

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان -

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

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

En : Télécommunications

Spécialité : Télécommunications Optiques

Par : DRARIS GHOZLANE et GHOUALI GHIZLENE

Sujet

Conception de filtres micro-ondes à base de résonateurs métamatériaux

Soutenu publiquement, le 23 / 06 / 2025, devant le jury composé de :

Mme BADAOUI.H	Professeur	Université de Tlemcen	Présidente
Mme BENMOSTEFA.N	Professeur	Université de Tlemcen	Examinatrice
Mme OTMANI.A	MCB	Université de Tlemcen	Encadrante

Année universitaire: 2024/2025

Résumé

Les avancées technologiques dans le domaine des télécommunications s'orientent, depuis plusieurs années, vers la miniaturisation des dispositifs, la réduction des coûts de fabrication, la diminution des pertes et l'amélioration de l'efficacité des composants haute fréquence.

Parmi les lignes de transmission planaires, la ligne microruban s'impose comme une solution largement utilisée grâce à sa facilité d'intégration, son faible encombrement et sa compatibilité avec les circuits imprimés. Cependant, ses performances peuvent être limitées dans certaines applications exigeantes.

Pour surmonter ces limitations, les métamatériaux offrent des perspectives prometteuses. Ces structures artificielles, caractérisées par des propriétés électromagnétiques inhabituelles, permettent de concevoir des dispositifs innovants capables d'atteindre des performances supérieures. En particulier, l'intégration de résonateurs métamatériaux dans les filtres micro-ondes permet d'améliorer des paramètres essentiels tels que la sélectivité, la bande passante, la réjection et le facteur de qualité.

Dans ce contexte, notre travail vise à concevoir et à simuler des filtres micro-ondes basés sur la technologie microruban, en y intégrant des résonateurs métamatériaux. L'objectif est d'optimiser leurs performances électromagnétiques à l'aide du logiciel HFSS (High Frequency Structure Simulator) et d'analyser l'impact des métamatériaux sur le comportement global des dispositifs étudiés.

Mots-clés : Métamatériaux, Micro-ondes, Résonateur, Simulation électromagnétique, HFSS.

Abstarct

Technological advances in the field of telecommunications have, for several years, focused on device miniaturization, reduced manufacturing costs, lower losses, and improved efficiency of high-frequency components.

Among planar transmission lines, microstrip lines are widely used due to their ease of integration, compact size, and compatibility with printed circuit boards. However, their performance may be limited in certain demanding applications.

To overcome these limitations, metamaterials offer promising prospects. These artificial structures, characterized by unusual electromagnetic properties, enable the design of innovative devices capable of achieving enhanced performance. In particular, integrating metamaterial resonators into microwave filters improves key parameters such as selectivity, bandwidth, rejection, and quality factor.

In this context, our work aims to design and simulate microwave filters based on microstrip technology, integrating metamaterial resonators. The objective is to optimize their electromagnetic performance using HFSS (High Frequency Structure Simulator) software and to analyze the impact of metamaterials on the overall behavior of the studied devices.

Keywords: Metamaterials, Microwave, Resonator, Electromagnetic Simulation, HFSS.

تتجه التطورات التكنولوجية في مجال الاتصالات منذ عدة سنوات نحو تصغير حجم الأجهزة، وخفض تكاليف التصنيع، وتقليل الخسائر، وتحسين كفاءة المكونات عالية التردد من بين خطوط النقل المستوية، يعتبر خط الميكروشريط حلاً شائع الاستخدام بفضل سهولة دمجهِ وصغر حجمهِ وتوافقه مع الدوائر المطبوعة. ومع ذلك، قد تكون أدائه محدوداً في بعض التطبيقات الصعبة للتغلب على هذه القيود، توفر المواد الفائقة إمكانات واعدة. تسمح هذه الهياكل الاصطناعية، التي تتميز بخصائص كهرومغناطيسية غير عادية، بتصميم أجهزة مبتكرة قادرة على تحقيق أداء أعلى. على وجه الخصوص، يتيح دمج مرئانات المواد الفائقة في مرشحات الميكروويف تحسين المعلومات الأساسية مثل الانتقائية وعرض النطاق الترددي والرفض وعامل الجودة في هذا السياق، يهدف عملنا إلى تصميم ومحاكاة مرشحات الميكروويف القائمة على تقنية الشريط الدقيق، من خلال دمج مرئانات الميتاماتيريال فيها. والهدف هو تحسين أدائها الكهرومغناطيسي باستخدام برنامج HFSS (High Frequency Structure Simulator) وتحليل تأثير الميتاماتيريال على السلوك العام للأجهزة المدروسة. الكلمات المفتاحية: المواد الفائقة، الميكروويف، المرئان، المحاكاة الكهرومغناطيسية، HFSS.

Remercîment

*Nous tenons tout d'abord à remercier Allah,
Le Tout-Puissant et Miséricordieux, qui nous a donné
la force, la patience et la persévérance nécessaires
pour mener à bien ce modeste travail.*

*Nous exprimons notre profonde gratitude
à Mme **Otmani Amina**, pour son encadrement précieux tout au
long de ce projet.*

*Son expertise, ses conseils éclairés
et son accompagnement constant ont grandement contribué à
la réussite de ce travail.*

*Nos sincères remerciements vont également
à Mme **Badaoui Hadjira**, Professeur
à l'Université Abou Bekr Belkaid – Tlemcen,
pour l'honneur qu'elle nous fait en présidant le jury, ainsi qu'à
Mme **Benmostefa Naima**, Professeur à la même université,
pour avoir accepté
d'évaluer notre mémoire.*

*Votre présence au sein du jury
nous touche profondément.*

Dédicace

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

Je dédie ce travail,

*A mon père Draris Kheir eddine qui m'a appris l'importance du
travail acharné, de la persévérance et de l'honnêteté, je suis reconnaissante
pour tes conseils avisés et ton soutien sans faille. Tu m'as inspiré à viser
plus haut*

*et à poursuivre mes rêves. Je te suis infiniment reconnaissante
pour ton soutien indéfectible, ta confiance en moi et ton amour.*

*À ma mère Benmanssour Anissa qui a toujours été mon port
d'attachement*

*et ma boussole, merci pour ton amour inconditionnel, ton dévouement
et ton soutien inébranlable. Tu as été la lumière qui a éclairé mon chemin
dans les moments sombres et tu as toujours cru en moi, même lorsque je
doutais.*

*A mes sœurs adorées Zineb, Meriem, Fatima Zohra et la petite
Kawther*

*qui sont aussi mes meilleures amies, merci pour votre soutien constant,
votre humour contagieux et votre présence réconfortante.*

*Vous êtes ma source de joie et de bonheur, et je suis fière de vous avoir
dans ma vie.*

*A mon oncle Benmanssour Fethi, dont le soutien constant
et les précieux conseils ont été une source d'inspiration tout au long de ce
parcours.*

*A mon binôme Ghizléne qui est devenue une amie chère et une
collaboratrice talentueuse, merci pour notre collaboration fructueuse notre
amitié.*

*Tu as été une source d'inspiration et de motivation moi
tout au long de ce parcours.*

*À mes très chères amies Khadidja, Imene, Djamila, Sarah, Hayet,
Wafaa, Achwak, Bessma, Amina et Radjaa qui ont été mes piliers dans
les moments difficiles et mes partenaires de fête dans les moments de joie,
merci pour votre amitié sincère, votre soutien sans faille et votre amour
inconditionnel.*

A tous la famille Draris, Benamanssour et Hamad.

Enfin a tous mes enseignants sans exception.

Draris Ghozlane

Dédicace

*Tout d'abord et avant toute chose,
je remercie Allah pour sa grâce, sa guidance et sa force
qui m'ont permis de mener à bien ce travail
Je dédie mon travail*

*En mémoire de mon grand-père, Hadj Aïssa que la vie ne nous a pas
donné*

plus de temps pour partager ce moment ensemble, que Dieu ait pitié de lui.

*A ma grand-mère maternelle, qui m'a accompagné par ses prières
et son affection pour moi, que Dieu prolonge sa vie.*

A ma petite famille

*Ma chère mère, la chose la plus précieuse que j'ai en ce monde
qui m'a accompagné et a été mon soutien depuis que je suis venu
au monde que Dieu la protège, ainsi que mon père.*

*A mon cher frère pour ces conseils précieux tout au long de mes
études.*

*A ma meilleur amie khouloud pour l'aide et supports
dans les moments difficiles.*

*Et ma binôme Draris ghozlane pour son soutien moral,
sa patience et sa compréhension et son amitié
durant toutes ces années d'étude et tout au long de ce projet.*

*Un grand merci à mon encadreur Otmani Amina
Et à tous mes amies de ma promotion.*

Ghouali Ghizlene

Table des Matières

Résumé	i
Remercîment	iv
Dédicace	v
Table des Matières	viii
Liste des Figures	xi
Liste des Tableaux.....	xiv
Liste des acronymes	xv
Introduction Générale	2

Chapitre I: Les lignes de transmission

I.1. Introduction.....	5
I.2. Historique	5
I.3. Les lignes de transmission	6
I.3.1. Ligne bifilaire	7
I.3.2. Câble coaxial.....	8
I.3.3. Guide d'onde	9
I.3.4. Circuit planaire.....	10
I.3.4.1. Micro ruban (Microstrip)	11
I.3.4.2. Lignes coplanaires (Coplanar waveguide).....	12
I.3.4.3. Lignes triplaque.....	12
I.3.4.4. Ligne à fente (Slot line)	13
I.4. Micro ruban (Microstrip).....	13
I.4.1. L'analyse	14
I.4.2. La synthèse	16
I.5. Conclusion	17

Chapitre II: Les métamatériaux

II.1. Introduction	19
II.2. Propriété des matériaux.....	19
II.2.1. Les matériaux doublement positifs (Double Positive Materials DPS)	20
II.2.2. Les matériaux à permittivité négative (Epsilon Négative Materials ENG).....	20

II.2.3. Les matériaux à perméabilité négative (Mu Négative Materials MNG).....	20
II.2.4. Les matériaux doublement négatifs (Double Négative Materials DNG)	20
II.3. Les métamatériaux.....	21
II.4. Généralité et chronologie des métamatériaux	24
II.4.1. Le résonateur en anneau fendu RAF (Ou appelée en anglais Split Ring Resonator SRR).....	28
II.4.2. Le complémentaire du résonateur en anneau fendu CRAF (Ou appelée en anglais Complementary Split Ring Resonator CSRR).....	29
II.5. Applications des métamatériaux.....	30
II.5.1. La superlentille	30
II.5.2. Antenne métamatériau	31
II.5.3. Absorbants métamatériau	31
II.5.4. Les filtres métamatériaux	33
II.6. Conclusion.....	34

Chapitre III: Généralité sur les filtres

III.1. Introduction.....	36
III.2. Notion de filtre	36
III.3. Etapes de développement des filtres.....	38
III.4. Types des filtres.....	38
III.4.1. Filtre passe bas	38
III.4.2. Filtre passe haut.....	39
III.4.3. Filtre passe bande.....	39
III.4.4. Filtre coupe bande.....	40
III.5. Prototypage passe bas.....	41
III.5.1. Filtre de Butterworth.....	42
III.5.2. Filtre Elliptique.....	42
III.5.3. Tchebychev	43
III.6. La transposition de fréquences.....	45
III.6.1. Transposition passe bas vers passe bas	46
III.6.2. Transposition passe bas vers passe haut.....	46
III.6.3. Transposition passe bas-passe bande	46
III.6.4. Transposition passe bas- coupe bande	47
III.7. Méthode du choix du model	47

III.8. Conclusion	49
-------------------------	----

Chapitre IV: Étude des filtres micro-ondes à résonateurs métamatériaux

IV.1. Introduction.....	51
IV.2. Présentation des logiciels.....	51
IV.2.1. Le logiciel HFSS	51
IV.2.1.1. Définition	51
IV.2.1.3. Un projet en HFSS.....	52
IV.2.1.4. Etape de réalisation.....	53
IV.2.2 Le logiciel ORIGIN.....	57
IV.3. Modélisation et optimisation.....	57
IV.3.1. La ligne microruban	57
IV.3.2. Filtre avec un résonateur rectangulaire	59
IV.3.3. Filtre coupe bande avec deux résonateurs rectangulaires	62
IV.3.4. Filtre passe bande avec deux résonateurs rectangulaires	64
IV.3.5. Filtre passe bande avec deux résonateurs rectangulaires inversé.....	66
IV.3.6. Filtre passe bande avec trois résonateurs rectangulaires.....	69
IV.4. Conclusion	71
Conclusion Générale.....	74
Références Bibliographiques	79

Liste des Figures

Chapitre I

Figure I.1. Schéma simple illustrant la propagation d'une onde	6
Figure I.2. Ligne bifilaire	7
Figure I.3. Paire torsadée	8
Figure I.4. Câble coaxial.....	8
Figure I.5. Guide d'onde rectangulaire.....	9
Figure I.6. Technologie de filtre à éléments distribués Microstrip	10
Figure I.7. Amplificateur de puissance radiofréquence comportant des structures de circuits planaires.....	11
Figure I.8. Ligne à micro ruban	12
Figure I.9. Lignes coplanaires	12
Figure I.10. Lignes triplaque.....	12
Figure I.11. Ligne à fente.....	13
Figure I.12. Ligne microruban	13
Figure I.13. Distribution des champs électromagnétiques dans une ligne micro ruban	14
Figure I.14. Microstrip Line Calculator	17

Chapitre II

Figure II.1. Classifications des matériaux en fonction de la permittivité et de la perméabilité à l'onde électromagnétique interagissant avec quatre matériaux possibles.....	20
Figure II.2. Réfraction de la lumière	22
Figure II.3. Principe de la réfraction (a) Réfraction avec un métamatériau (b) Réfraction avec un matériau conventionnel	23
Figure II.4. Un milieu à indice de réfraction normale (b) un métamatériau liquide d'un indice de réfraction négative	24
Figure II.5. Les étapes de la création des métamatériaux	24
Figure II.6. Les fils métalliques qui donnent le constant diélectrique négatif.....	25
Figure II.7. Structure SRR	25
Figure II.8. Les géométries planaires des cellules unitaires d'un résonateur d'anneaux fendus. (a) structure circulaire. (b) structure carrée.....	26
Figure II.9. Représentation du trièdre de vecteur	26

Figure II.10. Différentes géométries de SRR CSRR.....	28
Figure II.11. Le motif résonnant en forme de Ω introduit en 2003	28
Figure II.12. Le motif résonnant en forme de S introduit en 2004	29
Figure II.13. Les CSRRs réalisée en 2004	29
Figure II.14. Exemple de superlentille.....	30
Figure II.15. Des exemples des antennes métamatériaux	31
Figure II.16. Illustration des travaux de N. I. Landy avec en perspective	32
Figure II.17. Des exemples des absorbants métamatériaux	32
Figure II.18. Des exemples des filtres métamatériaux.....	33

Chapitre III

Figure III.1. Une chaîne d'émission et de réception	36
Figure III.2. Schéma général d'un filtre	37
Figure III.3. Gabarit d'un filtre passe bas réel.....	37
Figure III.4. Gabarit d'un filtre idéal passe bas.....	39
Figure III.5. Gabarit d'un filtre idéal passe haut	39
Figure III.6. Gabarit d'un filtre idéal passe bande	40
Figure III.7. Gabarit d'un filtre coupe bande	40
Figure III.8. Prototype d'un filtre passe bas.....	41
Figure III.9. Réponse en transmission de la fonction Butterworth pour différents ordres n	42
Figure III.10. Réponse de type Elliptique d'un filtre.....	43
Figure III.11. Les pertes d'insertion du filtre prototype de Tchebychev pour différents n (a) de type II (b) de type I.....	44
Figure III.12. Transposition passe bas – passe bas	46
Figure III.13. Transposition passe bas – passe haut	46
Figure III.14. Transposition passe bas vers passe bande	46
Figure III.15. Transposition passe bas –coupe bande	47
Figure III.16. Organigramme de sélection de type de filtre	48

Chapitre VI

Figure IV.1. La fenêtre principale du logiciel HFSS	53
Figure IV.2. Les dimensions de box de plan de masse.....	54
Figure IV.3. Réglage des paramètres de la structure	54
Figure IV.4. Le plan de masse	55

Figure IV.5. La nouvelle structure : plan de masse + substrat	55
Figure IV.6. La structure + radiation.....	56
Figure IV.7. La structure + radiation+ les ports.....	56
Figure IV.8. Logo ORIGIN	57
Figure IV.9. Ligne microruban a la bande [1,75-2,5] GHZ.....	58
Figure IV.10. La réponse fréquentielle de la ligne microruban dans la bande [1,75-2,5] GHZ	59
Figure IV.11. Ligne micro ruban +un résonateur en rectangulaire.....	60
Figure IV.12. La réponse fréquentielle d'une ligne micro ruban +un résonateur en rectangulaires	61
Figure IV.13. Introduction des expressions de "NRW" dans HFSS.....	61
Figure IV.14. Permittivité, perméabilité et l'indice de réfraction d'un seul rectangle.....	62
Figure IV.15. Ligne micro ruban +deux résonateurs en rectangulaires.....	63
Figure IV.16. La réponse fréquentielle d'une ligne micro ruban +deux résonateurs en rectangulaires	64
Figure IV.17. Résultats de simulation des paramètres S_{11} et S_{21} du filtre passe bande	65
Figure IV.18. Permittivité, perméabilité et l'indice de réfraction de deux rectangles de type SRR	66
Figure IV.19. Ligne microruban+ deux résonateurs de rectangulaires inversé	67
Figure IV.20. La réponse fréquentielle d'une ligne microruban + deux résonateurs de rectangulaires inversé.....	68
Figure IV.21. Permittivité, perméabilité et l'indice de réfraction de deux rectangle inversé	69
Figure IV.22. Ligne microruban + trois résonateurs de rectangulaires.....	69
Figure IV.23. La réponse fréquentielle d'une ligne microruban + trois résonateurs en rectangulaires	70
Figure IV.24. Permittivité, perméabilité et l'indice de réfraction de trois rectangles de type SRR	71

Liste des Tableaux

Chapitre VI

Tableau IV.1. Les dimensions de la structure (en millimètre).....	58
Tableau IV.2. Les différentes dimensions du filtre dans la bande [1,75-2,5] GHz (en millimètres).....	60
Tableau IV.3. Les dimensions de filtre Ligne micro ruban + deux résonateurs en rectangulaires (en millimètres)	63
Tableau IV.4. Les dimensions d'une ligne microruban + 2 résonateurs rectangulaires inversé (en mm)	67
Tableau IV.5. Les dimensions de la ligne+ trois résonateurs de rectangulaires.....	70

Liste des acronymes

A

Arlon AD1000 (tm) Substrat de $\epsilon_r=10,2$ et $\tan(\delta)=0,0023$

B

BW Band Width

Sb stop-bande.

C

CSRRs Complementary Split-Ring Resonator

D

DPS Double PoSitive materials

DNG Double NeGative materials

dB Décibel

E

E Champ Electrique

ENG Epsilon NeGative materials

F

FBW Frequency Band Width

G

GHz Gigahertz

GPS Global Positioning System

H

H Champ magnétique

HFSS High Frequency Structure Simulator

K

Ka	Bande de fréquence [26.5–40 GHz]
Ku	Bande de fréquence [12–18 GHz]

L

LHM	Left Hand Materials
-----	---------------------

M

MHz	mégahertz
MNG	Mu NeGative materials

N

NRW	Nicolson Ross Weir
-----	--------------------

Q

Quasi-TEM	quasi- Transverse ElectroMagnetic
-----------	-----------------------------------

R

RAF	Résonateur à Anneau Fondu
RLC	Resistance, Inductance, Capacité
RBP	Relative Bandwidth Percentage
RF	Radiofréquence

S

SRR	Split-Ring Resonator
-----	----------------------

V

V	Bande de fréquence [50–75 GHz]
---	--------------------------------

Z

Zc	impédance caractéristique
----	---------------------------

Introduction Générale

Introduction Générale

Au cours des dernières décennies, les technologies de télécommunications ont connu un essor remarquable, porté par les avancées dans les dispositifs hyperfréquences tels que les antennes miniatures, les filtres et autres composants essentiels. Cette évolution s'est traduite par une extension considérable du périmètre fonctionnel couvert, ainsi qu'une amélioration continue des performances techniques des systèmes [1].

Parmi ces dispositifs, les composants micro-ondes occupent une place centrale dans de nombreux domaines, notamment les télécommunications, les systèmes radar, la détection, la navigation et le traitement du signal. Toutefois, les applications modernes imposent des exigences toujours plus strictes : miniaturisation, large bande passante, haute sélectivité, faible perte d'insertion et compatibilité avec les nouvelles générations de systèmes sans fil à haut débit [2]. Répondre à ces contraintes implique de dépasser les limites des matériaux conventionnels et des architectures standards.

Dans ce contexte, les métamatériaux ont émergé comme une alternative prometteuse. Développée initialement par le physicien russe Victor Veselago dans les années 1960, la théorie des métamatériaux a suscité un regain d'intérêt ces dernières années en raison de leurs propriétés électromagnétiques exceptionnelles, telles qu'une permittivité et/ou une perméabilité négative, pouvant conduire à un indice de réfraction négatif [3]. Ces matériaux artificiels, structurés de manière périodique à une échelle inférieure à la longueur d'onde, permettent la conception de dispositifs innovants, plus compacts, et offrant de meilleures performances que leurs équivalents traditionnels.

L'intégration de résonateurs métamatériaux dans les dispositifs micro-ondes, en particulier dans les filtres, constitue une avancée majeure. Elle ouvre la voie à la réalisation de filtres hautement sélectifs, compacts, multibandes ou à bandes rejetées, adaptés aux besoins croissants des télécommunications modernes [4]. En effet, les filtres micro-ondes sont indispensables pour assurer la pureté spectrale, réduire les interférences et garantir la stabilité des signaux dans des environnements de plus en plus exigeants [5].

Dans un contexte marqué par la miniaturisation et la recherche de hautes performances dans les systèmes de télécommunications, les dispositifs micro-ondes classiques atteignent leurs limites en termes de compacité, de sélectivité et de pertes. L'émergence des métamatériaux, grâce à leurs propriétés électromagnétiques inhabituelles, offre une nouvelle voie pour la conception de structures résonantes plus performantes. Ce mémoire s'interroge donc sur la manière d'exploiter ces matériaux pour concevoir et optimiser des filtres micro-ondes compacts, efficaces et adaptés aux exigences actuelles des télécommunications.

Ce travail a pour objectif d'étudier les propriétés électromagnétiques des métamatériaux et d'exploiter leur potentiel pour la conception de structures résonantes innovantes destinées aux dispositifs micro-ondes. Dans cette optique, nous cherchons à optimiser les performances des composants étudiés en termes de compacité, de sélectivité et d'efficacité. Pour valider les concepts proposés, des simulations électromagnétiques sont réalisées à l'aide du logiciel HFSS (High Frequency Structure Simulator), permettant une modélisation précise du comportement des structures conçues. Les résultats obtenus font l'objet d'analyses approfondies afin d'évaluer les performances et de proposer des améliorations susceptibles d'orienter des recherches futures dans ce domaine.

