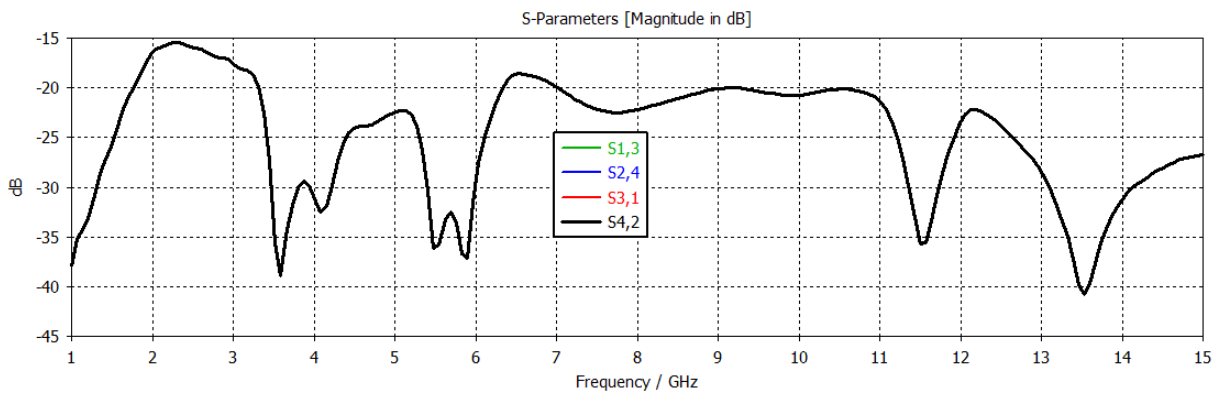


Figure III.31 : Isolation entre les ports (1 et 3), (2 et 4)

c/ Distribution de courant surfacique aux fréquences : 2.8 GHz, 7.5 GHz et 8.6 GHz

Les résultats de la figure III.32 des courants de surface aux fréquences de 2,8 GHz, 7,5 GHz et 8,6 GHz montrent qu'en excitant le port 1, une faible densité de courant de surface est observée sur le stub en forme de X, ce qui permet de le considérer comme un composant de découplage ou d'isolation (filtre) entre les ports (1 et 3).

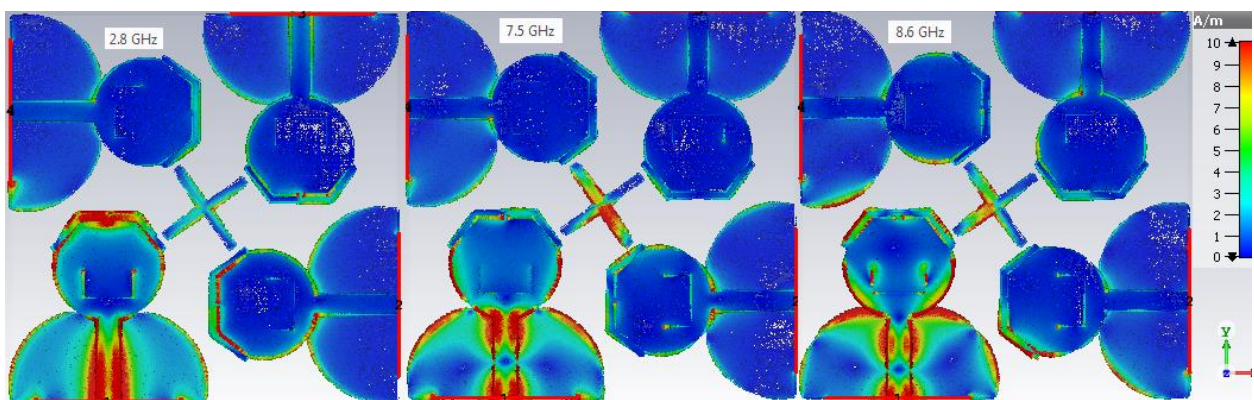


Figure III.32 : Courant surfacique pour 2.8 GHz, 7.5 GHz et 8.6 GHz

III.5. PERFORMANCES DE L'ANTENNE MIMO PROPOSEE

Dans les antennes multiports, le coefficient de corrélation d'enveloppe (Envelope Correlation Coefficient (ECC)) est considéré comme un indicateur clé de la performance. Une valeur faible d'ECC entre deux ports signifie une diaphonie faible lors d'une opération simultanée. Cela signifie également une meilleure performance en termes de diversité dans le cas d'une utilisation en MIMO. L'ECC égale à zéro dans le cas idéal. Elle doit être inférieure à 0,5.

