

**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'Etude
Pour L'obtention du Diplôme de Master Académique
Domaine : **Sciences et Technologies**
Filière : **Télécommunications**
Spécialité : **Réseaux et Télécommunications**

**Conception et analyse des absorbeurs hautes
performances basés sur les métamatériaux**

Présenté par :
MEROUR RIM AMANI
HIMEUR KHAWLA
Sous la direction de :
Dr. GUEBGOUB NASSIMA

Juin 2025

Remerciements

*Le plus grand merci revient tout d'abord à **Allah**, Lui seul nous a guidés sur le droit chemin tout au long de notre vie. Il nous a donné le courage, la volonté et la force nécessaires pour mener à bien ce travail.*

*Nous exprimons notre profonde gratitude à **Madame le Dr GUEBGOUB Nassima**, notre encadrante, pour ses conseils précieux, sa supervision attentive et ses avis éclairés qui ont grandement contribué à l'avancement de ce projet.*

*Nous tenons également à remercier sincèrement le **Président** et les **membres du jury** pour avoir accepté d'examiner et d'évaluer notre travail.*

*Nos plus sincères remerciements vont à nos chers **parents** et à notre **famille**, pour leur soutien indéfectible, leur patience, leurs encouragements constants, ainsi que pour les nombreux sacrifices consentis tout au long de notre parcours.*

Enfin, nous remercions chaleureusement toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, au bon déroulement et à la réalisation de ce projet.

Dédicace

" بسم الله الرحمن الرحيم "

C'est avec l'aide et la grâce du Dieu que j'ai achevé ce modeste travail que je dédie : À tous ma grande famille

*À mon cher **Père** : source de force et de sagesse. Ton soutien constant, tes conseils précieux et ta présence silencieuse mais rassurante ont été pour moi un pilier tout au long de ce parcours. Te protège et t'accorde une longue vie pleine de santé et de sérénité. Merci pour tout, Papa.*

*À ma **mère** : ton amour inconditionnel, ta tendresse, ta patience et tes innombrables sacrifices m'ont soutenue à chaque étape de ma vie. Tu es ma lumière, mon refuge et ma plus grande bénédiction. Que Dieu te protège et prenne soin de toi avec sa miséricorde.*

*À mon grand frère **Aymen** : Ton soutien, tes encouragements et ta présence bienveillante ont toujours été d'une grande importance pour moi. Tu as su m'inspirer par ta force, ton sérieux et tes précieux conseils. Merci pour ta confiance et ton aide tout au long de ce parcours. Que Dieu te protège et t'accorde réussite et bonheur*

*À ma chère sœur **Ikram** : Merci d'être là quand ça ne se passe pas. Merci de m'avoir prêté ton épaule quand j'en avais besoin. J'ai toujours la chance de t'avoir à mes côtés, Que Dieu te protège et t'accorde réussite et bonheur*

*À mon petit frère **Mohammed Iheb** : ta joie de vivre, ton innocence et ta gentillesse ont toujours allégé mes moments de fatigue et de stress. Merci d'être une présence réconfortante et encourageante, même si tu ne t'en rends pas toujours compte. Que Dieu te protège et te guide vers la réussite.*

*À ma collègue **Khawla** : Merci pour ton sérieux, ta collaboration et ton esprit d'équipe tout au long de ce travail. Ce fut un réel plaisir de partager cette expérience avec toi.*

*À mes amies : **Ikram.M (ma sœur), Latifa.A, Malak.B, Khawla.H, Samira.B, Sara.D** vous êtes ma deuxième famille. Merci pour votre amour, votre soutien et votre fidélité, merci pour les fous rires, les souvenirs incroyables, et surtout pour toujours être là même quand on fait n'importe quoi. Ne changez jamais. Je vous aime fort.*

... .. "Last but not least i wanna thank me"

RIM AMANI

Dédicace

C'est grâce à Allah seul que j'ai pu achever ce travail.

Je dédie ce modeste travail à mes chers parents pour tout l'effort et le soutien incessant qu'ils m'ont toujours apportés, qu'on a autant sacrifiés pour me voir atteindre ce jour, merci pour votre patience infinie. Que ce modeste travail soit le fruit de vos sacrifices.

A ma sœur chérie qui m'a conseillé, encouragée et soutenu tout au long de mes études, que le bon Dieu vous protège.

A tous mes chères amies.

KHAWLA

RESUME

Les Métamatériaux (MTM) absorbants sont des structures artificielles conçues pour absorber efficacement les ondes électromagnétiques dans des bandes de fréquence ciblées. Dans ce travail, les structures proposées, opérant dans les bandes micro-ondes et térahertz, répondent aux exigences des technologies modernes, notamment en termes de faible épaisseur, d'efficacité et de stabilité. Elles incluent des configurations à bande étroite, à double bande, à triple bande, ainsi qu'un absorbeur dynamique à base de VO₂ pour la bande térahertz, dont l'absorption peut être modulée activement par un stimulus thermique.

Les résultats numériques obtenus, à l'aide du logiciel CST Studio Suite, ont démontré une excellente efficacité d'absorption (pouvant atteindre 100 %), une bonne stabilité angulaire dans certains cas, ainsi qu'une capacité de miniaturisation remarquable. Ces performances confirment la pertinence des MTM pour le développement d'absorbeurs intelligents, adaptés aux besoins croissants dans les domaines des télécommunications, de la détection et du camouflage électromagnétique.

Mots clés : Méta matériaux (MTM), Absorbeur électromagnétique, VO₂ , Absorbeurs intelligents.

ABSTRACT

Absorbing Metamaterials (MTMs) are artificial structures designed to efficiently absorb electromagnetic waves in targeted frequency bands. In this work, the proposed structures operate in the microwave and terahertz ranges and meet the demands of modern technologies, particularly in terms of low thickness, high efficiency, and stability. These include narrowband, dual-band, and triple-band configurations, as well as a dynamic absorber based on VO₂ for the terahertz range, whose absorption can be actively tuned through thermal stimulation.

Numerical results obtained using CST Studio Suite demonstrated excellent absorption efficiency (up to 100%), good angular stability in certain cases, and a remarkable potential for miniaturization. These performances confirm the relevance of MTMs for the development of smart absorbers tailored to the growing needs of telecommunications, sensing, and electromagnetic stealth applications.

Keywords: Metamaterials (MTM), Electromagnetic absorber, VO₂ , Smart absorbers.

المخلص

المواد الميتامادية الممتصة (MTM) هي هياكل صناعية مصممة لامتصاص الموجات الكهرومغناطيسية بشكل فعال ضمن نطاقات ترددية محددة. في هذا العمل، تم اقتراح هياكل تعمل ضمن نطاقات الترددات الميكروية والنيروهيرتز، وتستجيب لمتطلبات التقنيات الحديثة، خاصة من حيث السماكة المنخفضة والفعالية والاستقرار. وتشمل هذه الهياكل تكوينات ضيقة النطاق، ثنائية النطاق ثلاثية النطاق، بالإضافة إلى ممتص ديناميكي يعتمد على ثاني أكسيد الفاناديوم (VO₂) ضمن نطاق النيروهيرتز، يمكن تعديل امتصاصه بشكل نشط عن طريق التحفيز الحراري.

أظهرت النتائج العددية، التي تم الحصول عليها باستخدام برنامج CST Studio Suite فعالية امتصاص ممتازة (تصل إلى 100%)، واستقراراً جيداً بالنسبة لزاوية السقوط في بعض الحالات، بالإضافة إلى قدرة ملحوظة على التصغير تؤكد هذه النتائج مدى أهمية المواد الميتامادية في تطوير ممتصات ذكية تتلاءم مع الاحتياجات المتزايدة في مجالات الاتصالات والكشف والتمويه الكهرومغناطيسي.

الكلمات المفتاحية : المواد الميتامادية ، (MTM) ممتص كهرومغناطيسي، ثاني أكسيد الفاناديوم (VO₂) ، ممتصات ذكية

TABLE DES MATIERES

Remerciements	i
Dédicace	ii
RESUME	v
TABLE DES MATIERES.....	iv
LISTE DES FIGURES	xi
LISTE DES TABLEAUX	xiv
LISTE DES ABREVIATION.....	xv
Glossaire Des Symboles.....	xvii
INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE 01 : Généralités Sur Les Absorbeurs Électromagnétiques	
I.1. INTRODUCTION	4
I.2. BREVE HISTOIRE DES ABSORBEURS ÉLECTROMAGNETIQUES	4
I.3. POSITIONNEMENT DE LA PROBLÉMATIQUE	6
I.4. THEORIE DE L'ABSORPTION DES ONDES ELECTROMAGNETIQUES BASEE SUR LES EQUATIONS DE MAXWELL.....	6
I.4.1. Modélisation de l'atténuation dans un conducteur (absorption)	7
I.4.2. Condition d'absorption optimale : Adaptation de l'impédance	8
I.4.3. Coefficient d'absorption.....	9

I.5. MATERIAUX ABSORBEURS ELECTROMAGNETIQUES	11
I.5.1. Absorbants diélectriques	11
I.5.2. Absorbants magnétiques	12
I.5.3. Absorbants comportant des circuits analogiques	12
I.5.4. Absorbants métamatériaux.....	14
I.6. LES APPLICATIONS DES ABSORBEURS ELECTROMAGNETIQUE	15
I.6.1. Furtivité et camouflage radar	15
I.6.2. Chambres anechoïques.....	15
I.6.3. Absorption des interférences électromagnétiques (EMI)	16
I.6.4. Amélioration des performances des antennes	16
I.6.5. Technologies des capteurs et gestion de l'énergie	17
I.6.6. Dispositifs médicaux et biomédicaux.....	18
I.7. CONCLUSION	18

CHAPITRE 02 : Généralités Sur Les Métamatériaux absorbants

II.1. INTRODUCTION.....	20
II.2. PRINCIPES FONDAMENTAUX DES METAMATERIAUX (MTM)	20
II.2.1. Définition et origine du concept	20
II.2.2. Paramètres effectifs et indice de réfraction.....	21
II.2.3. Caractéristiques remarquables des MTM	22
II.3. MODELISATION DES MTM PAR CIRCUIT RLC	23
II.4. LES METAMATERIAUX ABSORBANTS	25

II.4.1. Principe de fonctionnement	25
II.4.2. Méthodes de conception des MTM absorbants	25
II.5. CLASSIFICATION DES ABSORBANTS MTM SELON LA FREQUENCE.....	26
II.5.1. Absorbants MTM en micro-ondes (MHz – quelques dizaines de GHz)	26
II.5.2. Absorbants MTM en ondes millimétriques (30 – 300 GHz).....	27
II.5.3. Absorbants MTM en Téra hertz (0.1 – 10 THz).....	27
II.5.4. Absorbants MTM en infrarouge et visible (10 THz – 750 THz).....	27
II.6. CLASSIFICATION DES ABSORBANTS MTM SELON LE MODE DE FONCTIONNEMENT	28
II.6.1. Absorbeurs MTM à bande étroite.....	28
II.6.2. Absorbeurs MTM à multi-bande.....	30
II.6.3. Absorbeurs MTM large bande.....	31
II.6.4. Absorption indépendante de la polarisation	33
II.7. CONCLUSION	34
 CHAPITRE 03 : Résultats Numériques et discussions	
III.1. INTRODUCTION	36
III.2. LE CONCEPT DE CST MICROWAVE STUDIO SUITE	36
III.3. CONCEPTION D'UN ABSORBEUR MTM À BANDE ETROITE	37
III.3.1. Coefficients de réflexion et d'absorption	38
III.3.2. Champ électrique et magnétique.....	39
III.3.3. Analyse de la polarisation de l'onde incidente pour l'excitation de l'absorbeur MTM en modes TM et TE	40

III.4. CONCEPTION D'UN ABSORBEUR BI-BANDE A BASE DES SRR	41
III.4.1. Coefficients de réflexion, de transmission et d'absorption	42
III.4.2. Le champ électrique et magnétique.....	43
III.4.3. Incidence et polarisation	44
III.5.CONCEPTION D'UN ABSORBEUR BI-BANDE A BASE DES ANNEAUX RESONATRICES	44
III.5.1. Coefficients de réflexion et d'absorption aux différentes étapes de conception.....	45
III.5.2. Champs électriques et magnétiques.....	48
III.5.3. Incidence et polarisation	48
III.6. CONCEPTION ET ANALYSE D'UN ABSORBEUR MTM TRIPLE BANDE	49
III.6.1. Coefficients de réflexion et d'absorption aux différentes étapes de conception.....	50
III.6.2. Champs électriques et magnétiques	53
III.6.3. Incidence et polarisation	54
III.7. CONCEPTION D'UN ABSORBANT MTM DYNAMIQUE LARGE BANDE DANS LE DOMAINE TERAHERTZ (THz).....	55
III.7.1. Définition et intérêt du domaine des fréquences (THz) pour les absorbants MTM.....	55
III.7.2. Matériaux utilisés	56
III.7.3. Configuration géométrique de l'absorbeur MTM large bande	57
III.7.4. Coefficients de réflexion et d'absorption aux différentes étapes de conception.....	58
III.7.5. Absorption reconfigurable par contrôle actif de la conductivité du VO ₂	61
III.7.6. Champs électriques et magnétiques	63
III.7.7. Incidence et polarisation	63

III.8. BILAN ET APPLICATION.....	65
III.9. CONCLUSION.....	66
CONCLUSION GENERALE	68
BIBLIOGRAPHIE	70

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE 01 : Généralités sur les Absorbants Électromagnétiques

Figure I.1 : Adaptation d'impédance dans un absorbant à métamatériau multicouche	9
Figure I.2 : Représentation de la réflexion et la transmission d'une onde à l'interface de deux milieux	10
Figure I.3 : Liste non exhaustive de formes de FSS	13
Figure I.4 : Le Lockheed F-117 Nighthawk.....	15
Figure I.5 : Chambres Anéchoïques.....	16
Figure I.6 : Optimisation des performances d'antennes dans les appareils lot compacts	17
Figure I.7 : Les capteurs IoT : la solution intelligente pour économiser de l'énergie.....	17
Figure I.8 : (a) échographie de l'épaule [38] ; (b) IRM (Imagerie par résonance magnétique)	18

CHAPITRE 02 : Généralités sur les Métamatériaux Absorbants

Figure II.1 : (a) Structure fils fins présentant ϵ négative et μ positive [41] ; (b) Configuration périodique d'un résonateur à anneau fendu circulaire (Split Ring Resonateur : SRR) présentant μ négative et ϵ positive.....	21
Figure II.2 : Structure proposée par D. Smith (SRR + Tige) présentant Un milieu doublement négatif	22
Figure II.3 : (a) Réfraction négative ; (b) Invisibilité ; (c) Super lentille ; (d) Contrôle de la polarisation	23
Figure II.4 : Modèle du circuit équivalent du SRR : (a) Configuration d'un SRR double ; (b) Configuration simple d'un SRR.....	24
Figure II.5 : Absorbant MTM parfaits : (a) Triple SRR carrée ; (b) anneaux ; (c) Patch ; (d) fractal	26
Figure II.6 : Illustration des travaux de N. I. Landy avec en (a) face avant ; en (b) face arrière, et en (c) perspective.....	29
Figure II.7 : Coefficients A (Rouge), R (vert) et T (bleu) simulés de N. I. Landy	30
Figure II.8 : (a) Schéma 3D d'une cellule unitaire ; (b) Les spectres d'absorption, de réflexion et de transmission de l'absorbant.....	31
Figure II.9 : (a) Schéma 3D et 2D d'une cellule unitaire ; (b) Le spectre d'absorption et le spectre de réflexion de l'absorbant	33

Figure II.10 : Schéma général de la métasurface (a) ; Coefficients de réflexion Co-polarisés et Cross polarisés lorsque le champ incident est (b) polarisé en x et (c) polarisé en y.....	34
---	----

CHAPITRE 03 : Résultats Numériques et Discussions

Figure III.1 : Description CST microwave studio suite.....	37
Figure III.2 : (a) Un diagramme schématique global, (b) Cellule unitaire de la MTM proposée...	38
Figure III.3 : Le coefficient de réflexion s_{11}	39
Figure III.4 : La variation de l'absorption	39
Figure III.5 : (a) Champs électriques ; (b) Champs électriques à 4 GHz	39
Figure III.6 : L'impact de ϕ sur les pics d'absorption.....	41
Figure III.7 : Influence du θ dans les pics d'absorption.....	41
Figure III.8 : (a) Un diagramme schématique global ; (b) Cellule unitaire de la MTM proposée...	42
Figure III.9 : (a) A, R et T de la cellule MTM ; (b) A, R et T	42
Figure III.10 : Les champs électriques à : 2.4 GHz (a) et 4.1 GHz (b)	43
Figure III.11 : champs magnétique à : 2.4 GHz (a) et 4.1 GHz (b)	43
Figure III.12 : L'impact de ϕ sur les pics d'absorption à double bande	44
Figure III.13 : Influence du θ dans les pics d'absorption à double bande.....	44
Figure III.14 : (a) Cellule unitaire sous CST ; (b) Schéma de principe de l'unité de base proposée	45
Figure III.15 : Le coefficient de réflexion s_{11} de l'absorbant – étape1	46
Figure III.16 : Graphique d'absorption – étape 1	46
Figure III.17 : Le coefficient de réflexion s_{11} de l'absorbant – étape2	47
Figure III.18 : Graphique d'absorption – étape 2	47
Figure III.19 : Champs électriques à : 7.937 GHz (a) ; 12.43 GHz (b)- Champs magnétiques à : 7.937 GHz (c) ; 12.43 GHz (d).....	48
Figure III.20 : L'impact de ϕ sur les pics d'absorption à double bande	48
Figure III.21 : Influence du θ dans les pics d'absorption à double bande.....	49
Figure III.22 : Schéma de principe de l'unité de base proposée	50
Figure III.23 : Le coefficient de réflexion S_{11} de l'absorbant – étape1.....	50
Figure III.24 : Graphique d'absorption – étape 1	51
Figure III.25 : Le coefficient de réflexion S_{11} de l'absorbant – étape2.....	51
Figure III.26 : Graphique d'absorption – étape 2	52
Figure III.27 : Le coefficient de réflexion S_{11} de l'absorbant – étape3.....	52

Figure III.28 : Graphique d'absorption –étape3	53
Figure III.29 : champs électriques aux : 4.924 GHz (a) ; 8.853 GHz (b) ; 12.764 GHz(c).....	53
Figure III.30 : Champs magnétiques aux : 4.924 GHz (a) ; 8.853 GHz (b) ; 12.764 GHz (c)	54
Figure III.31 : L'impact de φ sur les pics d'absorption à triple bande..	55
Figure III.32 : L'influence du θ dans les pics d'absorption à triple bande.....	55
Figure III.33 : Spectre électromagnétique mettant en évidence le domaine des fréquences TéraHertz	56
Figure III.34 : Schéma de principe de l'unité de base proposée	58
Figure III.35 : Le coefficient de réflexion s_{11} de l'absorbant – étape1	59
Figure III.36 : Graphique d'absorption – étape 1	59
Figure III.37 : Le coefficient de réflexion s_{11} de l'absorbant – étape2	60
Figure III.38 : Graphique d'absorption – étape 2	60
Figure III.39 : Le coefficient de réflexion S_{11} de l'absorbant – étape3.....	61
Figure III.40 : Graphique d'absorption – étape 3.	61
Figure III.41 : A : absorbance et R	61
Figure III.42 : (a) Le spectre de réflexion et (b) le spectre d'absorption pour différentes conductivités du VO ₂	62
Figure III.43 : (a) Le spectre de réflexion et (b) le spectre d'absorption pour différentes conductivités du VO ₂ reportés dans [75]	63
Figure III.44 : Champs électriques (a) ; Champs magnétiques (b) à 5.194 GHz	63
Figure III.45 : L'impact de φ sur les pics d'absorption à une large bande	64
Figure III.46 : L'influence du θ sur les pics d'absorption à une large bande.....	65

LISTE DES TABLEAUX

Tableau III.1 : Paramètres de conception de cellule unitaire du premier absorbeur MTM	38
Tableau III.2 : Paramètres de conception de cellule unitaire du deuxième absorbeur MTM	42
Tableau III.3 : Les valeurs des paramètres de la cellule suggérée du troisième absorbeur	45
Tableau III.4 : Les valeurs des paramètres de la cellule suggérée du quatrième absorbeur	50
Tableau III.5 : Les valeurs des paramètres de la cellule suggérée du cinquième absorbeur	58
Tableau III.6 : Tableau récapitulatif des caractéristiques et des applications des absorbeurs MTM simulés	66

LISTE DES ABREVIATIONS

CA	Circuit Analogique
FSS	Surfaces sélectives en fréquence
VHF	Very High Frequency
EM	Les rayonnements électromagnétiques
EMI	Les interférences électromagnétiques
RAM	Radar Absorbing Materials
CEM	La Compatibilité Électromagnétique
5G	Cinquième Génération
6G	Sixième Génération De Technololgie Cellulaire
IoT	L'Internet Des Objets
IRM	Imagerie Par Résonance Magnétique
ISO13485	Système De Management De La Qualité Pour La Conception Et La Fabrication De Dispositifs Médicaux
MTM	Métamatériaux
SRR	Split Ring Resonator
MMA	Métamatériaux Absorbeur
VO₂	Le Dioxyde De Vanadium
TOPAS	Thermal Optical Plasma Aerosol Spectrometer
Au	L'or
SiO₂	Le dioxyde de silicium
2D	Bidimensionnel
3D	Tridimensionnel
CST	Computer Simulation Technology
PCB	Studio cartes électroniques haute fréquence
MWS	Microwave Studio

TE	Transverse Electrique
TM	Transverse Magnétique

Glossaire Des Symboles

μ	Perméabilité.
ϵ	Permittivité.
ω	Pulsation angulaire.
S11	Coefficient de réflexion.
S21	Coefficient de transmission.
A	Coefficient De l'absorption
n_{eff}	Indice de réfraction effectif
Z	L'impédance effective
σ	La conductivité électrique,
J	La densité de courant induite
E	Champ électrique
H	Champ magnétique
B	Constante de phase
α	L'angle d'incidence d'une Onde
δ	La profondeur de peau
tan δ	Tangente de Perte

INTRODUCTION
GENERALE

L'accélération du développement technologique dans les domaines des télécommunications, des radars et de l'électronique embarquée a conduit à une prolifération notable des rayonnements électromagnétiques dans notre environnement quotidien. Si ces ondes électromagnétiques (EM) sont indispensables au fonctionnement des dispositifs modernes, leur présence excessive peut provoquer des interférences électromagnétiques (EMI), compromettant ainsi la fiabilité et les performances des systèmes électroniques.

Avec l'apparition récente de sources et de détecteurs capables de fonctionner dans la gamme des fréquences térahertz (THz), ce domaine fait l'objet d'un intérêt scientifique croissant. Située entre les micro-ondes et l'infrarouge, la bande THz représente une solution naturelle face à la saturation progressive des bandes micro-ondes traditionnelles. Toutefois, la propagation efficace des ondes dans cette gamme reste un défi en raison des pertes importantes et des interactions complexes avec les matériaux. De plus, une exposition prolongée à des champs électromagnétiques intenses peut engendrer des effets biologiques indésirables, tels que l'échauffement des tissus ou des troubles neurologiques. Face à ces problématiques, les matériaux absorbants électromagnétiques représentent une solution efficace permettant de dissiper l'énergie des ondes incidentes, en la convertissant généralement en chaleur, tout en minimisant les réflexions parasites [1] [2].

Par conséquent, il y a une demande croissante pour le développement de matériaux et de techniques appropriés pour supprimer les conséquences du rayonnement électromagnétique. Malgré les progrès réalisés avec les absorbants électromagnétiques traditionnels, tels que les matériaux diélectriques et magnétiques, ces derniers restent limités par leur forte épaisseur, leur bande passante réduite et leur sensibilité à l'angle d'incidence. Ces contraintes freinent leur intégration dans des systèmes compacts et à large couverture fréquentielle. Dans ce contexte, l'utilisation des métamatériaux (MTM) est une solution prometteuse, offrant des solutions plus légères, plus efficaces et mieux adaptées aux exigences des technologies modernes. Les MTM ont captivé l'attention de nombreux chercheurs en raison de leurs propriétés inhabituelles telles que le double comportement négatif, le comportement gaucher, l'indice de réfraction négatif, la vitesse de phase négative, etc. Les applications des MTMs sont très vastes, couvrant l'électromagnétisme, l'optique, la nanoélectronique, dispositifs biomédicaux et le domaine militaire [3].

Une des applications prometteuses des MTM est dans le domaine de la conception des absorbants EM, où les propriétés requises des MTM peuvent être intelligemment accomplies par adopter une conception et une structure particulière. Les absorbants MMA sont l'un des secteurs les plus développés parmi les diverses réalisations des MTM [3].

L'objectif de ce projet de fin d'études est de concevoir et d'analyser des structures d'absorbeurs d'ondes électromagnétiques basés sur des MTM minces et performants, fonctionnant dans des bandes de fréquence spécifiques, notamment dans le domaine des micro-ondes. Une attention particulière est également portée aux absorbeurs dynamiques à large bande, intégrant du dioxyde de vanadium (VO_2), un matériau à transition de phase, pour des applications en térahertz (THz).

Dans cette perspective, ce mémoire est structuré en trois chapitres complémentaires :

Le premier chapitre présente un aperçu historique de l'évolution des absorbeurs électromagnétiques et expose la problématique actuelle liée aux limites des solutions traditionnelles (épaisseur, bande passante, sensibilité angulaire). Il développe ensuite les bases théoriques de l'absorption électromagnétique à partir des équations de Maxwell, en mettant en évidence les conditions d'une absorption optimale. Une classification des différents types d'absorbeurs ; diélectriques, magnétiques, composites à circuits, et méta matériaux ; est proposée, suivie d'une revue de leurs principales applications technologiques.

Le second chapitre explore les principes fondamentaux des métamatériaux (MTM), en mettant en évidence leurs propriétés électromagnétiques exceptionnelles telles que l'indice de réfraction négatif, le comportement gaucher, ou la double permittivité/perméabilité négative. Il présente les modèles de représentation (paramètres effectifs, circuits RLC équivalents), ainsi que les différentes stratégies de conception d'absorbeurs MTM, notamment à base de structures multicouches résonantes. Le chapitre propose également une classification fonctionnelle et fréquentielle des absorbeurs MTM et introduit les métamatériaux actifs, notamment les structures dynamiques à base de matériaux à changement de phase comme le VO_2 .

Le troisième chapitre est consacré à la conception et à l'analyse numérique de différentes structures d'absorbeurs à base de méta matériaux (MTM), reposant sur des cellules unitaires multicouches modélisées à l'aide du logiciel CST Studio Suite.

Quatre configurations sont proposées, toutes opérant dans la bande des micro-ondes : une structure à bande étroite et trois structures multibandes, conçues à partir de matériaux conventionnels tels que le FR4 et le RO4003C. Enfin, une cinquième structure est présentée, fonctionnant dans la gamme térahertz (THz), basée sur un absorbeur dynamique intégrant du dioxyde de vanadium (VO_2), un matériau à transition de phase, permettant un contrôle actif de l'absorption, illustrant le potentiel des MTM intelligents dans la conception d'absorbeurs reconfigurables de nouvelle génération. Chaque structure est évaluée en fonction du coefficient de réflexion, du taux d'absorption, de la distribution des champs électromagnétiques et de la sensibilité à la polarisation incidente. Les résultats mettent en évidence les atouts de chaque géométrie selon les applications visées, en soulignant notamment l'efficacité, la compacité, et la réponse dynamique en fonction de la fréquence ou de l'angle d'incidence.

Enfin, nous clôturons ce travail par une conclusion générale.

CHAPITRE 01 :
Généralités sur les Absorbeurs
Électromagnétiques

I.1. INTRODUCTION

L'évolution rapide et moderne de la communication sans fil provoque des interférences électromagnétiques (IEM) et contamine l'environnement par la pollution EM. Ces interférences influence le comportement typique des systèmes ou des dispositifs. Par conséquent, il y a une demande croissante pour le développement de matériaux et de techniques appropriés pour supprimer les conséquences du rayonnement électromagnétique.

Ce chapitre s'ouvre par une vue d'ensemble historique sur l'évolution des absorbeurs électromagnétiques. La problématique actuelle y est clairement posée : bien que les absorbeurs traditionnels aient rendu de précieux services, leurs performances restent limitées en termes d'épaisseur, de bande passante ou de sensibilité angulaire, justifiant ainsi l'émergence de nouvelles approches, notamment à base de métamatériaux (MTM). Une attention particulière est ensuite portée à la théorie de l'absorption électromagnétique, en s'appuyant sur les équations de Maxwell et en détaillant les conditions physiques nécessaires à une absorption optimale. Cela inclut la modélisation de l'atténuation dans les matériaux conducteurs ainsi que l'importance de l'adaptation d'impédance. Le chapitre examine ensuite les différentes familles d'absorbeurs, qu'ils soient diélectriques, magnétiques, composites à circuits analogiques, ou plus récemment, métamatériaux (MTM). Enfin, les applications pratiques des absorbeurs électromagnétiques sont abordées.

I.1. BREVE HISTOIRE DES ABSORBEURS ÉLECTROMAGNETIQUES

La majorité de l'intérêt pour les absorbeurs de rayonnement électromagnétique a commencé dans la seconde moitié de la Seconde Guerre mondiale, et leur importance à cet égard était discutable. Les avantages militaires ont été rendus possibles grâce à la forte atténuation radar offerte par de tels absorbeurs et des avancées technologiques significatives ont été réalisées en conséquence. La fonction remplie par les matériaux eux-mêmes était essentiellement utilitaire, et peu d'attention était accordée à l'évolutivité ou à l'universalité des absorbeurs pour leur intérêt intrinsèque. La recherche s'est concentrée sur le développement d'absorbeurs pour les chambres anéchoïques ainsi que sur l'augmentation de la capacité des absorbeurs d'interférence dans les années 1950. Les écrans résistifs des absorbeurs d'interférence ont été remplacés par des absorbeurs dits à circuit analogique (CA), également connus sous le nom de surfaces en fréquence (FSS), et des composants périodiques réactifs et résistifs ont été utilisés.

Les absorbeurs CA ont été conçus comme un circuit analogique composé d'une combinaison en série RLC et comprenaient généralement des éléments périodiques sur un plan de masse conducteur. Les éléments dipôles, les éléments à pôles N, les types de boucles, les types de plaques, les éléments dipôles repliés, les croix, les croix de Jérusalem et leurs combinaisons faisaient partie des nombreuses formes différentes d'éléments périodiques qui ont été étudiées. Comme les absorbeurs Jaumann, les absorbeurs CA ont également été utilisés dans des systèmes multicouches, qui se composent de deux couches FSS ou plus au-dessus d'un plan de masse. De plus, des absorbeurs ont été développés pour fonctionner à des fréquences plus basses et pour atteindre des coefficients de réflectivité plus bas pour les chambres anéchoïques.