Ce mémoire est structuré en quatre chapitres principaux :

Chapitre 1 : Ce chapitre établit les bases théoriques des lignes de transmission, avec un focus particulier sur les lignes microrubans, en présentant leurs avantages et les deux approches principales d'analyse.

Chapitre 2 : Il est consacré à la présentation des propriétés des matériaux, suivie d'un aperçu général des métamatériaux et de quelques-unes de leurs applications.

Chapitre 3 : Il traite des bases théoriques des filtres micro-ondes. Il expose les différentes catégories de filtres, leurs propriétés, ainsi que leurs fonctions de transfert les plus courantes, telles que les modèles de Butterworth, Chebyshev et les filtres elliptiques. Nous y expliquons également les étapes de transformation d'un filtre prototype passe-bas en d'autres types : passe-haut, passe-bande et coupe- bande.

Chapitre 4 : Ce dernier chapitre est dédié à l'étude de l'association entre les lignes microrubans intégrées au substrat et les résonateurs métamatériaux. Plusieurs exemples de filtres conçus pour différentes bandes de fréquences y sont présentés, illustrant la diversité des configurations possibles. Chaque conception est analysée en détail. Les filtres sont modélisés et simulés à l'aide du logiciel HFSS, un outil de référence en simulation électromagnétique. Les résultats obtenus sont interprétés afin d'évaluer les performances des structures proposées et d'en tirer des conclusions pertinentes quant à leur efficacité et leur potentiel d'optimisation.

Ce mémoire se conclut par une récapitulation des contributions principales, ainsi que par la proposition de perspectives de recherche pouvant enrichir les travaux menés.

Chapitre I: Les lignes de transmission

I.1. Introduction

Les lignes de transmission sont des structures conçues pour transporter de manière efficace un signal électromagnétique d'un émetteur vers un récepteur. Elles se distinguent fondamentalement des circuits électriques conventionnels par leur nature distribuée, contrairement à une modélisation localisée. Dans les dispositifs considérés, les dimensions physiques sont souvent proches, voire proportionnelles, à la longueur d'onde du signal transmis, ce qui engendre des phénomènes de propagation électromagnétique. Ainsi, les lois classiques de Kirchhoff ne s'appliquent plus directement, et une analyse en régime distribué devient nécessaire.

On retrouve les lignes de transmission dans une grande variété de domaines : les systèmes de télécommunications, la distribution de l'énergie électrique, les circuits hyperfréquences ainsi que les interconnexions à haute vitesse. L'adaptation d'impédance y joue un rôle clé pour assurer un transfert optimal de l'énergie et réduire au minimum les distorsions du signal. Bien qu'ancrée dans les fondements classiques de l'électromagnétisme, la théorie des lignes de transmission reste essentielle dans les technologies modernes. En effet, la miniaturisation croissante des composants électroniques et l'élévation des fréquences opérationnelles accentuent leur impact, y compris dans des circuits de dimensions modestes.

On distingue plusieurs types de lignes de transmission (câbles coaxiaux, lignes bifilaires, guides d'ondes, lignes microruban, striplines, fibres optiques) chacun étant adapté à des domaines d'application spécifiques, selon des critères tels que la fréquence de fonctionnement, l'impédance, les pertes, la flexibilité ou encore la compacité.

I.2. Historique

Le concept de ligne de transmission remonte au XIX^e siècle avec les travaux fondamentaux de James Clerk Maxwell sur l'électromagnétisme et la propagation des ondes. Au cours des années 1850, Lord Kelvin introduit l'idée des lignes à retard, posant ainsi les bases théoriques du transport des signaux électriques sur de longues distances. Par la suite, Oliver Heaviside développa les équations modernes des lignes de transmission en linéarisant les équations de Maxwell, permettant de modéliser la propagation des signaux dans les câbles télégraphiques. Avec l'essor de la radio et des communications sans fil au début du XX^e siècle, le besoin de lignes capables de transmettre efficacement des signaux à haute fréquence a conduit à l'invention

de structures telles que les câbles coaxiaux, les guides d'ondes, puis les circuits planaires comme les lignes microruban. Aujourd'hui, les lignes de transmission sont omniprésentes, soutenant le développement des réseaux de télécommunications modernes, des radars, et des systèmes micro-ondes et millimétriques indispensables à la 5G et aux technologies futures [6].

I.3. Les lignes de transmission

Les lignes de transmission jouent un rôle fondamental dans le transport des signaux électriques et électromagnétiques entre les différents composants d'un système. Utilisées dans une large gamme d'applications, allant des télécommunications aux dispositifs électroniques, elles garantissent une transmission fiable tout en minimisant les pertes [7].

Dans une ligne de transmission, le signal se propage sous la forme d'une onde électromagnétique composée d'un champ électrique et d'un champ magnétique. Ces deux champs sont perpendiculaires entre eux et également perpendiculaires à la direction de propagation.

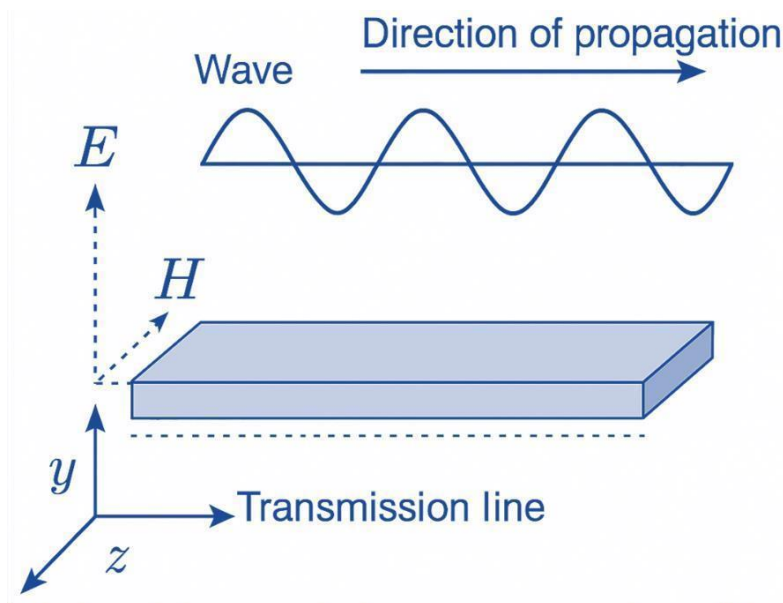


Figure I.1. Schéma simple illustrant la propagation d'une onde.

La propagation du signal est soumise à plusieurs phénomènes fondamentaux :

- Atténuation : au fur et à mesure que l'onde avance, elle subit des pertes d'énergie dues aux résistances ohmiques du conducteur, aux pertes diélectriques du substrat et, à haute fréquence, aux pertes par rayonnement.

- Dispersion : différentes composantes fréquentielles du signal peuvent se propager à des vitesses légèrement différentes, entraînant une déformation du signal.
- Réflexions : lorsque l'impédance de la ligne change brutalement (par exemple, à une jonction ou à une discontinuité), une partie du signal est réfléchi, ce qui peut provoquer des interférences et des pertes d'efficacité de transmission [8].

La qualité de la propagation dépend ainsi de plusieurs facteurs :

- La constance de l'impédance caractéristique le long de la ligne.
- La nature des matériaux utilisés (conductivité des conducteurs, permittivité et pertes du diélectrique).
- La fréquence du signal transmis.

Le choix du type de ligne dépend de plusieurs facteurs :

- La fréquence de fonctionnement.
- L'impédance caractéristique.
- Les contraintes d'intégration.
- Le coût de mise en œuvre.

Dans cette section, nous présentons les principales caractéristiques, les avantages, les inconvénients ainsi que les principaux types de lignes de transmission adaptées aux exigences des technologies modernes. Voici les principaux types :

I.3.1. Ligne bifilaire

La ligne bifilaire, qui également dénommée ligne parallèle, est constituée de deux conducteurs parallèles, elle est principalement utilisée dans les basses fréquences, notamment dans les applications radioamateurs ou dans le cadre de l'alimentation d'antennes dipôles [9].



Figure I.2. Ligne bifilaire.

Son coût et sa facilité de réalisation, dus à sa structure qui est simple, la rendent attrayante. En revanche, elle est sensible aux interférences électromagnétiques et présente de fortes pertes à haute fréquence, d'où son emploi limité au sein des systèmes modernes.

On la retrouve couramment dans les anciennes installations téléphoniques utilisant des conducteurs en ligne filaire.

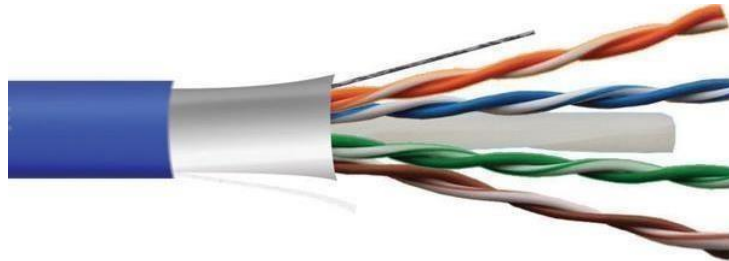


Figure I.3. Paire torsadée.

La catégorie « paire torsadée » est une version évoluée de la ligne bifilaire, spécifiquement conçue pour la rendre immunisée aux interférences électromagnétiques. Elle reste aujourd'hui la solution standard pour les transmissions à basse et moyenne fréquence, notamment pour les réseaux informatiques [10].

I.3.2. Câble coaxial

Le câble coaxial est un support guidé largement utilisé pour la transmission de signaux électriques. Il se compose d'un conducteur central en cuivre, chargé de véhiculer le signal, entouré d'un isolant diélectrique assurant son isolation. Ce diélectrique est lui-même enveloppé par un blindage métallique tressé (ou en feuille conductrice), dont le rôle est de protéger le signal contre les interférences électromagnétiques et de réduire la diaphonie. L'ensemble est recouvert d'une gaine externe en plastique, qui offre une protection mécanique et environnementale supplémentaire [11].



Figure I.4. Câble coaxial.

Le câble coaxial transmet le signal sous forme de courant électrique et non sous forme de lumière. Il est couramment employé dans les systèmes de câblage vidéo, les réseaux informatiques, les applications électroniques à basse fréquence, ainsi que dans certains domaines hyperfréquences, pouvant atteindre des fréquences de plusieurs dizaines de gigahertz. Toutefois, à des fréquences très élevées (par exemple autour de 40 GHz), les pertes par atténuation deviennent significatives, nécessitant une conception soignée et l'utilisation de matériaux à faibles pertes.

I.3.3. Guide d'onde

Guide d'ondes est le nom général donné à une structure qui permet aux ondes d'être guidées le long d'un chemin défini entre des éléments conducteurs (domaine des micro-ondes) ou diélectriques (domaine optique). Dans la direction perpendiculaire à la direction de propagation, les champs sont limités par les barrières de réflexion, mais ils se propagent librement dans le sens de propagation comme dans le vide ou dans un diélectrique [12]. Les guides d'onde constituent une option privilégiée pour les transmissions à très haute fréquence, grâce à leurs performances remarquables dans les bandes Ka, Ku et V dédiées aux communications par satellite. De plus, ils sont en mesure de transmettre des signaux à forte puissance sans pertes notables. Indispensables pour les infrastructures de télécommunication telles que les stations de base, les réseaux radar, les connexions satellites et les systèmes militaires, ils assurent un transfert quasi parfait sur de grandes distances et tolèrent des puissances largement supérieures aux autres technologies.

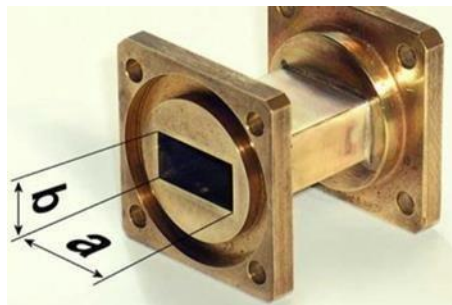


Figure I.5. Guide d'onde rectangulaire.

Le guide d'onde surpasse le câble torsadé et le câble coaxial dans les applications de haute fréquence critiques (généralement au-delà de 10 GHz) où il est essentiel de réduire au maximum les pertes : alors que le câble torsadé cesse d'être efficace à ces fréquences et que le coaxial connaît une atténuation excessive, le guide d'onde conserve des performances optimales, ce qui justifie son utilisation privilégiée dans les infrastructures avancées de télécommunications

malgré son coût élevé et sa complexité d'installation.

Cependant, leur taille importante, leur rigidité, leurs coûts d'installation élevés et leur entretien spécialisé les rendent peu adaptés aux dispositifs terminaux destinés au grand public.

I.3.4. Circuit planaire

À des fréquences élevées, au-delà de quelques centaines de mégahertz (MHz), des lignes de transmission spécifiques sont utilisées pour interconnecter les puces et composants électroniques sur les circuits. Ces structures, reposant sur la technologie des circuits imprimés, offrent une solution économique et fiable.

Les performances électriques de ces lignes dépendent fortement des dimensions des métallisations ainsi que des propriétés électromagnétiques des matériaux conducteurs et diélectriques utilisés [13].

Parmi les technologies les plus répandues, la ligne microruban s'impose comme une solution privilégiée dans les systèmes de télécommunication modernes. Elle permet l'intégration directe de circuits RF dans les dispositifs mobiles, favorisant ainsi la miniaturisation des antennes planes et des réseaux d'antennes essentiels pour les technologies 5G.

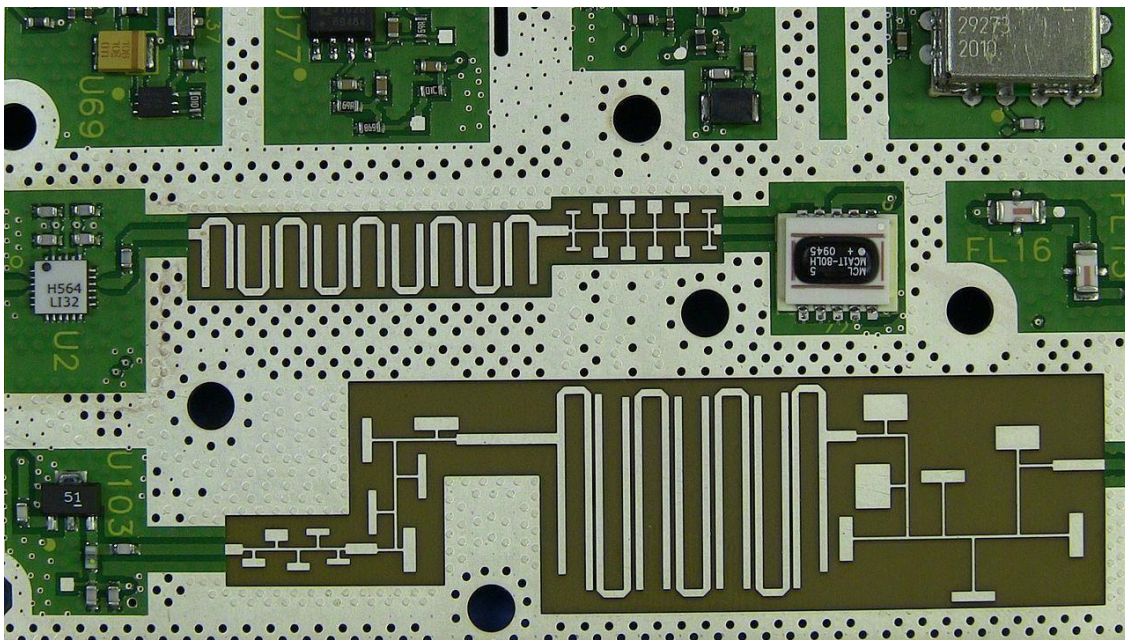


Figure I.6. Technologie de filtre à éléments distribués Microstrip.

La technologie microruban se caractérise par sa capacité à regrouper, sur un même substrat, plusieurs éléments tels que filtres, amplificateurs et duplexeurs, tout en permettant une production en grande série, adaptée aux besoins du marché grand public.

Néanmoins, la ligne microruban présente certaines limitations, notamment des pertes accrues à très haute fréquence et une efficacité réduite pour les applications à forte puissance. Malgré ces contraintes, elle est largement employée dans les smartphones, tablettes, modules WiFi / Bluetooth, récepteurs GPS, radars automobiles, antennes planes et dispositifs médicaux sans fil [14].

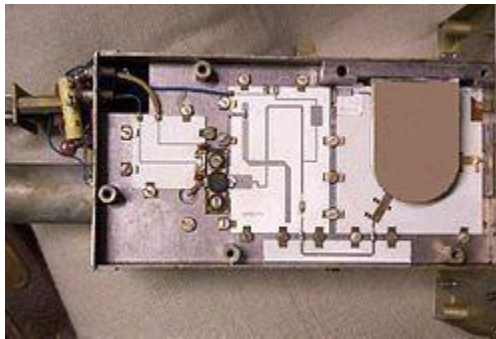


Figure I.7. Amplificateur de puissance radiofréquence comportant des structures de circuits planaires.

La capacité à intégrer de multiples fonctionnalités RF sur un seul circuit à coût réduit explique l'adoption massive de la technologie microruban dans les équipements de télécommunications contemporains.

Dans la suite de ce mémoire, l'accent sera mis sur l'étude des lignes de transmission microruban, en raison de leur simplicité de fabrication et de leur pertinence dans les applications modernes en haute fréquence.

Les structures planaires les plus couramment utilisées en hautes fréquences comprennent les configurations suivantes :

I.3.4.1. Micro ruban (Microstrip)

Un conducteur de type bande est positionné sur la surface d'un substrat diélectrique, avec un plan de masse situé sous ce dernier.

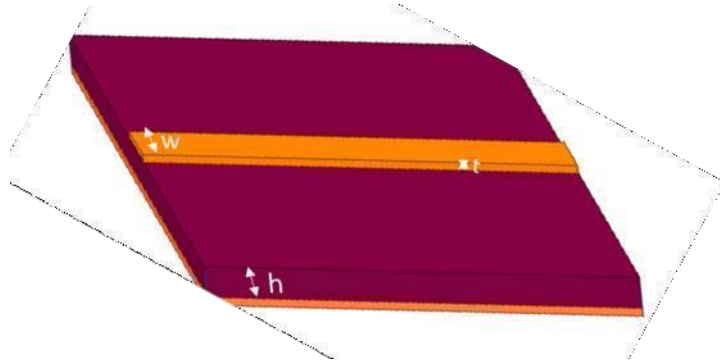


Figure I.8. Ligne à micro ruban.

I.3.4.2. Lignes coplanaires (Coplanar waveguide)

Une bande conductrice est entourée de deux plans de masse parallèles, tous situés sur la même face du substrat diélectrique.

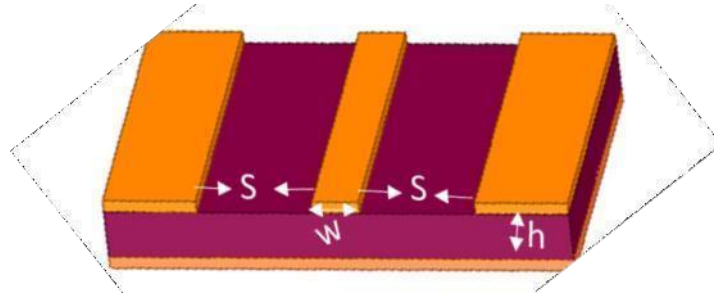


Figure I.9. Lignes coplanaires.

Cette structure facilite l'intégration de composants et offre de bonnes performances en termes de confinement du champ électromagnétique.

I.3.4.3. Lignes triplaque

Un conducteur est inséré à l'intérieur du substrat diélectrique, entre deux plans de masse situés au-dessus et en dessous du substrat.

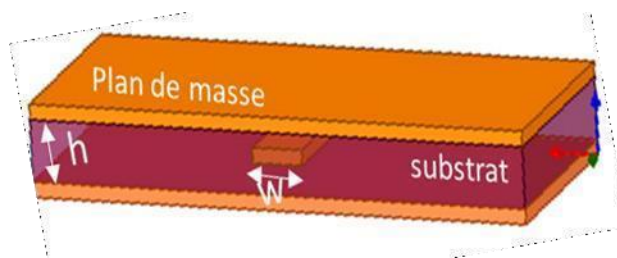


Figure I.10. Lignes triplaque.

Cette configuration offre une excellente isolation électromagnétique et est adaptée aux applications nécessitant un blindage accru.

I.3.4.4. Ligne à fente (Slot line)

Une fente est pratiquée dans une surface métallique, séparant ainsi deux parties conductrices sur le même plan du substrat diélectrique.

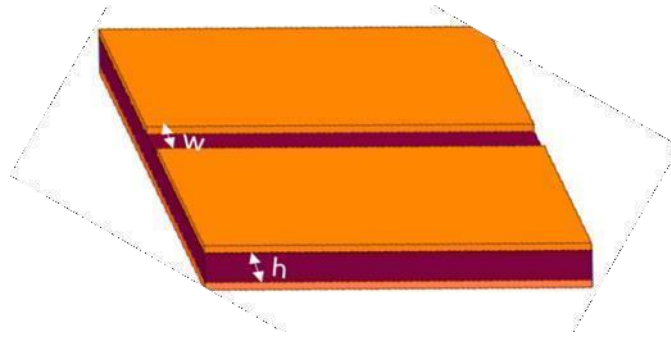


Figure I.11. Ligne à fente .

La propagation du signal se fait principalement dans la fente, cette structure étant utilisée notamment pour les circuits imprimés d'antennes.

I.4. Micro ruban (Microstrip)

La ligne à micro ruban est l'un des types de lignes de transmission planaires les plus populaires, principalement en raison de sa configuration plane, qui permet une fabrication à faible coût via des processus photo lithographiques. De plus, elle peut être facilement miniaturisée et intégrée aux dispositifs à micro-ondes passifs et actifs [15].

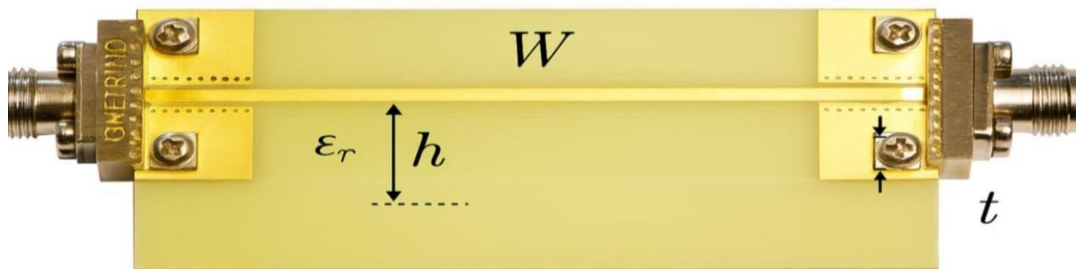


Figure I.12. Ligne microruban.