Une approximation du gain de diversité (diversity gain (DG)) par sélection dans le cas d'une antenne à 2 ports i, j , à un niveau de probabilité d'interruption de 1% (0.01). La valeur idéale de DG égale à 10. L'ECC et le DG peuvent être calculés à partir des paramètres S par le logiciel CST.

III.5.1. Coefficient de corrélation d'enveloppe (ECC)

La figure III.33 montre des valeurs typiques de ECC (≈ 0) sur toute la bande de fréquences, à l'exception de très petites fluctuations dans les bandes rejetées, car l'antenne MIMO ne travaille pas dans ces deux bandes. De plus l'ECC < 0.004 sur toute la bande ULB, ce qui montre la performance en terme de diversité de l'antenne MIMO ULB à 4ports proposée.

III.5.2. Gain de diversité (DG)

La figure III.34 montre des valeurs typiques de DG (≈ 10) sur toute la bande de fréquences, à l'exception des bandes rejetées ($DG \geq 9.98$), démontrant ainsi les performances de l'antenne proposée.

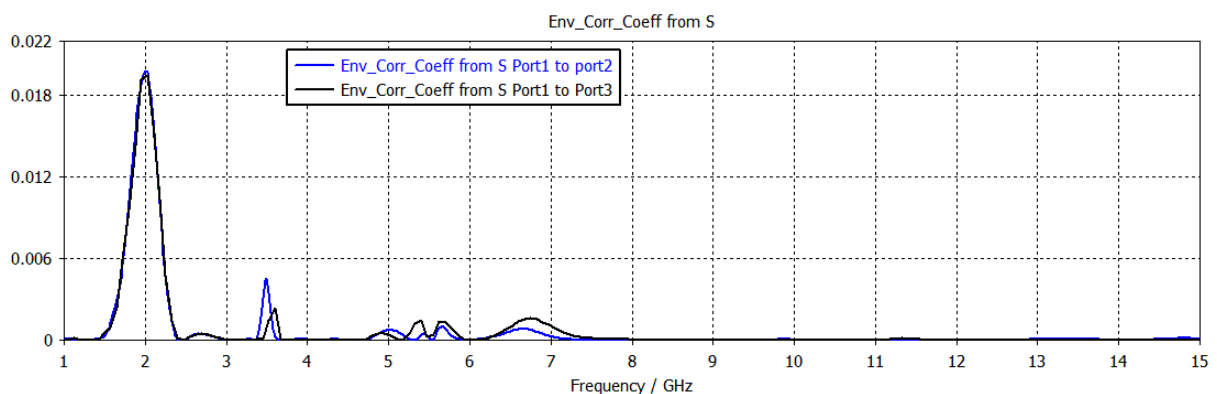


Figure III.33 : Coefficient de corrélation d'enveloppe (ECC) de l'antenne MIMO proposée