Dans les années 1960, les absorbeurs ont été contraints de se limiter aux bandes VHF basses (30–300 MHz) et UHF (300–3 000 MHz). Une épaisseur d'environ un mètre serait nécessaire pour l'utilisation de l'absorbeur de type interférence conventionnel, qui est basé uniquement sur des matériaux diélectriques. Cependant, une diminution de l'épaisseur a été rendue possible par l'incorporation de ferrite et d'autres éléments magnétiques dans l'absorbeur. Ces absorbeurs chargés magnétiquement, qui comprenaient des structures à trois couches en ferrite frittée, diélectrique et ferrite en caoutchouc, ainsi que des plaques de ferrite frittée au-dessus d'un plan de masse, ont été étudiés pour une utilisation possible dans des chambres anéchoïques fonctionnant à basses fréquences. Tout au long des années 1980 et 1990, la recherche sur l'ajout de matériaux magnétiques aux absorbeurs a continué. Une variété de matériaux a été étudiée, tels que le ferrite nickel-zinc, le caoutchouc, le carbone, et les mélanges de ferrite, ainsi que le hexaferrite de Ba substitué au Co-Ti [4].

En 2002, le groupe de N. Engheta [1] a montré dans un article théorique que si une surface à métamatériaux est placée à proximité d'une plaque plane parfaitement conductrice, dans une certaine bande de fréquences, cette structure peut réagir comme une plaque plane de forte impédance sur sa partie supérieure. Ainsi, si une feuille résistive est placée sur cette plaque de forte impédance, on peut obtenir une structure fine équivalente à un absorbant d'ondes électromagnétiques qui a des dimensions réduites [5]

I.2. POSITIONNEMENT DE LA PROBLÉMATIQUE

Les rayonnements électromagnétiques (EM), bien que largement utilisés dans de nombreuses applications technologiques telles que les télécommunications, le radar, le médical ou l'électronique grand public, peuvent représenter un danger pour la santé humaine et pour le bon fonctionnement des systèmes électroniques. En effet, une exposition prolongée ou à haute intensité à certaines fréquences peut engendrer des effets biologiques néfastes, tels que l'échauffement des tissus (effet thermique), des troubles neurologiques ou des perturbations du rythme cellulaire [6]. De plus, dans les environnements sensibles comme les laboratoires, les installations militaires ou les dispositifs médicaux, les interférences électromagnétiques (EMI) peuvent provoquer des dysfonctionnements graves. Dans ce contexte, les matériaux absorbants électromagnétiques jouent un rôle essentiel : ils permettent d'atténuer, voire d'éliminer, les ondes EM indésirables en les convertissant en chaleur, assurant ainsi la protection des personnes, la compatibilité électromagnétique des équipements, et la sécurité des communications [4]. Le développement de tels absorbants est donc devenu un enjeu majeur dans les domaines de l'électronique, des télécommunications et de la défense.

Malgré les avancées significatives dans le développement des absorbants électromagnétiques traditionnels ; tels que les absorbants diélectriques et magnétiques ; ces solutions présentent encore plusieurs limitations majeures. En effet, leur efficacité dépend souvent d'une épaisseur importante, ce qui complique leur intégration dans des dispositifs compacts ou portables. De plus, leur bande passante est généralement étroite, rendant difficile l'absorption simultanée sur une large gamme de fréquences. Enfin, leur sensibilité à l'angle d'incidence des ondes électromagnétiques réduit leur efficacité dans des environnements où la direction d'arrivée des ondes est variable. Ces contraintes techniques entravent l'adoption de ces matériaux dans des systèmes modernes exigeant à la fois légèreté, large bande, compacité et stabilité angulaire. C'est dans ce contexte que les métamatériaux (MTM) apparaissent comme une alternative prometteuse. Grâce à leur structure artificielle, ces matériaux peuvent être conçus pour manipuler les ondes électromagnétiques à volonté, offrant ainsi une absorption optimisée, même dans des configurations ultra-minces, multibandes, ou dynamiques. Le recours aux MTM permet ainsi de dépasser les limites des absorbants conventionnels et ouvre la voie à de nouvelles générations de dispositifs plus performants, mieux adaptés aux exigences actuelles des domaines des télécommunications, de l'électronique embarquée et du contrôle des interférences [5].

I.3. THEORIE DE L'ABSORPTION DES ONDES ELECTROMAGNETIQUES BASEE SUR LES EQUATIONS DE MAXWELL

Le phénomène d'absorption des ondes électromagnétiques peut être compris à travers l'analyse des équations de Maxwell, qui décrivent l'évolution des champs électrique (E) et magnétique (H) dans les milieux matériels [7]. Lorsqu'une onde EM rencontre un matériau, une partie de son énergie est réfléchie, une autre transmise, et une partie est absorbée (convertie en chaleur ou en d'autres formes d'énergie interne).

Les équations de Maxwell dans un milieu linéaire, homogène et isotrope s'écrivent :

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho \quad (\text{I.1})$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (\text{I.2})$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{I.3})$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (\text{I.4})$$

Avec les relations constitutives :

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E}, \quad \vec{B} = \mu \vec{H}, \quad \vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (\text{I.5})$$

Où:

- ϵ : est la permittivité électrique du matériau,
- μ : est la perméabilité magnétique,
- σ : est la conductivité électrique,
- J : est la densité de courant induite.

I.4.1. Modélisation de l'atténuation dans un conducteur (absorption)

L'absorption est modélisée par la solution de l'équation d'onde dans un milieu conducteur, où une partie de l'onde est dissipée [8]. En introduisant ces relations dans l'équation d'onde pour $\vec{E}$ on obtient :

$$\nabla^2 \vec{E} = \mu \epsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} + \mu \sigma \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (\text{I.6})$$

Cette équation montre que si $\sigma > 0$, un terme dissipatif apparaît, lié à la conversion de l'énergie de l'onde en chaleur (effet Joule).

Pour une onde plane :

$$\vec{E}(z, t) = \vec{E}_0 e^{-\alpha z} e^{i(\omega t - \beta z)} \quad (\text{I.7})$$

On définit :

- α : coefficient d'atténuation (lié à l'absorption),
- β : constante de phase (liée à la propagation),

Dans un bon conducteur, la constante de propagation complexe est donnée par :

$$\gamma = \alpha + i\beta = \sqrt{i\omega\mu(\sigma + i\omega\epsilon)} \quad (\text{I.8})$$

Quand le matériau est très conducteur, on suppose que $\sigma \gg \omega\epsilon$, donc on peut négliger le terme $\omega\epsilon$ et on obtient :

$$\gamma \approx \sqrt{i\omega\mu\sigma} \quad (\text{I.9})$$

Dans un bon conducteur (ou un matériau absorbant), on montre que :

$$\alpha = \beta = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\omega\mu\sigma} \quad (\text{I.10})$$

$$\alpha = \sqrt{\pi\mu\sigma f} \quad (\text{I.11})$$

La profondeur de peau δ est définie comme la distance à laquelle l'amplitude du champ diminue d'un facteur $1/e$, soit :

$$\delta = \frac{1}{\alpha} = \frac{1}{\sqrt{\pi\mu\sigma f}} \quad (\text{I.12})$$

Cette grandeur indique à quelle profondeur l'amplitude du champ EM diminue d'un facteur $1/e$. Une faible δ signifie une absorption plus rapide, typique des matériaux fortement conducteurs ou à forte permittivité magnétique.

I.3.1. Condition d'absorption optimale : Adaptation de l'impédance

Le prochain principe qui pourrait être responsable de l'absorption électromagnétique est l'adaptation d'impédance. C'est un phénomène bien connu qui se produit lorsque les ondes électromagnétiques passent d'un environnement à un autre, une partie de l'énergie EM étant réfléchie, le reste étant transmis. La réflexion est minimisée lorsque les caractéristiques de l'environnement réfléchissant correspondent à celles de l'environnement incident, comme le montre la figure I.1. L'adaptation de l'impédance est une tâche difficile pour atteindre des performances optimales dans la conception d'un absorbant.

Comme dans la plupart des situations, l'air est l'environnement principal avec une impédance caractéristique de 377Ω ; par conséquent, pour obtenir une absorption presque unidirectionnelle, l'impédance de l'absorbant doit être proche de cette valeur à la fréquence souhaitée.

Pour maximiser l'absorption (réduire la réflexion), l'impédance du matériau absorbant :

$$Z = \sqrt{\mu / \varepsilon} \quad (\text{I.13})$$

proche de celle du vide (ou de l'air):

$$Z \approx Z_0 = \sqrt{\mu_0 / \varepsilon_0} \approx 377 \Omega \quad (\text{I.14})$$

Cela permet de minimiser la réflexion à l'interface. Des structures multicouches ou méta matériaux sont souvent utilisés pour ajuster progressivement cette impédance et améliorer l'absorption sur une large bande [9].

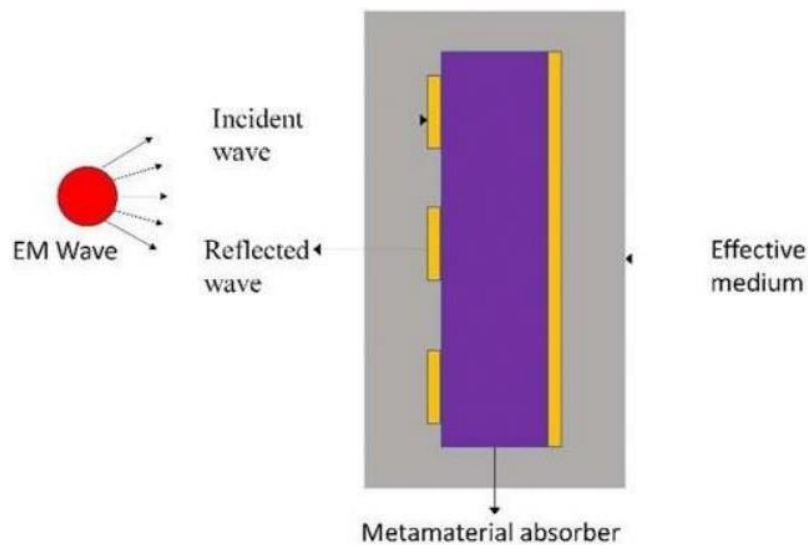


Figure I.1 : Adaptation d'impédance dans un absorbant à métamatériau multicouche [10]

I.3.2. Coefficient d'absorption

L'absorption électromagnétique d'un matériau peut être quantifiée en analysant le comportement d'une onde incidente lorsqu'elle rencontre ce matériau. Lorsque cette onde frappe la surface d'un échantillon, une partie est réfléchiée (R), une autre transmise à travers le matériau (T), et le reste est absorbé (A).

Ces trois phénomènes respectent le principe de conservation de l'énergie, ce qui se traduit par l'équation :

$$A=1-R-T \quad (I.15)$$

Les coefficients de réflexion R et de transmission T sont souvent déterminés à partir des paramètres S mesurés (ou simulés) dans le domaine des hautes fréquences, en particulier S_{11} pour la réflexion et S_{21} pour la transmission [11]. Ces coefficients sont définis comme suit :

$$R=|S_{11}|^2, T=|S_{21}|^2 \quad (I.16)$$

Ainsi, l'absorption devient :

$$A=1-|S_{11}|^2-|S_{21}|^2 \quad (I.17)$$

Dans les cas où le matériau est monté sur un substrat métallique ou un réflecteur parfait (interdisant toute transmission), on a $T \approx 0$, et l'absorption se réduit à :

$$A=1-|S_{11}|^2 \quad (I.18)$$

Cette approche est essentielle pour caractériser les performances des matériaux absorbants tels que les métamatériaux, en leur permettant de viser un taux d'absorption proche de 100 % à certaines fréquences.

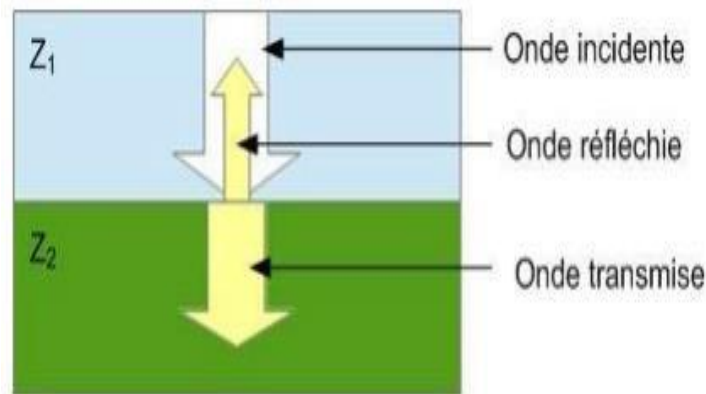


Figure I.2 : Représentation de la réflexion et la transmission d'une onde à l'interface de deux milieux

I.4. MATERIAUX ABSORBANTS ELECTROMAGNETIQUES

L'absorption électromagnétique repose sur la capacité d'un matériau à capter et dissiper l'énergie d'une onde incidente, limitant ainsi sa réflexion. Cette capacité est quantifiée par un coefficient d'absorption, qui dépend fortement de la fréquence du rayonnement. En général, l'absorption des hautes fréquences est plus facile en raison de la faible longueur d'onde, tandis que celle des basses fréquences est plus complexe et nécessite souvent des structures résonantes spécifiques. Pour couvrir un large spectre, il est courant de combiner plusieurs matériaux aux propriétés complémentaires afin d'élargir la bande d'absorption.

Dans le domaine électromagnétique, les ondes centimétriques émises par les équipements électroniques ou les radars exigent l'utilisation de matériaux absorbants avancés. Ces matériaux, appelés RAM (Radar Absorbing Materials), sont conçus pour minimiser ou supprimer l'onde réfléchie en absorbant efficacement l'onde incidente. Ils se présentent généralement sous forme de couches successives aux impédances ajustées, capables de convertir l'énergie électromagnétique en chaleur ou de la disperser, contribuant ainsi à la furtivité des dispositifs en empêchant leur détection par radar.

L'absorbeur idéal serait un revêtement ou une peinture capable d'atténuer efficacement les ondes électromagnétiques sur une large bande de fréquences, quelles que soient la polarisation et l'angle d'incidence. En pratique, un tel matériau universel n'existe pas encore, et concevoir un prototype répondant à toutes ces exigences demeure un défi. Les principales applications des RAM concernent la discrétion radar et la Compatibilité Électromagnétique (CEM). Ils sont notamment utilisés pour limiter les interférences entre les bandes de fréquences des systèmes de télécommunications terrestres et spatiaux, ainsi que dans les chambres anéchoïques, où ils servent à absorber les ondes réfléchies lors des tests électromagnétiques [12].

I.4.1. Absorbants diélectriques

Les absorbants diélectriques utilisent principalement les pertes par polarisation électrique pour atténuer les ondes électromagnétiques. Lorsqu'une onde incidente traverse un matériau diélectrique, les dipôles internes du matériau s'orientent sous l'effet du champ électrique, ce qui provoque une dissipation partielle de l'énergie sous forme de chaleur. Ces matériaux sont particulièrement efficaces à hautes fréquences et sont souvent utilisés pour leurs propriétés légères, non magnétiques, et leur facilité d'intégration dans des structures multicouches. Ils trouvent des Applications en compatibilité électromagnétique, en blindage et dans certaines chambres anéchoïques [13].

I.4.2. Absorbants magnétiques

Les absorbants magnétiques tirent parti des propriétés magnétiques de certains matériaux pour atténuer les ondes électromagnétiques. Leur fonctionnement repose principalement sur deux mécanismes : les pertes par hystérésis magnétique, dues à la réorientation des domaines magnétiques sous l'action du champ magnétique variable, et les courants de Foucault, induits dans les matériaux conducteurs, qui convertissent l'énergie électromagnétique en chaleur [14]. Les matériaux les plus couramment utilisés sont les ferrites (notamment Ni-Zn et Mn-Zn) et certaines poudres métalliques ferromagnétiques, qui combinent des propriétés de perméabilité magnétique élevées avec des pertes importantes à des fréquences spécifiques [15]. Les absorbants magnétiques sont particulièrement efficaces à des fréquences allant de quelques MHz à plusieurs centaines de MHz, et sont largement utilisés en compatibilité électromagnétique (CEM), pour le blindage des équipements sensibles, et dans les chambres anéchoïques afin d'absorber les signaux parasites ou réfléchis. Leur principal inconvénient réside dans leur densité relativement élevée, ce qui peut limiter leur utilisation dans les systèmes embarqués où le poids est critique [16].

I.4.3. Absorbants comportant des circuits analogiques

Les absorbeurs à base de circuits analogiques s'inspirent des techniques de traitement des signaux électriques pour absorber et dissiper l'énergie électromagnétique via des composants électroniques passifs. Ces structures, parfois appelées absorbeurs actifs-passifs, sont constituées de réseaux de résistances, d'inductances et de capacités (RLC) intégrés à des surfaces conductrices ou diélectriques [17] [18]. Le principe repose sur l'adaptation d'impédance entre l'onde incidente et la surface, suivie d'une dissipation de l'énergie EM sous forme de chaleur dans les résistances. En ajustant la configuration des composants et leurs valeurs, on peut contrôler précisément la fréquence d'absorption, la largeur de bande et parfois même s'adapter dynamiquement à des signaux variables (dans le cas de circuits semi-actifs).

Ces structures sont très utiles pour les applications de protection électromagnétique dans l'électronique embarquée, les systèmes radiofréquence, ou encore les dispositifs de test en CEM. De plus, grâce aux avancées en micro fabrication, ces circuits peuvent être miniaturisés et intégrés directement dans des surfaces fonctionnelles ou des couches de revêtements, tout en maintenant de bonnes performances d'absorption dans des gammes de fréquences ciblées. Leur flexibilité de conception en fait des candidats intéressants pour des absorbeurs reconfigurables, adaptables à différents environnements électromagnétiques [19].

Les premiers matériaux absorbants qui possèdent des circuits analogiques historiques sont constitués de bobines placées sur un absorbant magnétique, qui est plus finement accordé qu'un absorbant électrique. Le problème avec ces premiers matériaux est leur forte dépendance à la polarisation du champ magnétique basée sur le positionnement de la bobine, ce qui entraîne une fonctionnalité trop limitée pour plusieurs applications. Des études plus récentes se concentrent plus fréquemment sur les surfaces sélectives.

Des circuits analogiques connus sous le nom de surfaces sélectives en fréquences (FSS) peuvent permettre de réaliser des absorbants. Contrairement aux circuits analogiques précédents, les FSS sont en métal pur et sont généralement utilisés comme filtres passe-bande pour les radômes. Les FSS sont ainsi capables de contrôler les deux composants inductifs et capacitifs et sont basés sur un diélectrique hautement absorbant qui permet d'ajuster le composant résistif [20].

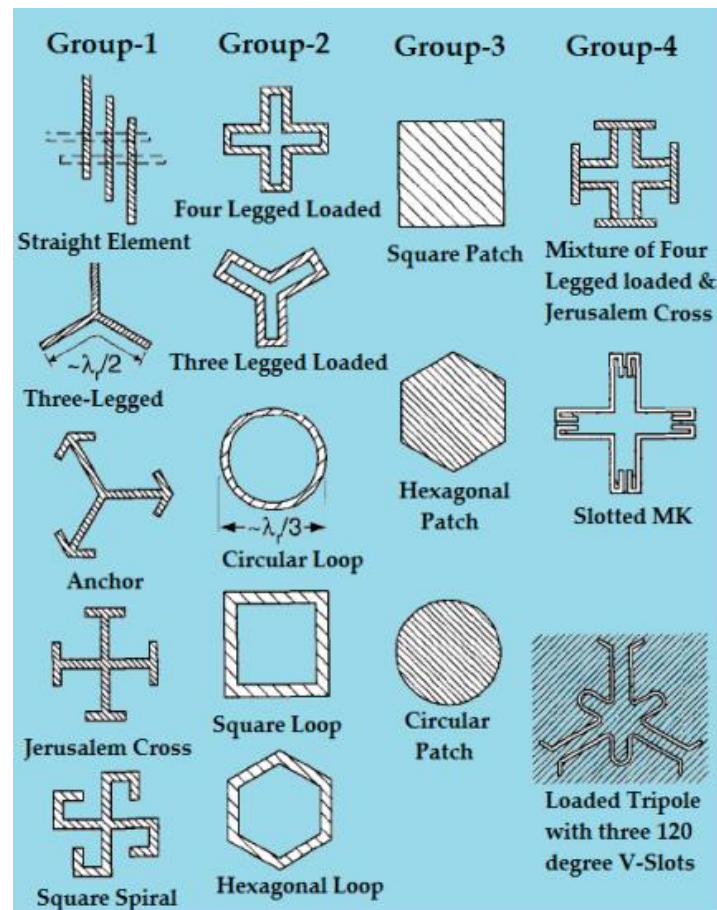


Figure I.20 : Liste non exhaustive de formes de FSS [20]

I.4.4. Absorbants métamatériaux

La recherche autour des métamatériaux est très active aujourd'hui car ce sont des matériaux qui présentent des propriétés électromagnétiques que l'on ne retrouve pas dans les matériaux naturels. Ils procurent beaucoup d'espoirs pour le développement de nouvelles technologies. Ce sont des matériaux composites artificiels qui ouvrent la voie à de nouveaux développements que ce soit en optique, en térahertz ou en micro-onde.

Les absorbants à base de méta matériaux exploitent des structures artificielles, appelées cellules unitaires ou résonateurs, agencées de manière périodique sur une surface. Ces structures sont conçues pour produire des résonances électromagnétiques contrôlées, permettant d'absorber efficacement les ondes EM à des fréquences bien définies. Contrairement aux matériaux naturels, les métamatériaux peuvent présenter une permittivité (ϵ) et une perméabilité (μ) négatives ou ajustables, rendant possible une absorption quasi parfaite dans des bandes spécifiques. En adaptant leur géométrie, il est possible de contrôler la fréquence centrale, la largeur de bande, la polarisation et même la directionnalité de l'absorption.

Ces structures sont souvent réalisées sous forme de couches minces, ce qui les rend très attractives pour des applications où l'encombrement et le poids sont critiques, comme dans les domaines de l'aéronautique, de la furtivité radar, ou de l'emballage électronique haute fréquence. Les métamatériaux peuvent aussi être intégrés dans des configurations multicouches ou hybrides (avec des diélectriques ou matériaux conducteurs) pour étendre leur bande d'absorption ou pour atteindre une absorption multi-bande. Malgré leurs performances prometteuses, les principaux défis restent liés à leur coût de fabrication, leur sensibilité à l'angle d'incidence et à la polarisation, ainsi qu'à leur complexité de conception.

Les recherches sur les métamatériaux se sont longtemps orientées sur la suppression des pertes comme dit précédemment. Les recherches pour réaliser des absorbants à base de méta matériaux ont débuté après beaucoup d'autres applications des métamatériaux. Ce nouveau type d'absorbant a été étudié à partir de 2002, avec une publication de N. Engheta [21] puis plus intensément à partir de 2008 sur de nombreuses plages de fréquences comme en térahertz, en infrarouge proche et dans le domaine du visible [6].

Dans le domaine des micro-ondes, un article fondamental publié en 2008 par N. I. Landy [22] marque un tournant dans le développement des nouveaux types d'absorbants. Ce travail présente un matériau absorbant traversant dont l'impédance est soigneusement ajustée pour se rapprocher de celle du vide à une fréquence spécifique, optimisant ainsi l'absorption. L'étude met également en évidence la localisation des pertes électromagnétiques, concentrées dans les zones

métalliques du méta matériau, tandis que le diélectrique utilisé (époxy FR4), peu absorbant, favorise le piégeage de l'onde à l'intérieur de la structure. Le matériau obtenu présente une épaisseur réduite, comparable à celle des absorbeurs basés sur circuits analogiques, tout en restant plus léger que les absorbants magnétiques, qui bien qu'également minces, sont plus lourds et complexes à concevoir.

I.5. LES APPLICATIONS DES ABSORBEURS ELECTROMAGNETIQUE

I.5.1. Furtivité et camouflage radar

La furtivité électromagnétique est une technologie utilisée pour réduire la détection des véhicules militaires en utilisant des absorbeurs électromagnétiques. Ces absorbeurs limitent la réflexion radar en adaptant la résistance des matériaux à l'air. Deux stratégies principales consistent à utiliser des absorbants spécifiques et des structures géométriques pour éviter la réflexion. Des techniques comme les ferrites ou les métaux, le nid d'abeille ou les multicouches, et des technologies comme les écrans de Salisbury et les absorbeurs quart d'onde aident à créer des interférences destructrices [22]. Les avancées dans les matériaux composites et les nanotechnologies ont rendu ces absorbeurs plus efficaces, légers et performants, comme le Lockheed F-117 Night Hawk et le F-35 Lightning II [23].



Figure I.4 : Le lockhed F-117 Nighthawk [24]

I.5.2. Chambres anechoïques

Les salles électromagnétiques et acoustiques sont conçues pour absorber les ondes électromagnétiques et acoustiques, réduisant ainsi les réflexions parasites et les interférences. Ils sont utilisés dans divers domaines tels que la recherche sur la compatibilité électromagnétique, les tests d'antennes, l'évaluation de la signature radar et les expériences en radiofréquence. La structure interne est composée de matériaux absorbants, souvent sous forme de cônes ou de pyramides.

L'adaptation de ces absorbeurs garantit une absorption maximale sur une large gamme de fréquences. Les absorbeurs modernes offrent une meilleure absorption grâce aux avancées dans les nanomatériaux et les métaux [25].

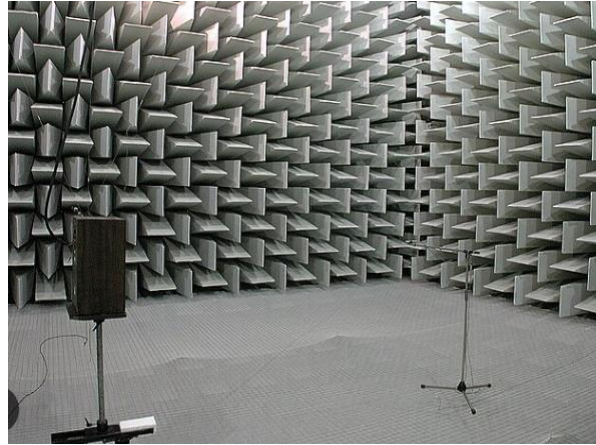


Figure I.5 : Chambres Anéchoïques [25]

I.5.3. Absorption des interférences électromagnétiques (EMI)

Les interférences électromagnétiques (EMI) se réfèrent aux perturbations causées par des champs électromagnétiques insolubles qui affectent le fonctionnement des appareils électroniques. Ces interférences peuvent provenir de sources naturelles ou artificielles, telles que les circuits électroniques, les équipements à radiofréquence ou les moteurs électriques. Pour limiter ces interférences, des absorbants électromagnétiques (EMI) sont utilisés pour dissiper l'énergie EMI sous forme de chaleur [26]. Ces absorbeurs sont généralement fabriqués à partir de polymères à base de ferrites, de nanomatériaux ou de matériaux spécialement conçus pour une large bande de fréquences. Ils sont couramment utilisés dans l'aérospatiale, l'électronique embarquée, les télécommunications et les systèmes informatiques sensibles [27].

I.5.4. Amélioration des performances des antennes

Optimiser les performances des antennes est crucial pour une meilleure transmission et réception électromagnétiques dans les systèmes de communication sans fil, les radars et les systèmes satellites. Les techniques incluent l'ajustement de l'impédance, les matériaux diélectriques hauts performance et l'intégration de surfaces métalliques ou de réseaux de directivité améliorés. L'ajustement de l'impédance minimise les réflexions et maximise le transfert d'énergie entre l'antenne et l'environnement [28]. Les matériaux à faible perte réduisent les atténuations et

améliorent l'efficacité du rayonnement. Les antennes à réseau de phases et les antennes à matrice métallique offrent un contrôle directionnel précis, optimisant la sensibilité et la résistance aux interférences. Ces avancées sont appliquées dans la 5G, l'aérospatiale et l'IoT [29, 30].



Figure I.6 : Optimisation des performances d'antennes dans les appareils lot compacts [31]

I.5.5. Technologies des capteurs et gestion de l'énergie

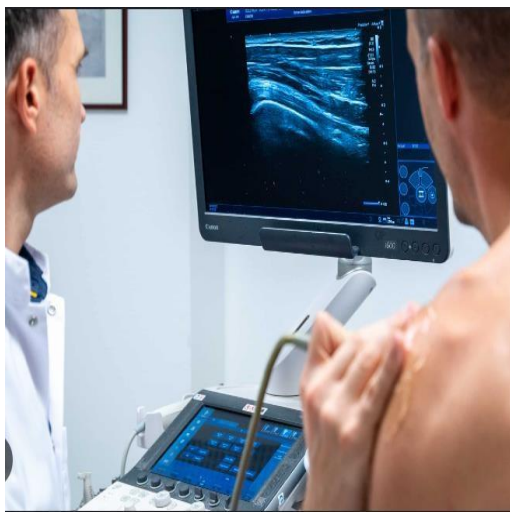
Les capteurs jouent un rôle important dans de nombreux domaines technologiques, tels que l'Internet des objets (IoT), l'automatisation industrielle, les dispositifs médicaux et les systèmes de surveillance. Leur capacité à détecter et à transmettre des informations avec une faible consommation d'énergie est la base de leur efficacité. Pour maximiser leurs performances, plusieurs stratégies énergétiques sont mises en œuvre, telles que la récupération d'énergie environnementale (energy harvesting) à partir de sources comme le soleil, les vibrations ou les ondes radiofréquences [32]. Leur autonomie peut être augmentée en utilisant des capteurs à faible consommation d'énergie et des protocoles de communication optimisés (tels que LoRa, ZigBee ou Bluetooth Low Energy) [33]. De plus, le développement de capteurs plus intelligents, précis et autonomes a été rendu possible grâce aux avancées en nanotechnologie et en matériaux intelligents, ce qui a réduit leur dépendance aux batteries. Ces avancées sont particulièrement importantes pour une utilisation dans des environnements difficiles où le maintien de l'énergie est un défi [34].



Figure I.7 : Les capteurs IoT : la solution intelligente pour économiser de l'énergie [35]

I.5.6. Dispositifs médicaux et biomédicaux

Ces dispositifs médicaux et biomédicaux jouent un rôle crucial dans la surveillance, le diagnostic et le traitement des patients. Ils englobent une large gamme de technologies, allant des équipements d'imagerie médicale (IRM, scanner, échographie) aux implants intelligents, en passant par les capteurs biométriques et les systèmes de télémédecine. Ces dispositifs deviennent de plus en plus précis, autonomes et compacts grâce aux avancées en nanotechnologie, en intelligence artificielle et en biocapteurs. Par exemple, les implants cardiaques connectés permettent une surveillance à distance en temps réel des patients [36], tandis que les biocapteurs intégrés dans les vêtements identifient des paramètres physiologiques tels que la fréquence cardiaque ou les niveaux de glucose [37]. Les défis importants incluent la biocompatibilité et la sécurité des matériaux utilisés, nécessitant des réglementations strictes comme l'ISO 13485 pour garantir la qualité et la sécurité des dispositifs [38]. Ces technologies révolutionnent le domaine médical en permettant un diagnostic précoce, un traitement individualisé et une meilleure gestion des patients.



(a)



(b)

Figure I.8 : (a) échographie de l'épaule [38] ; (b) IRM (Imagerie par résonance magnétique) [39]

I.6. CONCLUSION

Ce premier chapitre a permis de poser les fondations nécessaires à la compréhension des absorbeurs électromagnétiques, tant d'un point de vue historique que théorique. À travers une rétrospective de leur évolution, il a été mis en évidence que, malgré leur utilité avérée, les

absorbeurs traditionnels présentent des limites importantes en termes d'épaisseur, de bande passante et de sensibilité angulaire. Ces contraintes ont motivé l'émergence de solutions plus innovantes, notamment celles fondées sur les métamatériaux.