Les principaux paramètres caractérisant la structure microruban sont la permittivité du substrat ϵ_r (souvent choisie élevée pour concentrer le champ électromagnétique) tangente des pertes de substrat $\tan(\delta)$ (qui permet de réduire les pertes par rayonnement), ainsi que les

paramètres géométriques w et h [16].

- w : largeur de la ligne
- h : épaisseur du substrat
- t : épaisseur du metal

De nombreuses recherches ont montré qu'une telle ligne de transmission supporte une onde se déplaçant en mode quasi-TEM (Transverse Electro-Magnetic). Autrement dit, les champs électrique et magnétique sont orthogonaux à l'axe de la ligne le long duquel se produit la propagation [17].

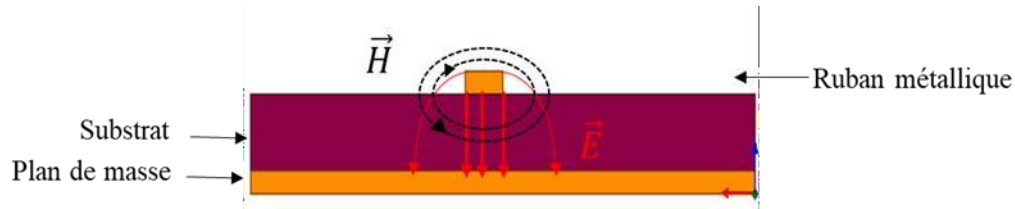


Figure I.13. Distribution des champs électromagnétiques dans une ligne micro ruban.

Cette déviation par rapport au mode TEM idéal est principalement due à la discontinuité du milieu entre le substrat (diélectrique) et l'air libre.

- Le champ électrique est principalement dirigé du conducteur vers le plan de masse.
- Le champ magnétique entoure le conducteur.
- La distribution des champs n'est pas parfaitement uniforme à cause de l'interface substrat/air, ce qui justifie l'appellation quasi-TEM.

Pour calculer les principales caractéristiques des lignes micro-ruban, on peut utiliser certaines formules basées sur les paramètres géométriques du substrat et les propriétés des matériaux.

Il existe deux approches pour la conception d'une ligne microruban : l'analyse et la synthèse.

I.4.1. L'analyse

L'analyse consiste à considérer une ligne de transmission définie par ses dimensions géométriques (largeur de la ligne w_{lig} épaisseur du substrat h_{sub} et par la permittivité relative effective ϵ_{re}) afin de déterminer ses paramètres caractéristiques tels que l'impédance

caractéristique Z_c et la permittivité effective ϵ_{re} [18].

L'impédance caractéristique d'une ligne microruban dépend à la fois de ses dimensions géométriques et des propriétés du substrat diélectrique utilisé.

Dans le cas où le conducteur est très mince (c'est-à-dire lorsque l'épaisseur tend vers zéro $t \rightarrow 0$), les formules d'estimation peuvent être simplifiées [19].

Supposons :

$$U = \frac{W_{lig}}{h_{sub}} \quad I.1$$

Pour $U \leq 1$:

$$\epsilon_{re} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} [(1 + 120)^{-0.5} + 0.04 (1 + U)^2] \quad I.2$$

$$Z_c = \frac{\eta}{2\pi\sqrt{\epsilon_{re}}} \ln(8U + 0.25U) \quad I.3$$

Avec :

$$\eta = 120\pi\Omega \quad I.4$$

Pour $U \geq 1$:

$$\epsilon_{re} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} (1 + 120)^{-0.5} \quad I.5$$

$$Z_c = \frac{\eta}{\sqrt{\epsilon_{re}}} [U + 1.393 + 0.677 \ln(U + 1.444)]^{-1} \quad I.6$$

Hammerstad et Jensen ont proposé des expressions plus précises pour le calcul de la permittivité effective ϵ_{re} et de l'impédance caractéristique z_c d'une ligne microruban.

$$\epsilon_{re} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + \frac{10}{U}\right)^{-ab} \quad I.7$$

Avec :

$$a = 1 + \frac{1}{49} \ln \left(\frac{U^4 + \left(\frac{U}{52}\right)^2}{U^4 + 0.432} \right) + \frac{1}{18.7} \ln \left[1 + \left(\frac{U}{18.1} \right)^3 \right] \quad I.8$$

$$b = 0.564 \left(\frac{\epsilon_r - 0.9}{\epsilon_r + 3} \right)^{0.053} \quad I.9$$

La précision de ce modèle est meilleure que 0,2% pour $\epsilon_r \leq 128$ et $0.01 \leq U \leq 100$.

L'expression la plus précise de l'impédance caractéristique est :

$$Z_c = \frac{n}{2\pi\sqrt{\epsilon_{re}}} \ln \left[\frac{F}{U} \sqrt{1 + \left(\frac{2}{U}\right)^2} \right] \quad \text{I.10}$$

Avec :

$$F = 6 + (2\pi - 6) \exp \left[- \left(\frac{30.666}{U} \right)^{0.7528} \right] \quad \text{I.11}$$

I.4.2. La synthèse

Des expressions approximatives du rapport U (défini comme $U = w_{lig}/h_{sub}$) en fonction de l'impédance caractéristique (Z_c) et de la permittivité effective (ϵ_{re}), dérivées par Wheeler et Hammerstad, sont disponibles dans la littérature [20], [21]. Ces formules permettent d'estimer rapidement les dimensions d'une ligne microruban, à partir de ses paramètres électromagnétiques, facilitant ainsi la phase de synthèse des circuits micro-ondes.

Pour $U < 2$:

$$U = \frac{8 \exp(A)}{\exp(2A) - 2} \quad \text{I.12}$$

$$A = \frac{Z_c}{60} \left(\frac{\epsilon_r + 1}{2} \right)^{0.5} \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1} \left(0.23 + \frac{0.11}{\epsilon_r} \right) \quad \text{I.13}$$

Pour $U \geq 2$:

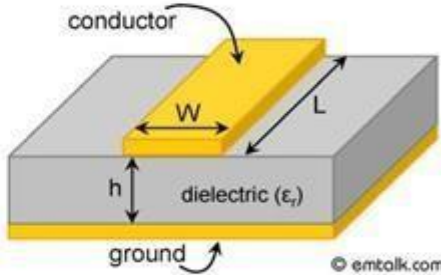
$$U = \frac{2}{\pi} \left[(B - 1) - \ln(2B - 1) + \frac{\epsilon_r - 1}{2\epsilon_r} \left(\ln(B - 1) + 0.39 - \frac{0.61}{\epsilon_r} \right) \right] \quad \text{I.14}$$

$$B = \frac{60\pi^2}{Z_c \sqrt{\epsilon_r}} \quad \text{I.15}$$

$$W_{lig} = U \times h_{sub} \quad \text{I.16}$$

Avec la révolution technologique actuelle, il existe désormais des outils de calcul en ligne, tel que le « Microstrip Line Calculator ».

Le calculateur de micro ruban détermine la largeur et la longueur d'une ligne de micro ruban pour une impédance caractéristique (Z_o) et une longueur électrique données ou vice versa.



© emtalk.com

Substrate Parameters

Dielectric Constant (ϵ_r):

Dielectric Height (h): mm

Frequency: GHz

Electrical Parameters		Physical Parameters	
Zo: Ω	Synthesize	Width (W): mm	Analyze
Elec. Length: deg		Length (L): mm	

Figure I.14. Microstrip Line Calculator.

Les paramètres du substrat (ϵ_r et h) et la fréquence d'intérêt sont nécessaires [22].

- **Synthesize** : Entrez les valeurs Zo et Longueur électrique pour déterminer la largeur physique et la longueur de la ligne de microbande. Appuyez sur Synthétiser pour voir les résultats.
- **Analyze** : Entrez les valeurs W et L d'une ligne de microbande pour déterminer son Zo et sa longueur électrique. Appuyez sur Analyser pour voir les résultats.

I.5. Conclusion

Ce chapitre a permis d'explorer les différentes configurations des lignes de transmission utilisées dans les systèmes de communication, ainsi que leurs caractéristiques et leurs applications spécifiques. Nous avons étudié des structures classiques telles que les lignes bifilaires, les câbles coaxiaux et les guides d'ondes, tout en approfondissant des structures plus récentes et innovantes, comme les circuits plans, notamment les micro-rubans. Ces technologies sont essentielles pour garantir des transmissions de signaux efficaces dans une large gamme de fréquences, des systèmes analogiques aux systèmes numériques avancés.

À mesure que la recherche progresse, de nouvelles approches sont explorées pour optimiser la performance des lignes de transmission. C'est dans ce contexte que les métamatériaux, que nous aborderons dans le chapitre suivant, entrent en jeu. Ces matériaux artificiels, grâce à leurs propriétés uniques, permettent de concevoir des structures de transmission offrant des performances améliorées.

Chapitre II: Les métamatériaux

II.1. Introduction

Les progrès technologiques sont étroitement liés à l'évolution des matériaux, qui jouent un rôle central dans le développement de nouvelles solutions. Depuis quelques années, l'apparition des métamatériaux a marqué un tournant important dans ce domaine. Ces structures artificielles, conçues pour présenter des propriétés électromagnétiques particulières, permettent de réaliser des dispositifs jusqu'alors impossibles à concevoir avec des matériaux classiques.

Grâce à leur structure périodique ou quasi-périodique, les métamatériaux peuvent interagir avec les ondes électromagnétiques d'une manière inédite, comme par exemple en présentant un indice de réfraction négatif. C'est pourquoi on les appelle aussi matériaux main gauche (left-handed materials). Leur étude intéresse de plus en plus de chercheurs, en particulier dans les domaines des micro-ondes et des télécommunications, où ils offrent des possibilités nouvelles pour la conception d'antennes, de guides d'ondes ou encore de filtres.

Ce chapitre propose un aperçu général des métamatériaux, en mettant l'accent sur ceux dits "main gauche". Nous commencerons par rappeler leur définition, leurs principales propriétés, ainsi que les étapes clés de leur développement. Nous évoquerons ensuite quelques applications prometteuses dans le domaine des hautes fréquences.

II.2. Propriété des matériaux

Dans le domaine de la physique de la matière, et plus particulièrement en électromagnétisme, un matériau homogène tel qu'un conducteur ou un diélectrique est généralement caractérisé par deux paramètres fondamentaux : la permittivité (ϵ) et la perméabilité (μ) [23].

Ces deux grandeurs déterminent la manière dont le matériau interagit avec les champs électriques et magnétiques. En se basant sur les différentes combinaisons possibles des signes de ϵ et μ , il est possible d'établir une classification des milieux isotropes. Cette classification est directement liée à l'indice de réfraction n , défini par :

$$n = \sqrt{\epsilon\mu} \quad \text{II.1}$$

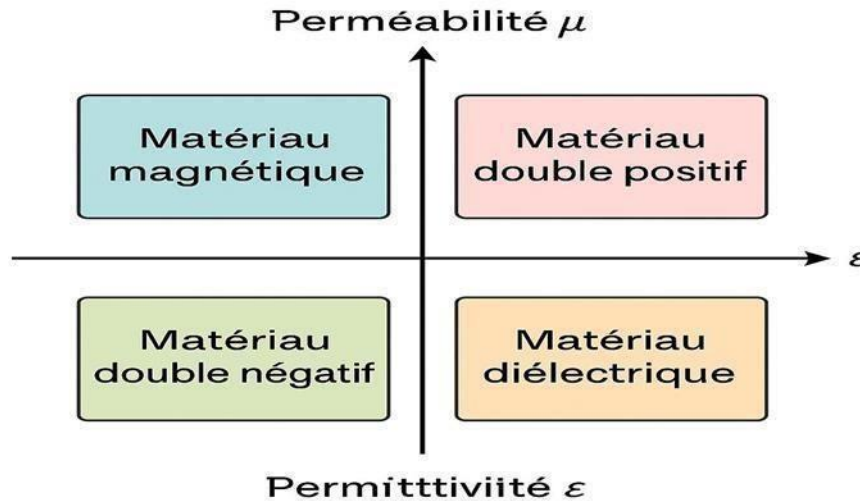


Figure II.1. Classifications des matériaux en fonction de la permittivité et de la perméabilité à l'onde électromagnétique interagissant avec quatre matériaux possibles.

Cette classification nous permet de constater que l'indice d'un matériau peut avoir différentes valeurs selon le signe de ϵ et μ .

Par conséquent, les diverses combinaisons du couple (ϵ, μ) sont : $(+, +)$, $(+, -)$, $(-, +)$ et $(-, -)$, comme le montre la figure II.1.

II.2.1. Les matériaux doublement positifs (Double Positive Materials DPS)

Premier quadrant ($\epsilon > 0$ et $\mu > 0$), il s'agit de la majorité des matériaux naturels (air, verre, eau), ces matériaux réagissent de manière conventionnelle aux champs électromagnétiques.

II.2.2. Les matériaux à permittivité négative (Epsilon Négative Materials ENG)

Le deuxième quadrant ($\epsilon < 0$ et $\mu > 0$) désigne les matériaux tels que le plasma, dans lesquels l'onde électromagnétique est fortement réfléchie ou atténuée. Ces matériaux sont utilisés pour créer des filtres et des guides d'ondes spécialisés [23].

II.2.3. Les matériaux à perméabilité négative (Mu Négative Materials MNG)

Le troisième quadrant ($\epsilon > 0$ et $\mu < 0$) ce qui est peu courant naturellement. Ils peuvent créer des effets optiques non conventionnels, comme la réfraction inversée [24].

II.2.4. Les matériaux doublement négatifs (Double Négative Materials DNG)

Le quatrième quadrant ($\epsilon < 0$ et $\mu < 0$), Ces matériaux n'existent pas naturellement et doivent être conçus comme des métamatériaux avec des structures périodiques spécifiques [25].

Pour Qu'un matériau présente un indice de réfraction négatif, il doit révéler à la fois une permittivité et une perméabilité relatives négatives. Toutefois, il existe des matériaux de permittivités négatives tels que les plasmas, les métaux dans l'infrarouge... etc., et aussi des matériaux de perméabilités négatives, tel que les ferrites et ferromagnétiques.

Dans ce secteur, nous nous concentrons sur l'analyse des caractéristiques de cette dernière catégorie, pour pouvoir par la suite l'appliquer dans la création de filtres.

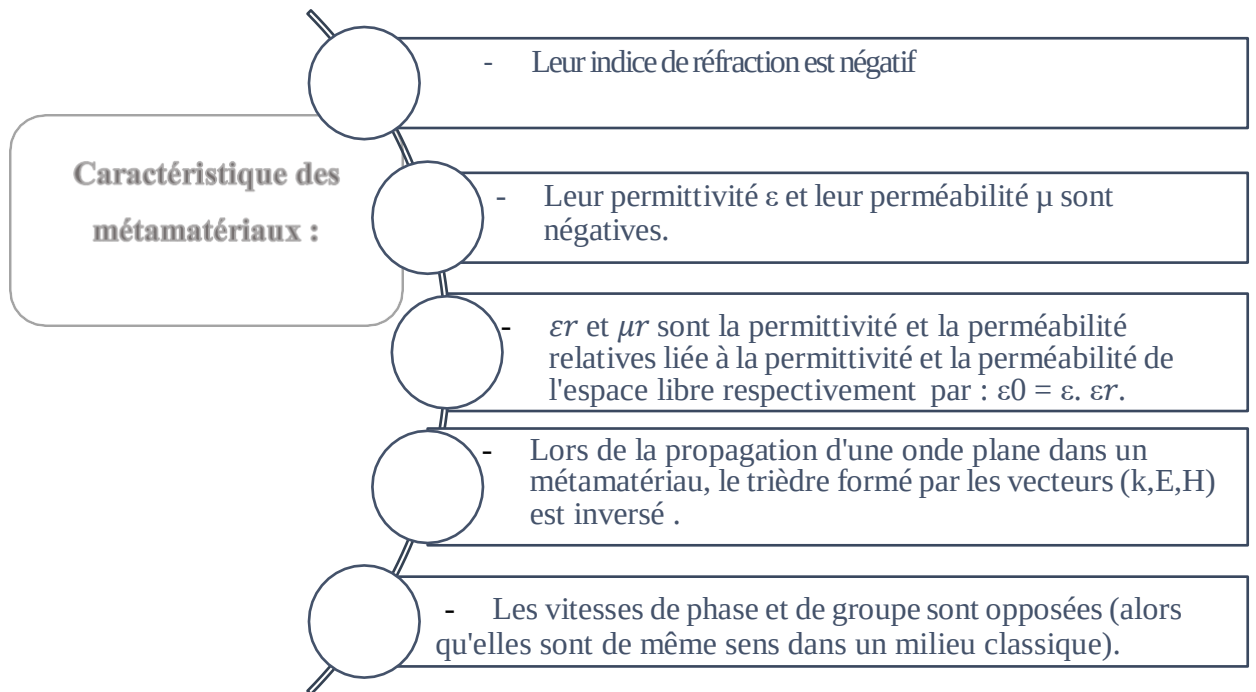
II.3. Les métamatériaux

Dans le domaine de la physique, les métamatériaux se réfèrent globalement à des matériaux composites artificiels qui présente des caractéristiques électromagnétiques absentes dans les matériaux naturels [26].

Ces structures ont ainsi des propriétés que l'on ne retrouve pas à l'état naturel ceci explique le préfixe méta qui signifie au-delà de [27]. Donc les métamatériaux sont des substances qui possèdent des caractéristiques « au-delà » de ce qu'on peut attendre de matériaux naturels.

Particulièrement en ce qui concerne l'électromagnétisme et l'optique, les métamatériaux affichent des caractéristiques inédites capables d'attiser la curiosité des chercheurs et ingénieurs (comme l'indice de réfraction négatif, etc.).

L'aspect le plus fascinant des métamatériaux est qu'ils présentent un indice de réfraction négatif ($n < 0$) [28]. Ces caractéristiques ne découlent pas avant tout de la composition chimique des éléments, mais plutôt de leur architecture interne, généralement leur structure.



Pour appréhender plus facilement le fonctionnement de ce type de matériaux, commençons par rappeler quelques notions de base, comme l'indice de réfraction. Lorsque la lumière traverse l'interface entre deux milieux dans lesquels elle se propage à des vitesses différentes (l'air et le verre), la lumière change tout à coup d'orientation. Ce phénomène est nommé réfraction et il est repris à la Figure II.2 [29].

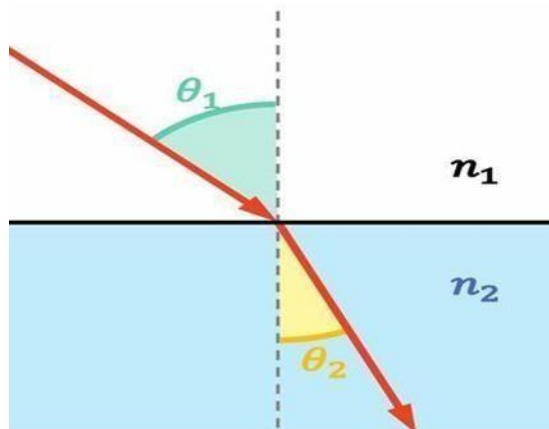


Figure II.2. Réfraction de la lumière.

La lumière suit les lois de réfraction classiques décrites par la loi de Snell-Descartes :

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

II.2

Où n_1 et n_2 sont les indices de réfraction des milieux 1 et 2 respectivement et θ_1 , θ_2 l'angle de réfraction par rapport à la normale.

Ces types de structures (métamatériaux) permettent des manipulations des ondes qu'il s'agisse de lumière, de son ou d'autres types allant au-delà des propriétés des matériaux habituels. Par exemple, elles peuvent rendre possible un indice de réfraction négatif, une absorption efficace de certaines fréquences, ou encore une possibilité de guidage des ondes dans des trajectoires inhabituelles.

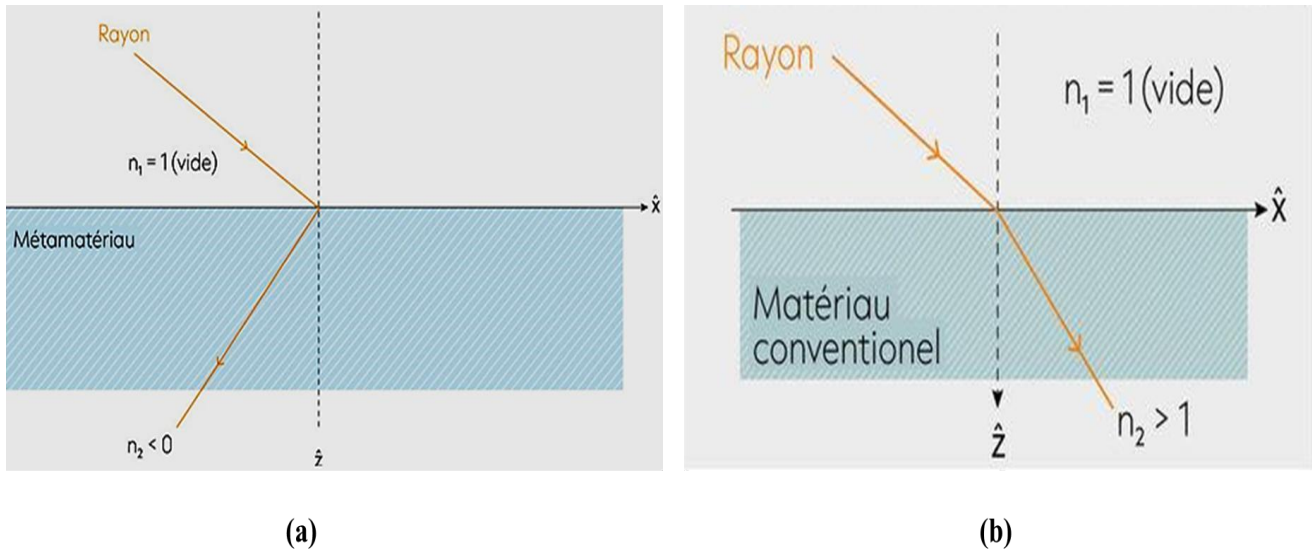


Figure II.3. Principe de la réfraction (a) Réfraction avec un métamatériau
(b) Réfraction avec un matériau conventionnel.

Un indice de réfraction négatif dévie la lumière à un angle opposé à la normale de surface. La lumière qui précédemment divergeait d'une source ponctuelle est désormais orientée à l'envers et converge vers un point [30].