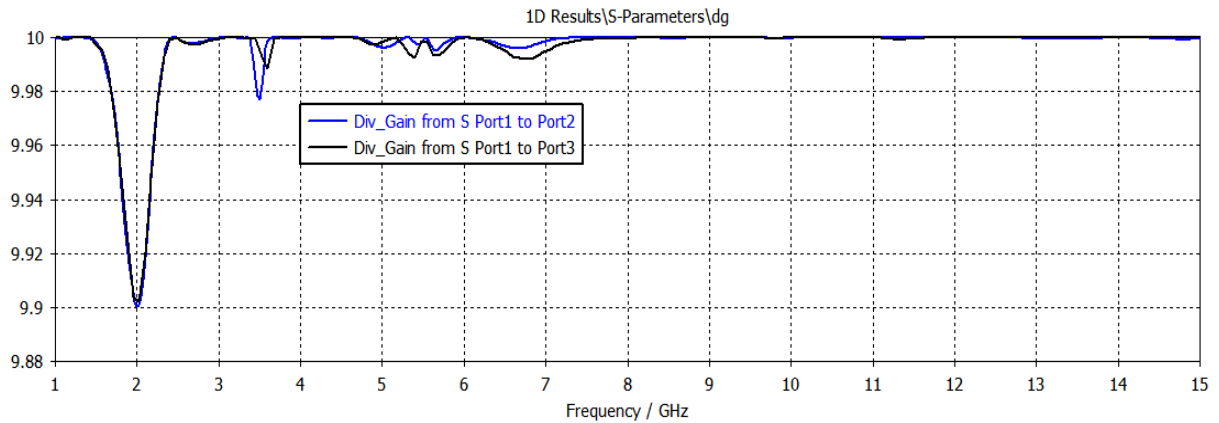
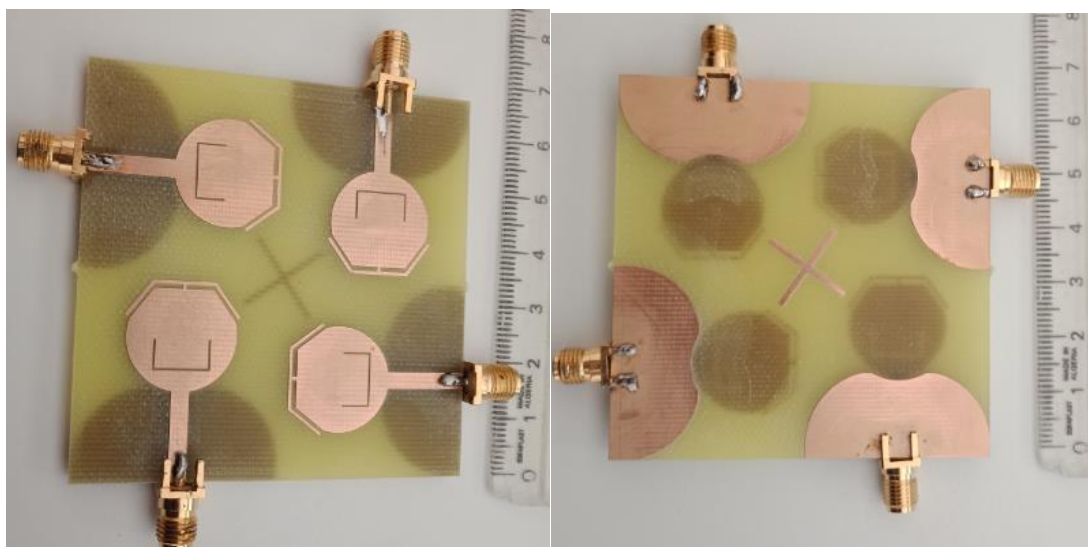


Figure III.34 : Gain de diversité de l'antenne MIMO proposée

III.6. REALISATION

III.6.1. Structure de l'antenne réalisée

Le prototype de l'antenne MIMO 4x4, présenté par la figure III.35 a été réalisée par la machine de la gravure mécanique disponible au laboratoire pédagogique du département d'électronique et Télécommunication, pour la caractériser, en termes de bande passante et de pertes d'insertion entre les quatre éléments de l'antenne MIMO. Le substrat utilisé est FR4 de permittivité diélectrique $\epsilon_r=4.4$ et d'épaisseur $h=1.5$ mm. Les paramètres S de l'antenne ont été mesurés par l'analyseur de réseaux vectoriel à deux ports (ZNB 20 Vector network analyzer), disponible au département de systèmes des Télécommunications de l'institut des Télécommunications.



(a) Vue de dessus (Top view)

(b) Vue de dessous (Bottom view)

Figure III.35 : Prototype de l'antenne MIMO ULB avec rejection des deux bande (WLAN et WIMAX)

III.6.2. Etapes de la mesure

En raison de la symétrie de la structure proposée, la première mesure a été réalisée pour la transmission entre deux ports uniquement (Port 1 à Port 2), avec les Ports 3 et 4 chargés à 50Ω , afin d'éviter les réflexions parasites dues aux désadaptations d'impédance. Ensuite, la deuxième mesure a été effectuée pour la transmission entre le port 1 et le port 3, avec également les ports 2 et 4 chargés à 50Ω ."