L'étude théorique, appuyée sur les équations de Maxwell, a permis d'identifier les mécanismes fondamentaux de l'absorption électromagnétique, en particulier le rôle de l'atténuation dans les conducteurs et l'importance d'une bonne adaptation d'impédance pour atteindre une absorption optimale. La présentation des différentes familles de matériaux absorbants ; diélectriques, magnétiques, composites et métamatériaux ; a souligné la diversité des approches disponibles selon les exigences des applications visées.

Enfin, un panorama des applications actuelles et émergentes a été dressé, démontrant le rôle central des absorbeurs dans des domaines stratégiques comme la furtivité radar, la compatibilité électromagnétique, l'optimisation des performances d'antennes ou encore la gestion de l'énergie. Ce contexte général justifie pleinement l'intérêt croissant porté aux absorbeurs métamatériaux, qui feront l'objet du chapitre suivant, dédié à leurs propriétés singulières et à leur utilisation dans la conception d'absorbeurs électromagnétiques nouvelle génération.

CHAPITRE 02:
Généralités sur les Métamatériaux
Absorbants

II.1. INTRODUCTION

Les absorbeurs électromagnétiques traditionnels sont confrontés à des contraintes telles qu'une épaisseur considérable, un poids conséquent et une bande passante limitée, surtout à basse fréquence. Les metamatériaux (MTM) offrent une approche novatrice grâce à leurs caractéristiques artificielles distinctives, qui permettent la création d'absorbeurs plus performants. Leur configuration spécifique optimise l'absorption des ondes, procurant ainsi des performances améliorées en matière de camouflage et de filtrage, tout en dépassant les limitations des matériaux conventionnels. Par leur structure sub-longueur d'onde, les MTM offrent la possibilité de créer des absorbeurs mince, légers et à large bande. Cela optimise le contrôle des ondes électromagnétiques pour diverses utilisations, y compris la diminution des interférences et le camouflage.

Ce chapitre a pour objectif de présenter les principes fondamentaux des MTM, tels que les paramètres effectifs, les caractéristiques remarquables et leur modélisation en circuit résonnant RLC. Un focus particulier a été mis aux MTM absorbants, leur principe de fonctionnement et les différentes méthodes de conception, ainsi que leur classification selon le domaine fréquentiel et selon le mode de fonctionnement.

II.2. PRINCIPES FONDAMENTAUX DES METAMATERIAUX (MTM)

Les MTM sont des matériaux artificiels dont les propriétés électromagnétiques proviennent de leur structure plutôt que de leur composition chimique. Contrairement aux matériaux naturels, les MTM permettent d'obtenir des comportements électromagnétiques inaccessibles avec les matériaux classiques, notamment un indice de réfraction négatif [40].

II.2.1. Définition et origine du concept

Le terme "méta matériau" est dérivé du grec "méta", signifiant "au-delà", ce qui reflète l'idée que ces matériaux vont au-delà des limites imposées par la nature. Le concept a émergé dans les années 1960 [41], mais c'est à partir des années 2000, avec les travaux de Veselago et Pendry [42], que l'intérêt scientifique pour les metamatériaux s'est intensifié.

Les metamatériaux sont des matériaux artificiels dont les propriétés électromagnétiques proviennent davantage de leur structure interne que de leur composition chimique. Ils sont généralement constitués d'inclusions périodiques, de dimensions inférieures à la longueur d'onde

des ondes électromagnétiques qu'ils manipulent. Cette structuration sub-longueur d'onde permet d'obtenir des propriétés effectives qui n'existent pas dans les matériaux naturels, telles qu'un indice de réfraction négatif, une permittivité ou une perméabilité négative, ou encore des anisotropies électromagnétiques contrôlées [41].

II.2.2. Paramètres effectifs et indice de réfraction

Les propriétés des métamatériaux sont souvent décrites par deux paramètres fondamentaux :

- La permittivité effective ϵ_{eff} : elle décrit la réponse électrique du matériau à un champ électrique.
- La perméabilité effective μ_{eff} : elle décrit la réponse magnétique du matériau à un champ magnétique.

Ces paramètres peuvent prendre des valeurs négatives ou très élevées. Grâce à une conception soignée des motifs (par exemple, les structures en anneau fendues ou SRR, les fils métalliques périodiques, etc), il est possible de concevoir des métamatériaux ayant des bandes interdites, des comportements résonants, ou des propriétés directionnelles [43, 44].

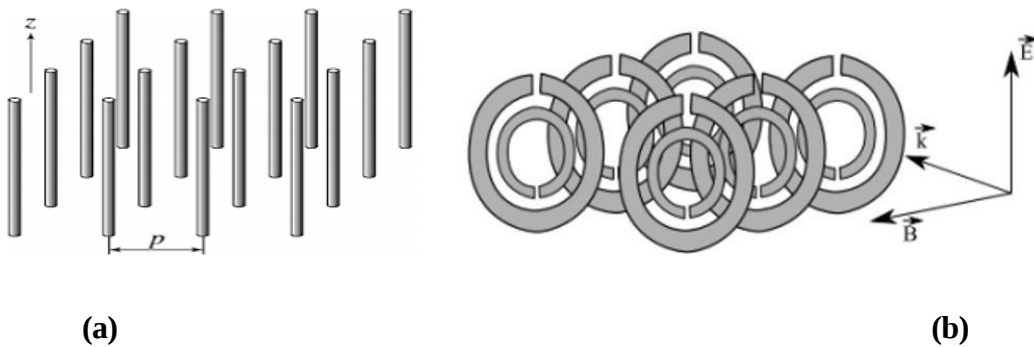


Figure II.1 : (a) Structure fils fins présentant ϵ négative et μ positive [43] ; (b) Configuration périodique d'un résonateur à anneau fendu circulaire (Split Ring Résonateur : SRR) présentant μ négative et ϵ positive [44]

Ces paramètres permettent de définir un indice de réfraction effectif :

$$n_{\text{eff}} = \sqrt{\epsilon_{\text{eff}} \cdot \mu_{\text{eff}}} \quad (\text{II.1})$$

Dans certains cas, ces grandeurs peuvent prendre des valeurs négatives dans certaines plages de fréquence, ce qui conduit à un indice de réfraction négatif.

Un MTM à indice de réfraction négatif, également appelé MTM doublement négatif, est conçu pour avoir une permittivité électrique (ϵ) et une perméabilité magnétique (μ) négatives. Cette conception permet à la lumière de se déplacer de manière inhabituelle à travers le matériau, inversant sa direction de propagation, ce qui conduit à des effets optiques intéressants [43].



Figure II.2 : Structure proposée par D. Smith (SRR + Tige) présentant Un milieu doublement négatif [43]

II.2.3. Caractéristiques remarquables des MTM

Les MTM présentent plusieurs propriétés électromagnétiques uniques :

- Réfraction négative : la direction de propagation de l'onde réfractée est opposée à celle de l'onde incidente selon les lois de Snell modifiées.
- Invisibilité ou camouflage électromagnétique : certaines structures peuvent détourner les ondes autour d'un objet, rendant celui-ci "invisible" aux ondes radar ou optiques.
- Amplification du champ proche (super lentille) : certains MTM permettent de dépasser la limite de diffraction classique et de focaliser l'énergie au-delà des capacités des lentilles standards.
- Propagation anisotrope ou bi-anisotrope : la réponse électromagnétique dépend de la direction de l'onde incidente, ce qui permet un contrôle fin de la polarisation et de la direction des ondes.

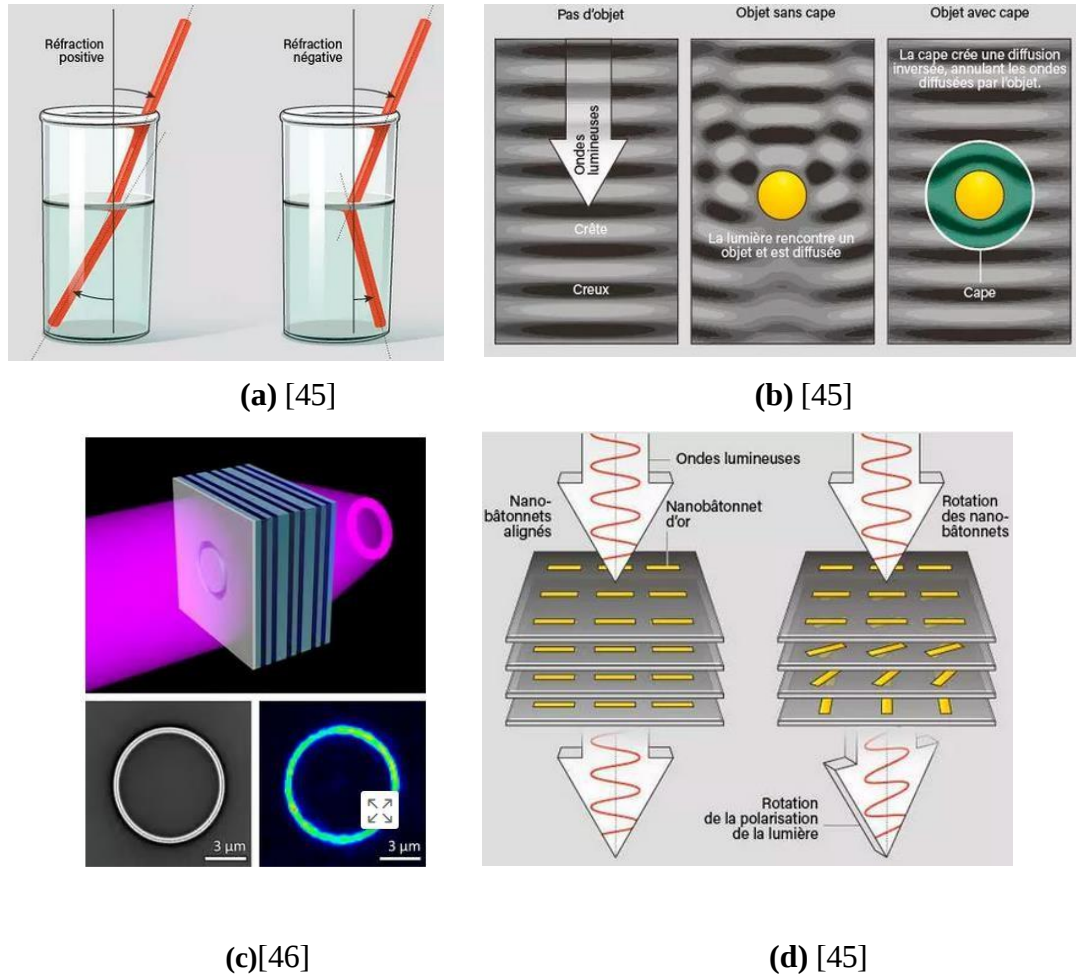


Figure II.3 : (a) Réfraction négative ; (b) Invisibilité ; (c) Super lentille ; (d) Contrôle de la polarisation

II.3. MODELISATION DES MTM PAR CIRCUIT RLC

Parmi les méthodes de modélisations des MMA est les méthodes basées sur un modèle de circuit des cellules unitaires MMA. Ces méthodes ont été mises au point pour prédire soit le comportement de l'ensemble du milieu MMA ou aussi le comportement des inclusions séparément [47]. Ces modèles basés sur le circuit équivalent dépendent principalement de la géométrie et les dimensions des inclusions. Ils décrivent le comportement magnétique des inclusions plutôt que le comportement électrique. Les MTM peuvent être modélisés comme des réseaux de circuits résonants RLC, dans lesquels :

- ✓ Les capacités représentent les effets électrostatiques,
- ✓ Les inductances traduisent les effets magnétiques,
- ✓ Les résistances modélisent les pertes.

Cette modélisation facilite la compréhension des phénomènes de résonance et permet d'optimiser les structures pour atteindre les caractéristiques souhaitées.

Dans la littérature, différentes formes d'inclusions ont été étudiées en utilisant ces modèles. Particulièrement, le comportement magnétique de l'inclusion circulaire SRR formé par deux anneaux concentriques métalliques a été analysé. Marques et al. [48] ont présenté une étude quasi-statique de l'inclusion SRR en proposant un circuit-équivalent modèle pour le comportement capacitif des inclusions [49].

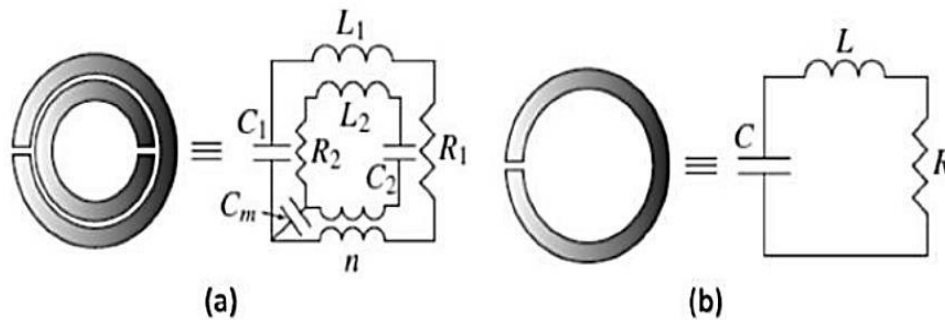


Figure II.4 : Modèle du circuit équivalent du SRR : **(a)** Configuration d'un SRR double ; **(b)** Configuration simple d'un SRR [50]

Dans la configuration anneau double, le couplage capacitif et inductif entre le grand et le petit anneau sont modélisés par une capacité de couplage et par un transformateur (rapport de transformation n), respectivement. Dans la Figure II.4 (b), l'anneau est équivalent à un circuit RLC résonateur, avec une fréquence de résonance. Le SRR double est équivalent au SRR simple si le couplage mutuel est faible [51].

La fréquence de résonance pour une approximation de premier ordre est :

$$f_0 \approx \frac{c}{2\pi r \sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad \text{II.2}$$

Où c : c'est la vitesse de la lumière, et r est le rayon moyen de l'anneau.

Cette forme donne une intuition sur le fait que plus l'anneau est grand, plus la fréquence est basse [51].

II.4. LES METAMATERIAUX ABSORBANTS

Les MTM absorbants sont des structures artificielles conçues pour absorber efficacement les ondes électromagnétiques dans des bandes de fréquence ciblées. Leur rôle est de réduire la réflexion et d'empêcher la transmission des ondes, les piégeant dans la structure pour les dissiper sous forme de chaleur. Ils jouent un rôle central dans les domaines des radars, de la détection, de l'imagerie et des dispositifs furtifs.

Les MTM offrent un champ de possibilités novateur pour la conception d'absorbants électromagnétiques performants. Grâce à leurs propriétés artificielles et à leur capacité de manipulation fine des ondes, ils constituent une alternative prometteuse face aux limitations des matériaux absorbants classiques, en particulier pour les applications à faibles épaisseurs et à bandes spécifiques ou larges. De plus, ils permettent d'obtenir des structures minces, efficaces sur des bandes de fréquence précises ou élargies grâce à des arrangements multicouches ou multi-résonants [52].

II.4.1. Principe de fonctionnement

Les MTM absorbants sont conçus pour minimiser la réflexion et maximiser l'absorption des ondes électromagnétiques incidentes. Leur fonctionnement repose sur deux mécanismes clés :

- ✓ **Le premier est l'adaptation d'impédance** : pour empêcher la réflexion à l'interface air/méta matériau, l'impédance effective de la structure doit être proche de celle du vide libre ($Z \approx 377 \Omega$), permettant ainsi à l'onde de pénétrer efficacement.
- ✓ **Le second mécanisme repose sur les pertes internes** : une fois l'onde piégée à l'intérieur de la structure, son énergie est dissipée par des mécanismes résistifs ou diélectriques. Cela est rendu possible par l'utilisation de matériaux à fortes pertes (tels que le graphite, le VO_2 ou des films minces résistifs), combinés à des structures résonantes (comme les anneaux fendues, croisillons ou spirales) qui concentrent le champ électromagnétique localement, favorisant une absorption efficace à des fréquences spécifiques [53].

II.4.2. Méthodes de conception des MTM absorbants

La conception des MTM absorbants repose principalement sur des architectures multicouches ou sur l'agencement périodique de cellules résonantes. La structure de base comprend généralement trois couches : un plan métallique inférieur servant de réflecteur (pour bloquer la transmission des ondes), une couche diélectrique jouant le rôle d'isolant et permettant

d'ajuster l'impédance, et un motif métallique supérieur résonant (souvent de forme géométrique simple comme une croix, un anneau ou un carré). Les structures résonantes utilisées varient selon l'application ciblée : anneaux fendus (split-ring résonateurs, SRR), formes croisées, patches carrés, motifs fractals (comme ceux de Sierpinski ou de Minkowski) ou encore structures chirales. Ces géométries sont choisies pour leur capacité à créer des résonances spécifiques et à maximiser l'absorption à certaines fréquences. L'optimisation de ces structures passe souvent par des simulations électromagnétiques avancées afin d'adapter précisément les performances aux exigences de bande passante, de finesse et d'efficacité [53]. Les conceptions les plus largement adoptées de ces absorbeurs parfaits sont illustrées à la Figure II.5 [11].

Les absorbeurs à base de MTM sont principalement utilisés dans les gammes de fréquences des micro-ondes, du TéraHertz et de l'optique, en fonction des exigences spécifiques de diverses applications [54].

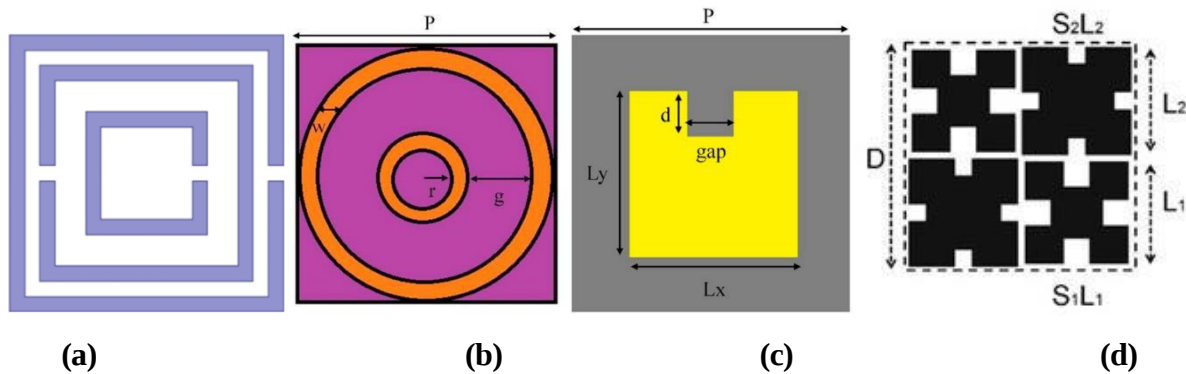


Figure II.5 : Absorbeur MTM parfait : (a) Triple SRR carrée ; (b) anneaux ; (c) Patch ; (d) Fractal [11]

II.5. CLASSIFICATION DES ABSORBEURS MTM SELON LA FREQUENCE

Les absorbants à base de MTM peuvent être classés en fonction de la bande de fréquences pour laquelle ils sont conçus. Chaque gamme présente des défis techniques particuliers et des applications spécifiques. Selon leur architecture, les absorbeurs MTM peuvent être conçus pour fonctionner dans plusieurs gammes de fréquence :

II.5.1. Absorbants MTM en micro-ondes (MHz – quelques dizaines de GHz)

Il s'agit de la bande de fréquences la plus mature pour les MTM absorbants, avec des applications bien établies dans les domaines des télécommunications et de la défense. Ces structures sont couramment utilisées pour la réduction de la signature radar (technologies furtives), le blindage électromagnétique (EMI shielding), les antennes à faible détectabilité, ainsi que pour

l'absorption sélective dans les dispositifs à guide d'ondes tels que les filtres, les coupleurs et les cavités résonantes [55].

II.5.2. Absorbants MTM en ondes millimétriques (30 – 300 GHz)

Dans la bande des ondes millimétriques, les absorbeurs à base de méta matériaux (MTM) jouent un rôle essentiel dans des domaines technologiques en plein essor. Grâce à leur capacité à contrôler finement l'absorption électromagnétique à des fréquences précises, ces structures sont particulièrement adaptées aux communications sans fil de nouvelle génération (5G et 6G) [52], où elles permettent de réduire les interférences et d'améliorer la performance des antennes. Elles sont également utilisées dans les systèmes d'imagerie active et passive, comme les scanners de sécurité pour la détection sans contact d'objets dissimulés. En outre, les MTM absorbants contribuent à l'amélioration des radars automobiles, notamment dans les bandes V (60 GHz) et W (77 GHz), en minimisant les réflexions parasites et en renforçant la précision de détection [56].

II.5.3. Absorbants MTM en Téra hertz (0.1 – 10 THz)

Dans la bande térahertz (0.1 – 10 THz), les absorbants MTM jouent un rôle clé dans des applications de pointe telles que l'imagerie biomédicale non invasive, la détection de menaces dissimulées (armes, explosifs) pour la sécurité, ainsi que la spectroscopie THz pour l'analyse chimique ou biologique. Grâce à leur capacité à contrôler précisément l'absorption à des fréquences spécifiques, ces structures permettent d'améliorer la sensibilité des capteurs et la résolution des systèmes d'imagerie. De plus, les absorbants THz sont prometteurs pour les futures communications sans fil ultra-rapides à courte portée, notamment en vue de la 6G. L'intégration de matériaux à changement de phase (comme le VO₂) ou de structures multi-résonantes permet d'élargir la bande d'absorption et de rendre ces dispositifs plus adaptatifs et compacts [57].

II.5.4. Absorbants MTM en infrarouge et visible (10 THz – 750 THz)

Dans les domaines de l'infrarouge et du visible (10 THz – 750 THz), les absorbants à base de MTM bénéficient des avancées en nano fabrication, permettant de concevoir des structures sub-longueur d'onde ultra-compactes. Ces MTM sont utilisés pour réaliser des capteurs optiques à haute sensibilité, des détecteurs biomoléculaires miniaturisés et des photos détectrices performants. Leur capacité à contrôler finement l'absorption spectrale les rend également adaptés à des applications de camouflage thermique dans l'infrarouge moyen, en rendant les objets

indétectables par les caméras thermiques. Ces dispositifs ouvrent la voie à des technologies avancées en optoélectronique et en sécurité [58].

L'intégration de matériaux actifs comme le dioxyde de vanadium (VO_2) ou le graphène dans les absorbants MTM infrarouge et visible renforce significativement leur capacité de modulation dynamique. Le VO_2 , en particulier, est un matériau à transition de phase qui passe d'un état isolant à un état métallique autour de 68 °C, ce qui permet de basculer les propriétés optiques de l'absorbeur en fonction de la température, de la tension ou de la lumière incidente. De son côté, le graphène, grâce à sa conductivité optique réglable par effet de champ électrique, permet de concevoir des dispositifs optoélectroniques dynamiquement reconfigurables. Ces matériaux ouvrent la voie à des applications avancées telles que le camouflage thermique adaptatif, les modulateurs IR actifs, les capteurs hyperspectraux ou encore les dispositifs à absorption accordable dans le domaine visible [59, 60, 61].

II.6. CLASSIFICATION DES ABSORBEURS MTM SELON LE MODE DE FONCTIONNEMENT

Les absorbateurs à base de méta matériaux (MTM) peuvent être finement optimisés pour présenter une impédance équivalente à celle du vide, tout en maximisant les pertes internes. Cette combinaison permet de minimiser efficacement la réflexion de l'onde électromagnétique incidente et d'en absorber l'énergie avec une grande efficacité. L'absorption peut être conçue pour être narrowband (bande étroite) ou broadband (bande large), en fonction de l'empilement et des résonances multiples. Dans la section suivante, nous proposons une classification de ces absorbateurs MTM selon leur mode de fonctionnement [62].

II.6.1. Absorbateurs MTM à bande étroite

Les absorbateurs méta matériaux à bande étroite sont conçus pour fonctionner autour d'une ou deux fréquences spécifiques, généralement à l'aide de structures résonantes soigneusement ajustées. Leur fonctionnement repose principalement sur l'accord entre la fréquence de résonance de la cellule unitaire et la fréquence de l'onde électromagnétique incidente, permettant une absorption quasi-parfaite à cette fréquence précise. Grâce à leur conception relativement simple, ils présentent une forte sélectivité spectrale et un rendement élevé autour du pic de résonance. Toutefois, cette sélectivité constitue également leur principale limitation : leur efficacité chute rapidement dès que l'on s'écarte de la fréquence cible. Ces absorbateurs sont donc bien adaptés aux

applications nécessitant une absorption ciblée, telles que les filtres sélectifs, les dispositifs d'imagerie hyperspectrale ou la réduction de signature à des fréquences spécifiques, mais ils ne conviennent pas aux applications nécessitant une large couverture fréquentielle [22, 63].

En 2008, Landy *et al.* [22] ont conçu le tout premier MTM absorbant à bande étroite, devenu emblématique, utilisant un résonateur en anneau fendu (SRR) et un fil conducteur découpé. Comme illustré dans la Figure II.6, la structure était composée de trois couches : deux résonateurs conducteurs et un substrat diélectrique.

Sur la Figure II.7 (a), le MTM conçu par Landy [10] a atteint une absorption de 96 % à 11,48 GHz par simulation, et de 88 % à 11,5 GHz en expérimentation. Ce MMA à bande étroite offrait une absorption élevée grâce au couplage magnétique entre l'anneau fendu et le fil conducteur dans un même plan parallèle. La réponse magnétique a été obtenue grâce aux courants antiparallèles induits par le fil découpé et le fil central des résonateurs.

Le mécanisme d'absorption a été théoriquement expliqué par les pertes ohmiques et diélectriques, comme détaillé dans la Figure II.7 (b).

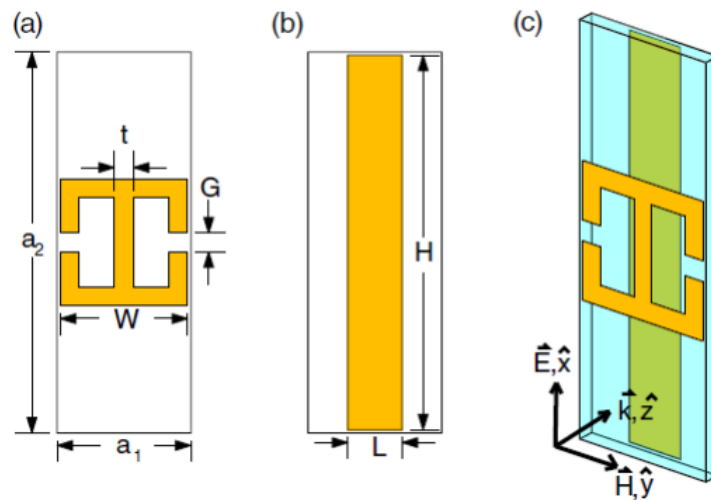


Figure II.6 : Illustration des travaux de N. I. Landy avec en (a) face avant ; en (b) face arrière, et en (c) perspective [22]

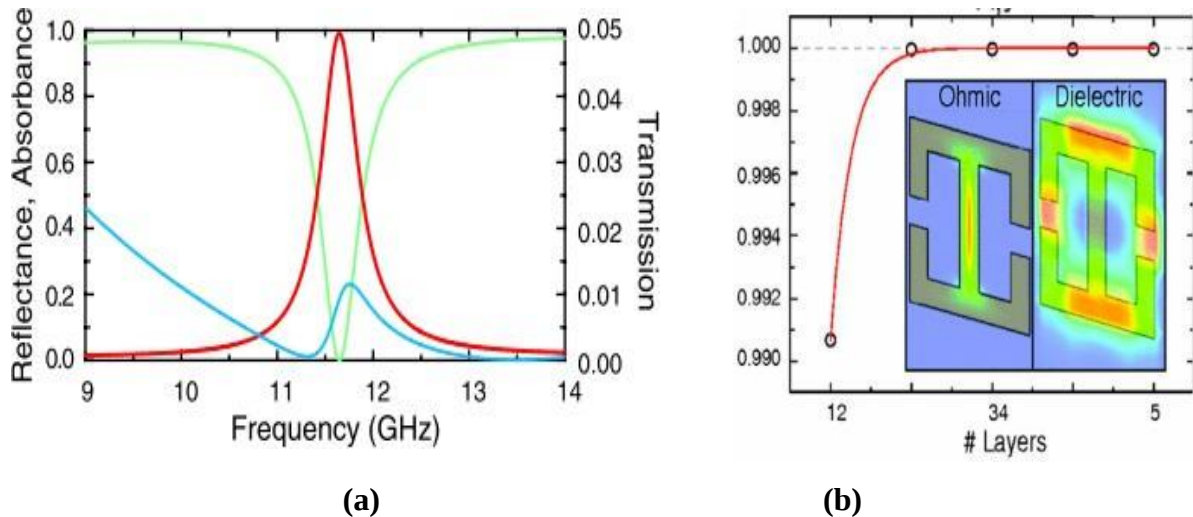


Figure II.7 : (a) : Coefficients A (Rouge), R (vert) et T (bleu) ; (b) : Pertes Ohmique et diélectriques [22]

II.6.2. Absorbeurs MTM à multi-bande

Les absorbeurs MTM multi bandes sont conçus pour absorber efficacement l'énergie électromagnétique à plusieurs fréquences distinctes. Cette capacité est généralement obtenue en intégrant dans une même cellule unitaire plusieurs résonateurs ayant des dimensions, des formes ou des orientations différentes, chacun étant accordé à une fréquence spécifique. Contrairement aux structures à bande étroite, ces absorbeurs permettent de répondre à des besoins plus complexes où plusieurs bandes d'absorption sont nécessaires, comme dans les dispositifs multi spectraux, les capteurs multifréquences ou les systèmes de réduction de signature couvrant plusieurs menaces. L'un des grands avantages de ces structures est leur compacité, car elles permettent une absorption multifréquence sans devoir empiler de nombreuses couches. En revanche, la conception devient plus complexe : les résonateurs doivent être agencés de manière à minimiser les interférences mutuelles et à préserver l'efficacité d'absorption à chaque bande ciblée. Les performances de ces absorbeurs dépendent donc fortement de la précision de la conception géométrique et du choix des matériaux constitutifs [59, 62].

La référence [64] propose un absorbeur MTM bi-bande. La cellule unitaire de la structure proposée est conçue à l'aide d'un résonateur triangulaire, d'un substrat diélectrique FR4 ($\epsilon_r = 4,3$, $\tan\delta = 0,025$), avec un plan de masse (figure II.8(a)). Deux pics d'absorption remarquables ont été obtenus, avec des taux d'absorption de 98,05 % et 96,43 % aux fréquences de résonance de 3,84 GHz et 6,62 GHz (figure II.8(b)).