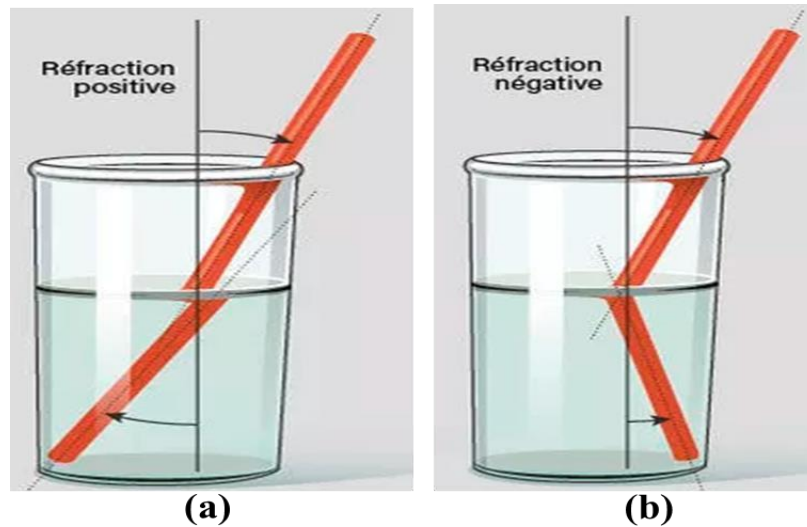


Figure II.4. Un milieu à indice de réfraction normale (b) un métamatériau liquide d'un indice de réfraction négative.

II.4. Généralité et chronologie des métamatériaux

Le concept de métamatériaux a été recommandé pour la première fois par le physicien théoricien russe Veselago, en 1968 et explique que le matériau avec à la fois une perméabilité électrique (ϵ) négatives ainsi qu'une permittivité magnétique (μ) est théoriquement possible.

Il a considéré qu'une onde électromagnétique peut se propager dans un milieu linéaire, homogène et isotrope et qui est caractérisé par une permittivité et une perméabilité négative à la fois [31].

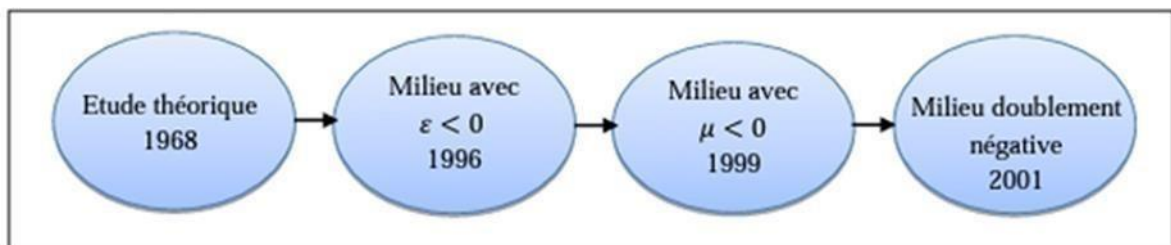


Figure II.5. Les étapes de la création des métamatériaux.

En 1996, John B. Pendry a proposé d'utiliser des fils métalliques fins capables de générer une perméabilité magnétique négative dans la gamme des micro-ondes.

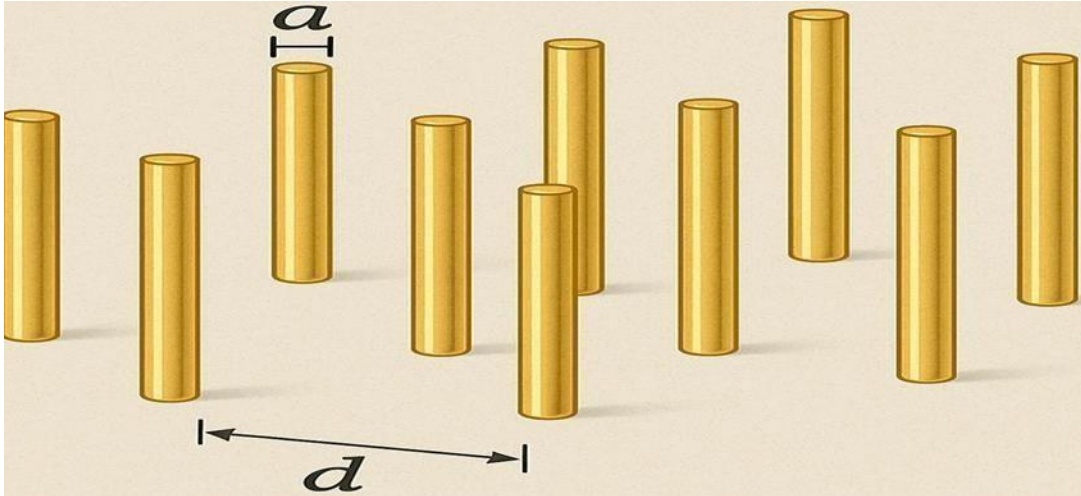


Figure II.6. Les fils métalliques qui donnent le constant diélectrique négatif.

Dans un milieu ayant une permittivité électrique négative, les ondes électromagnétiques ne peuvent plus se propager d'une manière conventionnelle, ce qui laisse envisager des comportements physiques inattendus. Le dispositif proposé par Pendry est constitué d'un réseau de fils métalliques traités comme infiniment fins (voir Figure II.6), formant alors une structure périodique dont la géométrie modifie très profondément la façon dont les ondes interagissent avec ce milieu.

Trois ans plus tard, en 1999, il poussait ces travaux avec D. J. Robbins, and W. J. Stewart et ils ont proposé une structure sous forme de résonateurs en anneau fendu « RAF » ou en anglais Split Ring Resonator « SRR », ces résonateurs ont le pouvoir de présenter une perméabilité négative dans une bande de fréquence bien déterminée et ont une réponse similaire aux matériaux ferromagnétiques [31].

La structure de base étudiée par pendry est de type circulaire, qui a deux anneaux le second étant fissuré à l'opposé du premier.

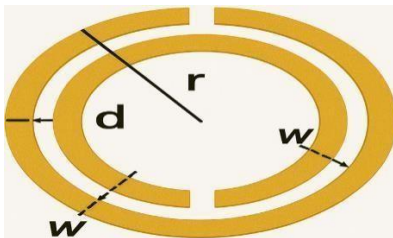


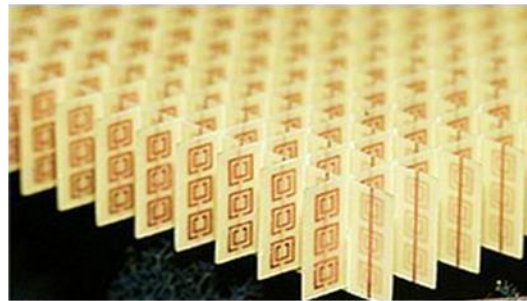
Figure II.7. Structure SRR.

En 2001, David R. Smith et son équipe ont proposé de combiner ces deux structures qui ont été inventées auparavant (les fils métalliques fins et les résonateurs à anneau fendu (Split Ring Resonators SRR)) afin de former un métamatériau composite présentant à la fois une permittivité négative ($\epsilon < 0$) et une perméabilité négative ($\mu < 0$). Cette combinaison permet la réalisation d'un matériau à indice de réfraction négatif ($n < 0$), tel que théorisé par Veselago.

La vérification expérimentale de ce comportement exceptionnel a été effectuée à l'aide du dispositif représenté à la Figure II.8, dans lequel la propagation des ondes électromagnétiques au sein du métamatériau a confirmé l'inversion du vecteur de réfraction. [33]



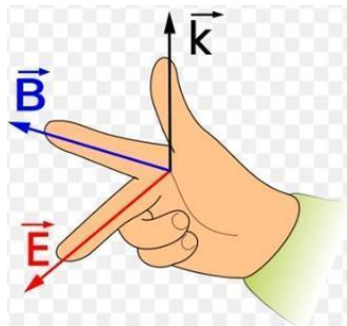
(a)



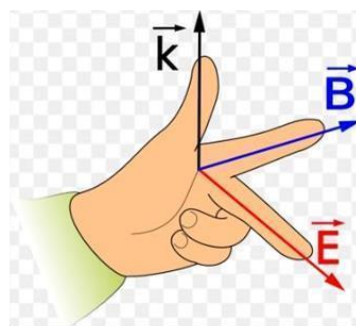
(b)

Figure II.8. Les géométries planaires des cellules unitaires d'un résonateur d'anneaux fendus. (a) structure circulaire. (b) structure carrée.

Ces matériaux à indice de réfraction négatif (également appelés Left-Handed Materials (LHM), dont le comportement ne suit pas la règle classique de la main droite appliquée aux milieux traditionnels.



(a)



(b)

Figure II.9. Représentation du trièdre de vecteur
(a) Matériaux main droit. (b) Matériaux main gauche.

Dans les matériaux ordinaires et Quand ε et μ sont positives, le champ électrique $\vec{E}$, le champ magnétique $\vec{H}$ et le vecteur d'onde $\vec{K}$ forment un trièdre direct, tandis que pour les métamatériaux (ε et μ sont négatives) $\vec{E}$, $\vec{H}$ et $\vec{K}$ forment un trièdre indirect qui caractérise la règle de la main gauche.

Suite à ces caractéristiques, ces matériaux sont nommés des Matériaux Main Gauche « MMG » ou en anglais Left handed Materials « LHM » [32].

Dans les années 2002, une nouvelle phase de prospérité en métamatériaux a démarré, notamment grâce aux travaux menés dans le domaine des antennes résonnantes par Lucent Technologies. En partie, ces recherches ont permis d'exploiter les métamatériaux comme moyen d'améliorer la miniaturisation et les performances des antennes utilisées dans les communications.

La période autour de 2005 a vu croître de nombreux travaux sur les métamatériaux, en raison de leurs propriétés électromagnétiques inédites (réfraction négative, absorption sélective), Cette période a marqué un intérêt croissant pour l'exploitation de ces propriétés dans diverses applications, notamment dans les micro-ondes.

Vers 2010, ces structures ont été intégrées dans la conception de milieux artificiels structurés capables de manipuler les ondes de façon sophistiquée, ouvrant la voie à de nouvelles innovations dans les dispositifs à ondes guidées et les matériaux fonctionnels.

Actuellement, dans le secteur industriel, on observe diverses configurations de structures SRR. De plus même les chercheurs ont adopté des structures innovantes dénommées CSRRs (Complementary Split Ring Resonator), représentant la version duale des SRRs.

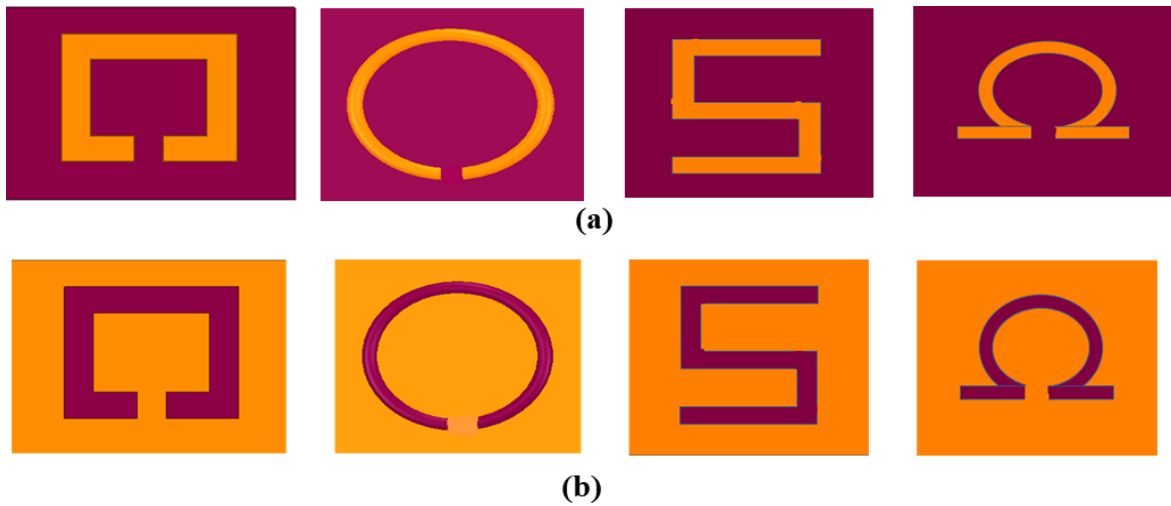


Figure II.10. Différentes géométries de (a) SRR (b) CSRR

II.4.1. Le résonateur en anneau fendu RAF (Ou appelée en anglais Split Ring Resonator SRR)

En 2003, C. R. Simovski a introduit un motif résonnant en forme de « Ω » dans la conception de structures métamatériaux, et ce motif a été étudié pour ses propriétés électromagnétiques intéressantes notamment en régime micro-ondes.

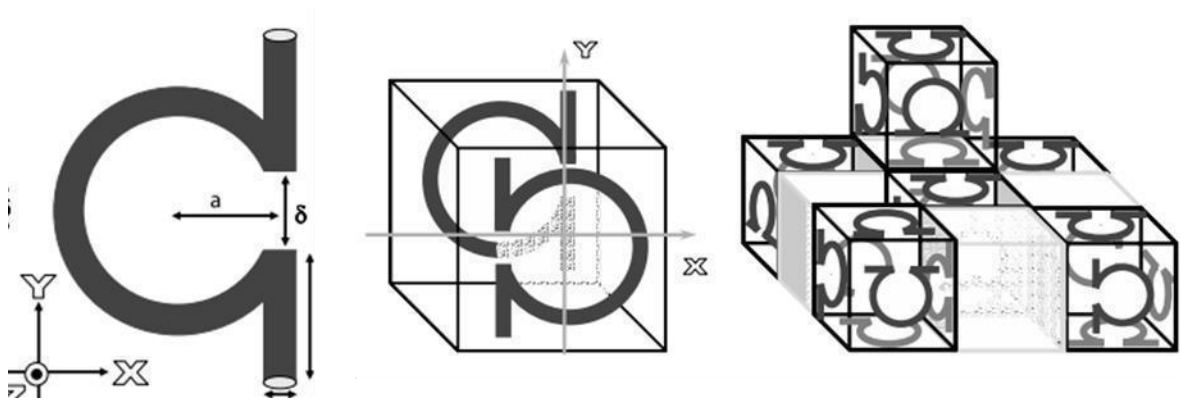


Figure II.11. Le motif résonnant en forme de Ω introduit en 2003.

L'année suivante, en 2004, des chercheurs de l'Université du Zhejiang (Chine) en collaboration avec le Massachusetts Institute of Technology (États-Unis) ont développé un autre type de motif, cette fois en forme de « S » [35]. Ce motif présente la particularité d'offrir simultanément une permittivité et une perméabilité négatives, facilitant ainsi la réalisation de structures bidimensionnelles à indice de réfraction négatif.

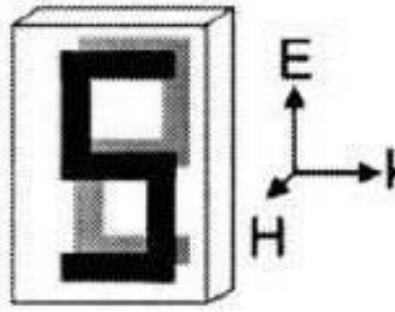


Figure II.12. Le motif résonnant en forme de S introduit en 2004.

Le SRR offre d'importantes possibilités d'application, notamment dans la conception de filtres, de coupleurs directionnels, de déphaseurs compacts ainsi que dans divers autres composants passifs utilisés en micro-ondes et télécommunications [34].

II.4.2. Le complémentaire du résonateur en anneau fendu CRAF (Ou appelée en anglais Complementary Split Ring Resonator CSRR)

Au lieu d'imprimer la forme du résonateur en métal sur le substrat cette fois-ci, une couche métallique est appliquée, dont la forme résonante a été enlevée.

L'étude expérimentale initiale des CSRRs a été introduite en 2004 par Francisco Falcone et ses collaborateurs [36].

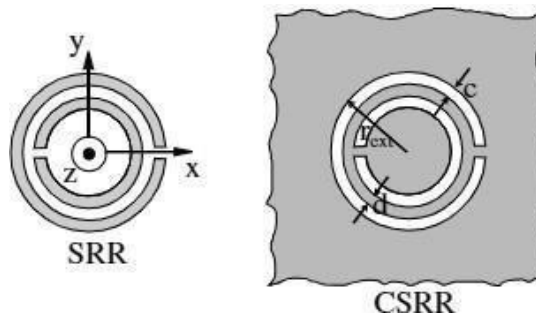


Figure II.13. Les CSRRs réalisée en 2004.

Les CSRRs constituent un excellent substitut aux SRRs classiques, car en premier lieu, les CSRRs sont des structures imprimées dans la couche métallique par soustraction, ce qui facilite leur intégration dans des circuits plans et réduit leur encombrement. De plus, ils offrent une meilleure miniaturisation des composants passifs, permettant ainsi la conception de dispositifs plus compacts.

II.5. Applications des métamatériaux

Au cœur des hautes technologies, les métamatériaux ouvrent de nouvelles perspectives, de par leurs propriétés électromagnétiques uniques, notamment en termes d'applications, car leur capacité inédite à manipuler les ondes électromagnétiques s'avère attractive aussi bien dans le domaine des télécommunications que dans les systèmes optiques, photoniques, radar ou de toute autre nature.

II.5.1. La superlentille

L'un des développements les plus remarquables permis par les métamatériaux est la conception de la **superlentille**. L'utilisation d'une lentille plane est rendue possible grâce à la réfraction négative pour focaliser une onde. Effectivement, les métamatériaux permettent aux ondes électromagnétiques de se concentrer sur un point plutôt que de s'éloigner vers l'extérieur. En général, une lentille conventionnelle doit être concave pour concentrer la lumière, ce qui n'est pas possible avec une lentille basée sur des métamatériaux [30]. Par ailleurs, les lentilles traditionnelles ne sont pas capables de percevoir des détails plus petits que la longueur d'onde de l'électromagnétisme.

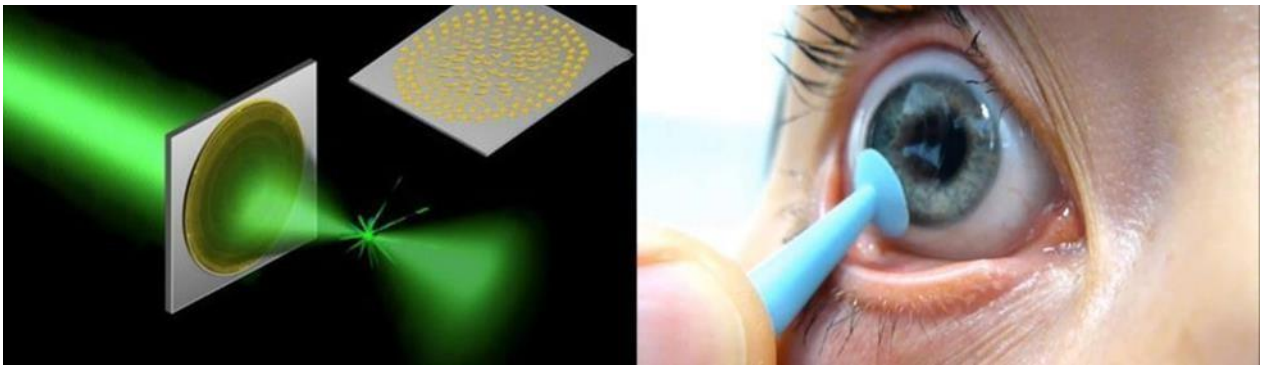


Figure II.14. Exemple de superlentille.

Les métamatériaux créent un phénomène de diffraction inversée de la lumière, ce qui leur confère une propriété de "super résolution". Ces lentilles plates à indice négatif (dites "main gauche") peuvent concentrer les ondes évanescentes, qui contiennent des informations sur les détails plus petits que la longueur d'onde de la lumière utilisée. C'est pourquoi on les nomme "lentilles parfaites" ou "superlentilles" [31].

II.5.2. Antenne métamatériau

L'intégration des métamatériaux dans la conception d'antennes est certainement l'un des domaines d'application les plus dynamiques pour ces structures artificielles, car elles permettent de surmonter de nombreuses limitations des antennes traditionnelles.

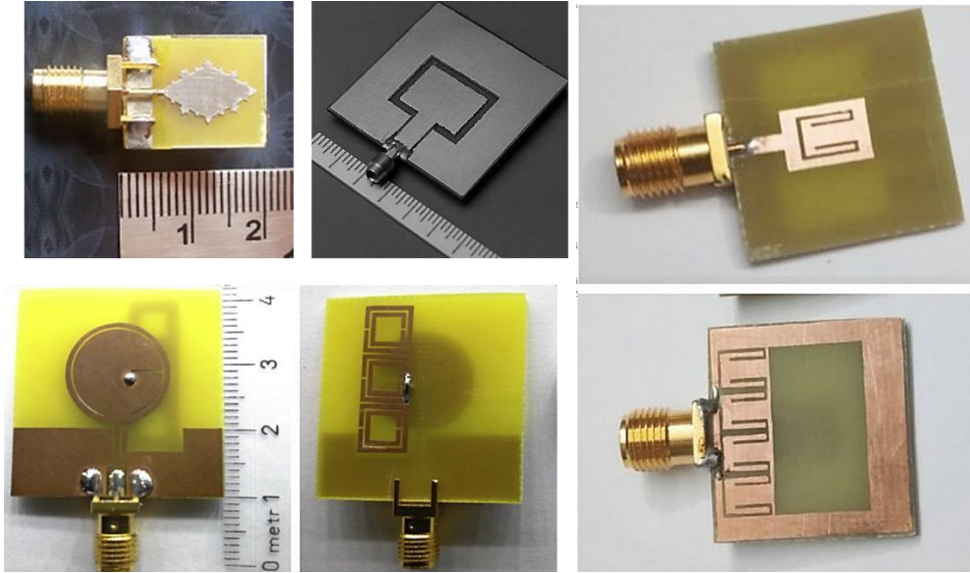


Figure II.15. Des exemples des antennes métamatériaux.

L'objectif de l'utilisation de métamatériaux dans les antennes est d'améliorer leurs propriétés, telles que le gain et la directivité. L'antenne métamatériau expérimentale est aussi petite qu'un cinquième de longueur d'onde [32].

II.5.3. Absorbants métamatériau

Les absorbants de métamatériaux sont des structures artificielles conçues pour absorber efficacement les ondes électromagnétiques incidentes sur une large bande de fréquences ou de manière sélective. L'étude pour le développement d'absorbants à partir de métamatériaux a commencé après de nombreuses autres utilisations de ces derniers.

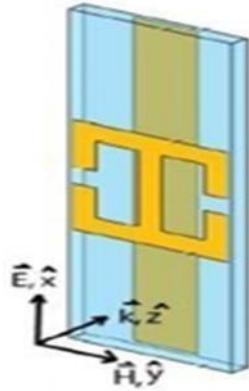


Figure II.16. Illustration des travaux de N. I. Landy avec en perspective.

L'étude de ce type d'absorbant a débuté en 2002, avec un article de N. Engheta qui utilise trois couches, deux couches métalliques et une diélectrique, puis s'est intensifiée à partir de 2008 sur divers spectres de fréquences [37].