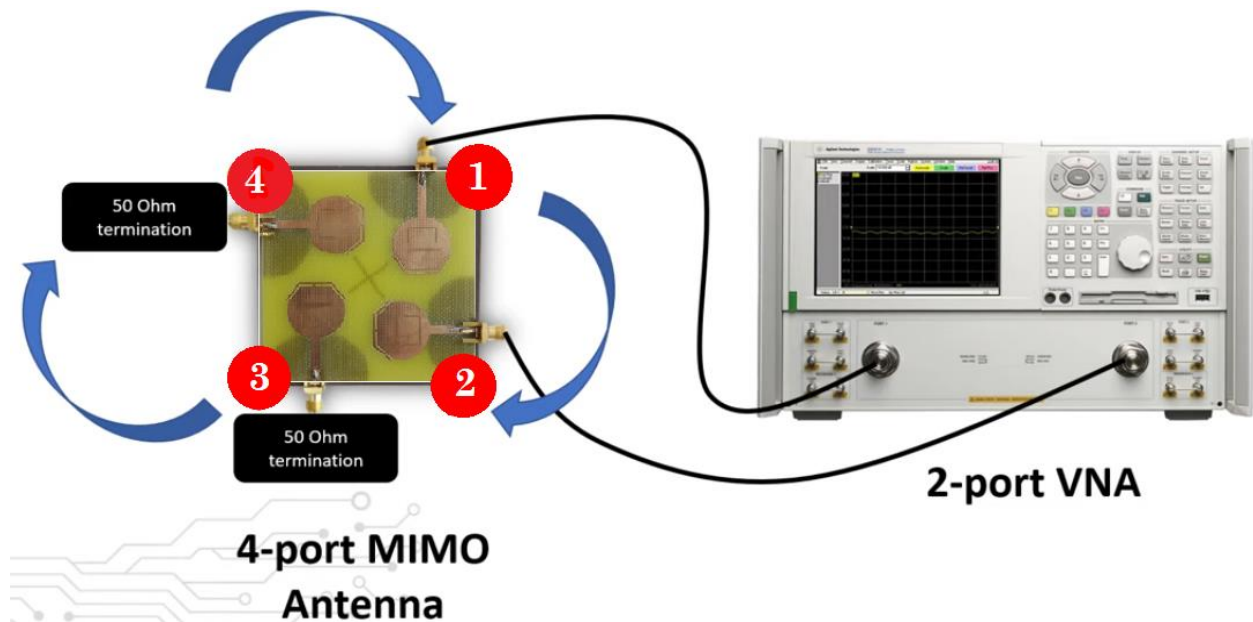


Figure III.36 : Principe de mesure des paramètres S de l'antenne MIMO à 4 ports par un analyseur de réseaux vectoriel à deux ports

III.6.3. Présentation et analyse des résultats



Figure III.37 : Mesure des paramètres de l'antenne MIMO réalisée par le VNA

a/ Coefficients de réflexion S_{ii}

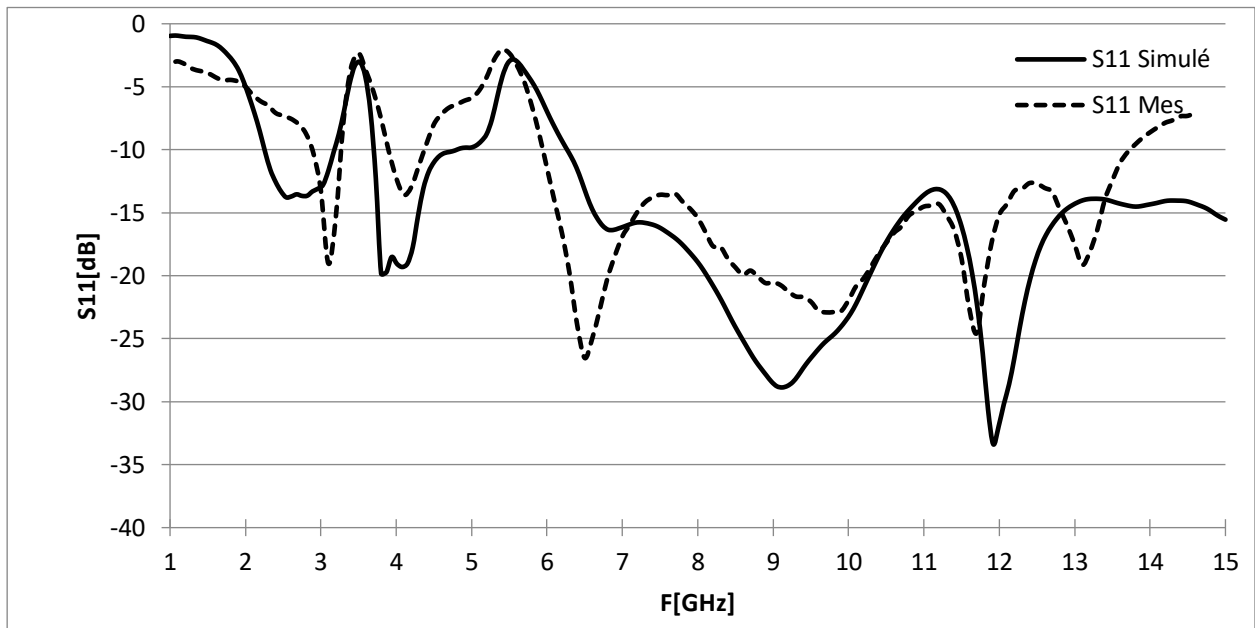


Figure III.38 : S_{ii} de l'antenne MIMO de la 2^{ème} configuration

Les résultats de simulation présentés dans la figure III.38 montrent que les mesures du coefficient de réflexion correspondent globalement bien aux simulations, notamment en ce qui concerne l'adaptation dans la bande UWB et le rejet des bandes.