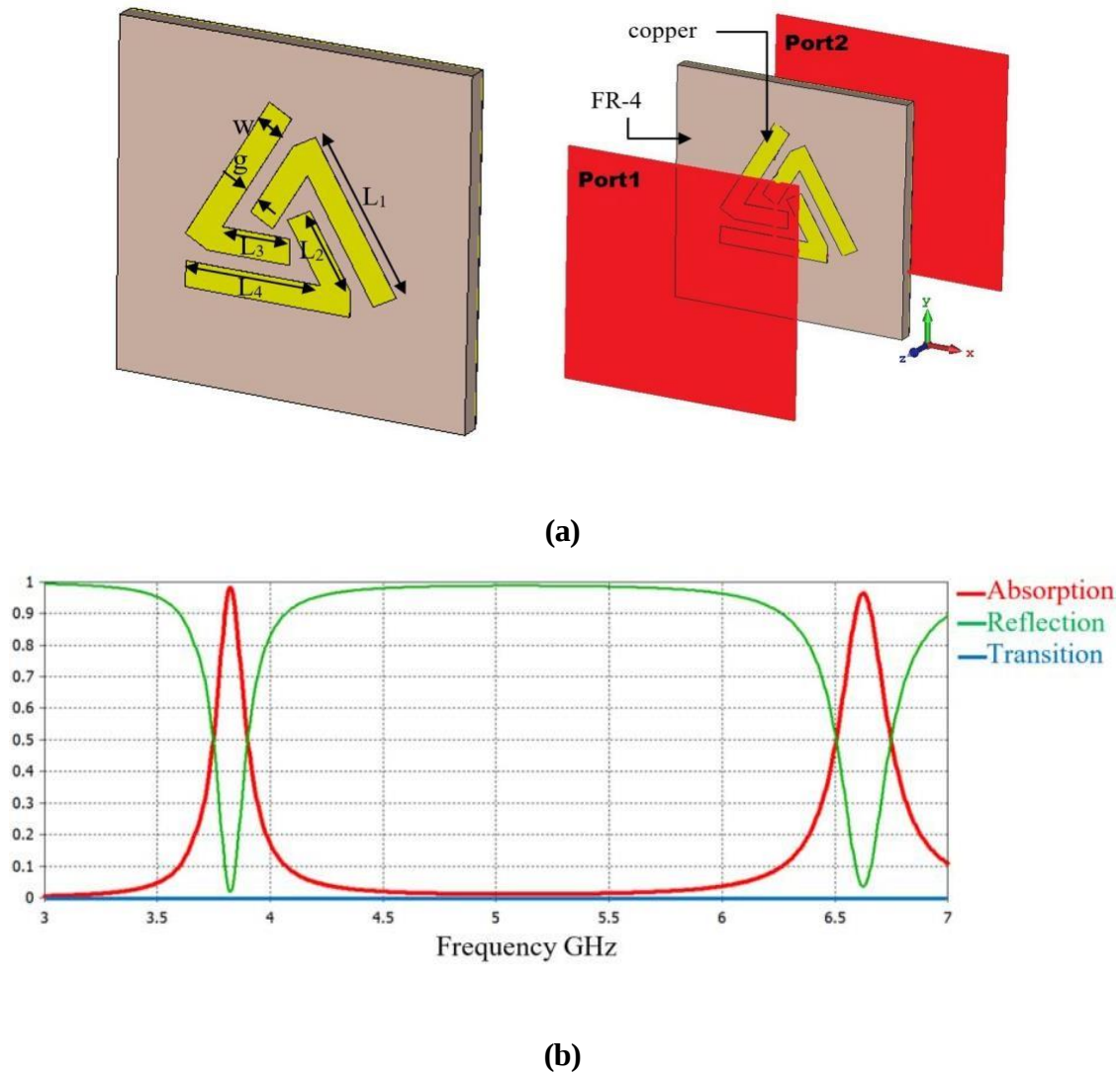


Figure II.8 : (a) Schéma 3D d'une cellule unitaire ; (b) Les spectres d'absorption, de réflexion et de transmission de l'absorbeur proposé par [64]

II.6.3. Absorbeurs MTM large bande

Les absorbeurs MTM à large bande sont conçus pour fournir une absorption efficace sur une gamme étendue de fréquences, contrairement aux structures à bande étroite ou multi bande qui ne ciblent qu'une ou plusieurs fréquences spécifiques. Cette performance est particulièrement recherchée dans les applications où le signal incident peut varier fortement en fréquence, comme dans les systèmes radar à large spectre, les dispositifs de camouflage électromagnétique adaptatif, ou encore les technologies de détection multi-régime.

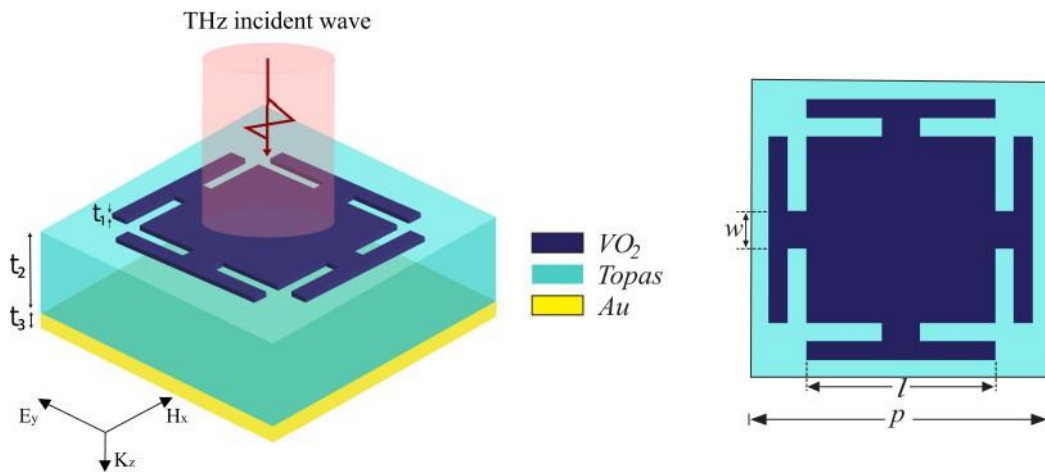
L'absorption à large bande est généralement obtenue en combinant plusieurs mécanismes dans la conception :

- ✓ Structures multi-résonantes réparties spatialement ou en couches successives ;

- ✓ Utilisation de matériaux à pertes élevées ou de substrats épais qui favorisent la dissipation sur une large plage fréquentielle ;
- ✓ Géométries à gradient d'impédance qui améliorent l'adaptation à l'impédance du vide sur une plage de fréquences plus large ;
- ✓ Inclusion de matériaux actifs comme le VO_2 ou le graphène, permettant d'ajuster dynamiquement la bande d'absorption.

Bien que leur conception soit plus complexe, ces absorbeurs sont particulièrement attractifs dans le domaine des micro-ondes et du térahertz, où la réduction de signature ou la détection doit couvrir un spectre large. Leur épaisseur physique est souvent relativement faible par rapport à la longueur d'onde, ce qui représente un avantage considérable en termes d'intégration dans des systèmes compacts [66].

Dans la référence [67], Md Ariful Islam et *al.* ont proposé un absorbeur MTM à base de dioxyde de vanadium (VO_2). Il permet une absorption de plus de 90 % des ondes térahertz (THz) incidentes entre 4,50 THz et 11,90 THz, avec une absorption moyenne de 94,64 % et une bande passante d'absorption relative plus élevée de 90,18 % (7.4 THz) (figure II.9(b)). L'absorbeur MTM proposé présente une conception avec un carré central entouré de quatre éléments en « T » de chaque côté, disposés symétriquement sur un substrat diélectrique TOPAS (figure II.9(a)).



(a)

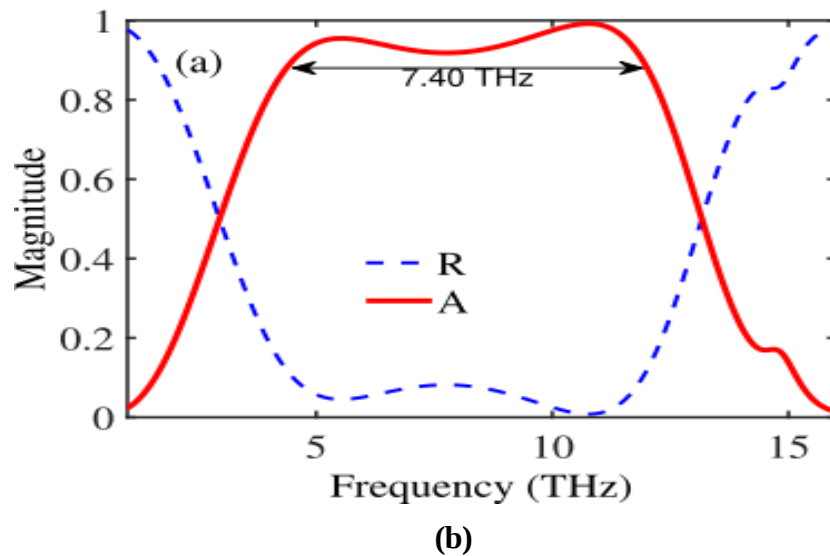


Figure II.9 : (a) Schéma 3D et 2D d'une cellule unitaire ; (b) Le spectre d'absorption et le spectre de réflexion de l'absorbeur proposé par [67]

II.6.4. Absorption indépendante de la polarisation

Les absorbeurs MTM indépendants de la polarisation sont conçus de manière à maintenir une efficacité d'absorption constante, quelle que soit la direction de polarisation de l'onde électromagnétique incidente. Cela est rendu possible grâce à une symétrie géométrique spécifique des motifs résonants (comme les structures circulaires, carrées, ou en croix à symétrie radiale), qui assurent une réponse électromagnétique identique pour toutes les orientations du champ électrique incident. Ces structures sont particulièrement utiles dans des environnements où la polarisation de l'onde n'est pas contrôlée ou varie dans le temps, comme dans les applications de détection, d'imagerie ou de camouflage électromagnétique [68].

Dans la référence [68], M. I. Khan et *al.* ont proposé une méta-surface à conversion de polarisation croisée à large bande en micro-ondes. La méta-surface est constituée de résonateurs en anneaux fendus couplés (SRR), chacun comportant deux fentes, et elle est réalisée sur un substrat diélectrique en FR4, avec un plan de masse métallique (Figure II.10(a)). Une conversion de polarisation croisée efficace est obtenue, aussi bien pour une incidence normale que pour une incidence oblique, avec une largeur de bande fractionnaire de 3 dB de 73 %, couvrant la plage de 5 à 10,8 GHz. Cette conversion de polarisation à large bande résulte de multiples résonances plasmoniques apparaissant à trois fréquences voisines. Grâce à la taille sub-longueur d'onde des cellules unitaires et à la structure symétrique des SRR couplés, la réponse de la méta-surface est indépendante de la polarisation et de l'angle d'incidence de l'onde entrante, ce qui en fait une

candidate prometteuse pour de nombreuses applications pratiques (figure II.10(b)).

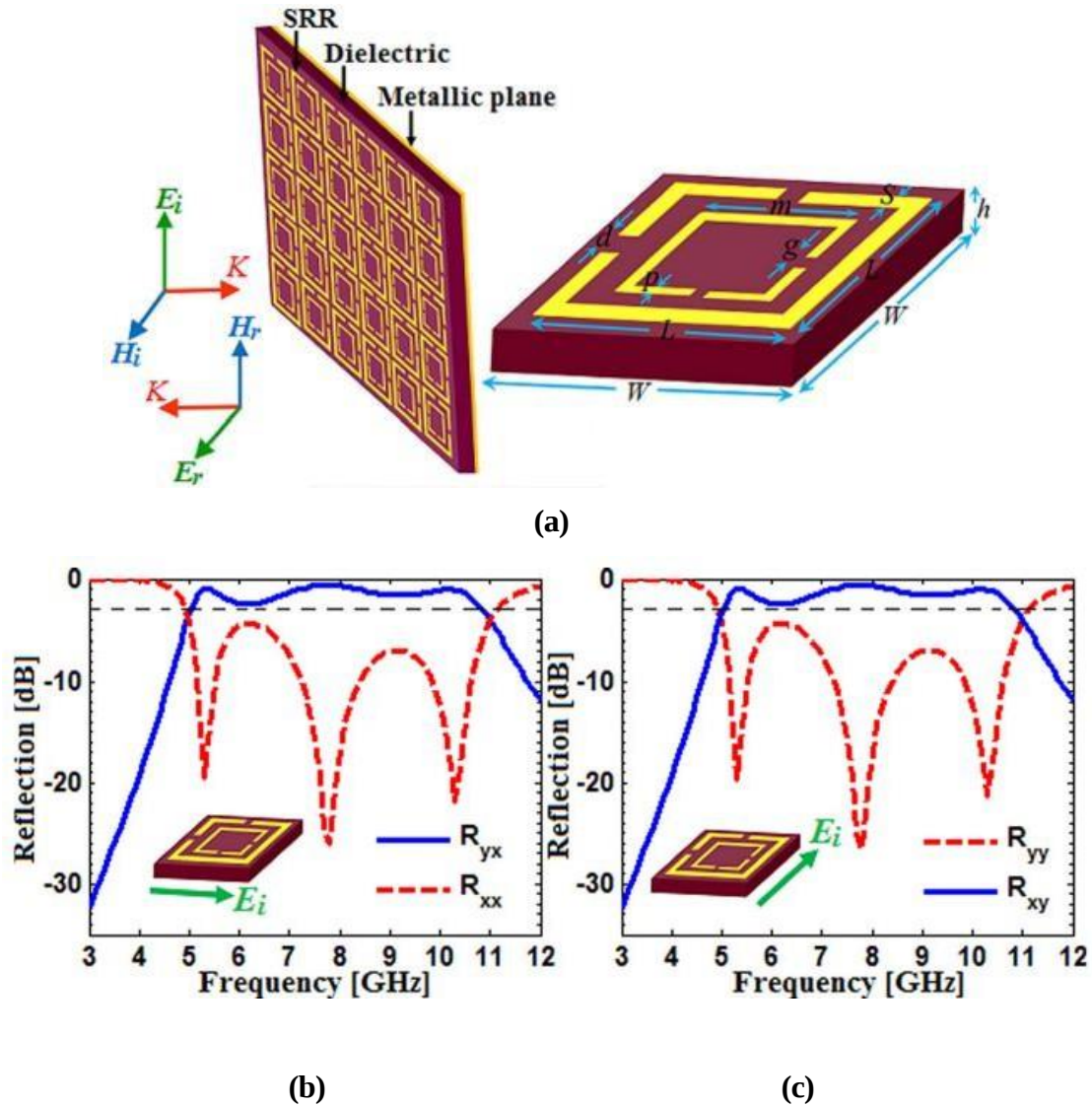


Figure II.10 : Schéma général de la métasurface (a) ; Coefficients de réflexion Co-polarisés et Cross polarisés lorsque le champ incident est (b) polarisé en x et (c) polarisé en y [68]

II.7. CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons exploré les fondements des métamatériaux (MTM), en mettant l'accent sur leur application en tant qu'absorbeurs électromagnétiques. Contrairement aux matériaux traditionnels, les MTM permettent de surmonter les limites classiques d'épaisseur, de poids et de bande passante restreinte, notamment grâce à leur structure artificielle sub-longueur d'onde. Nous avons présenté les principes électromagnétiques qui régissent leur fonctionnement,

les différentes approches de conception, en particulier les architectures multicouches et résonantes, ainsi que leur classification selon les plages fréquentielles et le mode d'absorption (étroite, multibande, large bande et indépendant de la polarisation). Enfin, les développements récents en matière de MTM actifs et intelligents ouvrent des perspectives novatrices pour des applications avancées en télécommunications, détection, imagerie, ou camouflage électromagnétique. Ces structures représentent aujourd'hui une voie incontournable vers des systèmes d'absorption plus compacts, adaptatifs et hautement efficaces.

CHAPITRE 03 :
Résultats Numériques
et Discussions

III.1. INTRODUCTION

Cette étude repose sur des simulations avancées réalisées avec **CST Microwave Studio 2018**, dans le but d'analyser le comportement électromagnétique des absorbeurs métamatériaux (MTM) et d'évaluer la performance de différentes structures. L'objectif principal est de concevoir des **absorbeurs multicouches efficaces**, basés sur des **cellules unitaires MTM**, constituées notamment de **résonateurs à anneaux fendues (SRR)** et d'**anneaux résonants**, capables d'absorber efficacement les ondes électromagnétiques dans des bandes de fréquences spécifiques.

Dans ce chapitre, nous avons analysé le coefficient de réflexion, le taux d'absorption, la distribution des champs électromagnétiques ainsi que l'effet de la polarisation de l'onde incidente pour différentes structures d'absorbeurs MTM. La première configuration correspond à un absorbeur à bande étroite. Les deuxième et troisième structures adoptent des géométries multi-résonantes distinctes, permettant une absorption bi-bande efficace. La quatrième structure présente un comportement à triple bande, capable de capter l'énergie électromagnétique à trois fréquences différentes tout en maintenant une excellente efficacité d'absorption. Ces absorbeurs sont conçus pour fonctionner dans la **bande des micro-ondes**, et sont réalisés à partir de matériaux à **faible coût**, tels que le **FR4** ($\epsilon_r = 4,4$, $\tan\delta = 0,027$) et le **RO4003C** ($\epsilon_r = 3,55$, $\tan\delta = 0,0021$), qui sont largement disponibles et faciles à manipuler. Enfin, la **cinquième structure** est un absorbeur MTM actif **large bande**, conçu pour le domaine **térahertz (THz)**. Elle adopte une géométrie multi-résonante basée sur des matériaux à **haut coût**, tels que **l'or** et le **dioxyde de vanadium (VO₂)**, un matériau à transition de phase capable de passer d'un état isolant à un état métallique à une température d'environ **68 °C**.

III.2. LE CONCEPT DE CST MICROWAVE STUDIO SUITE

Le logiciel d'analyse électromagnétique 3D de haute performance, CST Studio Suite est utilisé pour concevoir, analyser et optimiser les systèmes et composants électromagnétiques. Le CST Studio Suite dispose d'une interface utilisateur unique qui intègre des solveurs de champs électromagnétiques pour diverses applications couvrant le spectre électromagnétique. Les ingénieurs ont la capacité d'analyser de manière efficace et précise des systèmes complets constitués de nombreux éléments en combinant les solutions pour réaliser des simulations hybrides.

CST Studio Suite est utilisé dans les entreprises de technologie et d'ingénierie de premier plan à travers le monde. Il offre des avantages considérables sur le marché, permettant des cycles de développement plus courts et une réduction des coûts. La simulation permet l'utilisation de prototypes virtuels. La performance de l'appareil peut être améliorée, les problèmes de conformité potentiels identifiés et atténués dès la phase de conception, le nombre de prototypes physiques nécessaires peut être diminué, et le risque d'échecs de tests et de rappels minimisé. Elle regroupe plusieurs modules destinés à différents domaines d'application de l'électromagnétisme, tels que CST Microwave Studio (hautes fréquences), CST EM Studio (basses fréquences et champs statiques), CST Particle Studio (simulation de faisceaux de particules chargées), CST Cable Studio (réseaux de câbles complexes) et CST PCB Studio (cartes électroniques haute fréquence).

CST Microwave Studio (CST MWS) est le module dédié à la simulation des champs électromagnétiques en haute fréquence, généralement dans la gamme radiofréquence, micro-ondes et millimétrique. Il exploite plusieurs solveurs numériques (comme le solveur en domaine temporel, le solveur fréquentiel ou le solveur asymptotique) pour répondre à divers besoins en précision et en performance.

Le processus d'analyse numérique avec Microwave Studio peut être divisé en 3 étapes. Premièrement, la construction du modèle, ensuite la configuration générale du modèle, et enfin c'est l'étape de la simulation.

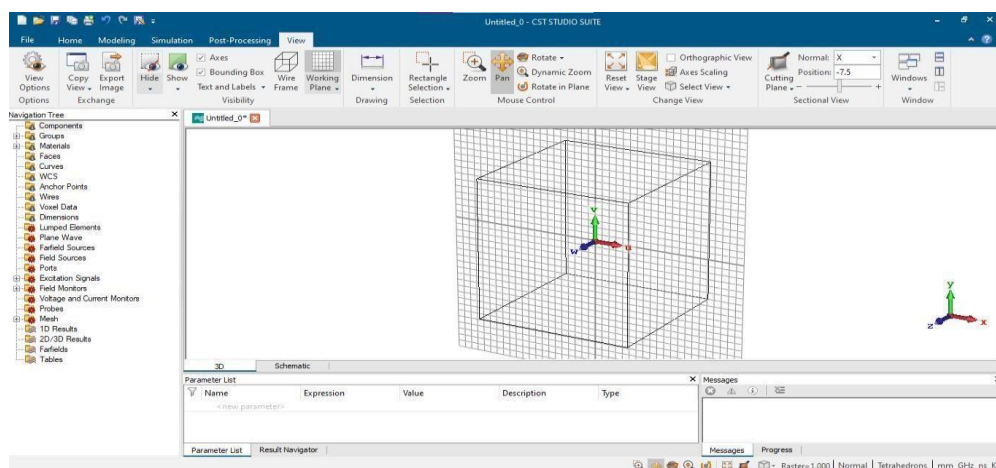


Figure III.1 : Description CST microwave studio suite

III.3. CONCEPTION D'UN ABSORBEUR MTM À BANDE ETROITE

Le premier absorbeur proposé est constitué d'une grille périodique bidimensionnelle des SRRs carrés disposée sur le dessus du matériau diélectrique le FR4 présentant une permittivité relative ($\epsilon_r=4.4$, $\tan \delta = 0.027$) et d'épaisseur $h = 2.4 \text{ mm}$, avec un plan de masse. Le cuivre

employée pour les SRR et le plan de masse ayant une conductivité de $5.8 \times 10^7 S/m$ et d'épaisseur $t = 0.035mm$. La cellule unitaire de la métasurface proposée est illustrée en figures III.2 (b). Les paramètres optimaux sont illustrés dans le tableau III.1

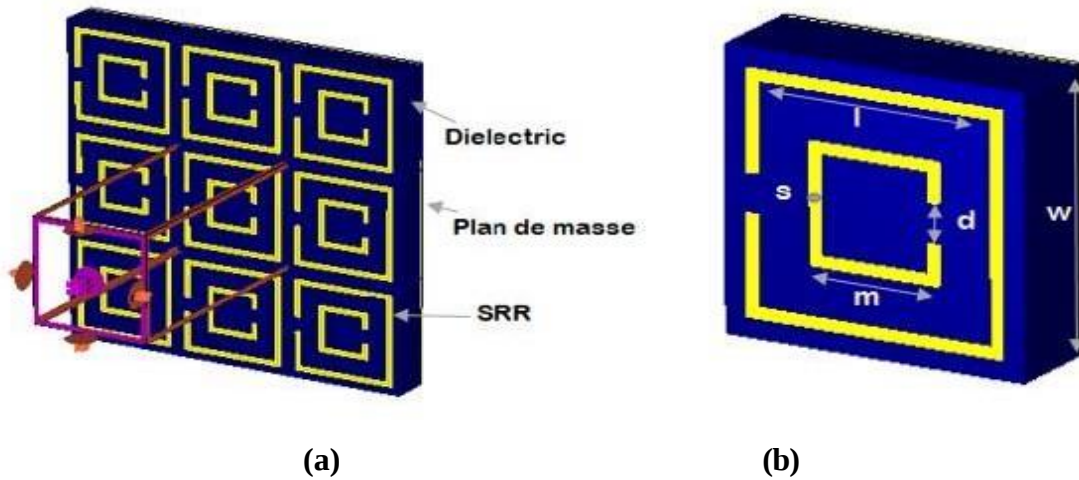


Figure III.2 : (a) Un diagramme schématique global, (b) Cellule unitaire de la MTM proposée

Paramètres	Valeurs (mm)
w	7
l	6
s	1
h	2.4
m	3
d	1

Tableau III.1 : Paramètres de conception de cellule unitaire du premier absorbeur MTM.

L'étude de la structure a suivi plusieurs étapes de conception successives.

III.3.1. Coefficients de réflexion et d'absorption

On a examiné les paramètres S_{11} de la cellule unitaire proposée, et ces résultats ont été exploités pour définir le comportement électromagnétique entre 3 GHz et 8 GHz.

La figure III.3 illustre que le module du coefficient de réflexion S_{11} présente une bande étroite centrée à 4 GHz, traduisant la résonnance du SRR carré.

La figure III.4 montre un pic d'absorption atteignant (87.7 % à 4 GHz).

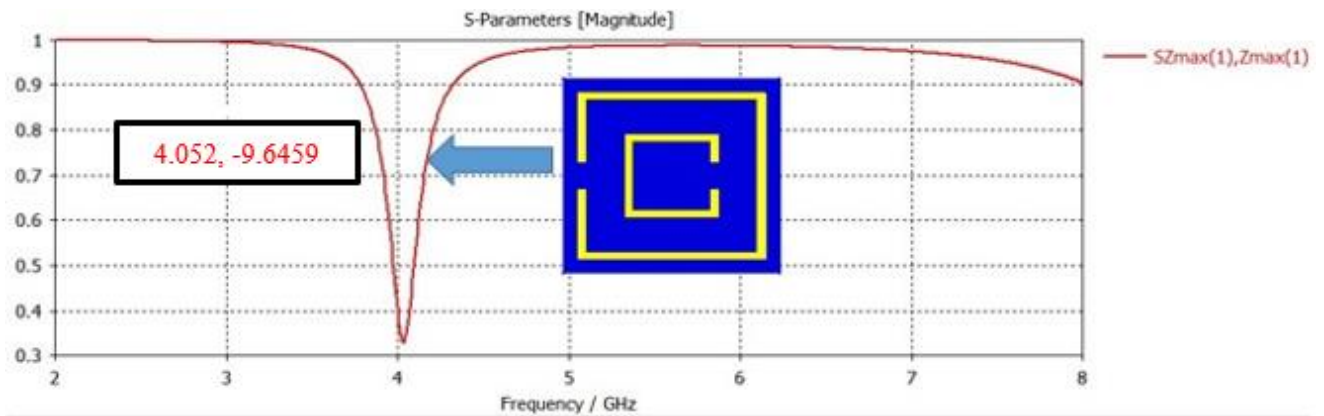


Figure III.3 : Le coefficient de réflexion s11

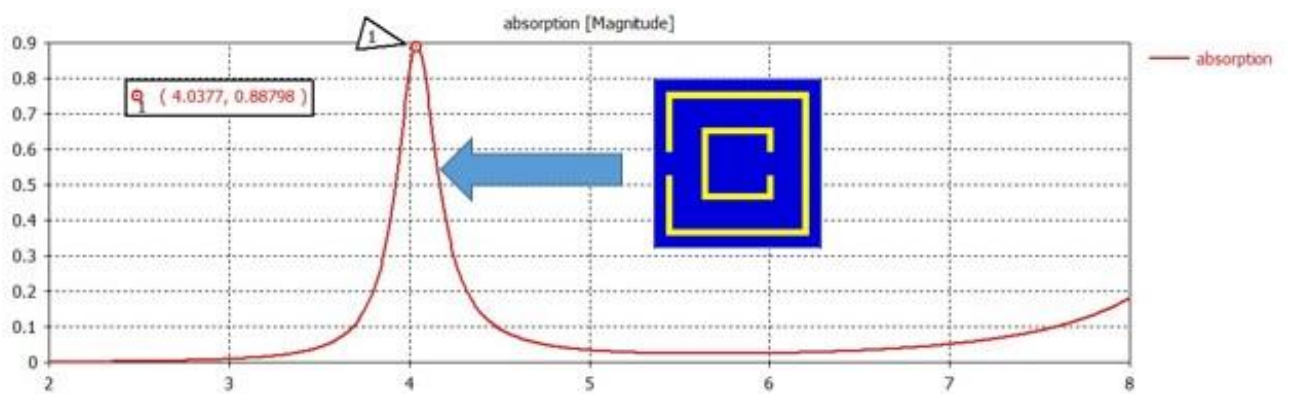


Figure III.4 : La variation de l'absorption

III.3.2. Champ électrique et magnétique

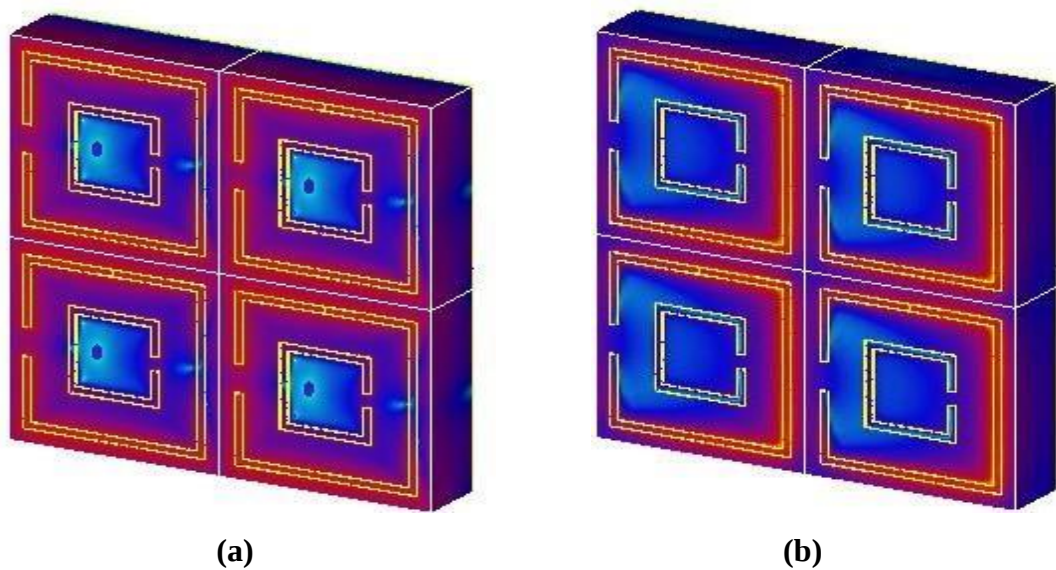


Figure III.5 : (a) Champs électriques ; (b) Champs magnétiques à 4 GHz

La figure III.5(a) montre une forte localisation du champ électrique le long des bords externes du résonateur carré gauche, indiquant une intensification du courant de surface caractéristique d'un

mode de résonance électrique. La figure III.5(b) illustre la distribution du champ magnétique, principalement concentré dans les deux résonateurs, en particulier à droite (résonance magnétique). Cette double résonance (électrique et magnétique) est responsable de l'absorption accrue de l'onde incidente, caractéristique des absorbeurs MTM. Le couplage entre le grand SRR externe et le petit SRR renforce le champ dans les zones de discontinuité, confirmant que leur excitation conjointe participe à la résonance et à l'absorption quasi-parfaite dans une bande étroite.