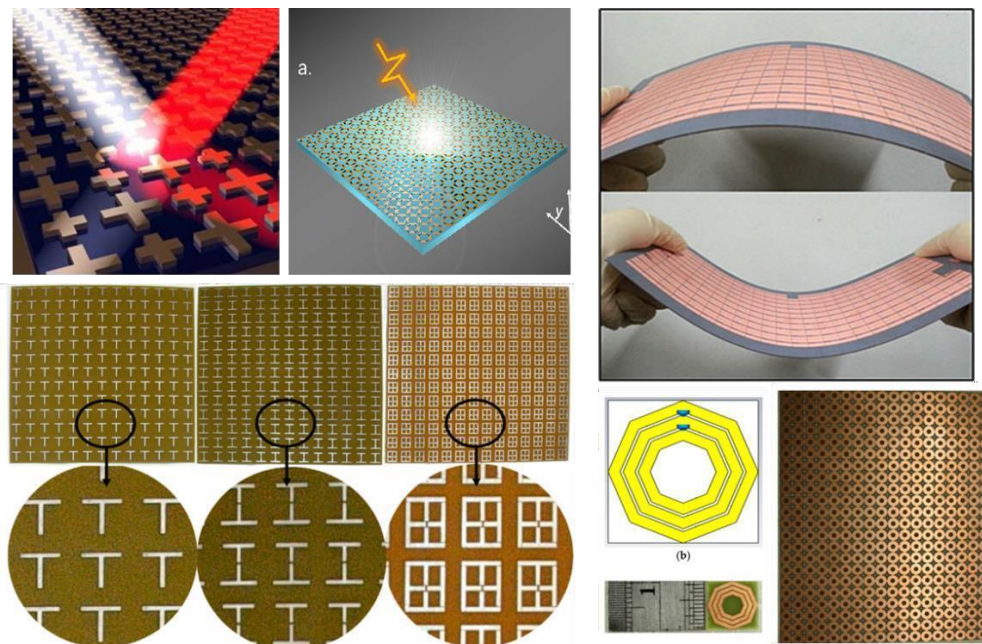


Figure II.17. Des exemples des absorbants métamatériaux.

Les absorbants métamatériaux s'appliquent à plusieurs domaines, comme dans le radar furtif (stealth), le contrôle thermique (absorbants infrarouges), les capteurs électromagnétiques. En effet, leur conception sur mesure permet de les rendre compatibles avec une gamme bien spécifique de fréquences, depuis les micro-ondes jusqu'aux infrarouges et même à la lumière visible.

II.5.4. Les filtres métamatériaux

Les filtres constituent le cœur du fonctionnement d'un système de communication ou d'un appareil électronique, Ils permettent de sélectionner ou de bloquer une fréquence ou une plage donnée pour assurer le fonctionnement d'ensembles à base de circuits RF, de micro-ondes ou d'optique. Historiquement, ces filtres étaient employés à partir de structures résonantes classiques, parfois encombrantes ou aux performances limitées.

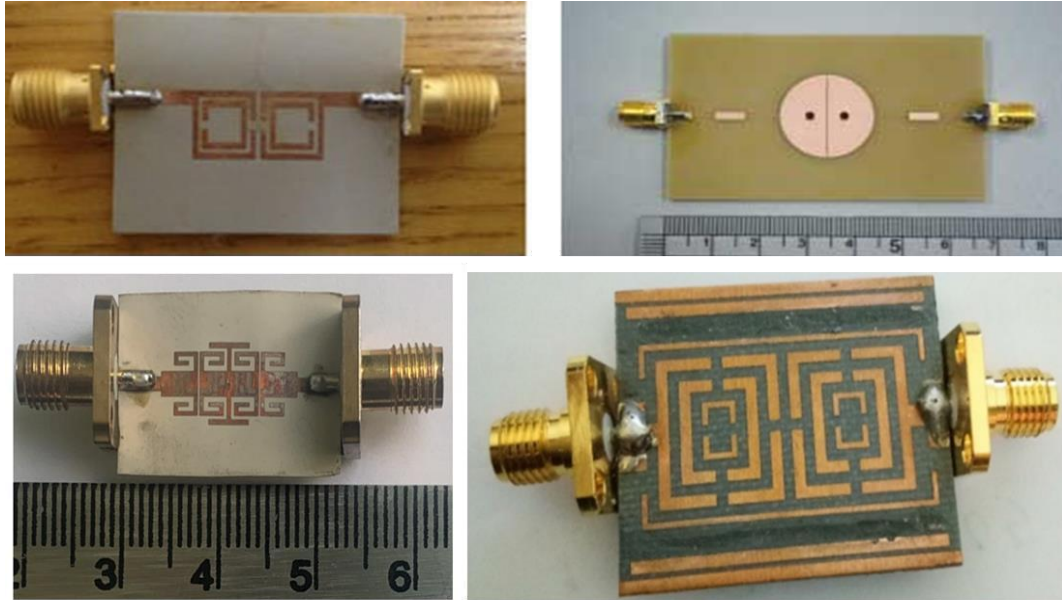


Figure II.18. Des exemples des filtres métamatériaux.

Les filtres métamatériaux se distinguent par une permittivité et une perméabilité simultanément négative. Leur conception repose sur l'utilisation de résonateurs en anneaux fendus (SRR) et/ou de résonateurs complémentaires en anneaux fendus, positionnés sur diverses lignes de transmission telles que les lignes micro-rubans, etc.

L'emploi de résonateurs SRRs et CSRRs de métamatériaux visait à concevoir des filtres miniaturisés, compacts et reconfigurables [38], en sacrifiant une partie de la performance électromagnétique. En fonction de la conception et de l'architecture géométrique et paramétrique de ces structures, on identifie divers types de filtres, tels que le filtre passe bas, passe haut, passe bande, coupe bande... etc.

Dans notre projet, nous nous intéressons aux circuits de filtrage basés sur des cellules métamatériaux.

II.6. Conclusion

Ce chapitre nous a permis de faire un rappel sur les propriétés des matériaux conventionnels avant d'aborder les métamatériaux, qui présentent la particularité remarquable d'avoir un indice de réfraction négatif (permittivité et perméabilité négatives simultanément). Nous avons démontré théoriquement le sens de propagation des ondes dans un milieu doublement négatif et avons exploré plusieurs applications potentielles de ces métamatériaux.

Dans le chapitre suivant, nous étudierons l'une des applications que nous avons mentionnées précédemment, à savoir les filtres.

Chapitre III : Généralité sur les filtres

III.1. Introduction

Le filtrage occupe une place cruciale en électronique. Sa mission est de choisir, parmi une multitude de signaux électriques, ceux dont la fréquence se situe dans une ou plusieurs plages de fréquences appelées bandes passantes [39].

Ainsi, le filtre élimine une ou plusieurs bandes de fréquences complémentaires appelées bandes d'atténuation. On utilise les filtres dans un large éventail d'applications, en particulier dans les systèmes de transmission et de réception des satellites, des radars et d'autres dispositifs de télécommunication [40].

Dans ce chapitre, nous introduisons le concept des filtres en général avant de détailler leur évolution au fil de l'histoire, les différents types en passant sur les filtres planaires, leur conception, caractéristiques et application dans le domaine de la télécommunication.

III.2. Notion de filtre

Dans les systèmes de télécommunication, l'utilisation de filtres est indispensable afin de distinguer la composante souhaitée des éléments indésirables. Le filtre est intégré à tous les stades des processus d'une chaîne d'émission et de réception [41].

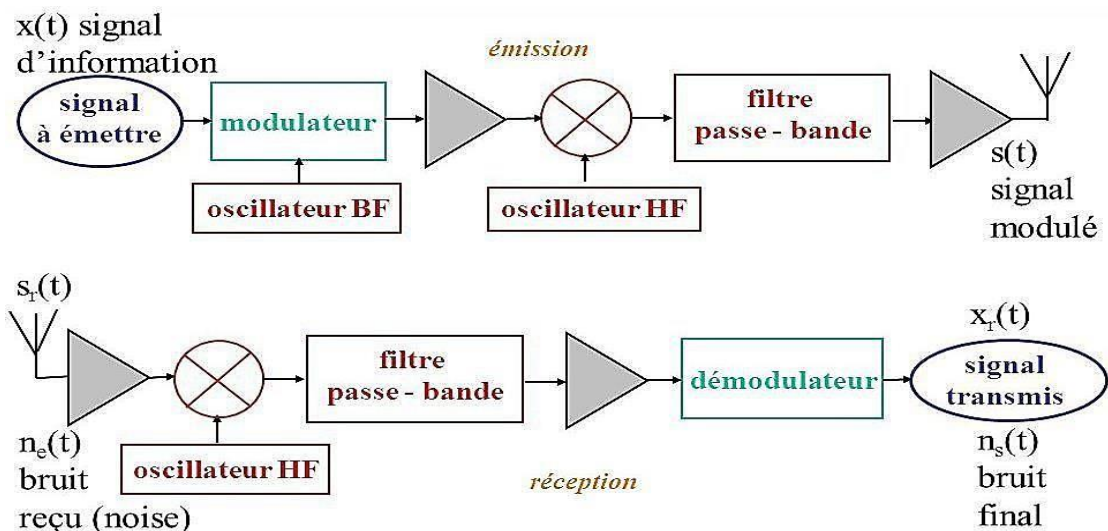


Figure III.1. Une chaîne d'émission et de réception.

Le filtrage d'un signal désigne le processus de séparation des éléments d'un signal en fonction de leurs fréquences. Le filtre est le circuit qui accomplit cette tâche.

Les plages de fréquences dans lesquelles les éléments du signal transmis sont appelés bandes passantes, tandis que celles dans lesquelles ils ne le sont pas sont appelées bandes coupées (ou bandes bloquées) [42].

Nous pouvons également définir le filtre comme un élément électronique, quadripôle linéaire sans pertes, qui autorise la séparation des signaux en fonction de leurs fréquences. Son trait distinctif majeur est le diagramme de l'atténuation en relation avec la fréquence [43].



Figure III.2. Schéma général d'un filtre

Par conséquent, la sélection de la technologie du filtre se base sur [44] :

- **Bande passante** : c'est la plage de fréquences dans laquelle le filtre permet la transmission des signaux sans atténuation importante.
- **Bande d'atténuation** : c'est la zone de fréquence où le signal est bloqué.
- **La bande de transition d'un filtre** : est la région de fréquences entre la bande passante et la zone d'atténuation.
- **Gain** : L'amplitude du signal de sortie par rapport au signal d'entrée.
- **f_c Fréquence de coupure** : C'est la fréquence à laquelle le filtre commence à atténuer le signal de manière significative.

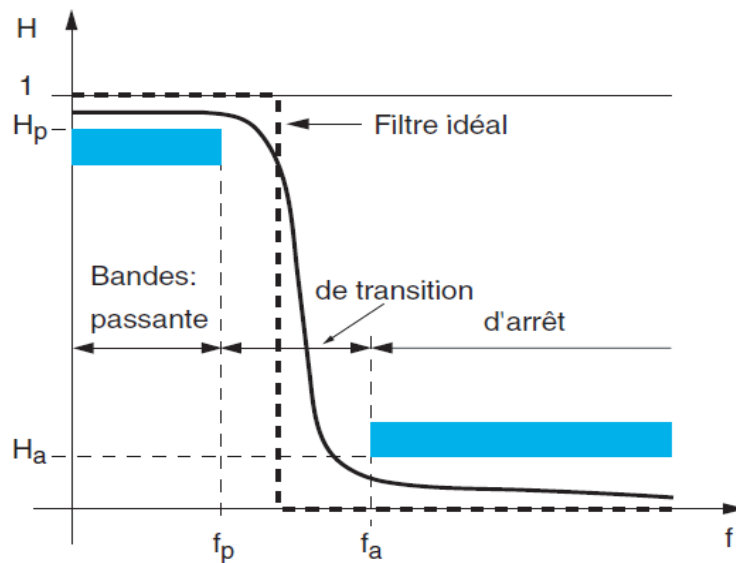


Figure III.3. Gabarit d'un filtre passe bas réel.

III.3. Etapes de développement des filtres

Campbell a été le premier à introduire des filtres en 1915, employant un câble pour supprimer les harmoniques dans le signal d'un générateur. En réalité, il employait le câble en tant que filtre passe-bas, et a aussi affirmé qu'il pouvait faire office de filtre passe-bande, en substituant la bobine par un condensateur. La même année, Karl Willy et Wagner en Allemagne ainsi que Campbell en Amérique ont tous deux exploité le filtre de manière autonome. C'est pour cette raison que 1915 est reconnue comme l'année de création du filtre.

Ces types de filtres utilisent des composants analogiques linéaires passifs, exclusivement constitués de résistances, de condensateurs et d'inductances disposés en topologie T ou π . En 1923,

J. Zobel a suggéré une stratégie qui a conduit à la création de filtres ayant une capacité et une inductance sans limites [45] [46].

Entre 1930 et 1940, Wilhelm Cauer a marqué un tournant majeur en établissant le domaine de la synthèse de réseau. Il a alors fait appel aux estimations de Tchebychev pour développer sa théorie qui a rendu possible la conception de filtres passifs dotés de fonctions de transmission précisément déterminées [47].

E.L. Key et R.P. Sallen ont proposé une approche globale pour la conception des filtres RC actifs, consistant en une suite de sections passives du premier ordre et de sections actives du second ordre. À la fin des années 1960, une évolution a permis de combiner amplificateurs avec résistances et condensateurs [48].

En 1978, Khen Sang et Paul R. Gray ont conçu le filtre en tant que réseau d'intégrateurs, permettant ainsi son ajustement. Dans ce processus, le filtre peut être associé à un circuit de réglage automatique, poursuivant l'évolution constante du travail du candidat jusqu'à aujourd'hui [49].

III.4. Types des filtres

Un filtre sélectionne certaines fréquences d'un signal et en atténue d'autres. On distingue principalement quatre types de filtres :

III.4.1. Filtre passe bas

Un filtre passe-bas est un élément électronique qui permet le passage de signaux ayant une fréquence inférieure à une fréquence de coupure déterminée tout en réduisant les fréquences supérieures.

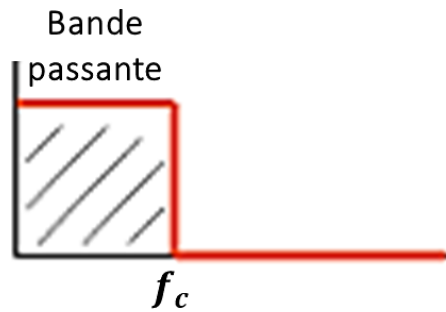


Figure III.4. Gabarit d'un filtre idéal passe bas.

On le retrouve fréquemment dans diverses applications, y compris les systèmes radar et de communication [50].

III.4.2. Filtre passe haut

Un filtre passe-haut est un dispositif qui permet aux fréquences élevées d'une fréquence de coupure de passer, tout en réduisant celles qui sont basses. Pour créer cet effet de filtrage, il se sert souvent de résistances et de condensateurs, ce qui assure que seuls les signaux supérieurs à une fréquence spécifique sortent [51].

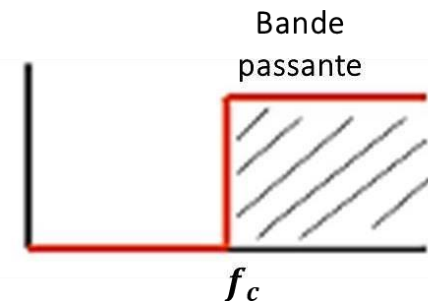


Figure III.5. Gabarit d'un filtre idéal passe haut.

III.4.3. Filtre passe bande

Un filtre passe-bande est un dispositif électronique qui permet aux signaux de passer dans une certaine plage de fréquences tout en réduisant les fréquences en dehors de cette plage.

- Les deux fréquences limites de cette plage sont la fréquence basse de coupure f_{c1} et la fréquence haute de coupure f_{c2} .
- La fréquence centrale est celle autour de laquelle le filtre est centré $f_c = (f_{c1} + f_{c2})/2$.
- La bande passante est l'intervalle de fréquences où les signaux sont transmis correctement $BW = f_{c2} - f_{c1}$.

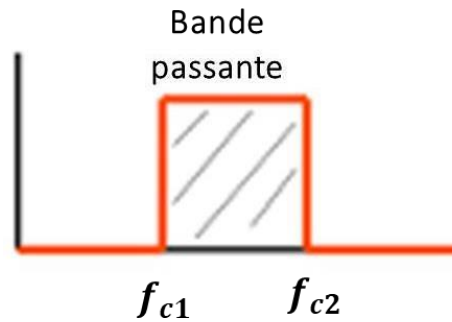


Figure III.6. Gabarit d'un filtre idéal passe bande.

Dans des secteurs comme les communications et l'audio, il est crucial de séparer les signaux désirés des autres [52].

III.4.4. Filtre coupe bande

Un filtre coupe-bande, ou filtre réjecteur de bande, est un circuit utilisé pour rejeter des signaux dans une bande de fréquence appelée bande de rejection. À l'extérieur de cette bande, le filtre laisse passer le signal.

Il est caractérisé par deux fréquences de coupure qui délimitent la bande de rejection. À l'extérieur de cette bande, les fréquences sont transmises [53].

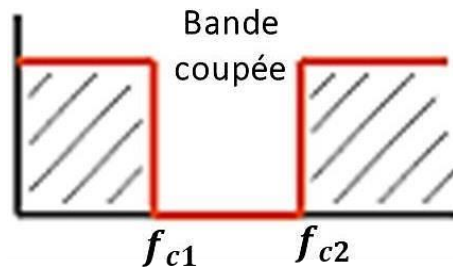


Figure III.7. Gabarit d'un filtre coupe bande.

On remarque que tous les types de filtres analogiques classiques (passe-bas, passe-haut, passe-bande et filtre coupe bande) sont étroitement liés au filtre passe-bas prototype. En fait, lors de la conception, on commence par définir un filtre passe-bas simple avec des caractéristiques précises (c'est-à-dire la forme de la réponse en fréquence, le gain et l'atténuation). Un filtre passe-bas prototype serait un modèle. Ensuite, par des transformations mathématiques appropriées, on peut transformer ce filtre passe-bas en filtre passe-haut (inversé par la fréquence), en filtre passe-bande (concentrée sur une fréquence spécifique) ou en filtre coupe-bande (rejetant une bande de fréquences particulière). Ainsi, presque tous les types de filtres sont compatibles.

III.5. Prototype passe bas

Un prototype de filtre passe-bas, constitué d'éléments capacitifs et inductifs localisés, est établi. Tous les types de filtres (passe basse, passe haut, passe bande ou coupe bande) seront conçus à partir de ce prototype passe bas, pour lequel certaines modifications indispensables seront réalisées (changement d'impédance et de fréquence). La figure III.8 illustre les deux configurations potentielles du prototype du filtre passe-bas. Ils sont constitués en alternance de capacités en parallèle et d'inductances en série. Le nombre de composants du prototype (capacités et inductances) sera imposé par l'ordre du filtre (n : pair ou impair).

Habituellement, les composants (g_n) du filtre prototype sont standardisés en fonction de l'impédance source (g_0) et de la fréquence de coupure (ω_c). Dans la plupart des situations, on suppose que l'impédance de charge est équivalente à l'impédance de source (ce qui est vrai ici), d'où $g_{n+1} = g_0 = 1$ [54].

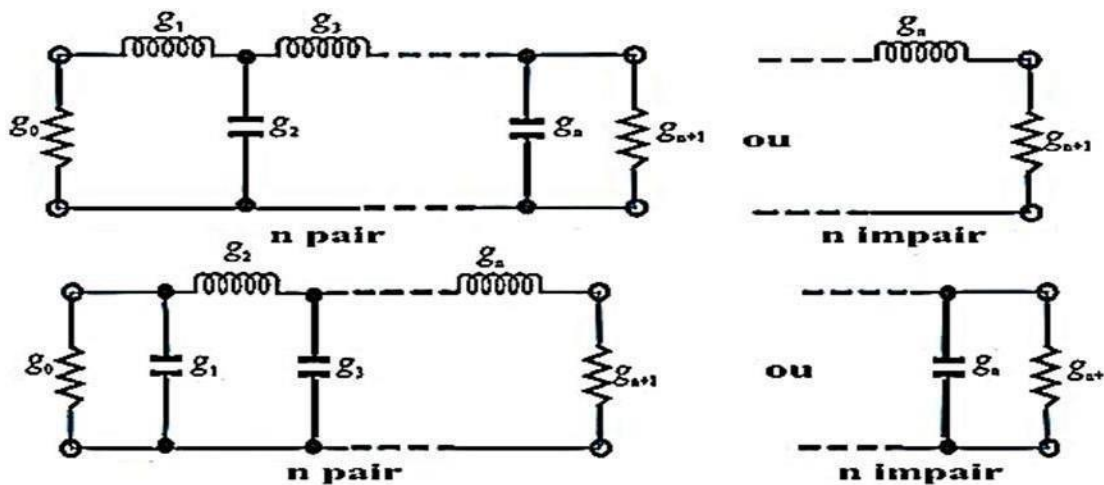


Figure III.8. Prototype d'un filtre passe bas.

Pour les deux versions. On définit g_0 comme la résistance de la source. Pour i variant de 1 à n , g_i correspond respectivement à la valeur d'une inductance en série et d'un condensateur en parallèle. Ce prototype passe bas peut être utilisé pour la création de divers filtres utiles intégrant des transformations de fréquence et d'éléments. On distingue plusieurs types de fonctions de transfert, les plus populaires étant Butterworth, Elliptic et Tchebychev [55].

III.5.1. Filtre de Butterworth

Les filtres de Butterworth présentent une réponse particulièrement uniforme dans leur bande passante. Toutefois, si l'on accepte une atténuation maximale dans la bande passante, il serait judicieux de permettre à l'atténuation de fluctuer autant que possible entre la valeur de MAX et 0dB, dans le but d'obtenir une coupure plutôt abrupte. Concernant ces filtres, l'imperfection qui représente l'atténuation résiduelle en bande passante est dispersée de manière homogène sur l'ensemble de cette bande[56].

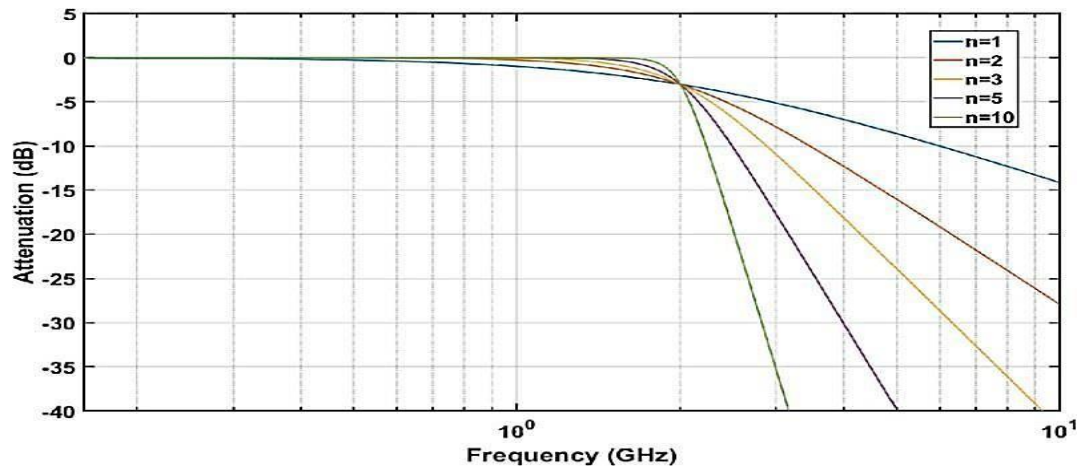


Figure III.9. Réponse en transmission de la fonction Butterworth pour différents ordres n.