b/ Coefficients de transmission S_{ij}

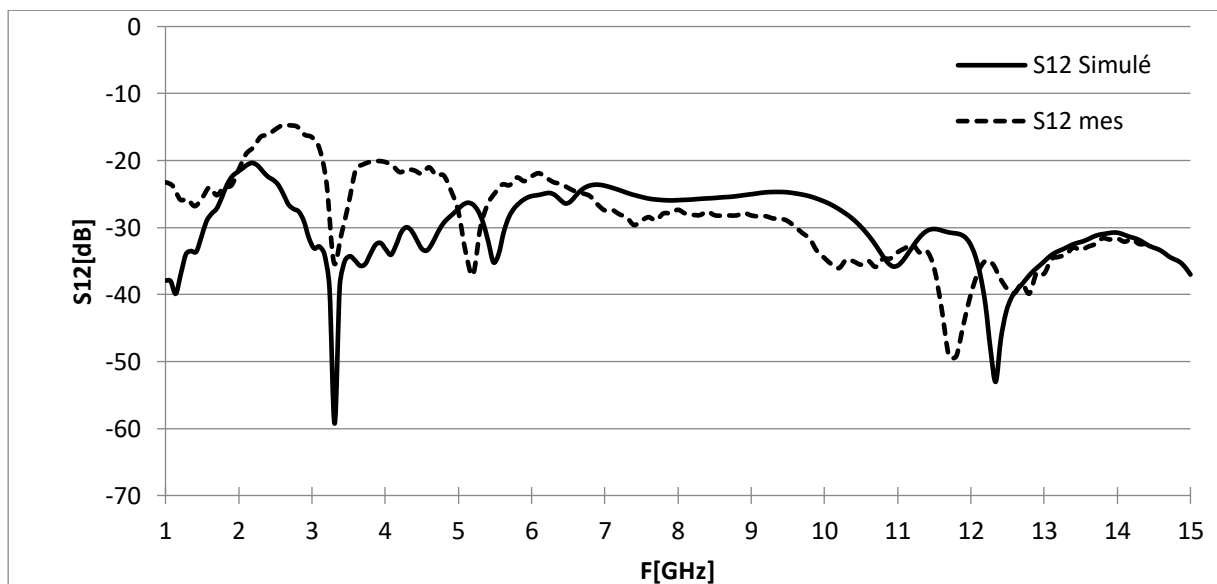


Figure III.39 : Isolation entre les ports (1 et 2) et/ou (2 et 3), (3 et 4), (1 et 4)