III.3.3. Incidence et polarisation

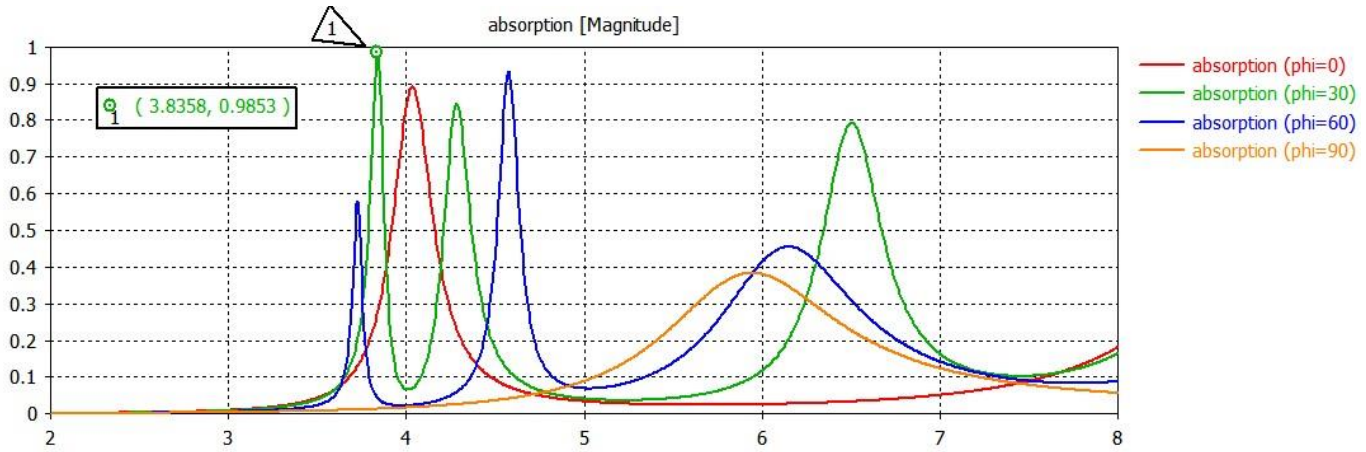
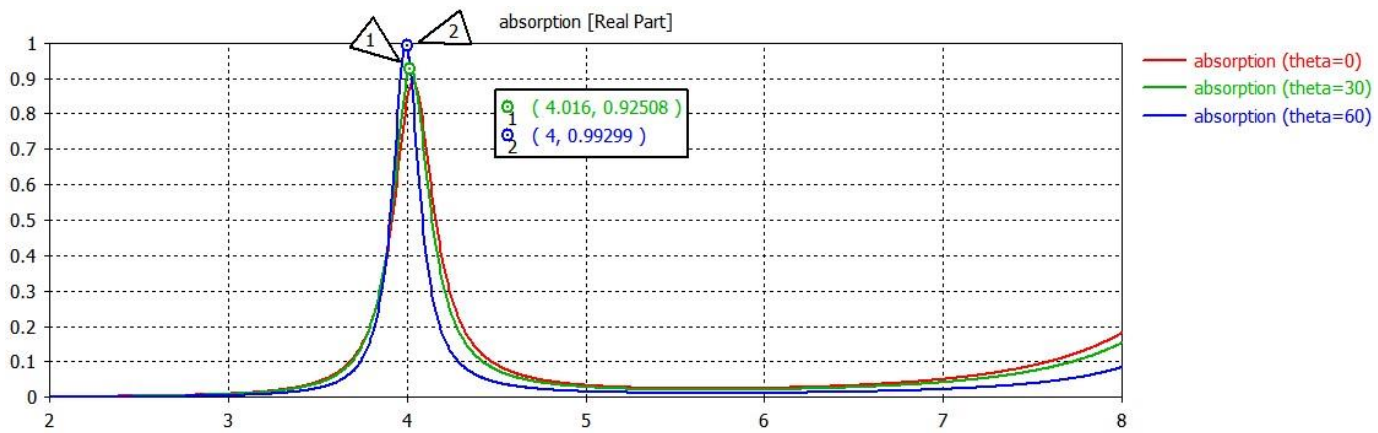
Afin d'évaluer la stabilité angulaire et la performance globale de l'absorbeur MTM proposé, une analyse approfondie des effets de la polarisation de l'onde incidente a été menée. Cette étude repose sur l'examen des deux modes fondamentaux de polarisation : **TE (Transverse Électrique)** et **TM (Transverse Magnétique)**, en fonction des variations angulaires des paramètres θ (thêta) et ϕ (phi) [69].

Le mode **TE** se caractérise par un champ électrique entièrement transverse à la direction de propagation, tandis que dans le mode **TM**, c'est le champ magnétique qui est transverse.

- ✓ **Mode TE (Transverse Électrique)** : Le **champ électrique** est **perpendiculaire** à la direction de propagation de l'onde incidente.
→ $E_z=0$, donc le champ **magnétique** a une composante dans la direction de propagation.
- ✓ **Mode TM (Transverse Magnétique)** : Le **champ magnétique** est **perpendiculaire** à la direction de propagation.
→ $H_z=0$, donc le champ **électrique** a une composante dans la direction de propagation

Ces deux configurations permettent d'explorer la réponse de la structure en présence de différentes conditions de polarisation. L'angle θ , mesuré entre la direction de propagation de l'onde incidente et l'axe normal à la surface de l'absorbeur, contrôle l'**obliquité de l'onde**. Quant à l'angle ϕ , représentant l'**orientation azimutale de la polarisation** dans le plan de la surface (x-y), son influence dépend fortement de la géométrie du résonateur.

En ce qui concerne notre premier absorbeur MTM, et comme illustré à la figure III.6, les études de polarisation en mode TE montrent une réponse idéale à un angle $\phi = 30^\circ$, avec une absorption quasi parfaite atteignant 98 % à 3.83 GHz. Par ailleurs, comme le montre la figure III.7, pour le mode de polarisation TM, l'absorbeur présente une absorption optimale de 99.29 % à 4 GHz lorsque l'angle d'incidence θ est égal à 60° .

Figure III.6 : L'impact de ϕ sur les pics d'absorptionFigure III.7 : Influence du θ dans les pics d'absorption

III.4. CONCEPTION D'UN ABSORBEUR BI-BANDE A BASE DES SRR

La figure III.8 présente la cellule unitaire du deuxième absorbeur MTM proposé par [69], composée de trois anneaux concentriques : un résonateur carré muni de fentes sur deux côtés adjacents, ainsi que deux résonateurs annulaires circulaires classiques (SRRs), inclinés à -45° afin d'introduire une forte asymétrie. Les résonateurs sont réalisés en cuivre d'une épaisseur de $35\ \mu\text{m}$, avec une couche conductrice inférieure servant de plan de masse parfait. Le substrat utilisé est de type RO4003C ($\epsilon_r = 3.55$, $\tan \delta = 0.0021$) et présente une épaisseur de $1.524\ \text{mm}$. La cellule unitaire a des dimensions de $15\ \text{mm} \times 15\ \text{mm}$. Les paramètres géométriques optimisés sont récapitulés dans le tableau III.2.

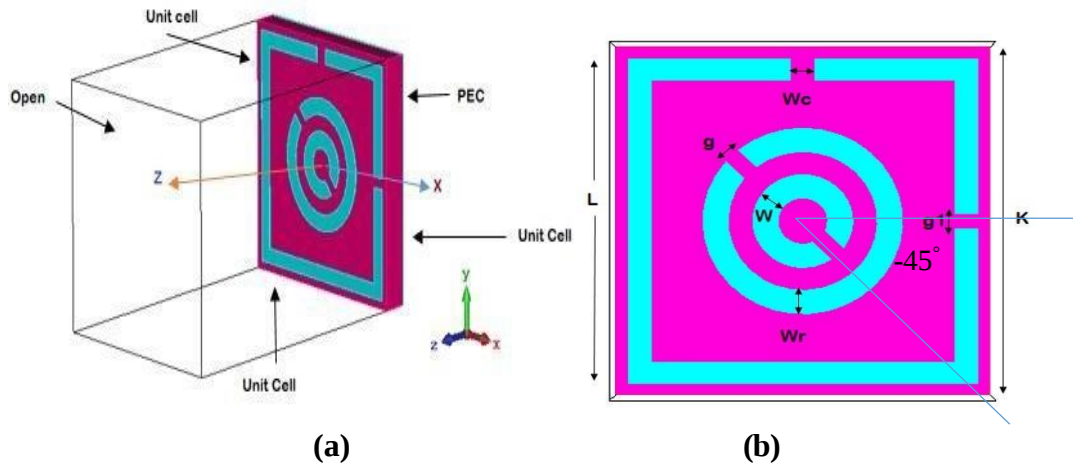


Figure III.8 : (a) Un diagramme schématique global, (b) Cellule unitaire de la MTM proposée

Paramètres	Valeurs (mm)
L	14
W_c	1
W_r	1
W	1
g	0.70
g_1	0.65
K	15

Tableau III.2 : Paramètres de conception de cellule unitaire du deuxième absorber MTM

III.4.1. Coefficients de réflexion, de transmission et d'absorption

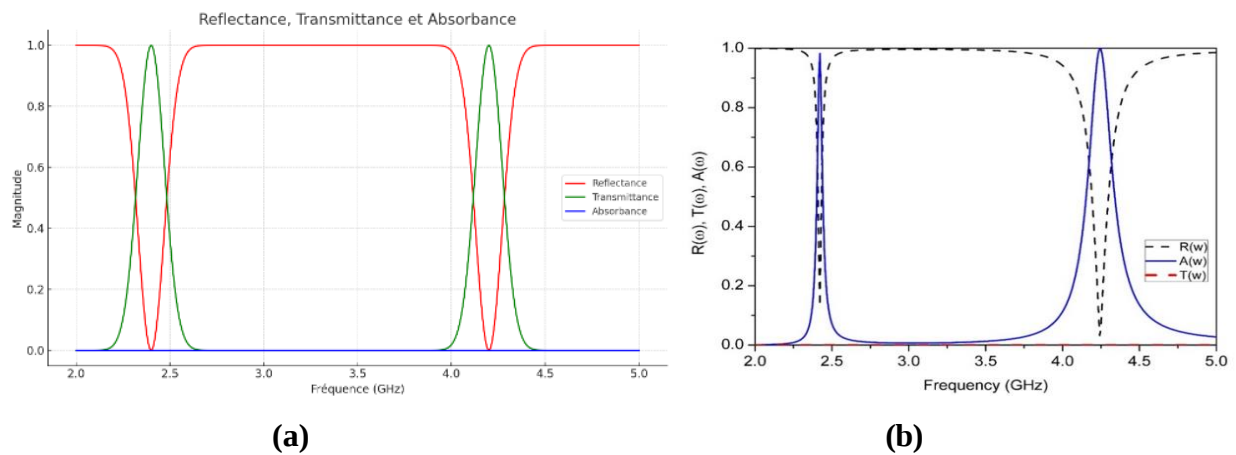


Figure III.9 : (a) A, R et T de la cellule MTM ; (b) A, R et T de [69]

D'après la figure III.9 (a), l'évolution du coefficient de réflexion R (S_{11}) en fonction de la

fréquence révèle deux bandes étroites centrées autour de 2,4 GHz et 4,25 GHz. Nous observons un coefficient de transmission nulle ($T=0$) et une absorbance parfaite sur les deux bandes étroites, atteignant 100 % à 2,4 GHz et 4,2 GHz. Ce comportement est similaire à celui observé dans la référence [69], illustré par la figure III.11(b), où des taux d'absorption de 98,2 % et 99,7 % ont été rapportés pour les deux bandes correspondantes.

III.4.2. Le champ électrique et magnétique

Les distributions des champs électrique et magnétique aux deux fréquences de résonance sont illustrées aux figures III.10 et III.11. La figure III.10(a) montre que, pour la fréquence de 2,4 GHz, le champ électrique est principalement concentré dans le résonateur carré. En revanche, à 4,1 GHz (figure III.10(b)), le champ électrique se localise essentiellement au niveau des fentes des SRR. Selon la figure III.11(a), à 2,4 GHz, le champ magnétique se concentre autour du résonateur externe. À 4,1 GHz (figure III.11(b)), il est réparti à la fois dans les résonateurs externes et internes, témoignant d'un couplage magnétique plus complexe à cette fréquence.

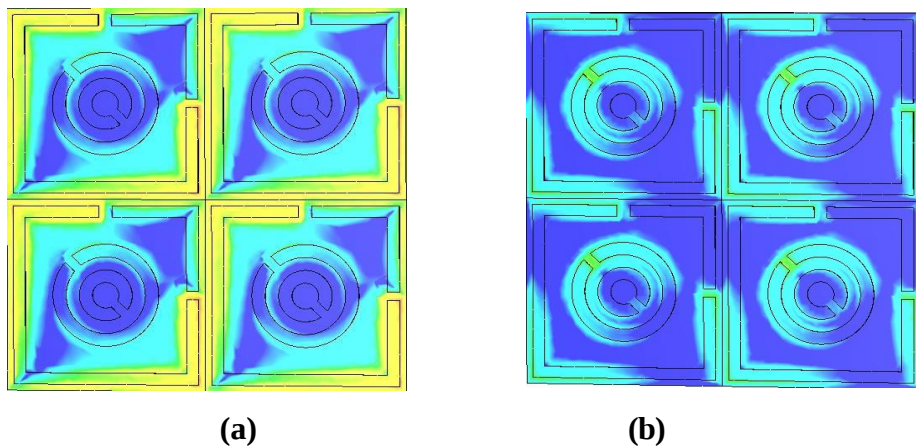


Figure III.10 : Les champs électriques à : 2.4 GHz (a) et 4.1 GHz (b)

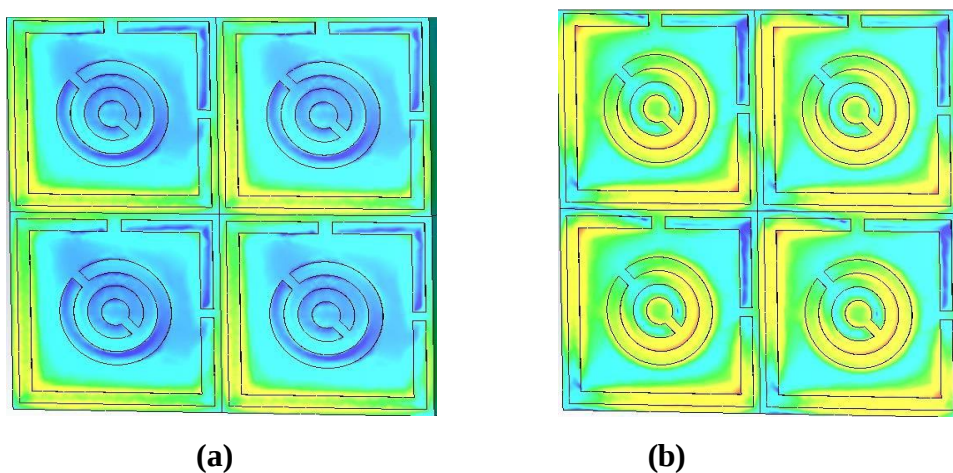


Figure III.11 : champs magnétique à : 2.4 GHz (a) et 4.1 GHz(b)

III.4.3. Incidence et polarisation

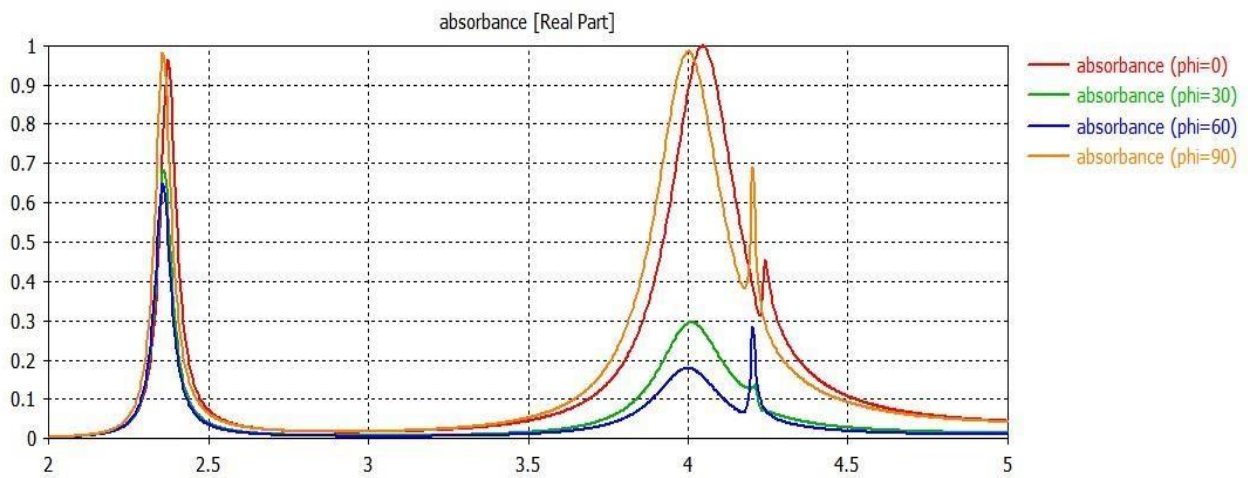


Figure III.12: L'impact de ϕ sur les pics d'absorption à double bande

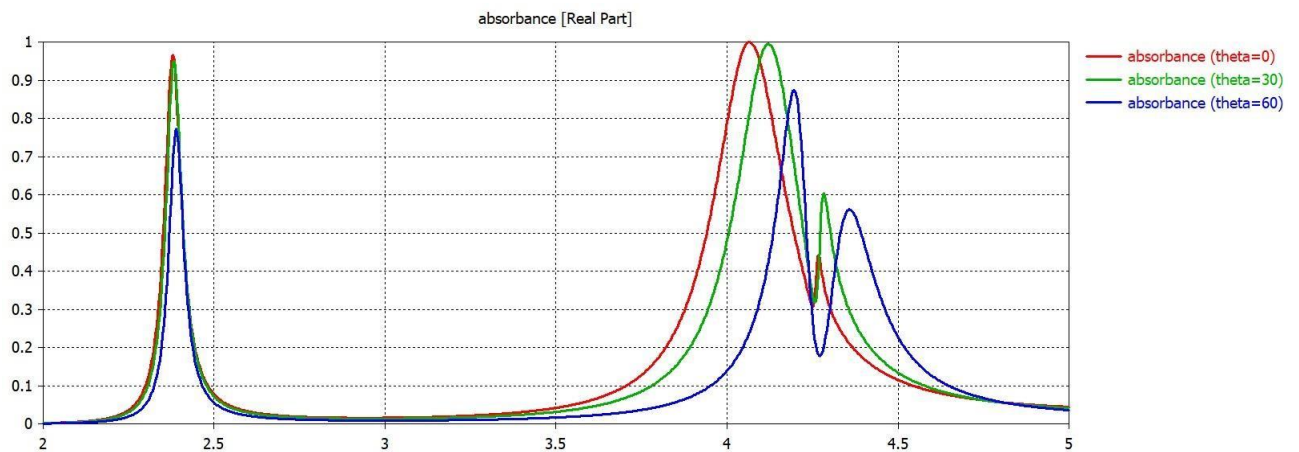


Figure III.13: Influence du θ dans les pics d'absorption à double bande

La figure III.12 présente une étude de la réponse en polarisation pour le mode TE. L'absorbeur MTM proposé conserve un comportement stable pour $\phi = 0^\circ$ et 90° . En ce qui concerne le mode TM, la figure III.13 montre que l'absorbeur atteint une absorption optimale, avec un pic atteignant 99,49 %, notamment aux angles d'incidence de 0° et 30° .

III.5. CONCEPTION D'UN ABSORBEUR BI-BANDE A BASE DES ANNEAUX RESONATRICES

La structure de la cellule unicellulaire proposée est illustrée à la figure III.14, tandis que ses dimensions et caractéristiques sont présentées dans le tableau III.3. Cette cellule est constituée de trois couches : une couche supérieure en cuivre formant le motif résonant, composé de deux anneaux concentriques ; l'anneau extérieur ayant une forme carrée et l'anneau intérieur prenant la forme d'une croix ; un substrat diélectrique en FR4 d'une épaisseur de 0,8 mm ($\epsilon_r = 4,3$, $\tan \delta =$

0,04) et un plan de masse. Le cuivre est utilisé pour sa conductivité élevée ($5,8 \times 10^7$ S/m), avec une épaisseur standard de 0,035 mm.

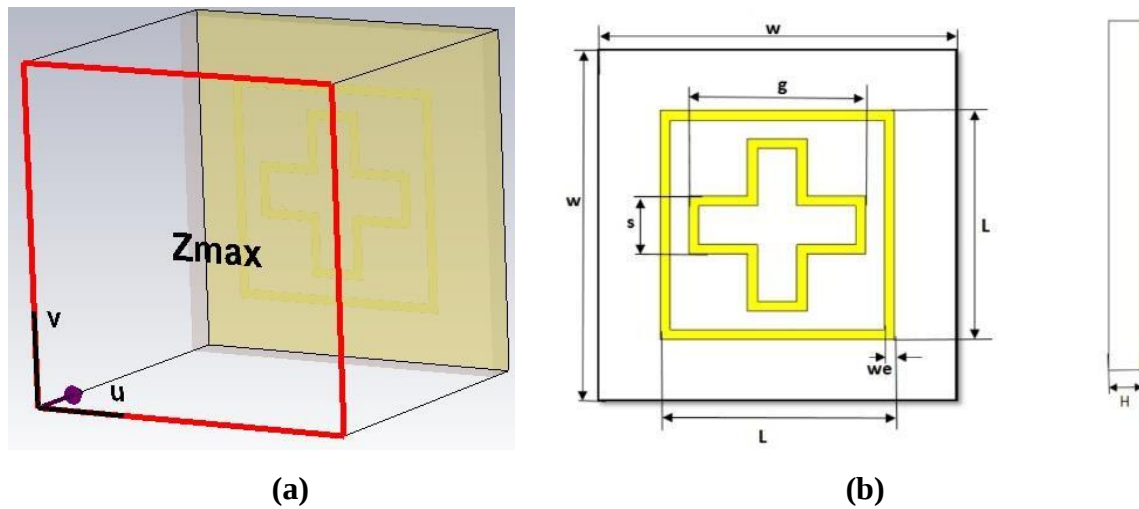


Figure III.14 : (a) Cellule unitaire sous CST ; (b) Schéma de principe de l'unité de base proposée

Paramètre	Dimensions (mm)
W	9
H	0.8
T	0.035
L	5.9
We	0.25
g	4.45
S	1.5

Tableau III.3 : Les valeurs des paramètres de la cellule suggérée du troisième absorbeur

III.5.1. Coefficients de réflexion et d'absorption aux différentes étapes de conception

A/ Etape 1 :

D'après les figures III.18 et III.19, l'évolution du coefficient de réflexion S11 montre une seule bande étroite centrée autour de 8 GHz, contribuant à la formation d'un pic d'absorption atteignant 99 %.

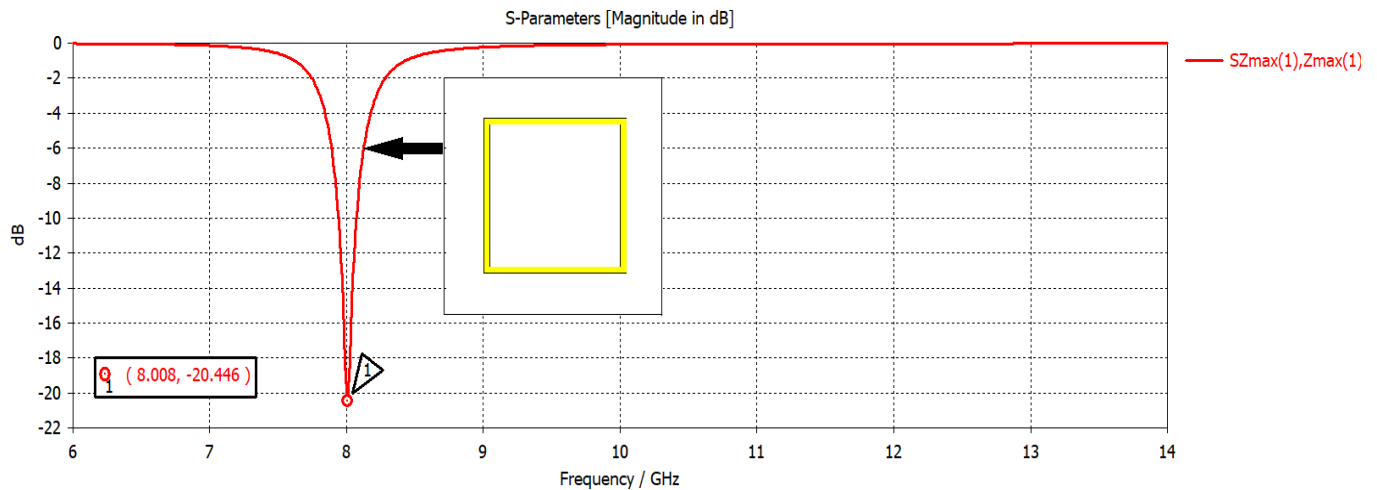


Figure III.15 : Le coefficient de réflexion s11 de l'absorbant – étape1

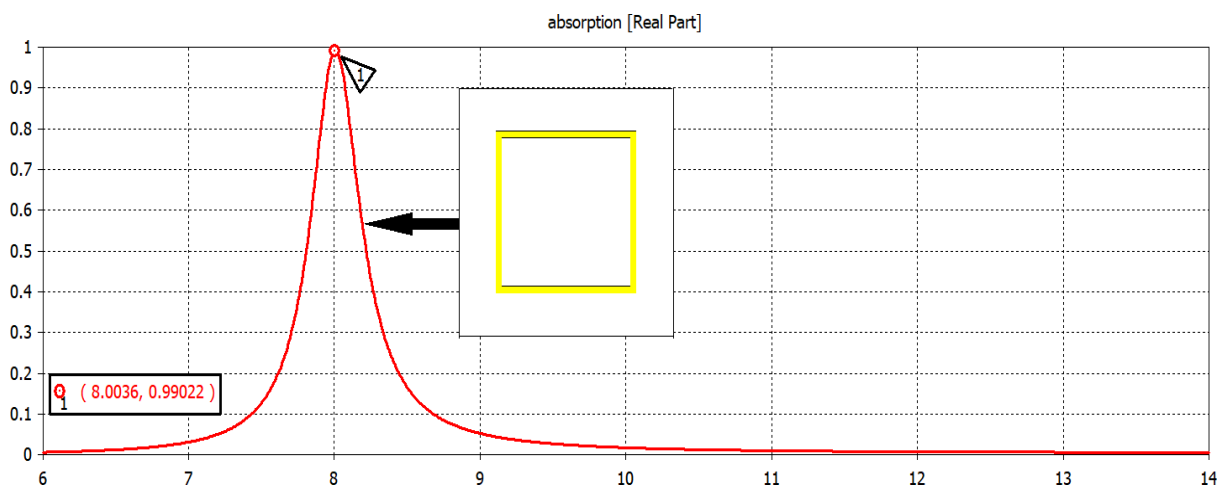


Figure III.16 : Graphique d'absorption – étape 1

B/ Deuxième étape :

D'après les figures III.17 et III.18, l'évolution du coefficient de réflexion S11 révèle deux bandes étroites centrées respectivement autour de 7.93 GHz et 12.43 GHz, contribuant à la formation de deux pics d'absorption atteignant 99 % et 96 %.

L'apparition du deuxième anneau en forme de croix est à l'origine de la seconde résonance. Ainsi, la combinaison structurale des deux anneaux permet d'obtenir une absorption quasi-parfaite à double bande.

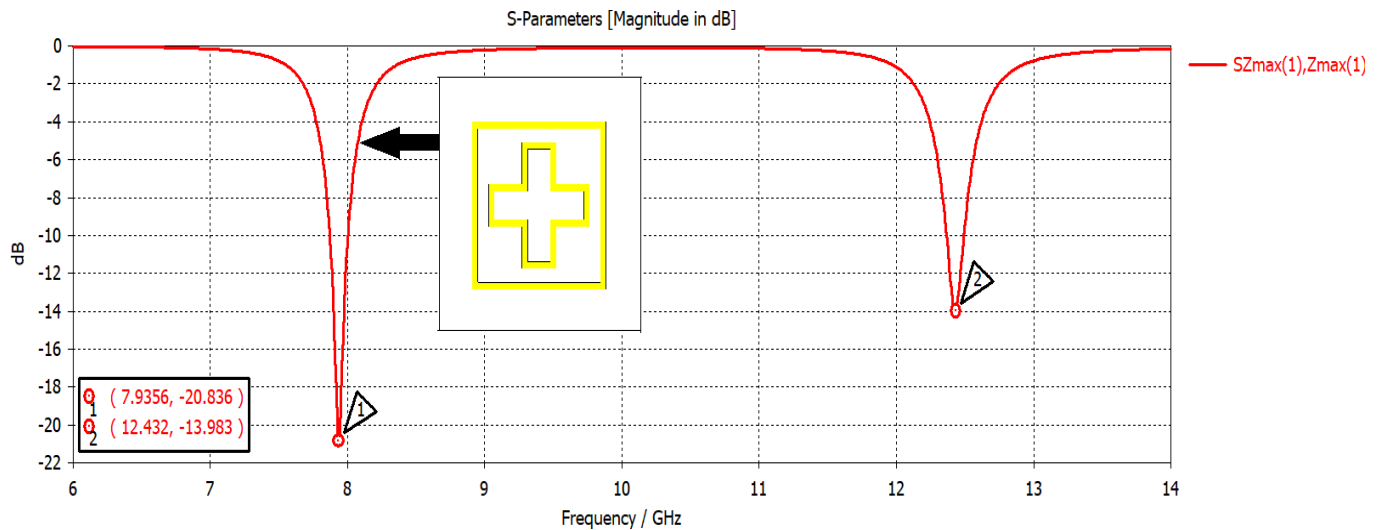


Figure III.17 : Le coefficient de réflexion s_{11} de l'absorbant – étape2

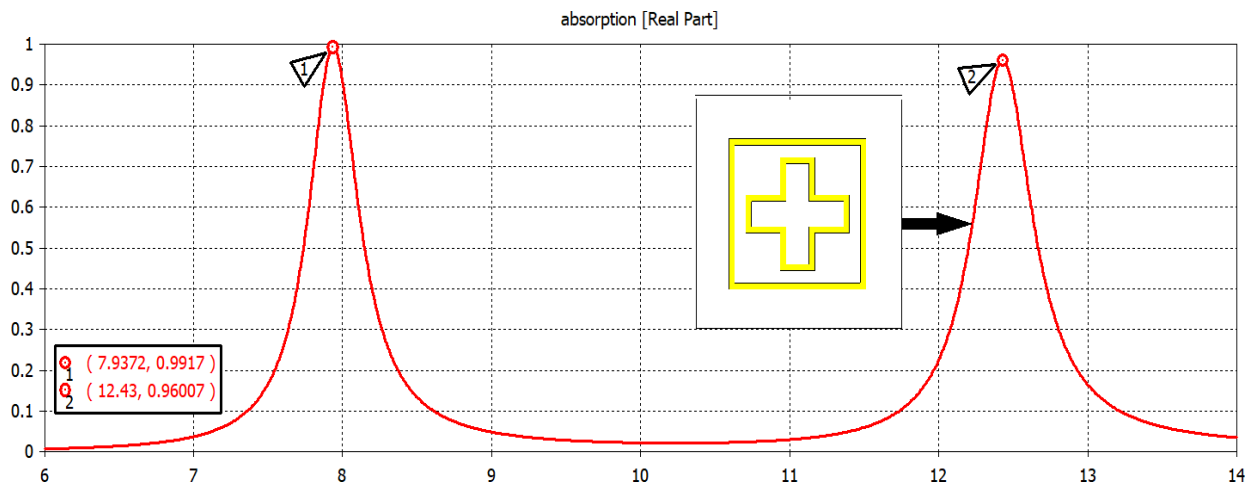


Figure III.18 : Graphique d'absorption – étape 2

III.5.2. Champs électriques et magnétiques

Comme le montrent la figure III.19 (a), à la fréquence de 7,937 GHz, une résonance marquée du champ électrique est principalement observée au niveau de l'anneau extérieur, notamment sur les côtés droit et gauche. À 12,43 GHz (Figure III.19(b)), l'intensité du champ électrique se concentre également sur les côtés droits et gauche, mais cette fois au niveau de la croix intérieure, indiquant l'apparition de la seconde résonance. Pour le champ magnétique, aux mêmes fréquences (Figures III.19(c) et III.19(d)), la résonance est localisée essentiellement sur les parties supérieure et inférieure de la structure.