D'après la figure III.9 on remarque que plus le nombre d'ordre du filtre augmente plus on s'approche du cas idéal du filtre

III.5.2. Filtre Elliptique

La particularité de l'approche elliptique réside dans son équi-ondulation simultanée dans les zones à la fois passantes et atténuées, en comparaison avec les autres méthodes. Par ailleurs, elle intègre des zéros de transmission dans sa réponse électrique, ce qui permet d'obtenir un bon niveau de sélectivité du filtre avec un ordre limité [57].

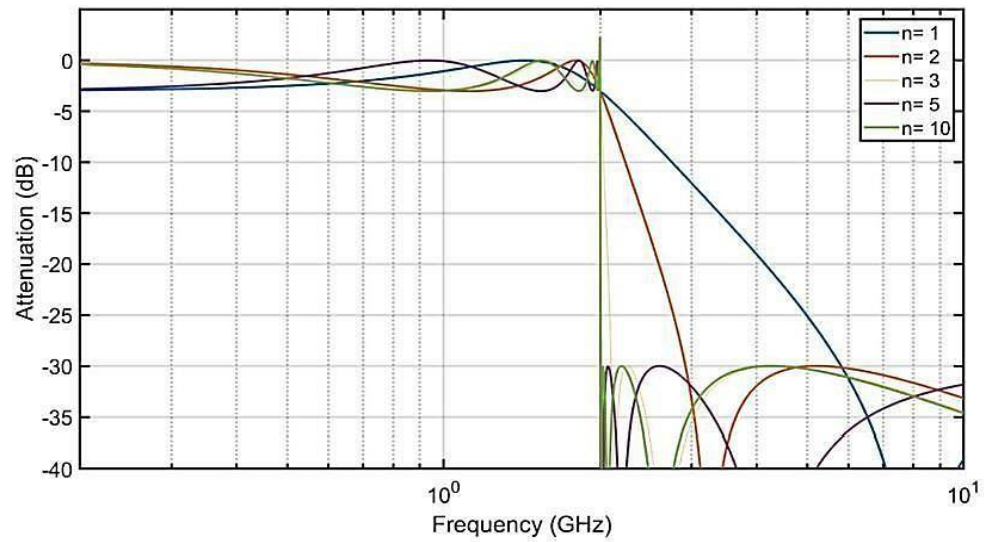


Figure III.10. Réponse de type Elliptique d'un filtre.

III.5.3. Tchebychev

Le filtre Tchebychev présente une ondulation dans la bande passante, ce qui lui confère 2 formes possibles :

- Avec ondulation dans la bande passante (filtres Tchebychev de type I ou « directs »),
- Avec ondulation dans la bande d'atténuation (filtres Tchebychev de type II ou « inversés »).

Les filtres de type I sont souvent appelés filtres Tchebychev de premier ordre et ceux de type II sont parfois appelés filtres Tchebychev inversés.

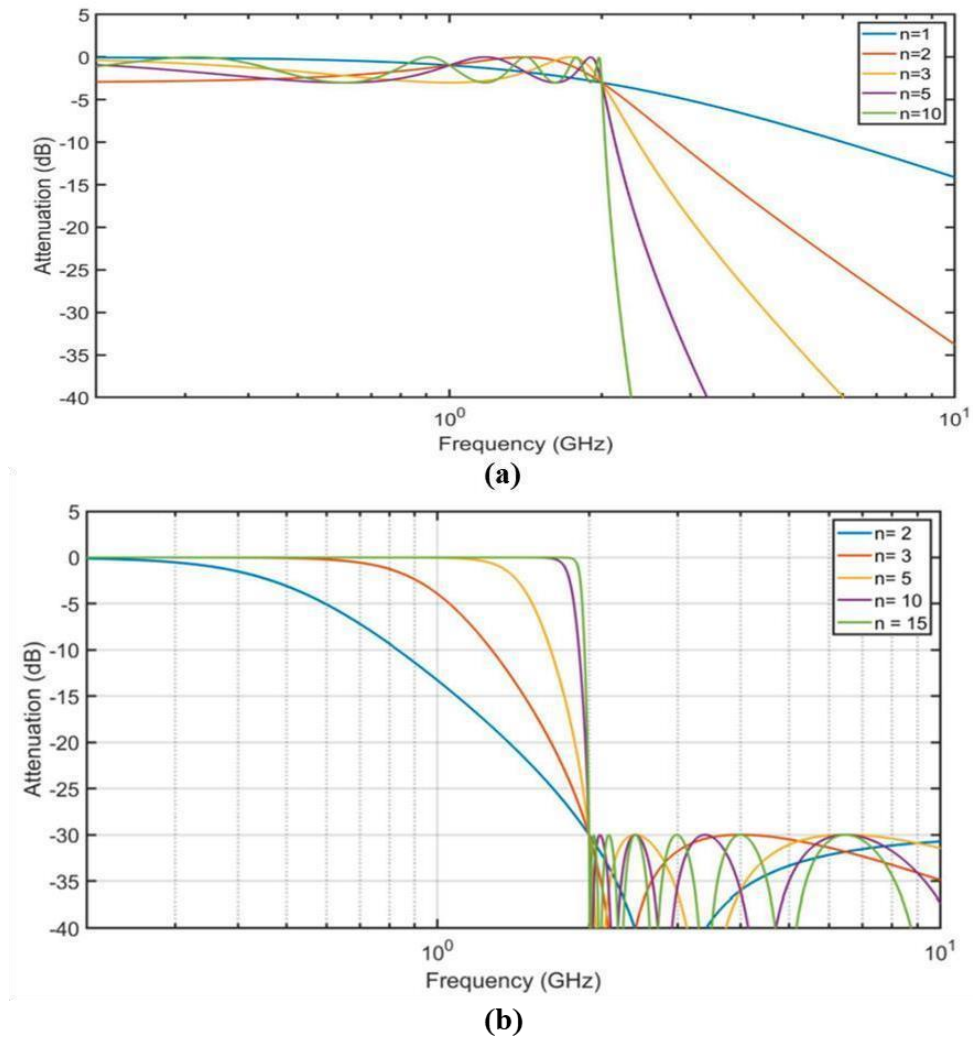


Figure III.11. Les pertes d'insertion du filtre prototype de Tchebychev pour différents n (a) de type II (b) de type I.

Les filtres de Tchebychev tirent leur nom du mathématicien russe Pafnouti Chebyshev, car leurs caractéristiques mathématiques découlent des polynômes de Chebyshev [58].

La figure III.11 illustre la réponse en transmission de la fonction de filtrage Tchebychev pour différentes valeurs de n . Sa réponse possède aussi une ondulation d'amplitude dans la bande passante.

Les filtres de Tchebychev et de Butterworth sont parmi les plus utilisés pour la conception de fonctions de transfert. Dans cette étude, nous privilégions l'analyse des filtres de Tchebychev.

L'approximation de Tchebychev II présente une réponse avec une bande passante plate et une bande atténuée contenant des ondulations causées par les zéros de transmission de la fonction de transfert [59].

Si l'ordre de filtre est n il présente $n-1$ ondulations dans la bande passante.

$$g_0 = 1 \quad \text{III.1}$$

$$g_1 = \frac{2}{\gamma} \sin\left(\frac{\pi}{2n}\right) \quad \text{III.2}$$

$$g_i = \frac{4 \sin\left(\left[\frac{2i-1}{2n}\pi\right]\right) \sin\left[\frac{2i-3}{2n}\pi\right]}{g_{i-1}(\gamma^2 + \sin^2\left(\frac{(2i-1)\pi}{n}\right))} \quad \text{Pour } i=2,3 \dots n \quad \text{III.3}$$

$$g_{i+1} = \begin{cases} 1 & \text{Pour } n \text{ impair} \\ \cosh^2\left(\frac{\beta}{4}\right) & \text{Pour } n \text{ pair} \end{cases} \quad \text{III.4}$$

$$\beta = \ln\left[\coth\left(\frac{LAr}{17.73}\right)\right] \quad \text{III.5}$$

$$\gamma = \sinh\left(\frac{\beta}{2n}\right) \quad \text{III.6}$$

III.6. La transposition de fréquences

La transposition de fréquences est une action qui permet d'étudier n'importe quel filtre à partir du prototype. Ces transpositions s'appliquent à la fois au gabarit, aux fonctions de transfert et à l'élément constitutif du filtre. Quand le filtre « prototype » est constitué d'éléments passifs, nous obtiendrons les filtres transposés en appliquant la transformation aux éléments dépendants de la fréquence. La normalisation des grandeurs se fait par rapport à l'impédance de charge RL , supposée identique pour le filtre et par rapport à la pulsation de coupure w , pour le passe haut, ($wc1$, $wc2$) pour la passe bande et le coupe bande [60].

III.6.1. Transposition passe bas vers passe bas

Un simple passage permet de remplacer les inductances et les capacités dans le prototype passe bas par de nouvelles inductances et capacités (figure III.12)

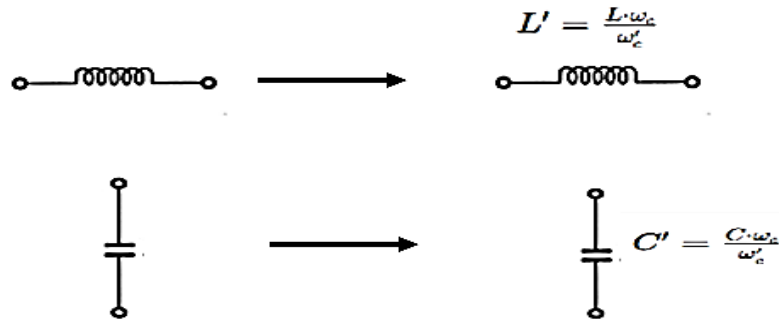


Figure III.12. Tranposition passe bas – passe bas.

III.6.2. Transposition passe bas vers passe haut

Elle transforme les inductances en capacités et vice-versa.

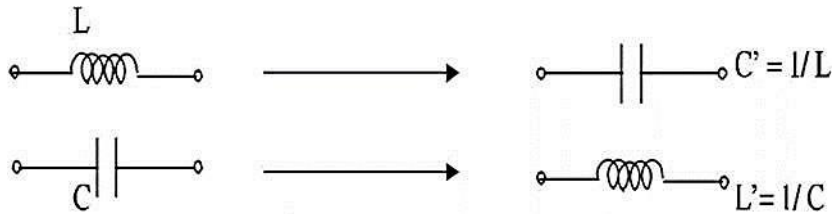


Figure III.13. Transposition passe bas – passe haut.

III.6.3. Transposition passe bas-passe bande

Le filtre souhaité n'a qu'une bande passante et il est défini par deux fréquences de coupures ω_{c1} et ω_{c2} .

A chaque fréquence du « prototype » correspond deux fréquences du passe bande :

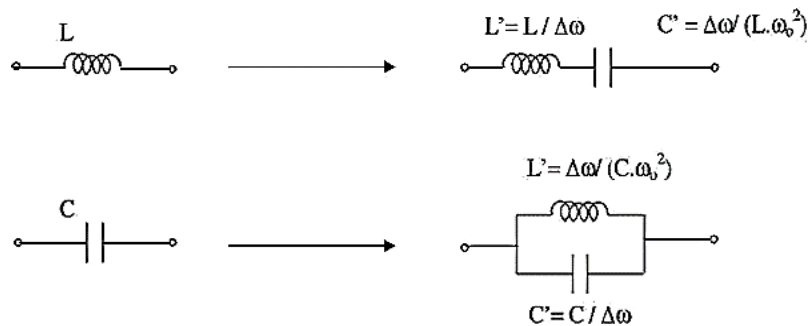


Figure III.14. Transposition passe bas vers passe bande.

La transposition passe bas-passe bande transforme une inductance en un circuit résonnant et une capacité en un résonnant parallèle.

Où : $\Delta\omega = \omega_{c2} - \omega_{c1}$ III.7

Et : $\omega_0 = \sqrt{\omega_{c1} \cdot \omega_{c2}}$ III.8

III.6.4. Transposition passe bas- coupe bande

Cette transposition est analogue à la précédente. Le filtre souhaité a une bande infinie à l'exception d'une bande limitée par deux fréquences de coupures ω_{c1} et ω_{c2} .

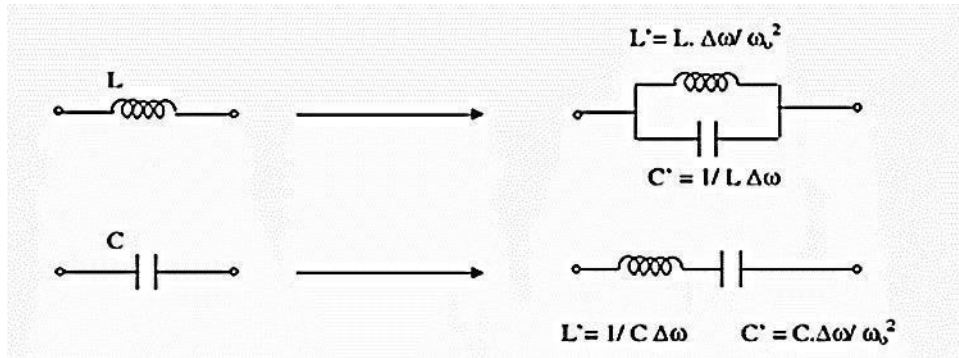


Figure III.15. Transposition passe bas –coupe bande.

A l'inverse de la précédente, cette transposition transforme une inductance et un circuit résonnant parallèle et une capacité en un circuit résonnant série.

III.7. Méthode du choix du model

La figure II.11 montre le raisonnement à suivre pour choisir entre ces types de filtres analogiques selon l'application et le gabarit souhaités [61].

Avec **BP** : la bande passante.

Sb : stop-bande.

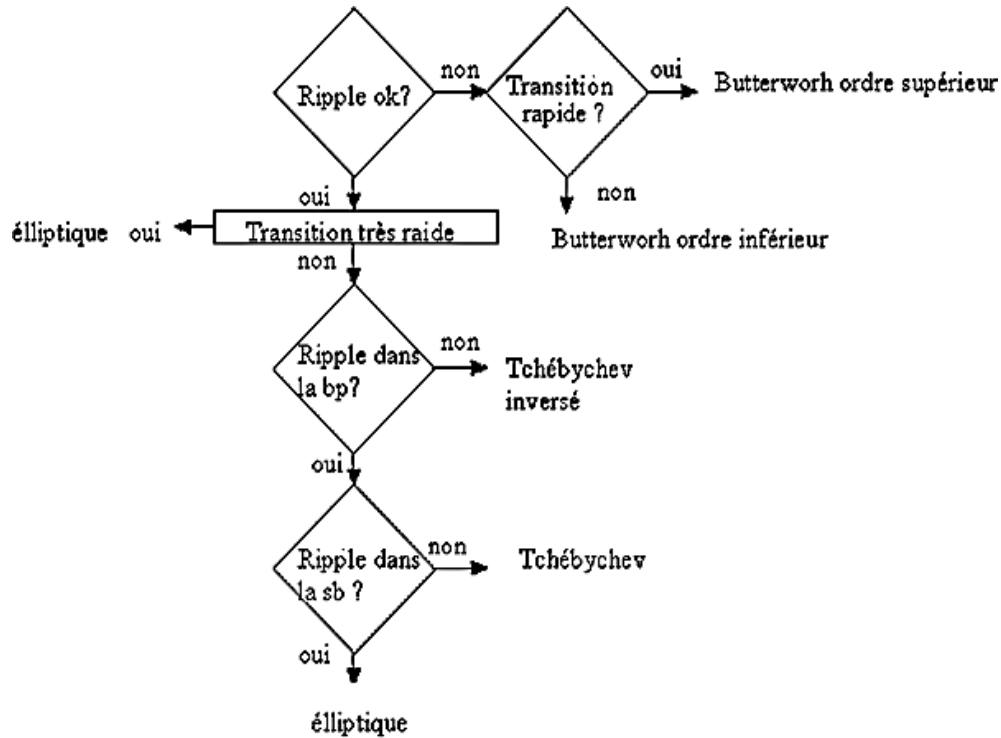


Figure III.16. Organigramme de sélection de type de filtre.

Un organigramme de sélection de type de filtre (Butterworth, Tchebychev, elliptique, etc.) selon différents critères comme l'ondulation dans la bande passante (BP) ou la bande de suppression (SB), ainsi que la rapidité de transition.

Voici un résumé du processus décisionnel représenté : Ripple (ondulation) accepté ?

- Non → Vérifier si transition rapide :
- Oui → Butterworth ordre supérieur
- Non → Butterworth ordre inférieur
- Oui → Transition très raide ?
- Oui → Elliptique
- Non → Ripple dans la bande passante ?
- Non → Tchébychev inversé
- Oui → Ripple dans la bande de suppression ?
- Non → Tchébychev
- Oui → Elliptique

III.8. Conclusion

Au cours de ce chapitre, nous avons posés les bases théoriques indispensables à la recherche des filtres. Nous avons classiquement défini ce qu'est un filtre et exposé ses principaux types : passe-bas, passe-haut, passe-bande et coupe-bande. À la suite de cela, nous avons introduit le modèle passe-bas, fréquemment employé comme référence de départ dans la conception des autres formes de filtres.

Nous avons également examiné les principales fonctions de transfert utilisées dans la synthèse des filtres, notamment celles de Butterworth, Tchebychev et elliptique, en mettant en évidence leurs caractéristiques et critères de choix selon les besoins de l'application. Enfin, nous avons abordé la transposition fréquentielle, permettant de dériver différents types de filtres à partir d'un prototype passe-bas.

Ces concepts de base nous permettent d'approcher, dans le chapitre suivant, la phase de simulation. Cette dernière concernera l'application des filtres, cette fois dans le contexte spécifique des métamatériaux, pour analyser leurs performances et comportements en environnement modélisé.

Chapitre IV: Étude des filtres micro-ondes à résonateurs métamatériaux

IV.1. Introduction

Dans les chapitres précédents, nous avons étudié les filtres avec les lignes microruban avec les métamatériaux, en examinant leurs caractéristiques, leurs formes et les types de filtres disponibles dans le monde. Dans ce chapitre, nous continuerons avec les exemples de différentes bandes de fréquence de cette étude.

L'objectif principal de ce chapitre est de démontrer la modélisation et la simulation de filtres avec des résonateurs à métamatériaux sur des lignes microrubans. Pour ce faire, nous avons utilisé Ansoft HFSS, qui est un outil de pointe pour la simulation électromagnétique 3D et qui permet une analyse précise des composants passifs avant leur fabrication.

IV.2. Présentation des logiciels

Il y a plusieurs logiciels qui permettent de réaliser des simulations bidimensionnelles multicouches où des simulations tridimensionnelles (telles que HFSS d'ANSYS, FEKO d'Altair et CST Microwave Studio), Dans notre section la simulation était faite sous logiciel HFSS et d'ANSYS.

La raison principale pour laquelle nous avons choisi le logiciel HFSS par rapport aux autres est sa capacité à fournir une représentation précise de la réponse fréquentielle du filtre. De plus, il permet de réaliser un maillage adaptatif automatique, alors que les autres logiciels négligent souvent ces détails essentiels.

IV.2.1. Le logiciel HFSS

Avant d'explorer les fonctionnalités proposées par HFSS, il convient d'en donner une définition claire et concise.

IV.2.1.1. Définition

Le logiciel HFSS (High Frequency Structure Simulator) version 15.0 d'Ansoft, un logiciel à but lucratif, est conçu pour calculer les champs électromagnétiques dans le domaine des fréquences. Il facilite l'examen du comportement d'une structure sur le plan électromagnétique et propose des outils d'interprétation et de post-traitement pour une analyse détaillée. Il réalise une modélisation électromagnétique en résolvant les équations de Maxwell grâce à la technique des éléments finis. Celle-ci est fondée sur la représentation géométrique de la structure à travers un

maillage.

Il consiste à fractionner l'espace en petits composants homogènes, bien que leur taille puisse varier considérablement, ce qui représente l'un des avantages majeurs de cette technique [62].

V.2.1.2. Fonctionnalités du logiciel HFSS

Le logiciel HFSS inclut un ensemble complet de fonctionnalités avancées qui simplifient le design et l'analyse de structures électromagnétiques complexes :

- Prototypes rapides et virtuels.
- Structures Arbitraires en 3D
- Multiples ports / Divers modes
- Compatible avec tous les matériaux aptes au micro-ondes.
- Calcul des paramètres S, Y et Z.

IV.2.1.3. Un projet en HFSS

Ce cas d'étude est conçu pour démontrer comment concevoir, simuler et analyser un filtre à l'aide de l'outil de conception Ansoft HFSS. Sa fenêtre comprend plusieurs panneaux optionnels :

- **Le Project Manager** : contient un arbre de conception qui énumère la structure du projet.
- **Le Message Manager** : permet d'afficher toutes les erreurs avant de commencer la simulation.
- **La fenêtre de Propriétés** : pour les affichages et permet de changer les paramètres des attributs du modèle.
- **La fenêtre de Progress** : affiche les progressions de la solution.
- **La fenêtre de 3D Modeler** : contient le modèle et son arbre pour la conception Active.

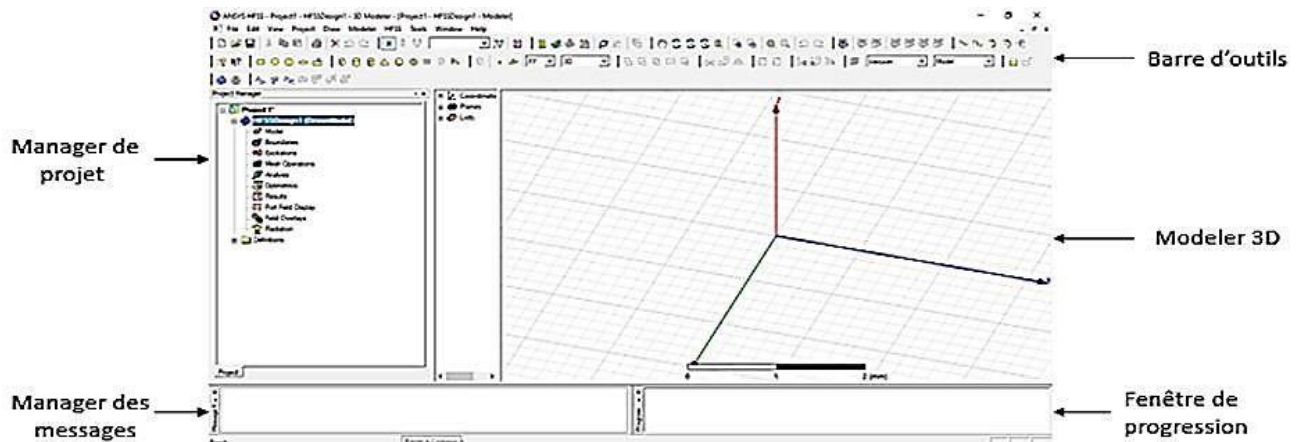


Figure IV.1. La fenêtre principale du logiciel HFSS.