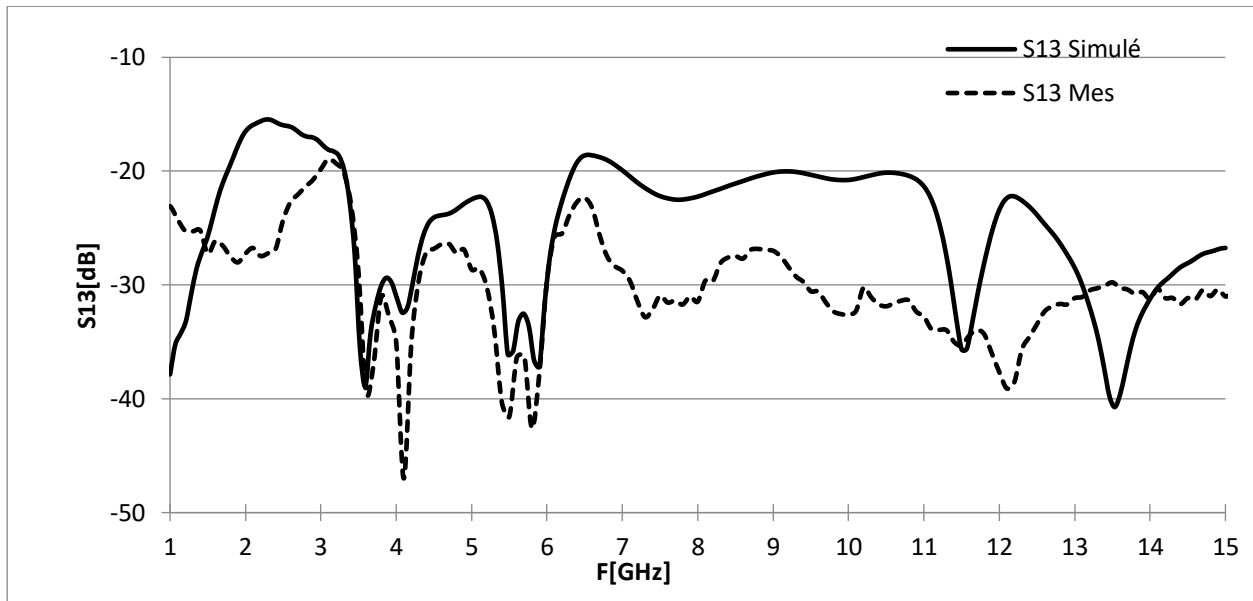


Figure III.40 : Isolation entre les ports (1 et 3) et/ou (2 et 4)

Les figures III.39 et III.40 montrent que les S_{ij} mesurés sont en bon accord avec les S_{ij} simulés, où nous observons une isolation mesurée inférieure à 20 dB sur toute la bande ULB.

III.7. CONCLUSION

Au début de ce chapitre, nous avons exposé l'outil de simulation (CST Microwave Studio). Il s'agit d'un outil de conception et de simulation électromagnétique, qui combine la simulation et la visualisation, tout en étant facile à utiliser dans l'environnement 3D avec une grande précision.

Ensuite, nous avons conçu l'antenne de base, il s'agit d'un monopôle planaire de forme circulaire modifié pour mieux s'adapter au spectre ULB avec rejection de la bande WiMAX autour de 3.5 GHz et la bande WLAN autour de 5.5GHz. Les bandes sont rejetées en intégrant un stub parasite en forme de T sur le bord supérieur du patch et une fente en forme de U sur ce dernier.

À partir de l'antenne de base, nous avons conçu une première configuration MIMO à quatre antennes avec quatre ports, imprimées sur le même substrat FR4 de dimensions $2L_s \times 2W_s$. Les quatre antennes sont disposées orthogonalement les unes par rapport aux autres pour minimiser le couplage.

Enfin, nous avons démontré que l'ajout d'un stub en forme de X du côté du plan de masse améliore l'isolation et minimise le couplage entre les quatre antennes du système MIMO, complétant ainsi la version finale de notre antenne MIMO ULB double rejection.

Le gain de diversité (DG) et le coefficient de corrélation d'enveloppe (ECC), évalués par CST, démontrent ainsi les performances de l'antenne proposée. Pour valider nos résultats, un prototype d'antenne a été fabriqué et testé, montrant un bon accord entre les résultats mesurés et simulés.

Cette analyse a montré que l'antenne MIMO avec deux bandes rejetées pourrait être une solution prometteuse pour répondre à de nombreux services requis pour les applications ULB, telles que les systèmes de communication sans fil et les applications de localisation. De plus, cette antenne se présente comme un candidat prometteur pour atténuer le problème d'évanouissement dû à la propagation par trajets multiples dans les systèmes de communication sans fil ULB.

Conclusion Générale

Les avancées rapides dans les télécommunications sans fil ont généré un besoin croissant de solutions innovantes pour répondre aux exigences croissantes en termes de débit et de qualité de transmission. Cette étude vise principalement à développer une antenne répondant à ces défis en offrant à la fois une large bande passante et la capacité de rejeter des bandes spécifiques pour minimiser les interférences.

Dans un premier temps, cette recherche se concentre sur une compréhension approfondie des antennes ULB (Ultra Large Bande) et des systèmes MIMO (Multiple Input Multiple Output). Les antennes ULB sont appréciées pour leur capacité à couvrir une large gamme de fréquences, ce qui les rend idéales pour les applications nécessitant des débits élevés et une faible consommation d'énergie. Les systèmes MIMO, quant à eux, améliorent la capacité et la fiabilité des transmissions sans fil en exploitant plusieurs chemins de propagation.