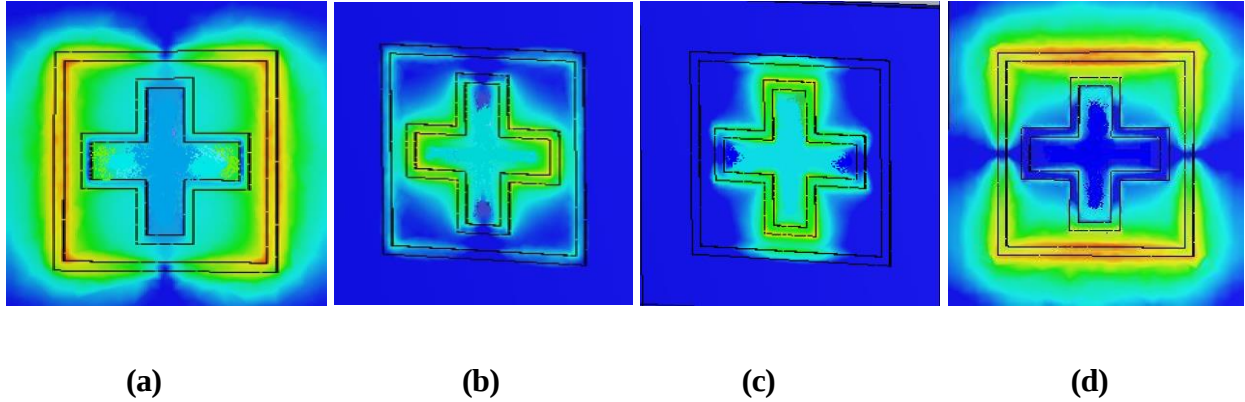


Figure III.19 : Champs électriques à : 7.937 GHz (a) ; 12.43 GHz (b)- Champs magnétiques à : 7.937 GHz (c) ; 12.43 GHz (d)

III.5.3. Incidence et polarisation

Comme le montrent les figures III.20, après avoir effectué une étude de la réponse en polarisation pour les modes TE, on observe que l'absorbeur MTM présente une réponse stable au niveau du second pic d'absorption, indépendamment de l'angle d'incidence ϕ . Concernant le premier pic, aux angles de 30° et 90° , l'absorption se produit légèrement avant 7.937 GHz. En polarisation TM (figure III.21) la réponse de l'absorbeur reste quasi constante pour le premier pic avec une absorption de 99.99 % à 0° et 30° , et de 88 % à 60° . Pour le second pic, l'absorption atteint environ 90 % à 30° .

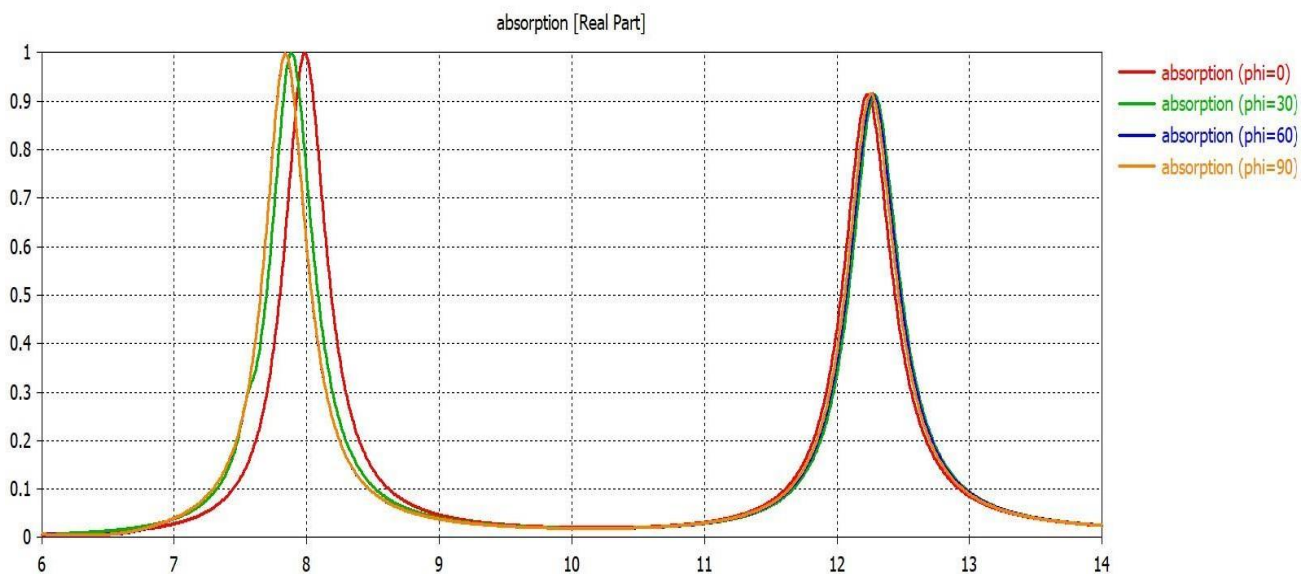


Figure III.20 : L'impact de ϕ sur les pics d'absorption à double bande

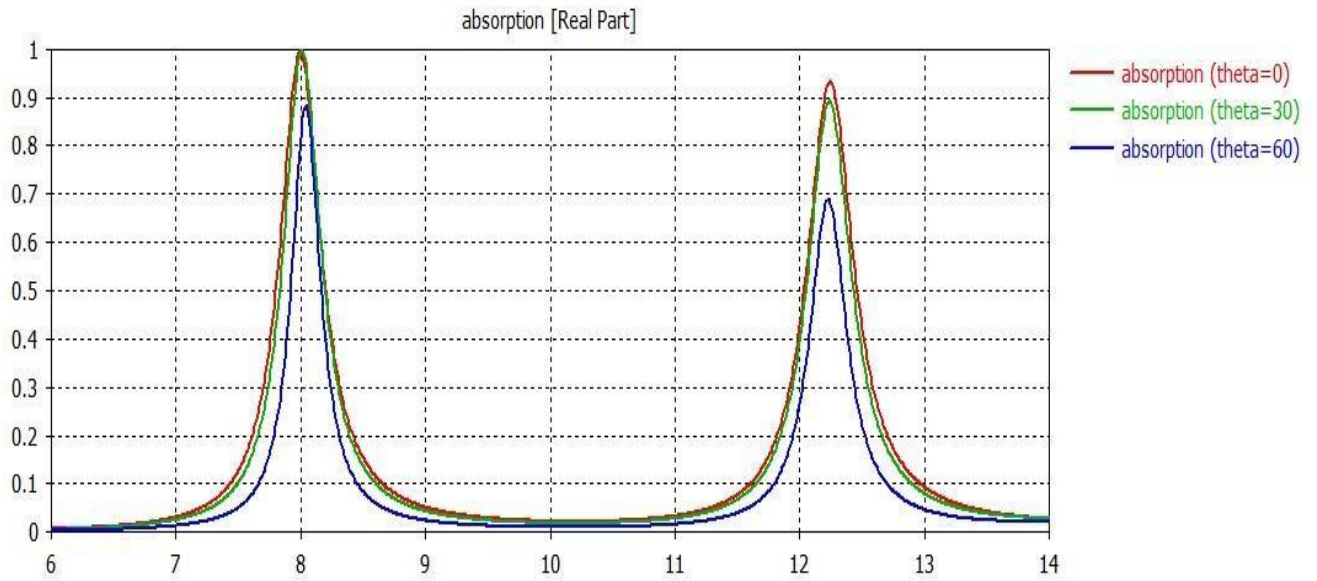


Figure III.21 : Influence du θ dans les pics d'absorption à double bande

III.6. CONCEPTION ET ANALYSE D'UN ABSORBEUR MTM TRIPLE BANDE

Notre structure est composée de trois résonateurs sous forme d'anneau couplés séparément aux champs électrique et magnétique, de manière à absorber l'intégralité du rayonnement incident au sein d'une seule cellule unitaire. Cette cellule repose sur une structure multicouche : un motif métallique en cuivre composée de trois anneaux concentriques de largeur w , un substrat diélectrique FR4 ($\epsilon_r = 4.3$, $\tan\delta = 0.04$) et un plan de masse (figure III.22). Les paramètres géométriques optimisés sont regroupés dans le tableau III.4.

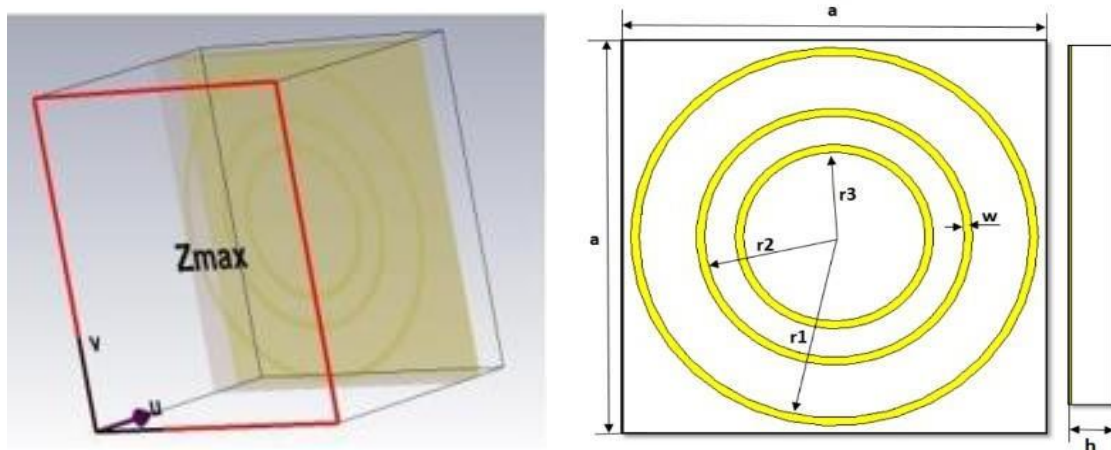


Figure III.22 : Schéma de principe de l'unité de base proposée

Paramètre	Dimensions (mm)
a	10
W	0.2
h	1
Tc	0.035
r1	4.625
r2	3.075
r3	2.15

Tableau III.4 : Les valeurs des paramètres de la cellule suggérée du quatrième absorbeur

III.6.1. Coefficients de réflexion et d'absorption aux différentes étapes de conception

A/ Etape 1:

D'après la figure III.23 et III.24, l'évolution du coefficient de réflexion S_{11} montre une seule bande étroite centrée autour de 12.473 GHz, contribuant à la formation d'un pic d'absorption atteignant 93.5 %.

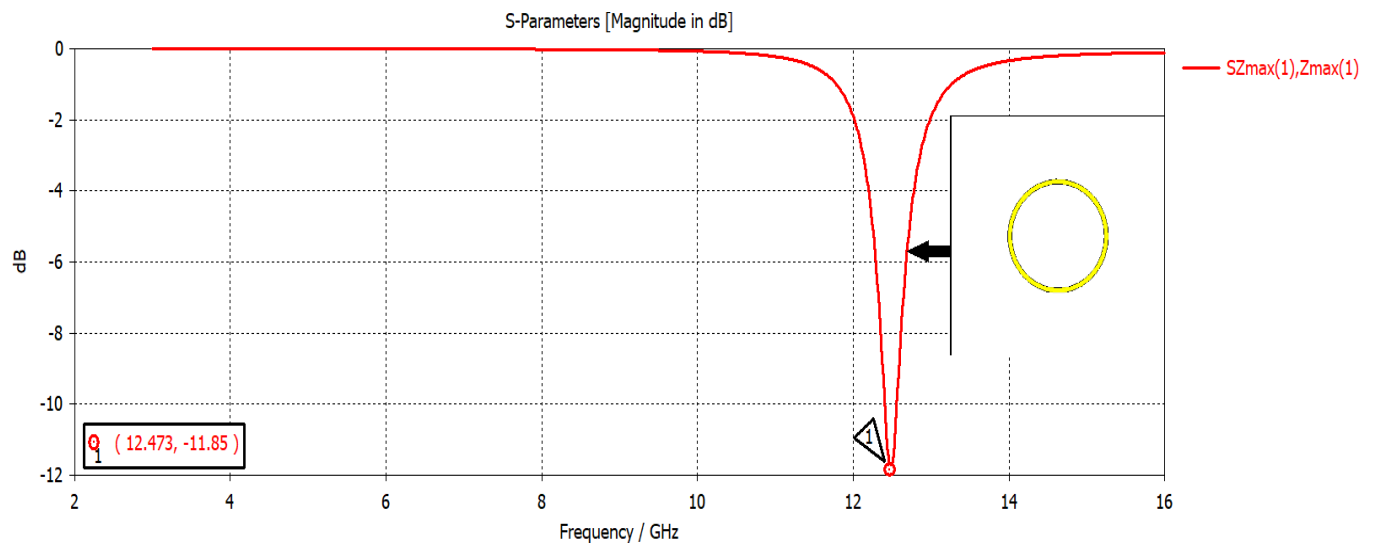


Figure III.23 : Le coefficient de réflexion S_{11} de l'absorbant – étape1

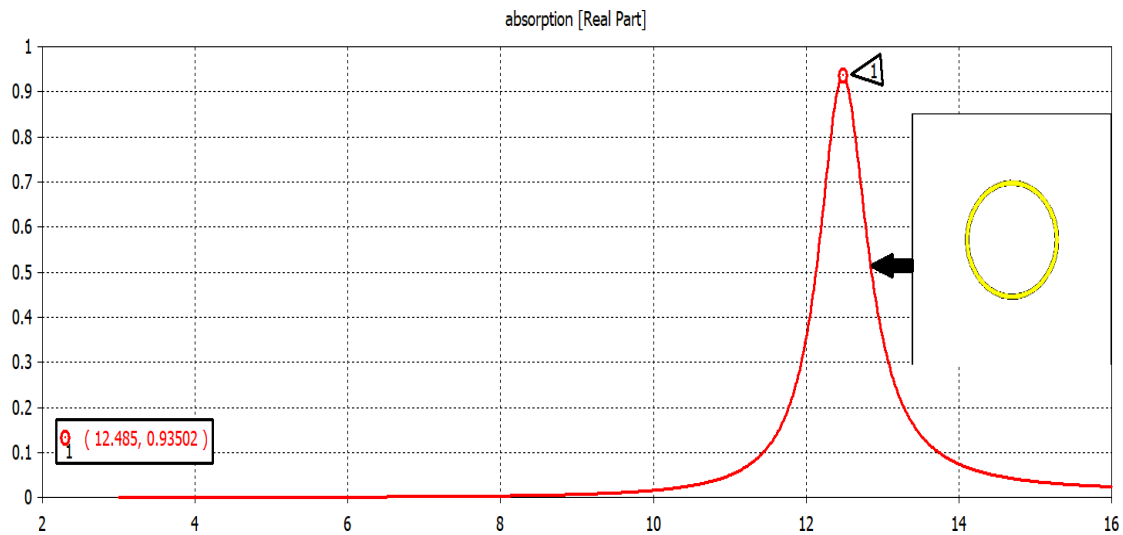


Figure III.24 : Graphique d'absorption – étape 1

B/ Etape 2 :

D'après les figures III.25 et III.26, l'évolution du coefficient de réflexion S11 révèle deux bandes étroites centrées respectivement autour de 8.71 GHz et 12.76 GHz, contribuant à la formation de deux pics d'absorption atteignant 94.59 % et 98.86 %.

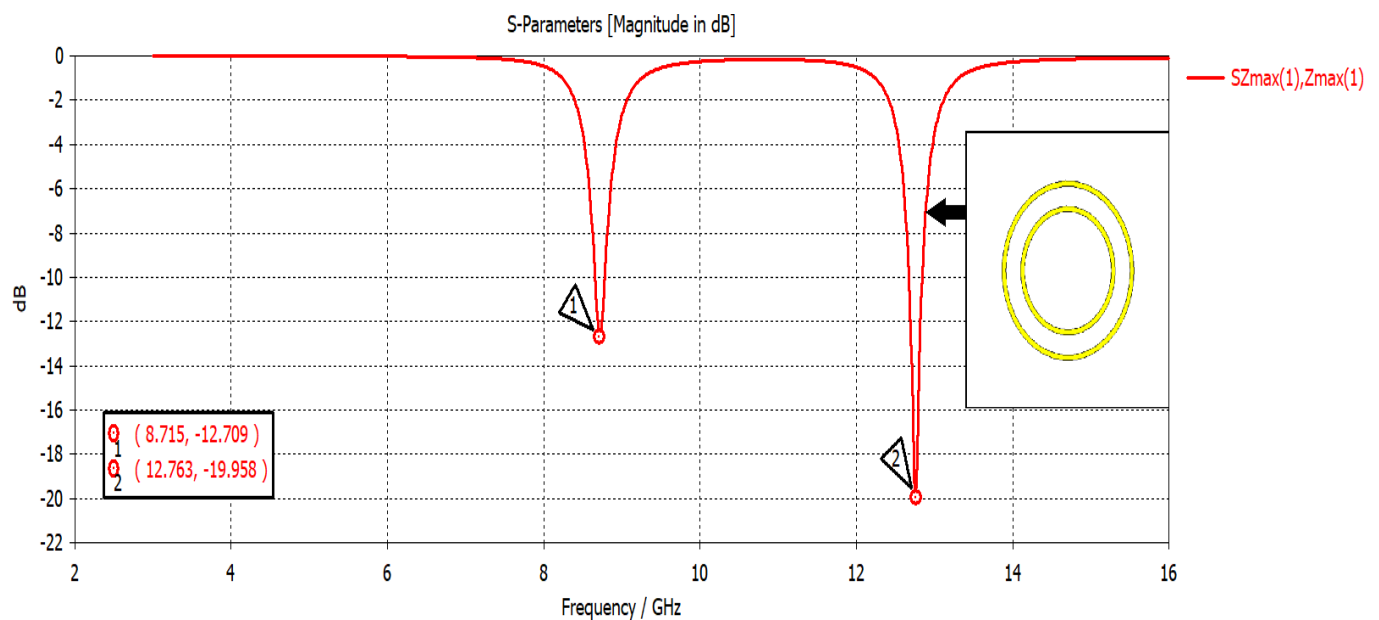


Figure III.25 : Le coefficient de réflexion S11 de l'absorbant – étape 2

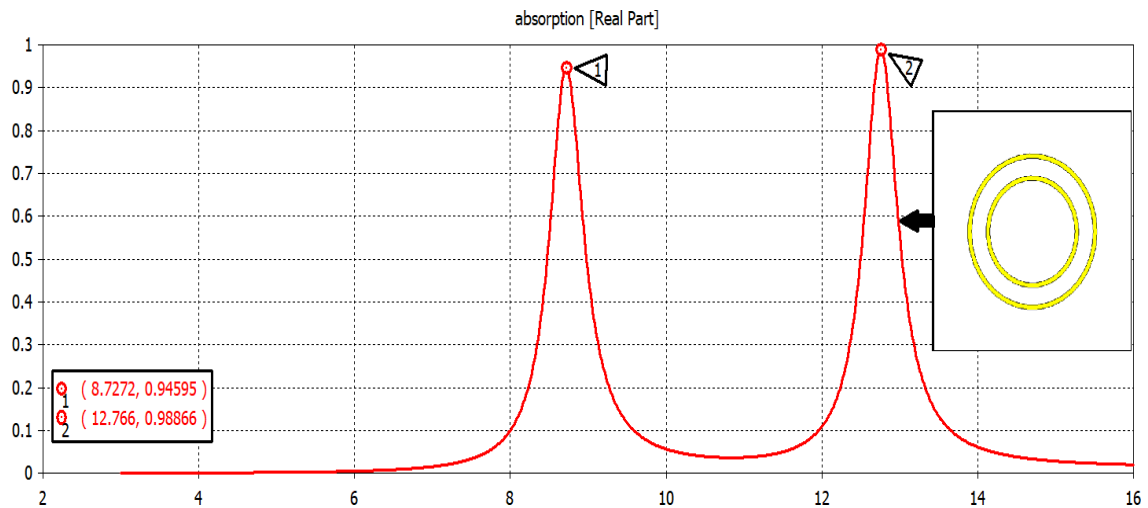
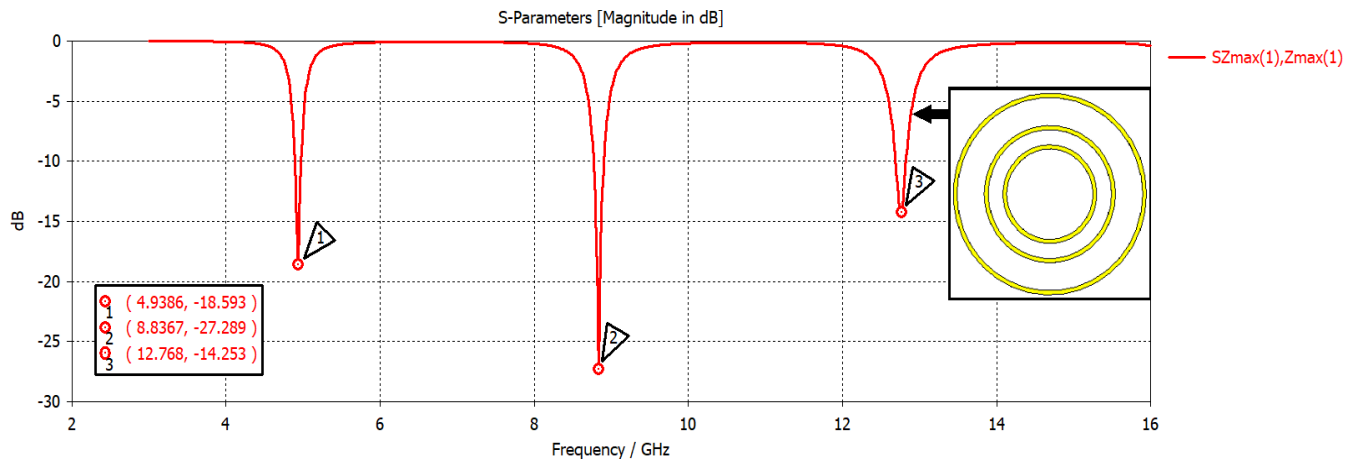


Figure III.26 : Graphique d'absorption – étape 2

C/ Etape 3 :

D'après la figure III.27, on observe clairement trois fréquences de résonances autour de **4.93 GHz**, **8.83 GHz**, et **12.87 GHz**., correspondant aux résonances successives des trois anneaux. Parallèlement, la courbe d'absorption révèle trois pics distincts atteignant 98,74 % à 4,93 GHz, 99,73 % à 8,83 GHz et 96,53 % à 12,87 GHz (figure III.28), traduisant une absorption élevée de l'onde électromagnétique incidente à ces points.

La combinaison judicieuse de ces résonateurs dans une seule cellule permet ainsi d'obtenir une absorption quasi-parfaite sur trois bandes étroites bien définies, démontrant l'efficacité de la conception multi-résonante proposée.

Figure III.27 : Le coefficient de réflexion S_{11} de l'absorbant – étape3

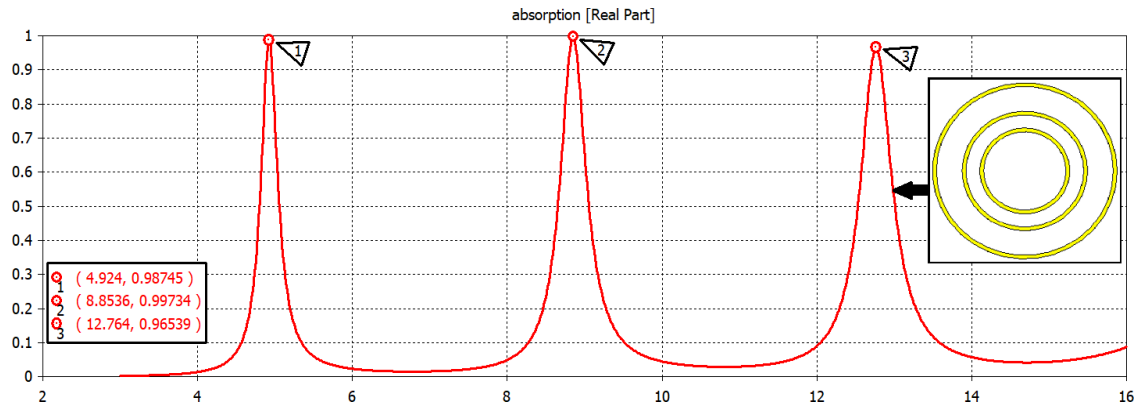


Figure III.28 : Graphique d'absorption –étape3

III.6.2. Champs électriques et magnétiques

À la fréquence de 4,924 GHz (Figure III.29 (a)), une forte résonance est observée au niveau du l'anneau extérieur, révélant une accumulation importante du champ électrique dans cette région. À 8,853 GHz (Figure III.29 (b)), la résonance est principalement localisée sur le second anneau intermédiaire. Enfin, à 12,764 GHz (Figure III.29 (c)), la résonance se concentre dans le petit anneau central. La figure III.30 met en évidence une évolution comparable dans la distribution du champ magnétique. À basse fréquence (Figure III.30 (a)), le champ magnétique reste relativement diffus, tandis qu'à des fréquences plus élevées (Figures III.30 (b) et (c)), il se concentre de manière significative au-dessus et en dessous des anneaux résonants. Cette répartition confirme le rôle structural de chaque anneau dans la génération de résonances multiples.

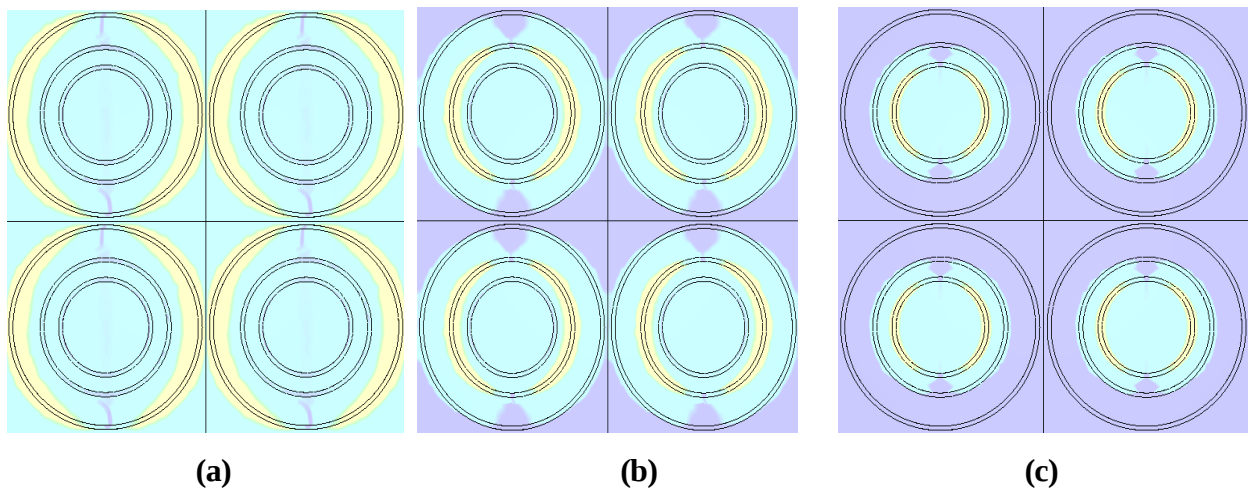


Figure III.29 : champs électriques aux : 4.924 GHz (a) ; 8.853 GHz (b) ; 12.764 GHz(c)

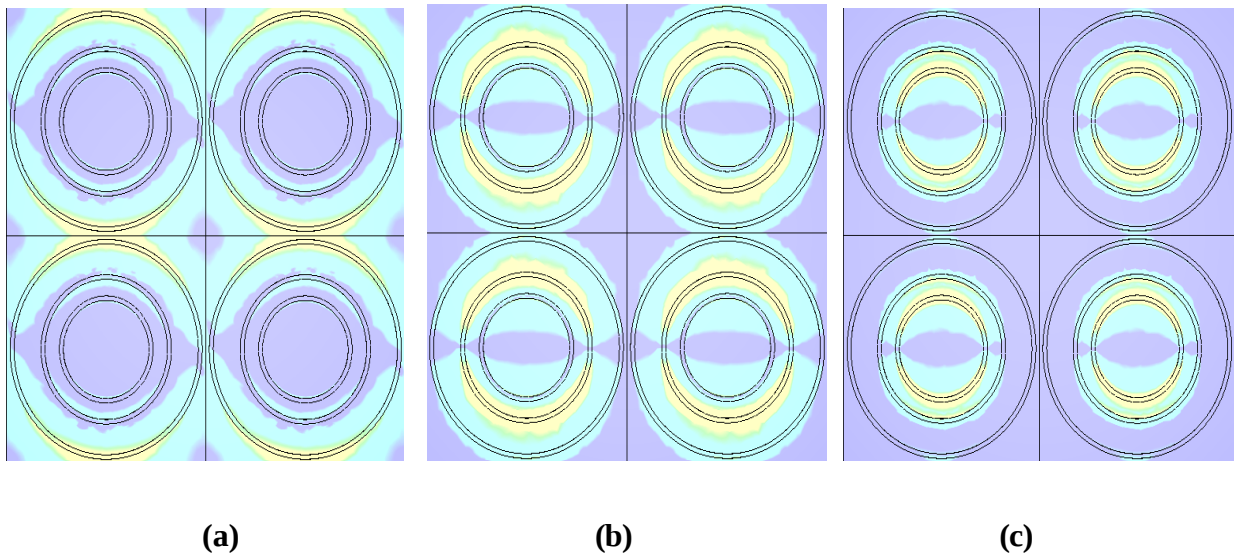


Figure III.30 : Champs magnétiques aux : 4.924 GHz **(a)** ; 8.853 GHz **(b)** ; 12.764 GHz **(c)**

III.6.3. Incidence et polarisation

D'après la figure III.31, la réponse de l'absorbeur MTM demeure stable et élevée pour les trois pics, indépendamment de la variation de l'angle φ . Cette invariance indique une **forte indépendance de la réponse en absorption vis-à-vis de la polarisation** en mode TE, attribuable à la symétrie radiale du motif composé d'anneaux concentriques.

Le comportement du mode TM en fonction de l'angle d'incidence θ est représenté dans la figure III.32. L'absorption reste élevée et parfaite pour les deux premiers pics, atteignant 99,99 % lorsque θ varie de 0° à 30° . Toutefois, au-delà de 30° , une diminution progressive de l'absorption est observée, atteignant environ 75 % à 60° .

Ainsi, il est possible de conclure que l'absorption décroît rapidement lorsque l'angle θ dépasse 30° . Néanmoins, sur la base de l'analyse conjointe des effets des angles φ (phi) et θ (thêta), la structure étudiée démontre un comportement d'absorption stable, efficace et multi-bande. Elle peut donc être considérée comme un absorbeur MTM idéal, à la fois performant, robuste face aux variations angulaires, et ultra-mince.