IV.2.1.4. Etape de réalisation

Voici les différentes étapes pour la création d'une structure en HFSS :

- **Créer un nouveau projet et design HFSS**
 - Ouvrir HFSS.
 - Créer un nouveau projet puis un nouveau design HFSS.
- **Définir les unités de travail**
 - Choisir les unités adaptées (exemple : millimètres ou micromètres) via le menu Design > Units.
- **Créer le plan de masse**

Pour dessiner le plan de masse, cliquer dans la barre d'outils. Dessiner alors une boîte. En utilisant les surfaces d'entrées du même rang, entrer la position et dimension de Box comme montré dans la figure IV.2.

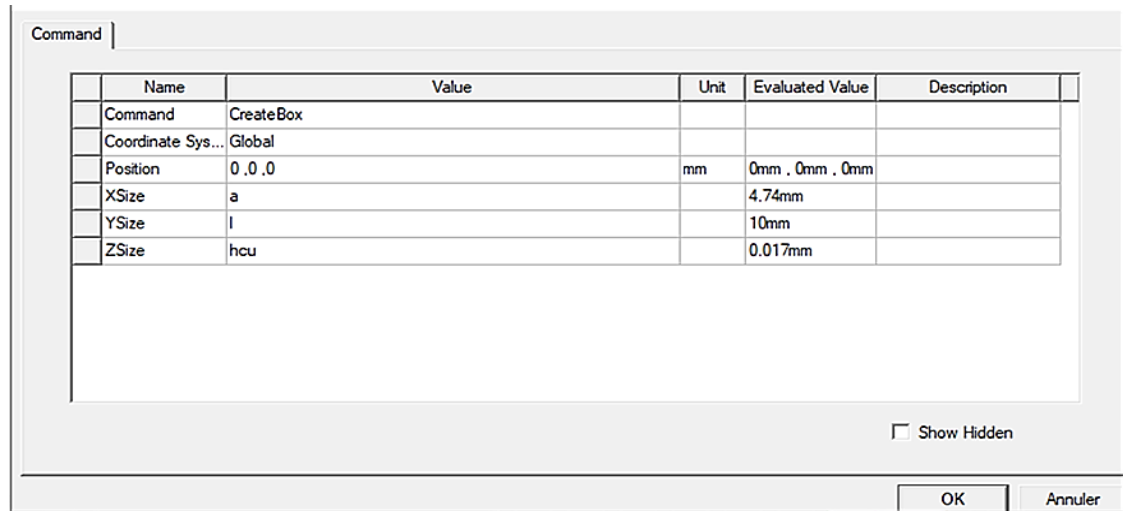


Figure IV.2. Les dimensions de box de plan de masse.

Pour choisir la matière de la structure, par exemple le cuivre.

- Choisir la case Attribut à partir de la fenêtre de Propriétés.
- Pour la Valeur du type Name : Box1.
- Pour la Valeur du type Matériel : ("copper").

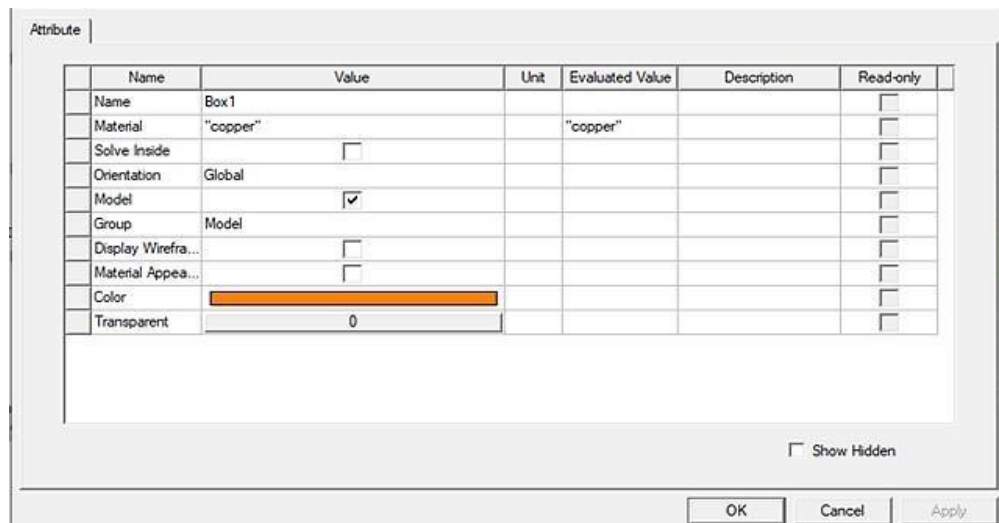


Figure IV.3. Réglage des paramètres de la structure.

Pour ajuster l'affichage, Choisir dans le menu View > Fit All > Active View, ou appuyer sur les touches Ctrl + D (Raccourci). Le plan de masse est illustré dans la Figure IV.4.

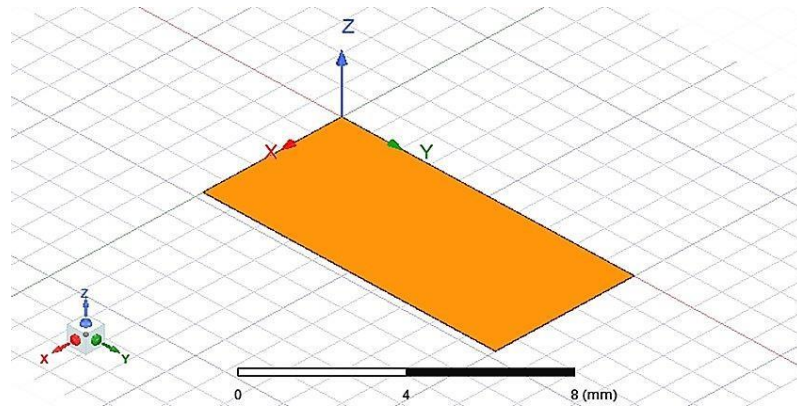


Figure IV.4. Le plan de masse.

▪ Modéliser le substrat

On fait la même exécution pour le substrat Les coordonnées sont assignées comme suit : Le point de départ pour le substrat est à (0mm ,0mm, hsub), La Figure 5 ci-dessous représente le plan de masse avec le substrat.

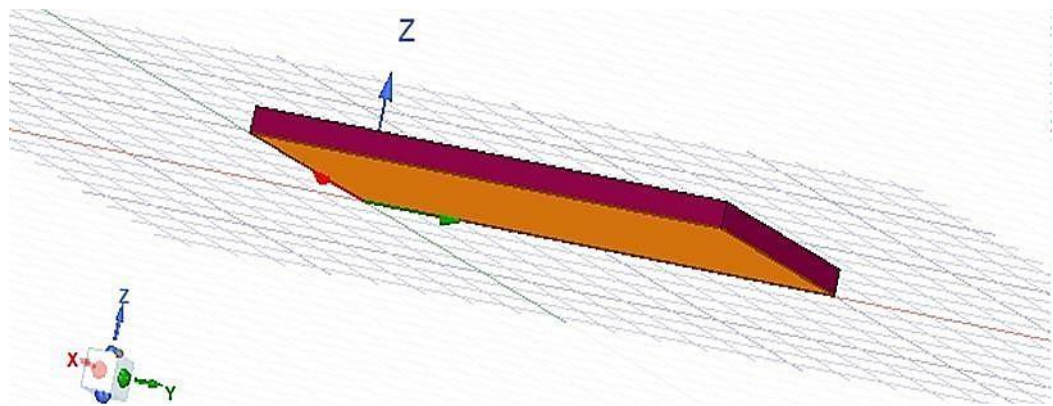


Figure IV.5. La nouvelle structure : plan de masse + substrat.

▪ Créer le conducteur microruban

- Dessiner une plaque rectangulaire au-dessus du substrat qui représente la ligne microruban (conducteur).
- Définir sa largeur, longueur et épaisseur.
- Assigner un matériau conducteur (comme cuivre).

▪ Définir les conditions aux limites

Une fois le modèle a été créé, on doit assigner les conditions aux limites de la structure : sont les étapes pour configurer l'environnement de simulation. Ces appareils, configurés pour une impédance spécifique (généralement 50 ohms), définissent la manière dont l'énergie est insérée dans la structure.

Nous devons d'abord dessiner une boîte d'air, puis la définir comme région de rayonnement.

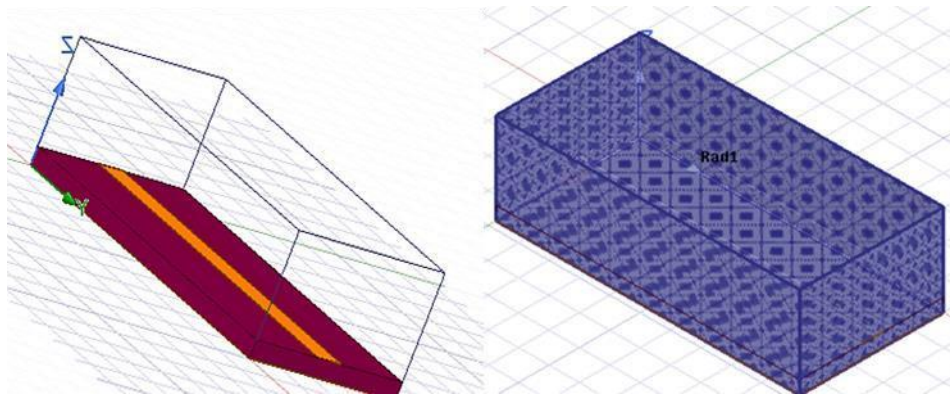


Figure IV.6. La structure + radiation.

- **Définir les ports**
 - Ajouter des ports HFSS (généralement ports de type « wave port ») aux extrémités de la ligne microruban pour les simulations.
 - Configurer correctement la taille et la position des ports.

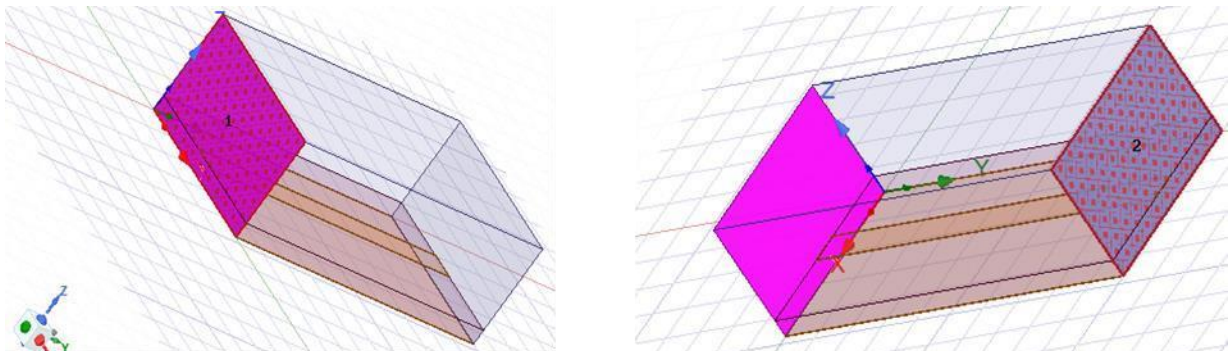


Figure IV.7. La structure + radiation+ les ports.

- **Configurer l'analyse et lancer la simulation**
 - Définir les fréquences d'analyse, paramètres S à calculer, etc.
 - Lancer la simulation HFSS.
- **Analyser les résultats**
 - Examiner les paramètres S, les champs électromagnétiques, etc.

Nous avons besoin de ces étapes dans la partie modélisation et optimisation. Et pour améliorer significativement la qualité visuelle des graphiques nous utilisons le logiciel ORIGIN.

IV.2.2 Le logiciel ORIGIN

Origin est un logiciel d'analyse de données et de production de graphiques de haute qualité, conçu pour répondre aux exigences des scientifiques et ingénieurs. Ce qui distingue Origin des autres applications, c'est la facilité avec laquelle vous pouvez personnaliser et automatiser vos tâches d'importation, d'analyse, de création de graphiques et de rapports de données [63].

En outre, Origin offre la possibilité de se connecter à diverses applications comme MATLAB™, LabVIEW™ ou Microsoft © Excel, ainsi que l'élaboration de routines sur mesure en employant des langages tels que le script, C, Python intégré ou la console R.



Figure IV.8. Logo ORIGIN.

Après avoir défini les logiciels que nous avons utilisé, nous passons maintenant aux simulations.

IV.3. Modélisation et optimisation

Cette section portera sur la modélisation et l'optimisation de plusieurs modèles et structures.

IV.3.1. La ligne microruban

L'élaboration de notre ligne microruban débuté par une sélection matérielle stratégique. Notre choix s'est porté sur un substrat Arlon AD1000 (tm), caractérisé par ses propriétés diélectriques spécifiques (constante diélectrique $\epsilon_r=10,2$ et $\tan(\delta)=0,0023$).

Arlon AD1000 est un matériau de substrat à haute constante diélectrique $\epsilon_r=10,2$ conçu pour être utilisé dans les circuits miniaturisés à haute fréquence. Il s'agit d'un stratifié tissé renforcé de verre avec une charge céramique, qui offre une excellente stabilité thermique et mécanique, ainsi qu'un facteur de qualité élevé, essentiel pour garantir la sélectivité et la faible perte d'insertion. Ces caractéristiques en font un choix optimal pour les circuits haute fréquence dans les systèmes de télécommunications, particulièrement adapté à la conception de filtres micro-ondes compacts et performants. [64].

En appliquant les formulations théoriques présentées dans le premier chapitre (équations I.12

a I.16), ainsi que des outils de calcul en ligne, et après la fixation de certains paramètres tels que l'impédance caractéristique fixée à 50Ω (standard dans le domaine des télécommunications) et une bande de fréquence comprise entre 1,75 et 2,5 GHz, nous avons pu déterminer avec précision les paramètres dimensionnels optimaux de notre structure.



Figure IV.9. Ligne microruban a la bande [1,75-2,5] GHZ.

Cette bande de fréquences est stratégiquement importante, car elle offre un bon compromis entre portée (meilleure que celle des bandes plus élevées) et capacité de transmission de données raisonnable, ce qui la rend adaptée aux systèmes sans fil modernes.

Les calculs ont abouti à une configuration géométrique caractérisée notamment par une largeur de ligne $w2 \approx 0.82 \text{ mm}$.

Tableau IV.1. Les dimensions de la structure (en millimètre).

h_{cu}	0.017	$w2$	0.403
h_{su}	0.43	l	30

Pour obtenir des résultats précis, la modélisation d'une ligne micro-ondes dans HFSS exige une démarche systématique. Elle s'appuie sur un processus d'optimisation itératif, au cours duquel les paramètres géométriques et matériaux sont ajustés afin d'atteindre les performances souhaitées.

Les meilleures dimensions ont été obtenues à l'issue de ce processus, comme présenté dans le tableau IV.1.

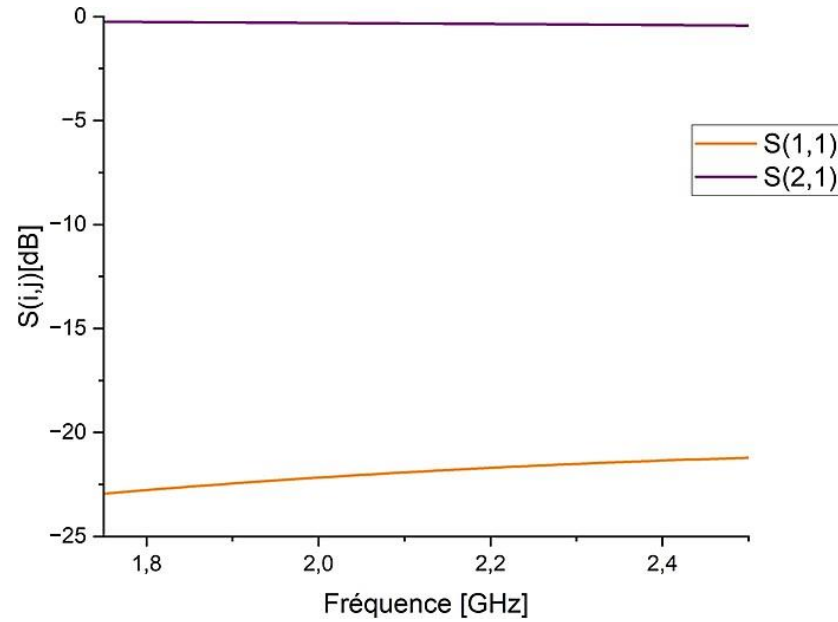


Figure IV.10. La réponse fréquentielle de la ligne microruban dans la bande [1,75-2,5] GHz.

La réponse en fréquence montre une bonne transmission dans la bande sélectionnée. Le coefficient de réflexion S_{11} est inférieur à -22 dB sur toute la bande, ce qui indique une bonne adaptation d'impédance, le coefficient de transmission S_{21} est proche de 0 dB, indique une très bonne transmission.

Dans le cadre de ce travail, diverses configurations ont été conçues et simulées en considérant deux bandes de fréquences distinctes, dans le but d'optimiser les performances et d'identifier la solution la plus efficace.

IV.3.2. Filtre avec un résonateur rectangulaire

Dans le cadre de cette étude, un résonateur en forme rectangulaire a été intégré à une ligne de transmission afin d'analyser son effet sur les performances électromagnétiques du dispositif. Cette configuration a permis d'explorer les possibilités d'optimisation offertes par les structures métamatériaux en termes de sélectivité et d'adaptation fréquentielle.

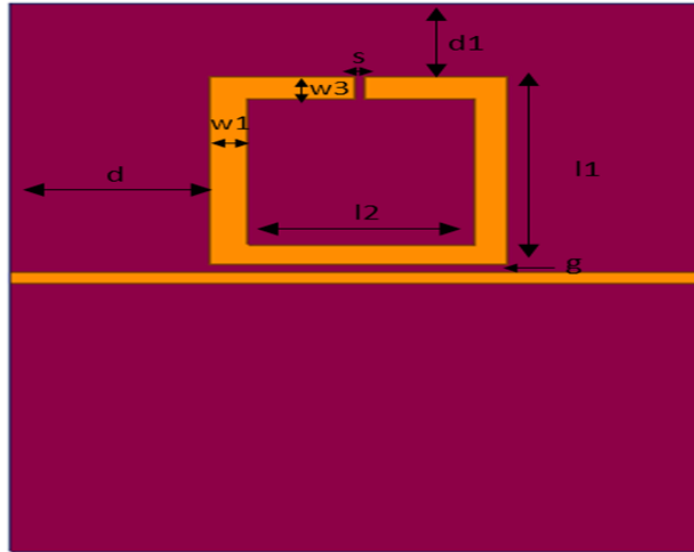


Figure IV.11. Ligne micro ruban +un résonateur en rectangulaire

La structure a été soumise à plusieurs optimisations en modifiant diverses dimensions, et celles qui ont été utilisées dans cette étude sont récapitulées dans le tableau ci-dessous :

Tableau IV.2. Les différentes dimensions du filtre dans la bande [1,75-2,5] GHz (en millimètres).

d	8.75	l1	13	w1	1.6
d1	5.6	l2	10	w3	1.4
g	0.05	s	0.5		

La réponse obtenue après les différentes étapes d'optimisation et de modélisation est présentée dans la figure suivante :

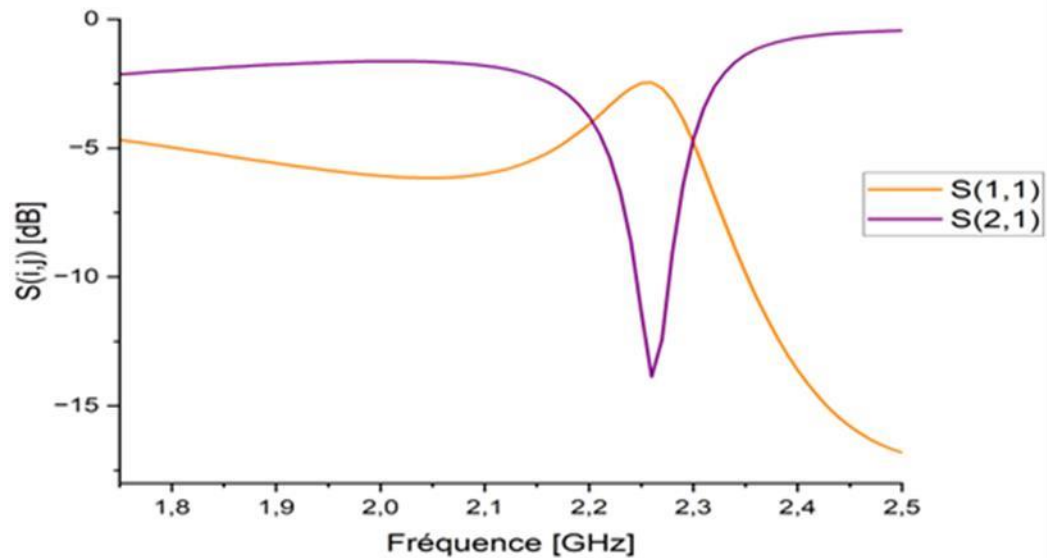


Figure IV.12. La réponse fréquentielle d'une ligne micro ruban +un résonateur en rectangulaire.

Le résonateur en forme rectangulaire introduit une bande de réjection étroite centrée autour de 2,25 GHz, avec une atténuation maximale autour de -15 dB. Cela confirme que le dispositif agit comme un filtre coupe-bande.

Ces résultats démontrent l'efficacité du dispositif pour supprimer sélectivement des fréquences indésirables, utile pour des applications RF comme la réjection d'interférences. L'ajustement des paramètres géométriques permettrait de contrôler précisément la fréquence rejetée.