L'antenne MIMO 4x4 développée dans cette étude intègre des techniques avancées pour rejeter spécifiquement les bandes WiMAX autour de 3.5 GHz et WLAN autour de 5.5 GHz. Cette conception vise à réduire les interférences potentielles avec d'autres systèmes de communication, tout en optimisant les performances de transmission dans des environnements complexes caractérisés par des trajets multiples.

Nous avons développé un système MIMO basé sur une antenne de base, un monopôle planaire circulaire modifié UWB, intégrant une double rejection pour les bandes WiMAX et WLAN. Cette conception utilise un stub parasite en forme de T sur le bord supérieur du patch et une fente en forme de U, permettant ainsi de rejeter efficacement ces bandes spécifiques tout en maintenant une large bande passante pour les applications ULB.

À partir de cette antenne de base, nous avons évolué vers une configuration MIMO à quatre antennes disposées orthogonalement sur un substrat FR4 de dimensions $2L_s \times 2W_s$, visant à minimiser le couplage entre les antennes. L'amélioration de l'isolation entre les antennes a été atteinte grâce à l'ajout d'un stub en forme de X du côté du plan de masse, complétant ainsi la version finale de notre antenne MIMO ULB double rejection.

Les performances de notre antenne ont été évaluées en termes de gain de diversité (DG) et de coefficient de corrélation d'enveloppe (ECC) par simulation avec CST, montrant une adaptation optimale et une efficacité dans la réduction du couplage entre les ports. La fabrication et les tests du prototype d'antenne ont validé nos résultats, démontrant un bon accord entre les résultats mesurés et simulés.

Cette analyse souligne que notre conception d'antenne MIMO avec deux bandes rejetées offre une solution prometteuse pour répondre aux exigences des applications ULB, notamment pour les systèmes de communication sans fil et les applications de localisation. De plus, cette antenne se présente comme un candidat potentiel pour surmonter les défis liés à l'évanouissement dû à la propagation par trajets multiples dans les systèmes de communication sans fil ULB.

Pour les travaux futurs, nous proposons de continuer à optimiser la conception de l'antenne MIMO à 8x8 éléments ULB afin d'améliorer davantage la capacité et l'efficacité du système.

References Bibliographique

- [1] FCC - « First report and order »- No 98. Docket ET -153. Federal Rapport, Communication Commission, April 2002.
- [2] Q-X. Chu, and C-X. Mao. "A Compact Notched Band UWB slot antenna with sharp selectivity controllable band width" IEEE Trans. Antennas Propag., Vol. 61, no. 8, pp. 3961-3966, 2013.
- [3] https://fr.m.wikipedia.org/wiki/Densit%C3%A9_spectrale_de_puissance
- [4] Amar Benhocine, "Système d'antenne intégré pour les applications micro-ondes et ondes millimétriques", Mémoire ou thèse pour Maître ès sciences, Université du Québec Institut National de la Recherche scientifique, Centre Énergie Matériaux Télécommunications, mars 2022
- [5] Zitouni Ahmed, "Étude et conception d'antennes ULB standards et à bandes rejetées", Thèse de doctorat, Université de Abou BakrBelkaid-Tlemcen, juin 2014
- [6] MAZOUZ Iman et MZARA Tourkia, "Étude et Conception d'une Antenne Ultra Large Bande À Double Bandes Rejetées en Utilisant la Géométrie Fractale", Mémoire de Master, Université Ziane Achour de Djelfa, 2019
- [7] Laurence Babour, "Étude et conception d'antennes ultra Large bande miniaturisées en impulsionsnel", Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, France, 2009.
- [8] GUEBGOUB Nassima, "Contribution à l'étude des techniques de miniaturisation des antennes. Application aux réseaux sans fil et Ultra Large Bande", Thèse de doctorat, Université 8mai 1945, Guelma, 2022
- [9] ZIANI KERARTI Djalal, "Étude et conception d'antennes ultra large bande", Thèse de magister, université Abou Bakr Belkaid - Tlemcen, 2011
- [10] Dinesh Yadav, and Vivekanand Tiwari, "UWB Antenna Designing: Challenges and Solutions", Int'l Journal of Computing, Communications & Instrumentation Engg. (IJCCIE) Vol. 1, Issue 1 (2014)
- [11] M.A. Al Joumayly, S.M. Aguilar, N. Behdad, S.C. Hagness "Dual Band Miniaturized Patch antennas for Microwave Breast Imaging", IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, Vol 9, pp. 268-271, 2010.