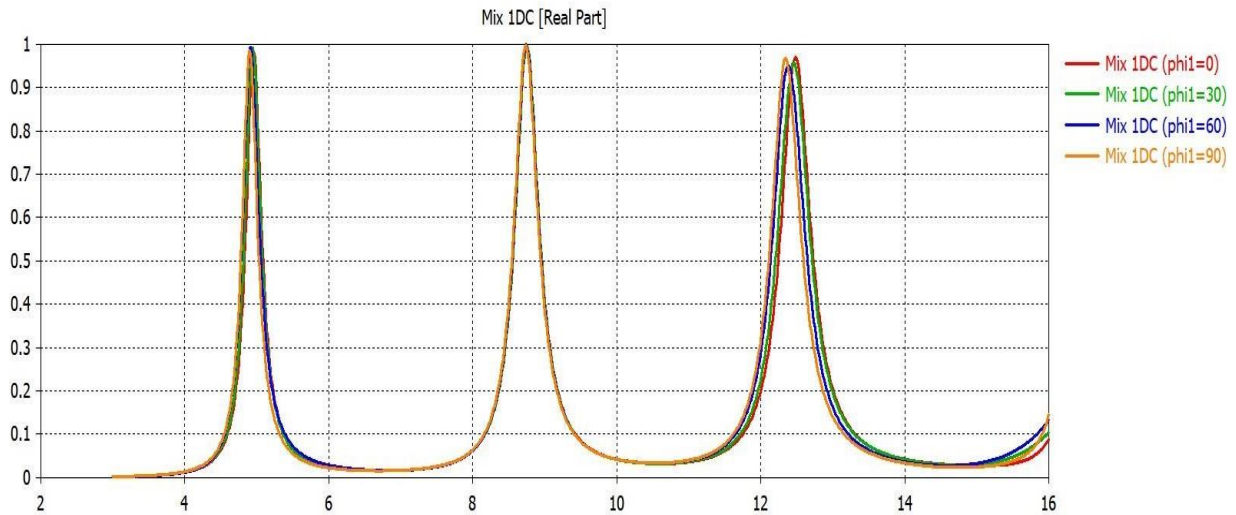


Figure III.31 : L'impact de ϕ sur les pics d'absorption à triple bande

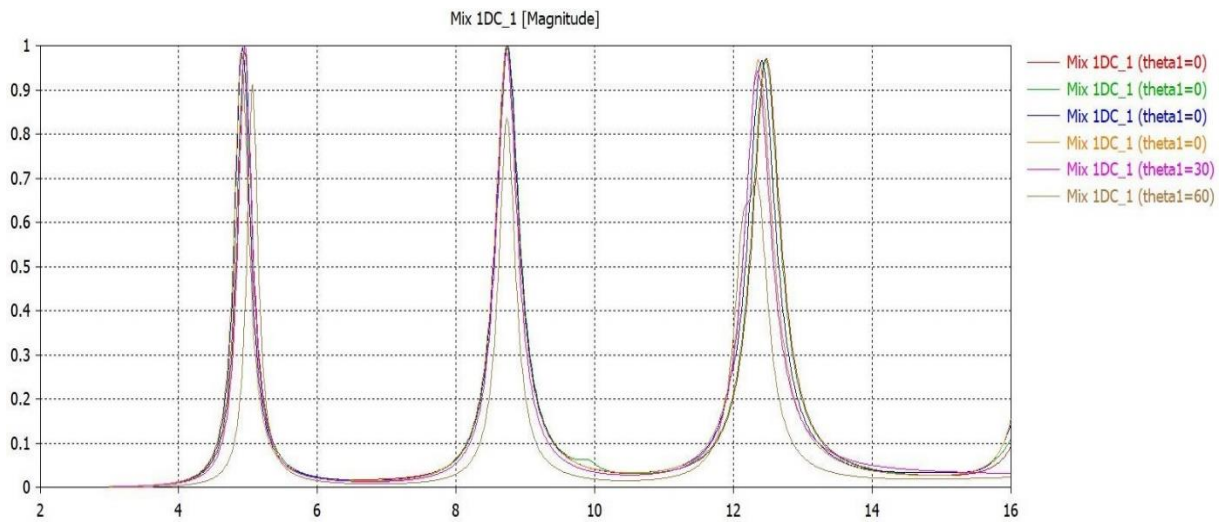


Figure III.32 : L'influence du θ dans les pics d'absorption à triple bande

III.7. CONCEPTION D'UN ABSORBANT MTM DYNAMIQUE LARGE BANDE DANS LE DOMAINE TERAHERTZ (THz)

III.7.1. Définition et intérêt du domaine des fréquences (THz) pour les absorbants MTM

Avec l'apparition récente de sources et de détecteurs capables de fonctionner dans la gamme des fréquences térahertz (THz), ce domaine fait l'objet d'un intérêt scientifique croissant. Située entre les micro-ondes et l'infrarouge, la bande THz représente une solution naturelle face à la saturation progressive des bandes micro-ondes traditionnelles. Toutefois, la propagation efficace des ondes dans cette gamme reste un défi en raison des pertes importantes et des interactions complexes avec les matériaux. C'est dans ce contexte que les MMA (Métamatériaux Absorbants)

trouvent toute leur pertinence : leur capacité à contrôler finement l'impédance, à concentrer les champs électromagnétiques et à maximiser les pertes internes en fait des candidats idéaux pour développer des absorbeurs minces, efficaces et sélectifs en THz. Ils permettent notamment de surmonter les limitations des matériaux classiques, en assurant une absorption optimisée sur des bandes ciblées, ce qui est essentiel pour des applications en imagerie THz, sécurité, et télécommunications à haut débit (6G).

Les fréquences térahertz correspondent à un domaine fréquentiel situé entre celui des micro-ondes et de l'infrarouge (Figure III.33). Par rapport à sa position, le domaine des térahertz est souvent qualifié d'infrarouge lointain ou encore de rayons T, en opposition aux rayons X qui se situent de l'autre côté du domaine des fréquences optiques. En termes de valeurs de fréquences, on place généralement le domaine des fréquences térahertz entre ~ 100 GHz et ~ 30 THz [70, 71, 72].

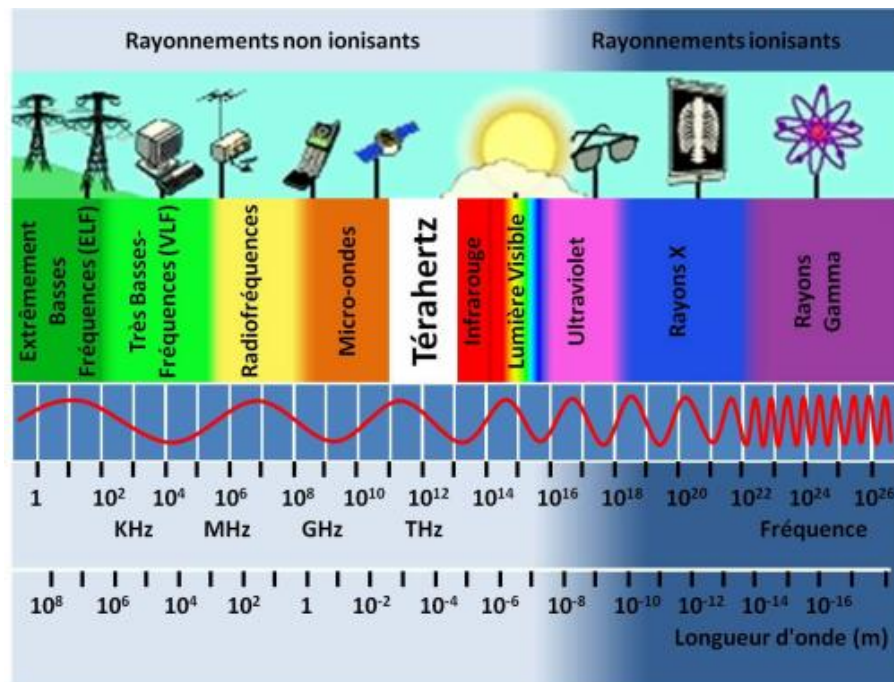


Figure III.33 : Spectre électromagnétique mettant en évidence le domaine des fréquences Térahertz.

III.7.2. Matériaux utilisés

Les absorbeurs MTM actifs à large bande dans la gamme térahertz (THz) suscitent un intérêt croissant en raison de leur capacité à offrir un contrôle dynamique des propriétés électromagnétiques. Parmi les matériaux les plus prometteurs pour ce type de structure, le dioxyde de vanadium (VO_2) joue un rôle clé grâce à sa propriété de transition de phase. En effet, le VO_2

peut passer d'un état isolant à un état métallique à une température critique d'environ 68 °C, ce qui permet de moduler activement l'absorption électromagnétique. Combiné à l'or (Au), qui assure une excellente conductivité et des pertes ohmiques contrôlées, le système permet de concevoir des structures résonantes efficaces et stables. Le dioxyde de silicium (SiO₂) est souvent utilisé comme substrat diélectrique dans ces dispositifs en raison de sa faible constante diélectrique, de sa stabilité thermique et de sa compatibilité avec les procédés de nano fabrication.

Le modèle de Drude est utilisé pour décrire les caractéristiques optiques du VO₂ dans la gamme térahertz [71], et peut être exprimé comme suit :

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_{\infty} - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + i\gamma\omega} \quad (\text{III.21})$$

Où $\varepsilon_{\infty} = 12$ représente la permittivité diélectrique à haute fréquence, et $\gamma = 5,75 \times 10^{13}$ rad/s est la fréquence de collision, respectivement. La relation entre la fréquence plasma ω_p et la conductivité σ peut être exprimée comme suit :

$$\omega_p^2(\sigma) = \frac{\sigma}{\sigma_0} \omega_p^2(\sigma_0) \quad (\text{III.22})$$

Avec $\sigma_0 = 3 \times 10^5$ S/m et $\omega_p(\sigma_0) = 1,4 \times 10^{15}$ rad/s. Dans cette analyse, on suppose que la conductivité du VO₂ varie de 200 S/m à 2×10^5 S/m lorsqu'il passe de la phase isolante à la phase métallique [71].

La couche diélectrique intermédiaire est constituée de dioxyde de silicium (SiO₂), d'une constante diélectrique relative $\varepsilon = 3.8$. La couche inférieure utilise de l'or (Au), et sa conductivité est de 4.56×10^7 S/m.

III.7.3. Configuration géométrique de l'absorbeur MTM large bande

Un absorbeur térahertz (THz) à ultra-large bande et à réglage dynamique, composé de trois anneaux en VO₂, espacés uniformément et d'un plan de masse métallique en or (Au), séparés par un espaceur diélectrique en dioxyde de silicium (SiO₂), a été proposé par Guozhang Wu *et al* [71]. La configuration unicellulaire de cet absorbeur, modélisée à l'aide du logiciel CST, est illustrée à la figure III.34. Les dimensions géométriques associées sont récapitulées dans le tableau III.5. Nous avons utilisé dans cette analyse des conditions aux limites périodiques pour simuler l'absorption et la réflexion de l'absorbeur proposé. Les conditions aux limites sont définies comme les cellules unitaires dans les directions x et y, tandis qu'une couche d'appariement parfait est établie dans la direction z [71].

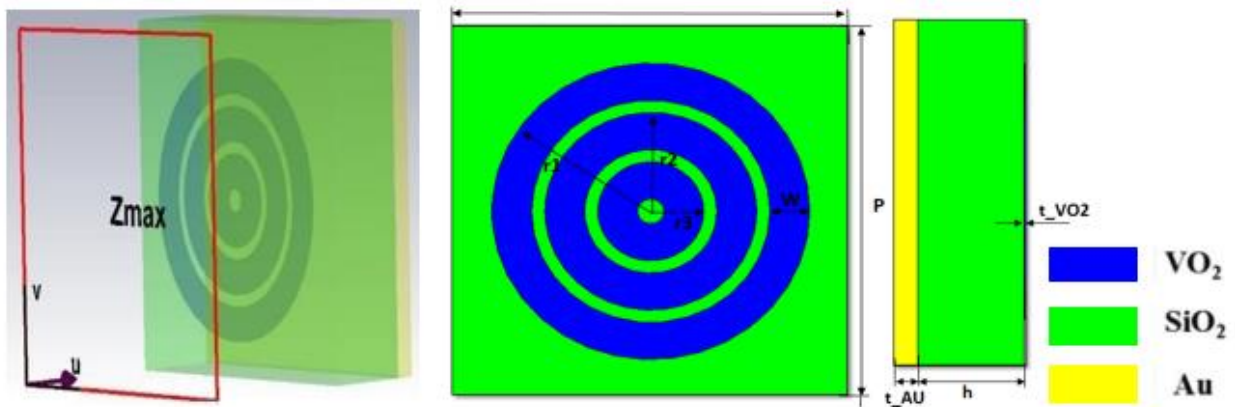


Figure III.34 : Schéma de principe de l'unité de base proposée

Paramètres	Dimensions (μm)
P	30
r 1	12
r 2	8
r 3	4
W	3
t_Au	2
t_VO2	0.2
H	9

Tableau III.5 : Les valeurs des paramètres de la cellule suggérée

III.7.4. Coefficients de réflexion et d'absorption aux différentes étapes de conception

A/ Etape 1 :

Les figures III.35 et III.36 illustrent respectivement le coefficient de réflexion S11 et l'absorption pour une structure comportant un seul anneau résonateur. On observe un creux marqué de S11 à environ 5 THz, correspondant à un pic d'absorption atteignant environ 94 %. Ce comportement démontre que même une configuration simple à un seul résonateur permet d'obtenir une absorption efficace dans une bande étroite.

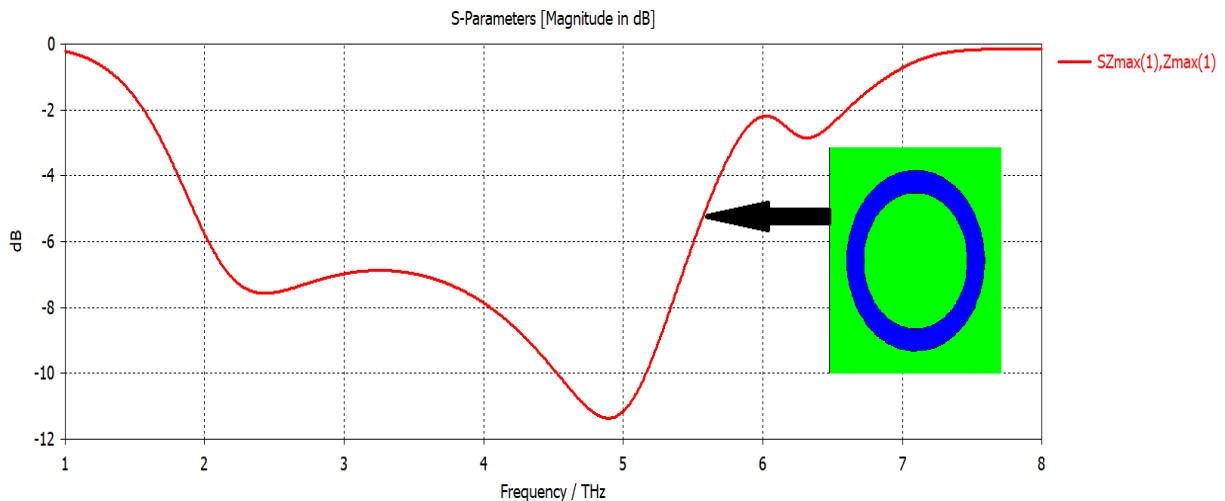


Figure III.35 : Le coefficient de réflexion s_{11} de l'absorbant – étape 1

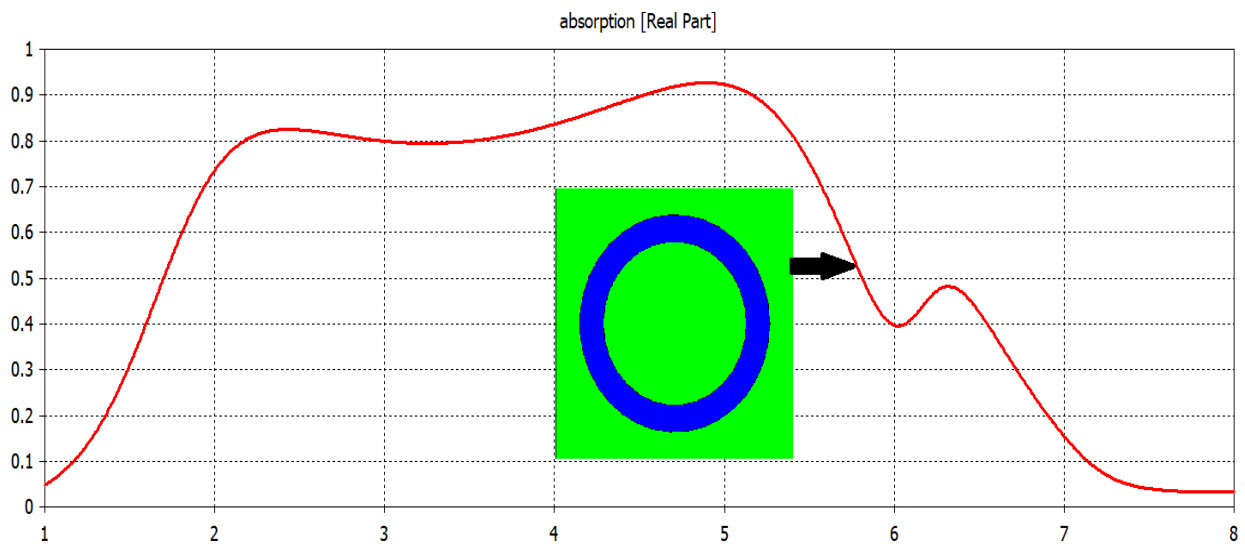


Figure III.36 : Graphique d'absorption – étape 1

B/ Etape 2 :

Avec l'ajout d'un deuxième anneau, comme présenté dans les figures III.37 et III.38, la réponse en fréquence s'élargit. On distingue deux creux de réflexion plus prononcés, localisés respectivement autour de 2.8 THz et 5.5 THz, traduisant deux bandes de résonance. Ces bandes sont accompagnées de pics d'absorption élevés, ce qui confirme que l'introduction d'un deuxième anneau améliore la capacité multi-bande de l'absorbeur.

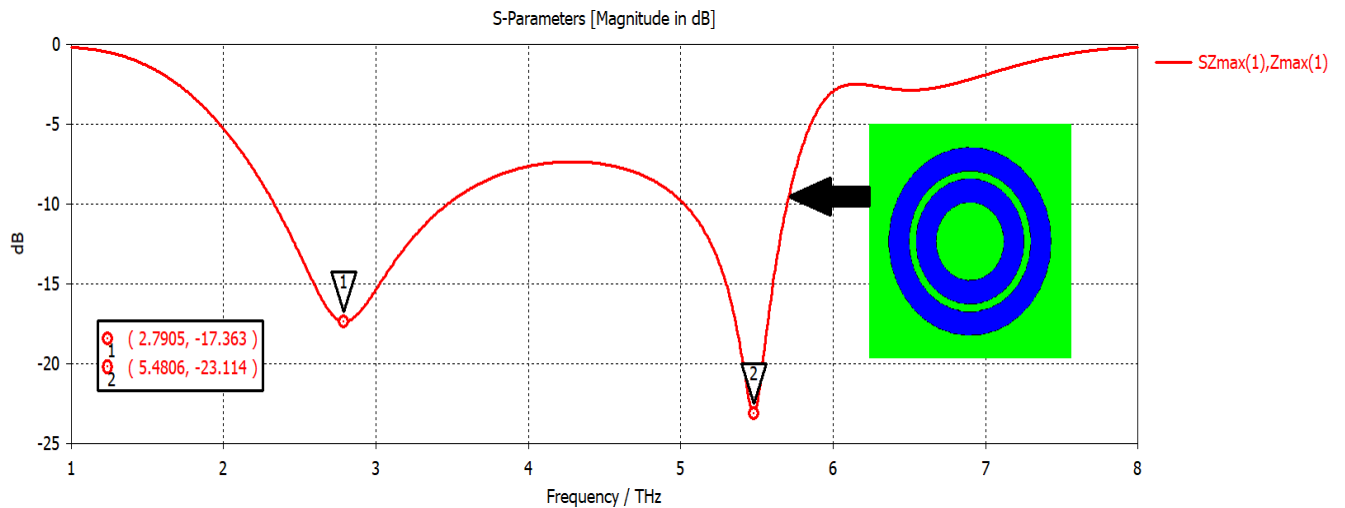


Figure III.37 : Le coefficient de réflexion s11 de l'absorbant – étape2

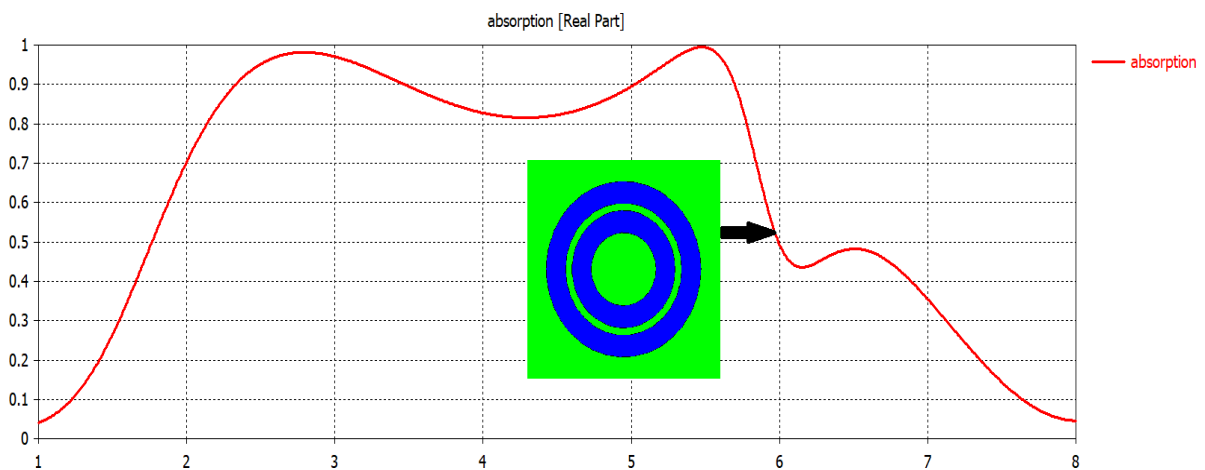


Figure III.38 : Graphique d'absorption – étape 2

C/ Etape 3 :

Les figures III.39 et III.40 montrent l'évolution finale de la structure avec trois anneaux concentriques. Cette étape atteint une performance optimale : les trois bandes de résonance sont bien distinctes, avec des creux de S11 très profonds et une absorption quasi-parfaite dépassant 98 % sur plusieurs fréquences. La combinaison des trois résonateurs engendre un couplage électromagnétique complexe, permettant une absorption à large bande et haute efficacité.

L'évolution progressive de la structure démontre que l'ajout successif de résonateurs circulaires concentriques permet non seulement de multiplier les bandes d'absorption, mais aussi d'améliorer leur efficacité. L'étape finale illustre un absorbeur MTM performant, compact et bien adapté aux applications THz nécessitant une absorption multi-bande.

La figure III.41, extraite de la référence [71], vient confirmer le comportement électromagnétique de la configuration finale de notre conception.

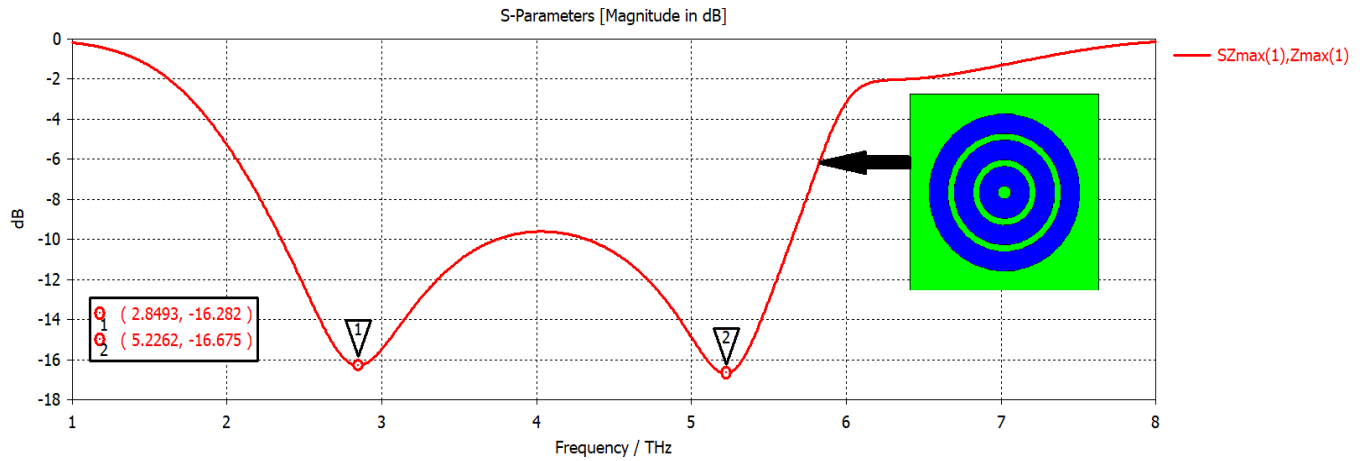


Figure III.39 : Le coefficient de réflexion S_{11} de l'absorbant – étape3

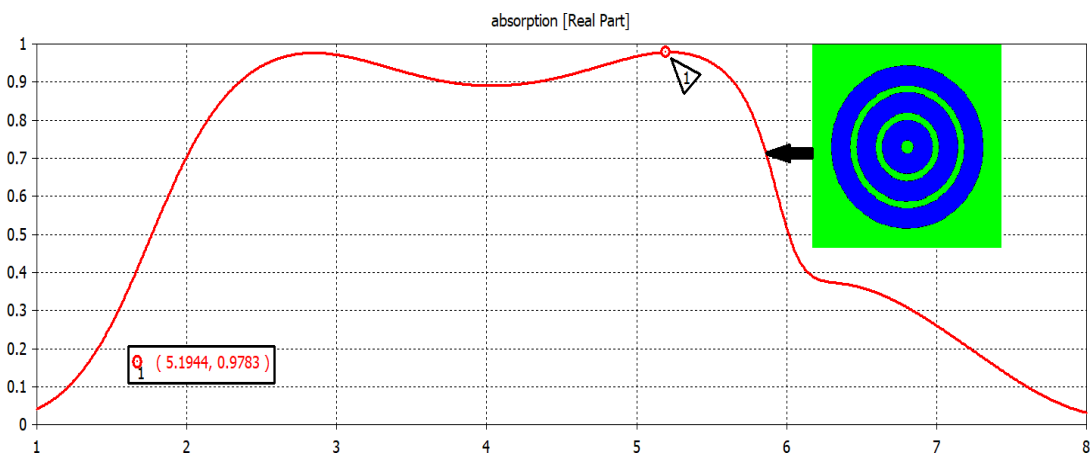


Figure III.40 : Graphique d'absorption – étape 3

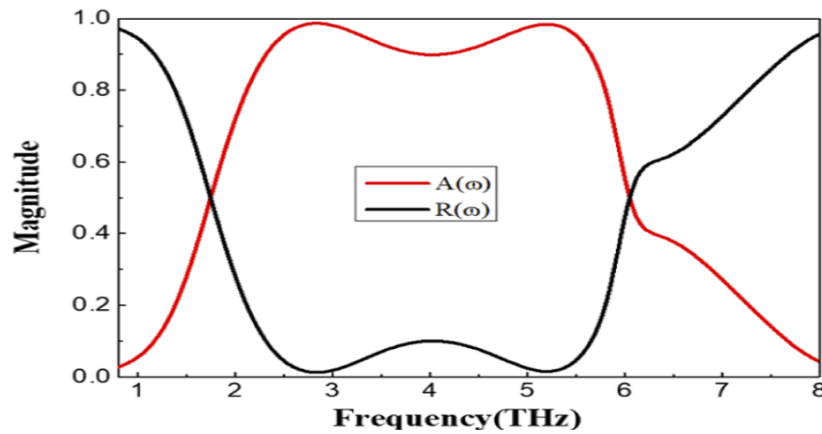


Figure III.41 : A : absorbance et R : réflectance de [71]

III.7.5. Absorption reconfigurable par contrôle actif de la conductivité du VO_2

Le dioxyde de vanadium (VO_2) est un matériau à transition de phase bien connu, capable de passer d'un état isolant à un état métallique autour de 68 °C. Cette propriété en fait un excellent candidat pour la conception d'absorbeurs térahertz dynamiquement réglables. En effet, la

conductivité électrique du VO₂ peut être modulée sur une large plage (de l'ordre de 200 S/m à 2×10^5 S/m), ce qui permet de reconfigurer activement les performances de l'absorbeur.

Comme l'illustre la figure III.42, la variation de la conductivité du VO₂ induit une modification notable des spectres de réflexion et d'absorption, en accord avec les résultats rapportés dans la référence [71] (figure III.43). Lorsque la conductivité augmente, l'absorbance croît progressivement, passant d'environ 4 % à une absorption quasi parfaite de 100 %. Cette amélioration notable s'effectue sans déplacement significatif de la fréquence centrale de résonance, ce qui démontre la stabilité fréquentielle de la structure. En résumé, la commande active de la conductivité du VO₂ offre une voie efficace pour concevoir des absorbeurs térahertz reconfigurables, capables de s'adapter dynamiquement aux besoins des applications comme l'imagerie, la détection ou la gestion adaptative du rayonnement électromagnétique.