Références Bibliographique

- [12] H N. PrombutrH, H P. Kirawanich H, and P. Akkaraekthalin, "Band width Enhancement of UWB Microstrip Antenna with a Modified Ground Plane", International Journal of Microwave Science and Technology, Volume, 7 pages, 2009
- [13] A.A Lotfi Neyestanak, "Ultra WideBand Rose Leaf Microstrip Patch Antenna" Progress In Electromagnetics Research, PIERs 86, pp. 155-168, 2008
- [14] N. Seladji-Hassaine, L. Merad, S.M. Meriah, F.T. Bendimerad "UWB Bowtie Slot Antenna for Breast Cancer Detection" World Academy of Science, Engineering and Technology 71, pp. 1693-1696, December 2012.
- [15] S.K. Singh, A.K. Singh, "UWB Rectangular Ring Microstrip Antenna With Simple Capacitive Feed for Breast Cancer Detection" Progress In Electromagnetics Research Symposium, Beijing, China, March 23-27, 2009.
- [16] LABIOD Mohamed Aymen, "Contribution à l'amélioration des transmissions vidéo dans les réseaux ad-hoc véhiculaires (VANET), Thèse préparée en cotutelle internationale entre l'université BADJI Mokhtar Annaba (Algérie) et l'université polytechnique Haut-de-France, 2019
- [17] Zhong Hua Ma 1 and Yan Feng Jiang., "L-Shaped Slot-Loaded Stepped-Impedance Microstrip Structure UWB Antenna", Micro machines 2020, 11, 828
- [18] I. H. Nejdj, S. Bri, M. Marzouk , S. Ahmad , Y. Rhazi , M. A. Lafkih , Y. A. Sheikh, A. Ghaffar and M. Hussein, "UWB Circular Fractal Antenna with High Gain for Telecommunication Applications ", Sensors 2023, 23, 4172
- [19] Gandoura Ibtissem, Lamer Soumia, "conception et réalisation des antennes fractales imprimées ultra large bande (ULB) a bande rejetée", Mémoire de master, Université 8 Mai 1945 – Guelma, 2019
- [20] Maalim Qasim Mohammed, Assim ModhafarFadhil, " New Compact Design of Dual Notched Bands UWB Antenna with Slots in Radiating and Feeding Elements ", 2013 IEEE Student Conference on Research and Development (SCORED), 16 -17 December 2013, Putrajaya, Malaysia
- [21] Muhammad Kabir Khan and Quanyuan Feng, "Design Validation of UWB MIMO Antenna with Enhanced Isolation and Novel Strips for Stop-Band Characteristics ", Entropy 2022, 24, 766
- [22] M. K. OMAR, «Conception et modélisation d'une antenne pour les communications ULB» oran, 2013

Références Bibliographique

- [23]. Patrice Pajusco, Nadine Malhouroux-Gaffet, "Relation entre canal de propagation et canaux virtuels MIMO : étude et expérimentation", Journées scientifiques 2009 : "Propagation et télédétection", Mar 2009, Paris, France, HAL Id:hal-0191216
- [24] <https://www.iwavecomms.com/fr/news/top-5-advantages-of-mimo/>
- [25] ALDHAHERI Ali Salem Ahmed, "Conception et simulation d'une antenne MIMO", Mémoire de master, Université Mohamed Khider de Biskra,
- [26] Niraj KUMAR, Usha Kiran KOMMURI, "MIMO Antenna H-Plane Isolation Enhancement using UC-EBG Structure and Metal Line Strip for WLAN Applications", Radio engineering, Vol. 28, NO. 2, 399-406, JUNE 2019
- [27] Vipin Kumar Gupta and Rikshit Baru, "Design and Characteristics Mode Analysis of Compact DGS-Based UWB-MIMO Antenna", Advances in Intelligent Computing and Communication, VOL.202, 199-210, Proceedings of ICAC 2020
- [28] Amyar Amal, "Conception et analyse d'une antenne MIMO fractal 4x4 ", Mémoire de Master, Université 08 mai 1945, Guelma, Juin 2022
- [29] Md Shahidul Alam, Amin Abbosh, "Reconfigurable band-rejection antenna for ultra-wideband applications", IET Microwaves, Antennas Propagation, Vol. 12 Iss. 2, pp. 195-202, 2018.
- [30] Md Alaeddine. Mokrani, Anes. Naas, «Conception d'antennes planaires miniatures pour des applications GSM», thèse de master, Université Abou Bekr Belkaïd – Tlemcen, Juillet 2021
- [31] <https://www.3ds.com/fr/produits-et-services/simulia/produits/cst-studio-suite/>