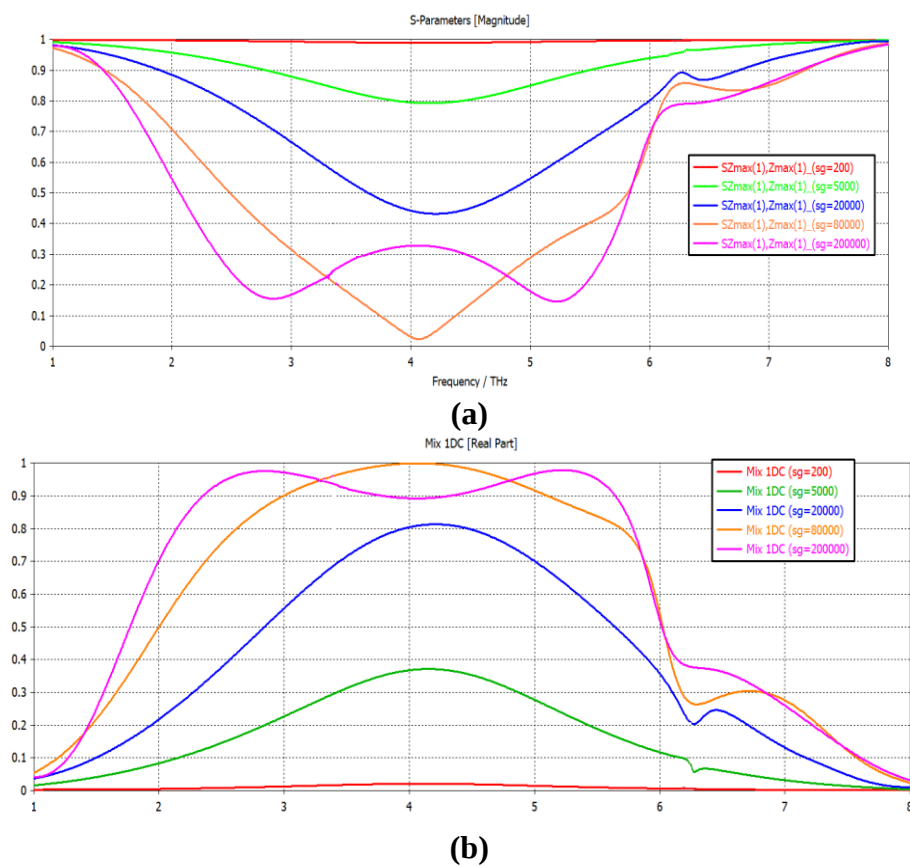


Figure III.42 : (a) Le spectre de réflexion et (b) le spectre d'absorption pour différentes conductivités du VO₂

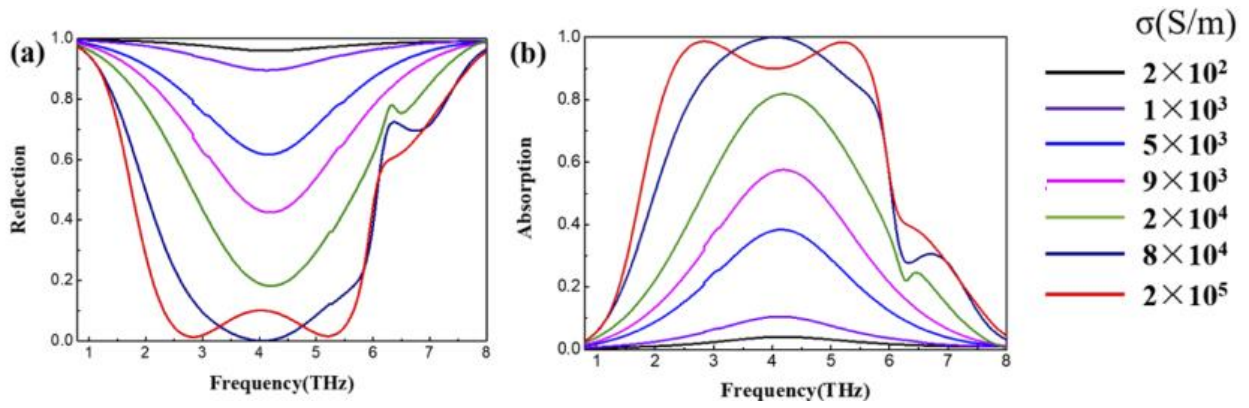


Figure III.43 : (a) Le spectre de réflexion et (b) le spectre d'absorption pour différentes conductivités du VO₂ reportés dans [71]

III.7.6. Champs électriques et magnétiques

À partir de la figure III.44(a), on observe que le champ électrique, à la fréquence de 5.19 GHz, présente un mouvement circulaire multidirectionnel autour des anneaux, avec une concentration particulièrement marquée en haut et en bas de la structure. Selon la figure III.44(b), le champ magnétique à cette même fréquence est principalement localisé dans le petit anneau latéral. Ces observations montrent que la distribution du champ électromagnétique résulte principalement d'un effet de couplage entre les anneaux. Ce phénomène est à l'origine des deux pics d'absorption bien espacés, conférant à l'absorbeur un comportement à large bande.

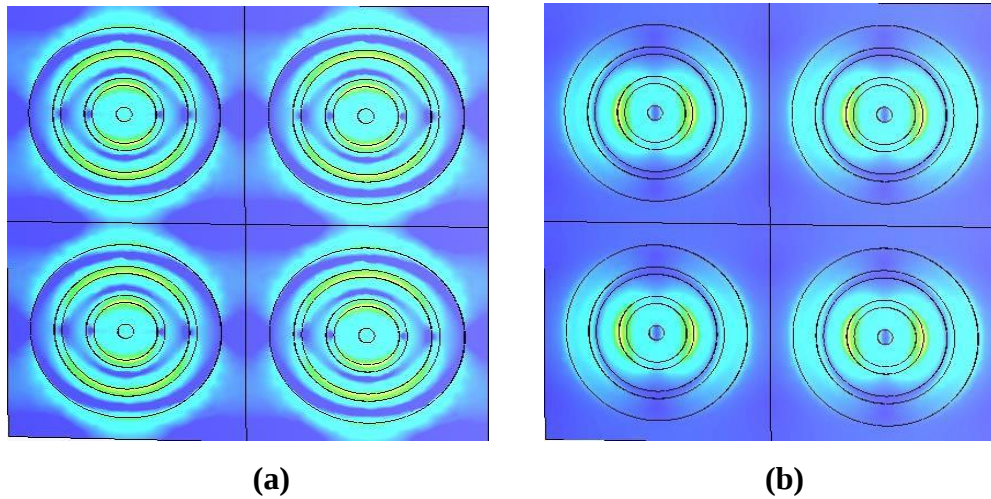


Figure III.44 : Champs électriques (a) ; Champs magnétiques (b) à 5.194 GHz

III.7.7. Incidence et polarisation

La figure III.45 montre que la réponse de l'absorbeur en méta matériaux (MTM) reste stable sur une large bande de fréquences, allant de 2.855 GHz à 5.194 GHz, dans le cas d'une polarisation TE, indépendamment de l'angle d'incidence. En revanche, la figure III.46 révèle que pour une

onde incidente en polarisation TM, le niveau d'absorption diminue rapidement à mesure que l'angle θ augmente, passant de 98 % à 32 % sur la même plage de fréquences. Cela indique une sensibilité accrue de l'absorbeur vis-à-vis de l'angle d'incidence en polarisation TM.

L'absorbeur dynamique à base de méta matériaux (MTM) proposé, reposant sur une structure multicouche intégrant le dioxyde de vanadium (VO_2), démontre des performances d'absorption efficaces et adaptables sur une large bande de fréquences, allant de 2.855 GHz à 5.194 GHz. La réponse reste remarquablement stable pour une polarisation TE, indépendamment de l'angle d'incidence, ce qui en fait une solution idéale pour les environnements complexes ou en mouvement.

En revanche, pour la polarisation TM, une sensibilité accrue à l'angle d'incidence est observée, avec une baisse du taux d'absorption de 98 % à 32 % lorsque l'angle θ augmente. Cette variation met en lumière l'importance d'une conception structurale soigneusement symétrique et optimisée pour une réponse plus robuste en polarisation TM.

L'un des atouts majeurs de cette conception réside dans l'intégration potentielle d'un dispositif thermique de contrôle, permettant d'ajuster la conductivité du VO_2 en temps réel. En effet, la transition de phase du VO_2 , d'un état isolant à un état métallique, peut être activée par chauffage, ce qui modifie ses propriétés électromagnétiques, et donc l'absorption. Une telle approche ouvre la voie à des absorbeurs reconfigurables, adaptables à des conditions d'environnement dynamiques, avec des applications prometteuses en furtivité adaptative, en capteurs intelligents, et en gestion thermique ou énergétique.

En conclusion, cet absorbeur MTM large bande, thermiquement contrôlable, offre une solution avancée et polyvalente dans le domaine des métamatériaux intelligents, alliant efficacité, miniaturisation et adaptabilité.

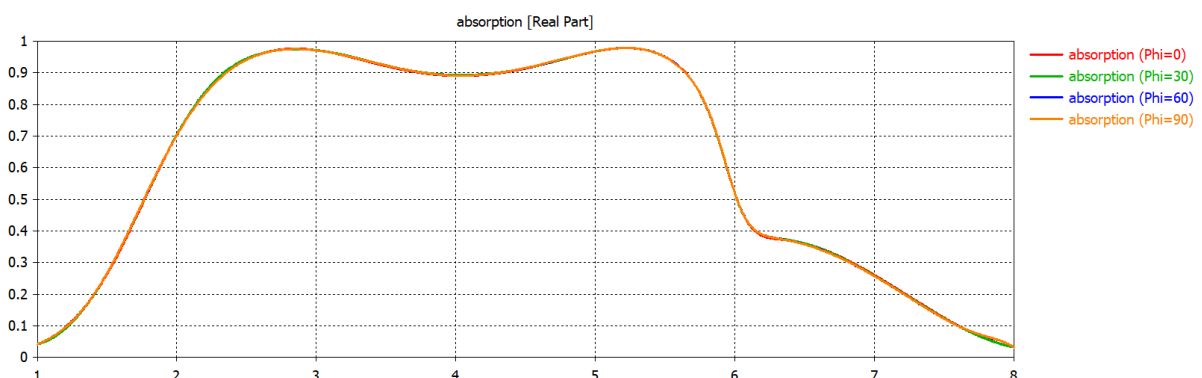


Figure III.45 : L'impact de ϕ sur les pics d'absorption à une large bande

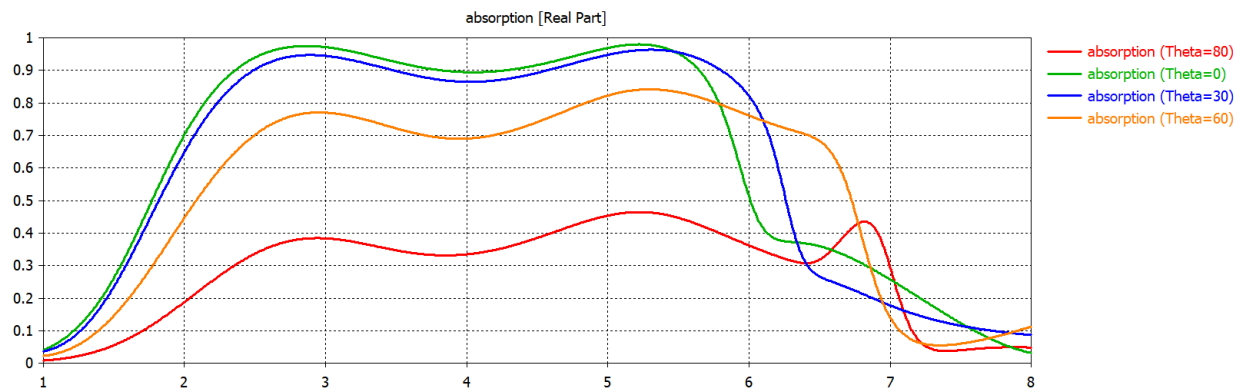
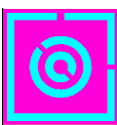


Figure III.46 : L'influence du θ sur les pics d'absorption à une large bande

III.8. Bilan et application

Le tableau ci-dessous présente un bilan comparatif des structures d'absorbeurs MTM étudiées, en mettant en évidence leurs performances, leur sensibilité à la polarisation, ainsi que leurs applications possibles selon les bandes de fréquence couvertes.

Structure	Fréq. d'Abs.	Matériaux	Taille de la cellule $w \times w \times h$ [mm ³]	Insensibilité de la polarisation	Pics d'Abs %	Applications Potentielles
Structure 1 	4 GHz	FR4 Cu	7×7× 2.4	TE : non TM : oui	99.29	• Réduction de la signature radar (RCS) • Dispositifs anti-interférences militaires
Structure 2 	2.4 GHz 4.2GHz	RO400 3C Cu	15 × 15 × 1.524	TE : non TM : non	94.04 99.49	• Wi-Fi / IoT (bande ISM) • Récolte d'énergie ambiante (RF harvesting)
Structure 3 	8 GHz 12.365 GHz	FR4 Cu	9×9× 0.8	TE : oui TM : non	94.04 99.49	• Antennes intelligentes mobiles • Surveillance radar portable (X-band)

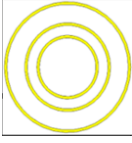
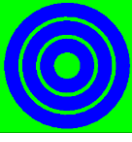
Structure 4 	4.924 GHz	FR4	10×10×1	TE : oui	99	• Camouflage électromagnétique multi-bande • Filtres RF pour antennes multi-bandes
	8.746 GHz	Cu		TM : oui	100	
	12.412 GHz				97	
Structure 5 	Large bande réglable de 2.34 THz à 5.64 THz	VO2 SiO ₂ Au	0.03×0.03×0.9	TE : oui TM : non	99	• Imagerie THz (sécurité, biomédical) • Capteurs intelligents adaptatifs • Modulateurs THz • Cryptage optique / camouflage dynamique

Tableau III.6 : Tableau récapitulatif des caractéristiques et des applications des structures d'absorbeurs MTM simulées

III.9. CONCLUSION

Ce chapitre a permis d'évaluer et de comparer les performances électromagnétiques de plusieurs structures d'absorbeurs MTM conçues à partir de différentes configurations géométriques et matériaux. Les résultats obtenus par simulation révèlent une évolution notable en termes d'efficacité d'absorption, de compacité et d'indépendance vis-à-vis de la polarisation, au fil des étapes de conception. Les cinq structures analysées présentent chacune des caractéristiques spécifiques :

- **Structure 1** offre un excellent taux d'absorption (99.29 %) à 4 GHz, mais reste sensible à la polarisation TE.
- **Structure 2**, avec deux pics à 2.4 GHz et 4.2 GHz, montre une meilleure sélectivité fréquentielle, bien que l'insensibilité à la polarisation soit absente.
- **Structure 3** améliore la stabilité en TE avec des pics bien définis, mais reste vulnérable au mode TM.
- **Structure 4**, en revanche, démontre une absorption quasi-parfaite sur trois bandes (99 %, 100 %, 97 %), avec une insensibilité confirmée aux deux modes de polarisation (TE et TM), ce qui la rend particulièrement robuste et polyvalente.
- **Structure 5**, introduisant un absorbeur dynamique large bande basé sur VO₂, s'étend de 2.34 THz à 5.64 THz avec une efficacité d'absorption atteignant 99 %. Elle se distingue

par son comportement reconfigurable et sa réponse adaptative en polarisation TE, tout en restant sensible au mode TM.

L'ensemble des résultats souligne l'impact crucial des choix de matériaux (FR4, RO4003C, VO₂), de la géométrie des résonateurs et de la symétrie de la cellule unitaire sur les performances globales de l'absorbeur. Le recours à des matériaux actifs comme le VO₂ ouvre par ailleurs des perspectives prometteuses vers des absorbeurs intelligents thermiquement contrôlables, offrant flexibilité et adaptabilité pour des applications avancées telles que la furtivité, la gestion d'énergie ou les capteurs THz.

CONCLUSION
GENERALE

L'accélération du développement technologique dans des domaines tels que les télécommunications, l'électronique embarquée et les systèmes radar a entraîné une augmentation significative du rayonnement électromagnétique dans notre environnement. Bien que ces ondes électromagnétiques soient essentielles au fonctionnement des dispositifs modernes, elles peuvent provoquer des interférences électromagnétiques (EMI), compromettant ainsi la fiabilité des systèmes électroniques. Parallèlement, l'émergence de sources et détecteurs fonctionnant dans la bande térahertz (THz), située entre les micro-ondes et l'infrarouge, suscite un intérêt croissant, notamment pour des applications en imagerie, détection et communication à haute fréquence. Cependant, la gestion des ondes dans cette gamme reste complexe en raison des pertes et de la sensibilité des matériaux.

Face à ces défis, les matériaux absorbants électromagnétiques apparaissent comme une solution efficace pour réduire les interférences et améliorer la performance des systèmes. Néanmoins, les absorbants traditionnels ; diélectriques ou magnétiques ; présentent des limitations en termes d'épaisseur, de bande passante ou de stabilité angulaire, freinant leur intégration dans des dispositifs compacts et modernes.

C'est dans ce contexte que les métamatériaux (MTM), structures artificielles aux propriétés électromagnétiques inédites, offrent une alternative prometteuse. Leur capacité à manipuler les ondes au-delà des limites des matériaux naturels en fait des candidats de choix pour la conception d'absorbeurs électromagnétiques innovants, minces, efficaces et multi bandes.

Ce mémoire avait pour objectif la conception et l'analyse de plusieurs structures d'absorbeurs à base de MTM, adaptées aux bandes micro-ondes et térahertz. À travers une étude structurée en trois chapitres, nous avons d'abord présenté, dans le premier chapitre, les bases théoriques des absorbeurs électromagnétiques, incluant leurs mécanismes d'absorption et leurs principales familles. Le deuxième chapitre a été consacré aux fondements des MTM, avec un accent particulier sur les MTM absorbants et leurs méthodes de conception. Enfin, le troisième chapitre a présenté la conception, la modélisation et la simulation numérique de cinq structures d'absorbeurs MTM : une structure à bande étroite, deux structures à double bande, une structure à triple bande, ainsi qu'un absorbeur dynamique en bande térahertz basé sur le VO_2 , dont l'absorption peut être ajustée thermiquement.

Les résultats ont confirmé la capacité des structures MTM à offrir une absorption parfaite dans certains cas (atteignant 100 %) et quasi-parfaite dans d'autres (94 %, 97 %, 99 %), tout en respectant les critères de miniaturisation. Selon la configuration adoptée, ces structures peuvent fonctionner de manière sélective (mono bande ou multi bande) ou en large bande. L'intégration du matériau à transition de phase VO₂ dans la cinquième structure a permis de démontrer un contrôle dynamique de l'absorption, ouvrant ainsi la voie à la conception d'absorbeurs intelligents et reconfigurables. Ces performances témoignent de la flexibilité et de l'adaptabilité des MTM, capables de répondre aux exigences spécifiques de différentes applications tout en maintenant une efficacité optimale.

Les perspectives de ce travail sont multiples. À court terme, il serait pertinent d'optimiser davantage les géométries proposées afin d'améliorer la stabilité angulaire et d'élargir les bandes d'absorption. À moyen terme, des études expérimentales sont nécessaires pour valider les résultats numériques obtenus par simulation. Enfin, à plus long terme, l'intégration d'absorbeurs actifs dans des systèmes embarqués, des dispositifs de furtivité, des capteurs intelligents ou des plateformes THz pour l'imagerie médicale ou sécuritaire pourrait faire l'objet de projets de recherche avancés.

Ainsi, ce travail constitue une étape fondatrice dans la conception d'absorbeurs MTM performants, tout en laissant entrevoir des pistes prometteuses pour l'avenir des technologies électromagnétiques.

- [1] Liu, Y., & Zhao, X, “Electromagnetic wave absorbing materials: A review”. *Materials Science and Engineering B*, 273. (2021).
- [2] M. T. Islam, “Metamaterial for Microwave Applications”, University Kebangsaan Malaysia, Malaysia, 2023
- [3] <https://www.siepel.com/absorbants-cem-hyper/>
- [4] Zhao.X, Liu.X, & Wang.Y, “Review of ferrite-based microwave absorbing, materials: Evolution, mechanisms, and applications”. *Journal of Applied Physics*, 134(5), 055101, (2023).
- [5] Sellier.A, « Absorbants à métamatériaux : étude théorique et expérimentale », Thèse de doctorat, Université Paris-Sud, France, (2014).
- [6] Zhai. Y, Wang.Y, & Liu. J, “Biological effects of electromagnetic radiation and protective materials : A review”. *Radiation Physics and Chemistry*, 171, 108720, (2020).
- [7] Kong.J. A, “Electromagnetic Wave Theory”. Cambridge, (2008).
- [8] Ulaby, F. T, “Fundamentals of Applied Electromagnetics” (6th ed.). Prentice Hall, (2010).
- [9] Abdulkarim, Y. I, Mohanty, A., Acharya, O. P., Dong, J. ,”A Review on Metamaterial Absorbers: Microwave to Optical”. *Frontiers in Physics*, 10, Article 893791, (2022).
- [10] Karamanos, K, and T. Christodoulides,” A Perfect Metamaterial Absorber with Dual Bands, *Progress In Electromagnetics Research*”, Vol. 108, pp. 41–54, (2010).
- [11] Qin, M, Zhang.L, & Wu.H, “Dielectric Loss Mechanism in Electromagnetic Wave Absorbing Materials”. *Advanced Science*, 9(10), 2105553, (2022).
- [12] M. Lee et AL, “A review on electromagnetic microwave absorption properties,” *Composite Reviews*, vol. 5, no. 2, 2022.
- [13] Z. Wang et al, “Progress and Challenges of Ferrite Matrix Microwave Absorption,” *Materials*, vol. 17, no. 10, 2022.
- [14] Y. Kim et al, “Investigation of Ni-Zn ferrite properties for electromagnetic applications,” *Scientific Reports*, vol. 9, no. 1, p. 12983, 2019.
- [15] F. Costa, A. Monorchio, and G. Manara, “A Circuit-based Model for the Interpretation of Perfect Metamaterial Absorbers,” *arXiv*, Nov. 2012.
- [16] T. Kodera, R. Morishita, and K. Takami, “Frequency Selective Surfaces : A Review”, *Appl. Sci.*, vol. 8, no. 9, p. 1689, 2018.
- [17] G. G. Genovesi et al, “Analysis and Design of Ultra Thin Electromagnetic Absorbers Comprising Resistively Loaded High Impedance Surfaces”, *arXiv*, May 2010.
- [18] N. Engheta and R. W. Ziolkowski,” *Metamaterials : Physics and Engineering Explorations*”. Wiley-IEEE Press, 2006.

- [19] S. Alvaré Peláez, “Cloak of Invisibility: Advanced Materials and Structures for Electromagnetic Absorption in Stealth Design”, Oct. 30, 2024.
- [20] Skolnik, M. I, “Radar Handbook”. McGraw-Hill, (2008).
- [21] https://en.wikipedia.org/wiki/Lockheed_F-117_Nighthawk.
- [22] [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Chambre anéchoïque du Laboratoire national de métrologie](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Chambre_anéchoïque_du_Laboratoire_national_de_métrologie)
- [23] Landy, N. I, Sajuyigbe, S, Mock, J. J., Smith, D. R., & Padilla, W. J. "Perfect metamaterial absorber." *Physical Review Letters*, 100(20), 207402, (2008).
- [24] P. Raju, T. Ramesh, and S. R. M. Murthy, “Ferrite + Polymer Nanocomposites for EMI Applications,” *Int. J. ChemTech Res.*, vol. 7, no. 3, pp. 1343–1350, 2015.
- [25] D. Marinković et al, “New Electromagnetic Interference Shielding Materials: Biochars, Scaffolds, Rare Earth, and Ferrite-Based Materials,” *Nanomaterials*, vol. 15, no. 7, Art. no. 541, 2025.
- [26] Zakeri et al, “Low-Cost Multiband Four-Port Phased Array Antenna for Sub-6 GHz 5G Applications with Enhanced Gain Methodology in Radio-over-Fiber Systems,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 12, pp, 2024.
- [27] G. Giannakopoulos and K. Mehboob, “Phased Array Antennas for 5G and Beyond: Innovations and Implementation,” *J. Cogn. Comput. Cybernet. Innov.* vol. 1, no. 1, pp. 42– 50, Mar. 2025.
- [28] W. Y. Yong and A. Alayón Glazunov, “Impact of Dielectric Substrate on the Performance of an 8×8 Magneto-Electric Dipole Phased Array Antenna for 5G mmWave Applications,” *Front. Commun. Netw.*, vol. 4, p. 1135941, Jun. 2023.
- [29] <https://knowhow.distrelec.com/fr/internet-des-objets-iot/optimisation-des-performances->
- [30] T. Sanislav, G. D. Mois, S. Zeadally, and S. Folea, “Energy Harvesting Techniques for Internet of Things (IoT),” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 12345–12360, 2021.
- [31] R. K. Raghava Rao et al, “Energy Efficiency Analysis of LoRa and ZigBee Protocols in Wireless Sensor Networks,” *Int. J. Wireless Commun. Netw*, vol. 11, no. 4, pp. 2836–2845, 2021.
- [32] L. Zhou et al, “Kinetic Energy Harvesting Based Sensing and IoT Systems: A Review,” *Frontiers in Electronics*, vol. 3, p. 101751, 2022.
- [33] <https://enless-wireless.fr/les-capteurs-iot-la-solution-intelligente-pour-economiser-de-lenergie>
- [34] P. Mabo et al, “Remote Monitoring of Cardiac Implantable Electronic Devices: Evolution to a Standard of Care,” *Europace*, vol. 25, no. 6, pp. 1012–1025, 2023.

-
- [35] M. Ramesh, R. Janani, C. Deepa, and L. Rajeshkumar, “Nanotechnology-Enabled Biosensors : Fundamentals, Design and Applications,” *Biosensors*, vol.13, no.1, p. 40, 2023.
- [36] F. Tettey, S. K. Parupelli, and S. Desai, “A Review of Biomedical Devices: Classification, Regulatory Guidelines....,” *Biomed. Mater. Devices*, Springer, 2023.
- [37] <https://www.im2p.fr/examen/les-echographies>
- [38] https://www.radiologie-beziers.com/examens_et_actes/radiologie-conventionnelle/irm/
- [39] Veselago, V. G, “The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ ”. *Soviet Physics Uspekhi*, 10(4), 509–514, (1968).
- [40] Ryan Arseneault, ”Les métamatériaux “, Département de physique et d’astronomie, article, Université de Moncton, Canada, 2009.
- [41] Sir John B. Pendry, “Negative Refraction Makes a Perfect Lens”, *Physical Review Letters*, **85**, 3966–3969 – Proposition de la *superlentille* offrant une résolution théorique infinie, Article scientifique, “Imperial College London, Center for Metamaterials and Integrated Plasmonics”, (2000).
- [42] Ms.Tel.Seriari+Zekhnini « Etude et conception des absorbants métamatériaux ultra minces et larges bandes », Mémoire de Master, 2021/2021.
- [43] **Andrea Alù**, Comment les métamatériaux domptent les ondes. *Pourlascience.fr*, 2ème trimestre 2023, pp. 54–63. Disponible en ligne : “Comment les métamatériaux domptent les ondes”, article pour la Science, 544 (01/02/2023).
- [44] Mayer, N, “Une lentille plate pour projeter des images en 3D”, *Futura-Sciences*, (8 juin 2016). Consulté le 14 juin 2025,
- [45] L. Huang and H. Chen, “Multiple band and polarization insensitive metamaterial absorber”, *Prog. Electromagn. Res*, 113 103-110, (2011).
- [46] B. Zhu, Z. Wang, C. Huang, Y. Feng, J. Zhao, and T. Jiang, “Polarization insensitive metamaterial absorber with wide incident angle”, *Prog. Electromagn. Res*, 101-231-239, (2010).
- [47] Bouabid Mohammed Es Salih, “Étude et Analyse des structures SRR, Application aux antennes patch large bande”, Mémoire de Master. Juin 2018.
- [48] L. Shang, J. Pendry, “Planar Sensor Base on Split-Ring Résonateurs for Non-Destructive Micro ave Sanhsing”. *Seniors*, (2023).
- [49] Watts, C. M., Liu, X. & Padilla, W. J, “Met material Electromagnetic Wave Absorbers”, *Advanced Materials*, 24, OP98–OP120.2012.
- [50] F. Ding, Y. Cui, X. Gee, Y. Jin & S, “Ultra-broadband Microwave Met material Absorber”, arrive: 1201.0062, (2011).
- [51] Francesca Venire, Sandra Costanzo and Antonio Borgia, “A Dual-Band Compact Met material Absorber with Fractal Geometry”, *Electronics MDPI*, 8, 879; 2019.

-
- [52] Mao, C, et al, “Millimeter-wave met material absorber for 5G applications”, *Materials Today: Proceedings*, Vol. 45, (2021).
- [53] Liu, X, Starr, T, Starr, A. F & Padilla, W. J, “Infrared spatial and frequency selective met material with near-unity absorbance”. *Physical Review Letters*, 104(20), 207403, (2010).
- [54] Cong, L., Xu, N., Zhang, W., Zhang, X., Singh, R., & Han, J, “Active multifunctional terahertz metamaterials: Adaptive control of resonance, absorption, and transmission”, *Advanced Optical Materials*, 5(2), 1600716. (2017).
- [55] Chen, H.-T., Padilla, W. J., Zide, J. M. O., Gossard, A. C., Taylor, A. J., & Averitt, R. D, “Active terahertz metamaterial devices”. *Nature*, 444(7119), 597–600.3, (2006).
- [56] Wu, Xiaofei Jiao, Yuandong Wang, Zeping Zhao, Yibo Wang, and Jianguo Liu, “Ultra-wideband tunable metamaterial perfect absorber based on vanadium dioxide”, *Guozhang*, 2021.
- [57] Kats, M. A, Blanchard, R, Zhang, S, & Capasso, F, “Vanadium dioxide as a natural disordered metamaterial : perfect thermal emission and large broadband negative differential thermal emittance”, *Physical Review X*, 3(4), 041004. (2013).
- [58] Li, Y., Yan, H., Li, J., & Xia, S, “Tunable and switchable infrared metamaterial absorber using phase-change VO₂ material”, *Optics Express*, 24(14), 15429-15438. (2016).
- [59] Yan, H., Li, X., Li, T., & Zhai, T, “Graphene-based tunable metamaterial absorber for infrared sensing”, *Nanophotonics*, 9(1), 77–89, (2020).
- [60] Tao, H., Landy, N. I., Bingham, C. M., Zhang, X., Averitt, R. D., & Padilla, W. J. A, “metamaterial absorber for the terahertz regime: design, fabrication and characterization *Optics*”, *Express*, 16(10), 7181–7188, (2008).
- [61] Éric Lheurette, *Métamatériaux à indice négatif de réfraction : des micro-ondes aux fréquences térahertz*, Synthèse scientifique, IEMN – Université de Lille, 2009
- [62] Khalid Saeed Lateef Al-badri, “Dual Band thin Metamaterial Perfect Absorber Based on Triangle Shape”, *Journal of Physics, Conference Series*, 1818 (2021).
- [63] Zhang, B., Zhao, Q., Zhou, J., & Lippens, D, “Broadband and thin metamaterial absorbers using resonant structures”, *Physical Review B*, 88(24), 245104. (2013).
- [64] Md Ariful Islam, Md. Rezwan Ahmed, Oishi Jyoti, Pritu P. Sarkar, And Md. Samiul Habib, ”Analysis of an ultra-broadband terahertz metamaterial absorber”, *Optics Continuum*, Vol. 4, No. 4, p : 756-769, Apr 2025.
- [65] Muhammad Ismail Khan, Qaisar Fraz, and Farooq A. Tahir, “Ultra-wideband cross polarization conversion metasurface insensitive to incidence angle”, *J. Appl. Phys.* 121, 045103, 2017.

- [66] Lim.D, Lee.D, & Lim. S, “Angle- and polarization-insensitive metamaterial absorber using via array”, *Scientific Reports*, 6, 39686, (2016).
- [67] Amiri, M, Alaei, R, & Rockstuhl, C, “Wide-angle metamaterial absorber with highly insensitive absorption for TE and TM modes” *Scientific Reports*, 10, 13638, (2020).
- [68] Huang.L, & Chen.H, “Polarization insensitive metamaterial absorber with wide incident angle”, *Progress in Electromagnetics Research*, 101, 231–239, (2010).
- [69] Shabanpour.J, Tzarouchis.D,& Tretyakov.S, “Reconfigurable honeycomb metamaterial absorber having incident angular stability”, *arXiv preprint*, arXiv:2001.00703, (2020).
- [70] Siegel, P. H, “Terahertz waves for communications and sensing”, *Johns Hopkins APL Technical Digest*, 25(4), 348–355, (2004).
- [71] Wu, G., Jiao, X., Wang, Y., Zhao, Z., Wang, Y., & Liu, J, “Ultra-wideband tunable metamaterial perfect absorber based on vanadium dioxide”, *Optics Express*, 29(2), 2703–2711, (2021).
- [72] Wang, S., Cai, C., You, M., Liu, F., Wu, M., Li, S., Bao, H., Kang, L., & Werner, D. H, “Vanadium dioxide based broadband THz metamaterial absorbers with high tunability: Simulation study”. *Optics Letters*, 27(14), 19436–19447. DOI :10.1364 / OE.27.019436, (2019).