La méthode Nicolson–Ross–Weir (NRW) est utilisée pour extraire les paramètres électromagnétiques (permittivité ϵ et perméabilité μ et l'indice de refraction n) d'un matériau à partir des mesures de paramètres S (S-parameters) obtenus dans des simulations

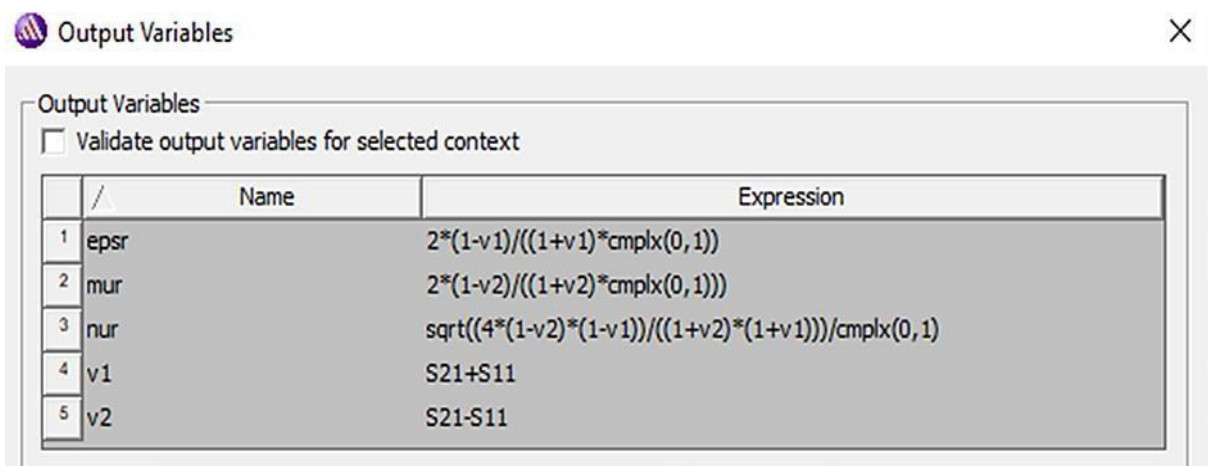


Figure IV.13. Introduction des expressions de "NRW" dans HFSS.

Pour savoir le type de matériaux de cette structure on a besoin de déclarer les expressions de NRW pour extraire le signe de l'indice de réfraction du filtre sous le simulateur HFSS, avec les paramètres "epsr", "mur" et "nur" qui sont la partie réelle de la permittivité ϵ , la perméabilité μ et l'indice de réfraction effectif n respectivement. V1 et V2 sont la somme et la soustraction des coefficients de transmission et de réflexion. la figure IV.14

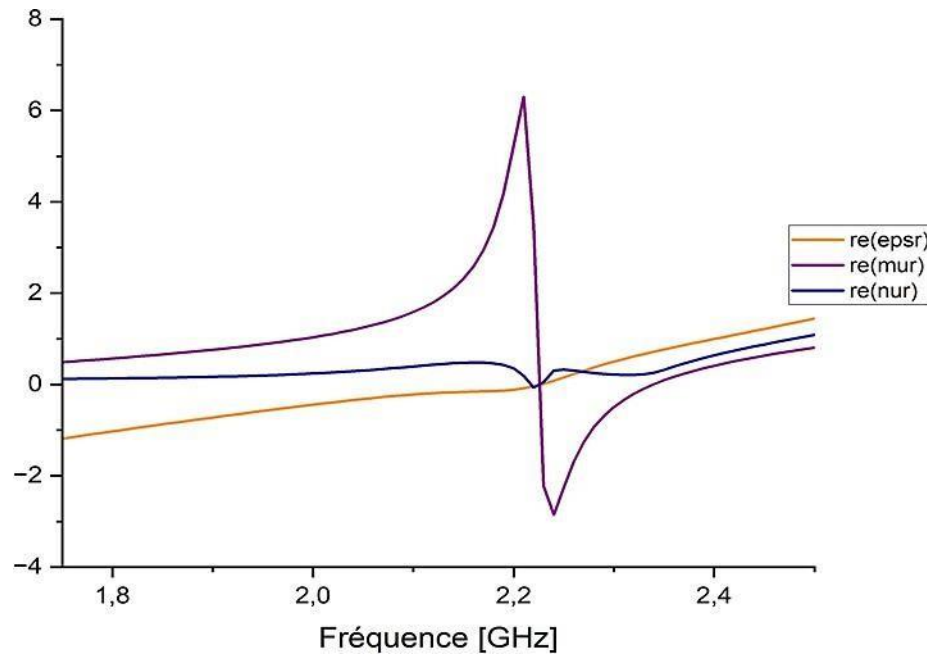


Figure IV.14. Permittivité, perméabilité et l'indice de réfraction d'un seul rectangle.

Ce résultat montre que le matériau étudié possède des propriétés classiques (ϵ_r et μ_r positifs) en dehors de la résonance. Cependant autour de 2,25 GHz, on observe des valeurs inhabituelles de permittivité (ϵ_r) et perméabilité (μ_r), avec des parties réelles négatives, traduisant un comportement typique des métamatériaux.

Cette réponse spectrale démontre la capacité de la structure à présenter simultanément une permittivité et une perméabilité effectives négatives, une condition nécessaire pour l'obtention d'un indice de réfraction négatif.

IV.3.3. Filtre coupe bande avec deux résonateurs rectangulaires

Lors de la seconde étude, un résonateur supplémentaire conçu avec une topologie en forme rectangle a été introduit afin d'optimiser les performances électromagnétiques du filtre.

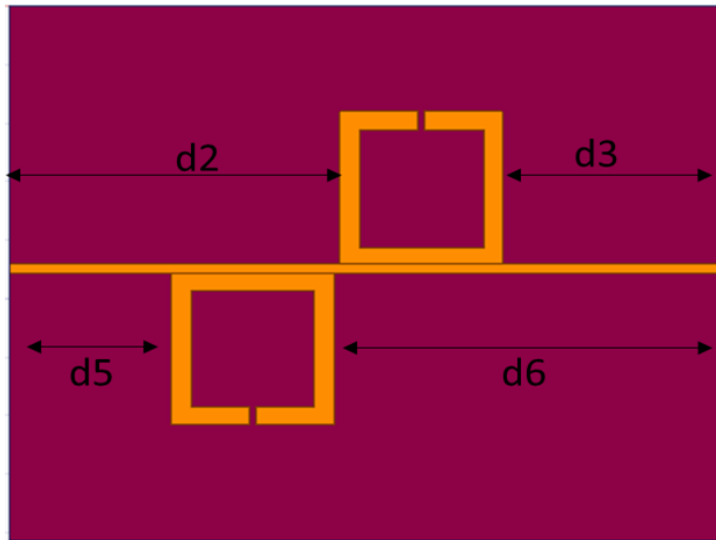


Figure IV.15. Ligne micro ruban +deux résonateurs en rectangulaire.

Suite à une série de simulations comportant des modifications dimensionnelles, on constate que les nouvelles valeurs listées dans le tableau IV.3 :

Tableau IV.3. Les dimensions de filtre Ligne micro ruban + deux résonateurs en rectangulaire (en millimètres)

d2	26.5	d5	13
d3	17.8	d6	31.3

Grâce aux différentes étapes d'optimisation et à la modification des dimensions des résonateurs, les performances électromagnétiques du filtre ont été significativement améliorées. La figure ci-dessous montre les S-paramètres obtenus avec une nette amélioration du coefficient de réflexion S_{11} et de la transmission, qui est caractérisé par S_{21} .

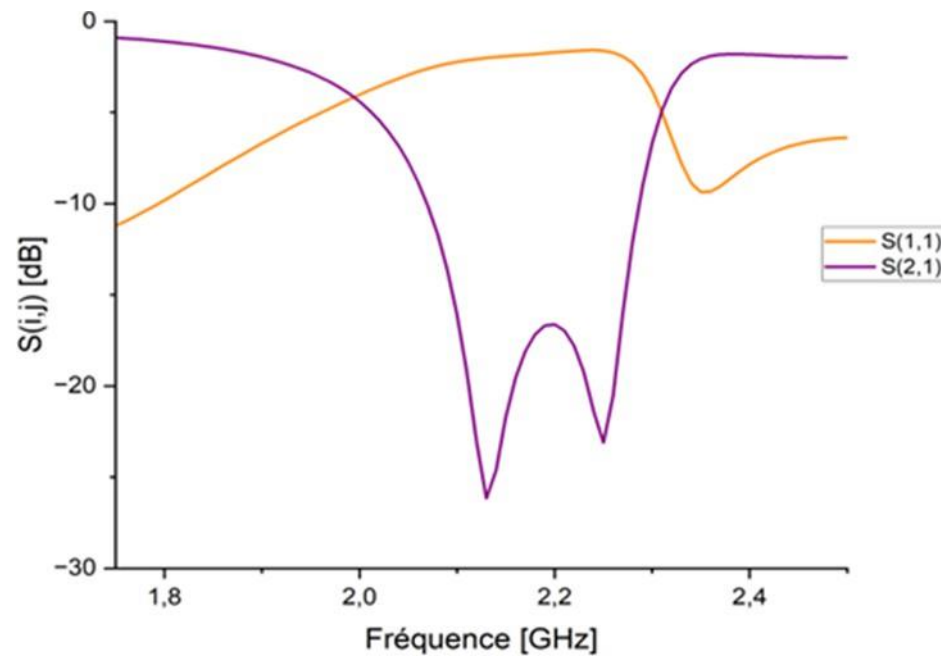


Figure IV.16. La réponse fréquentielle d'une ligne micro ruban +deux résonateurs en rectangulaire.

Le graphe de la figure précédente illustre le comportement en fréquence d'un filtre coupe-bande à large bande conçu à partir d'une ligne microruban couplée à deux résonateurs en forme rectangulaire. Contrairement à la configuration précédente, ce filtre présente une amélioration notable de ses performances en termes de réjection. En effet, la courbe du paramètre de réflexion S_{11} tend vers 0 dB dans la bande de réjection, et la courbe de transmission S_{21} montre une atténuation marquée du signal, atteignant environ -17 dB. Cela signifie que le filtre bloque efficacement les signaux dans cette plage de fréquences, tout en permettant une bonne transmission en dehors de cette bande.

Cette structure permet d'élargir la bande de coupure et d'approfondir l'atténuation. Ce type de réponse est particulièrement recherché dans les applications nécessitant une suppression sélective d'interférences ou de canaux indésirables.

IV.3.4. Filtre passe bande avec deux résonateurs rectangulaires

Avec la même structure et avec un léger changement de paramètre ($w_2=0,75\text{mm}$ à $w_2=0,79\text{mm}$), une réponse en fréquence complètement différente a été obtenue.

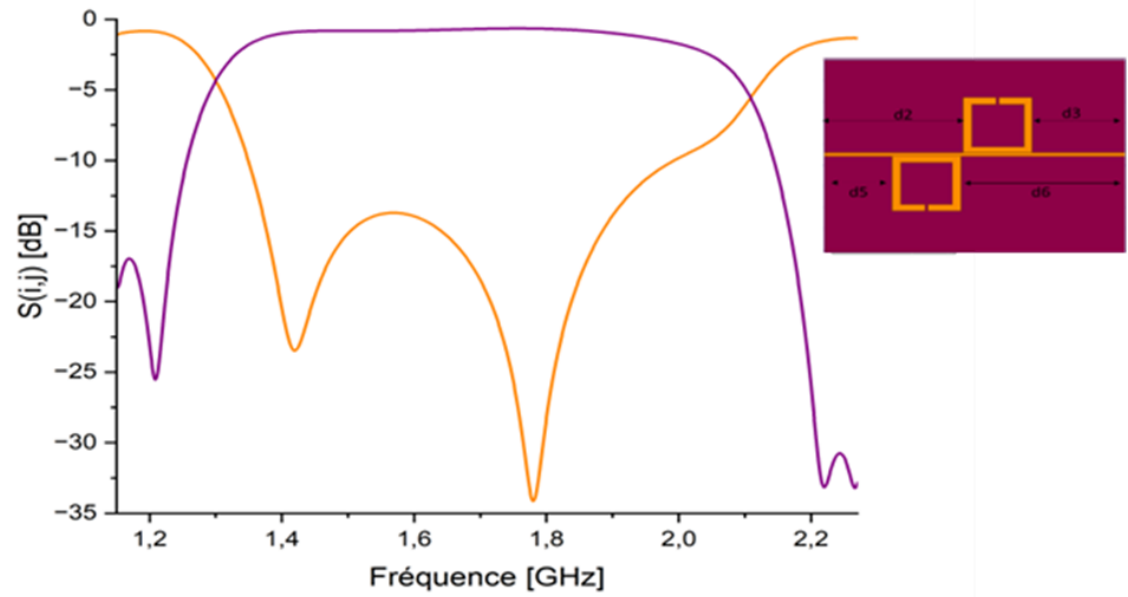


Figure IV.17. Résultats de simulation des paramètres S_{11} et S_{21} du filtre passe bande.

La nature du filtre a été modifiée, ce qui indique un changement significatif dans la réponse en fréquence du dispositif. Ce changement reflète un comportement résonant différent de la structure dans la plage de fréquences considérée.

Les résultats de la simulation des paramètres S de la configuration, présentés dans la figure (IV.17), montrent un comportement de filtre passe-bande de type Tchebychev d'ordre $n=2$ (2 pics), avec une fréquence centrale $f_0 \approx 1,64$ GHz, une bande passante absolue $BW \approx 0,65$ GHz et une bande passante relative $RBP \approx 39,6$ %. Dans cette bande, le niveau du coefficient de réflexion est inférieur à -15 dB et donc que les pertes par réflexion (ondes renvoyées à la source) sont très faibles dans la bande passante. Cela signifie que la majorité de l'énergie est transmise, ce qui est essentiel pour des performances optimales.

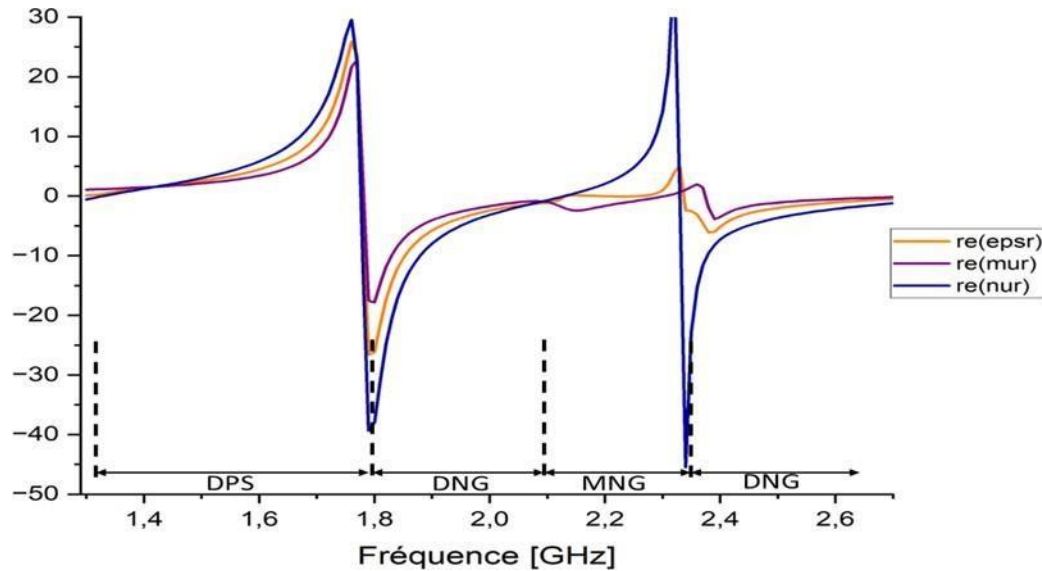


Figure IV.18. Permittivité, perméabilité et l'indice de réfraction de deux rectangles de type SRR.

Le graphique IV.18 illustre les fluctuations des propriétés électromagnétiques du matériau sur l'ensemble de la gamme de fréquences, ce qui permet de déterminer les divers régimes (DPS, MNG, DNG) en fonction de la fréquence.

Il est clairement observable que la même structure adopte des comportements distincts selon la bande fréquentielle : elle agit comme un matériau conventionnel (DPS) dans certaines plages, comme un matériau à perméabilité négative (MNG) dans d'autres, et même comme un matériau à indice de réfraction négatif (DNG) dans des zones spécifiques.

Cette capacité à changer de nature selon la fréquence met en évidence le caractère artificiel des métamatériaux, conçus pour présenter des propriétés électromagnétiques inexistantes dans les matériaux naturels, ouvrant ainsi la voie à des applications innovantes dans le domaine des dispositifs à ondes électromagnétiques.

IV.3.5. Filtre passe bande avec deux résonateurs rectangulaires inversé

Dans une perspective d'optimisation des performances, les deux résonateurs rectangulaires ont été échangés inversés. Cette modification a été accompagnée d'un ajustement minutieux de leurs dimensions, dans le but d'optimiser l'efficacité globale du dispositif.

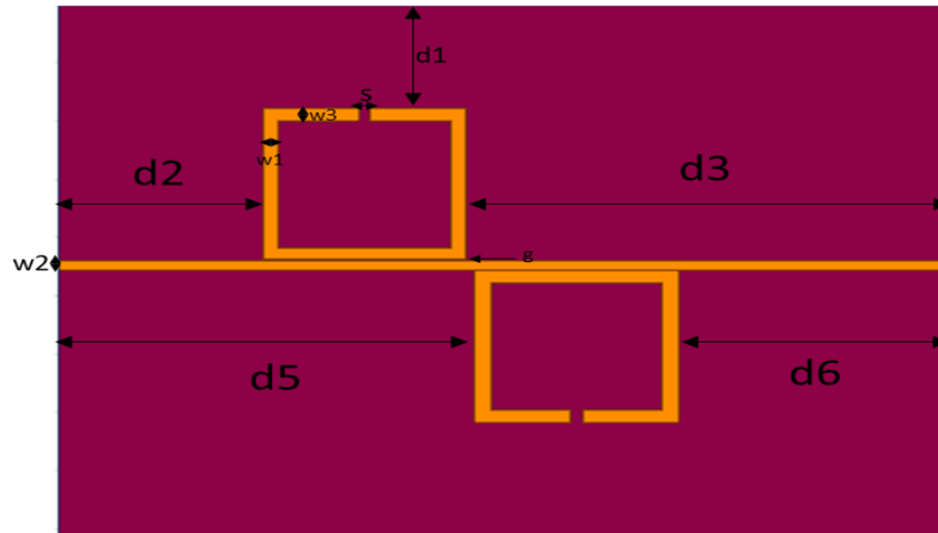


Figure IV.19. Ligne microruban+ deux résonateurs de rectangulaires inversé.

Le tableau ci-dessous présente les différentes dimensions de la structure analysée.

Tableau IV.4. Les dimensions d'une ligne microruban + 2 résonateurs rectangulaires inversé (en mm)

d2	13	d1	8.92	g	0.08
d3	30.91	w1	1	S	0.74
d5	26.6	w2	0.79		
d6	17.31	w3	1		

Les dimensions citées dans le tableau IV.4 sont utilisées pour la conception et la simulation de résonateur en HFSS.

Les résultats de la simulation des paramètres S du filtre passe-bande révèlent des performances remarquables d'un filtre passe-bande de type Tchebychev d'ordre 2, offrant une transition rapide entre bande passante et bande de réjection. La bande passante obtenue s'étend de 1,25 GHz à 1,84 GHz.

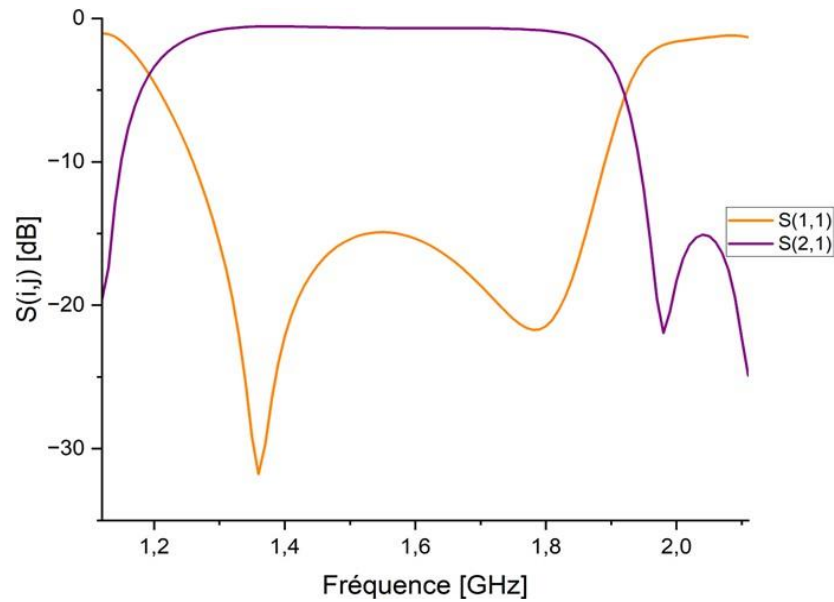


Figure IV.20. La réponse fréquentielle d’une ligne microruban+ deux résonateurs de rectangulaires inversé.

Le coefficient de réflexion S_{11} inférieur à -15 dB, atteste d’une excellente adaptation d’impédance à l’entrée du filtre, minimisant ainsi les pertes dues aux réflexions. Par ailleurs, le coefficient de transmission S_{21} maintenu autour de -0,5 dB, confirme des pertes d’insertion très faibles et donc une transmission optimale de la puissance incidente à travers la structure. Ces performances traduisent un comportement passe-bande efficace, où le filtre laisse passer la majorité de l’énergie dans la bande souhaitée tout en rejetant efficacement les fréquences hors bande. De plus, la stabilité des performances dans la bande passante démontre que la conception et l’optimisation réalisées ont permis de satisfaire pleinement les critères de transmission et de réflexion attendus pour ce type de filtre.

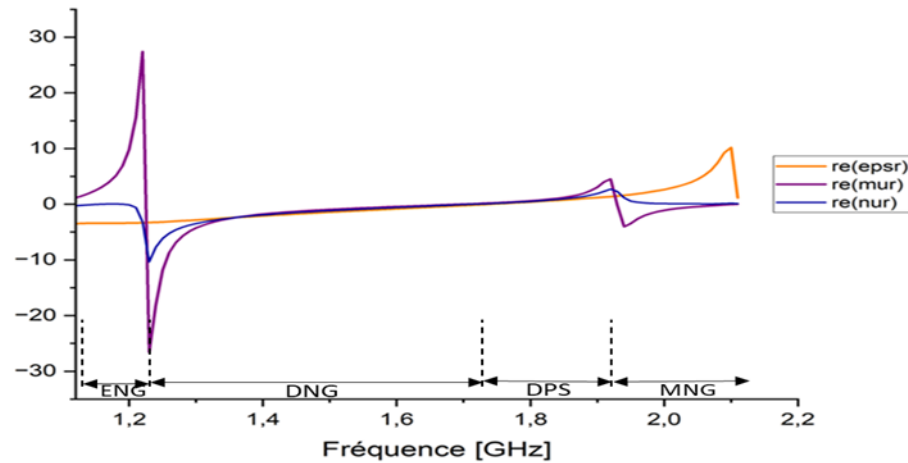


Figure IV.21. Permittivité, perméabilité et l'indice de réfraction de deux rectangles inversés.

Ce graphique met en évidence les différentes phases de réponse électromagnétique d'une même structure en fonction de la fréquence. Il confirme que le matériau étudié présente un comportement artificiel dont les propriétés varient selon la bande fréquentielle.

IV.3.6. Filtre passe bande avec trois résonateurs rectangulaires

Comme dernier travail, nous avons choisi d'ajouter un troisième résonateur à la structure initiale. Cette nouvelle configuration a été simulée, mais sans optimisation de sa réponse électromagnétique.

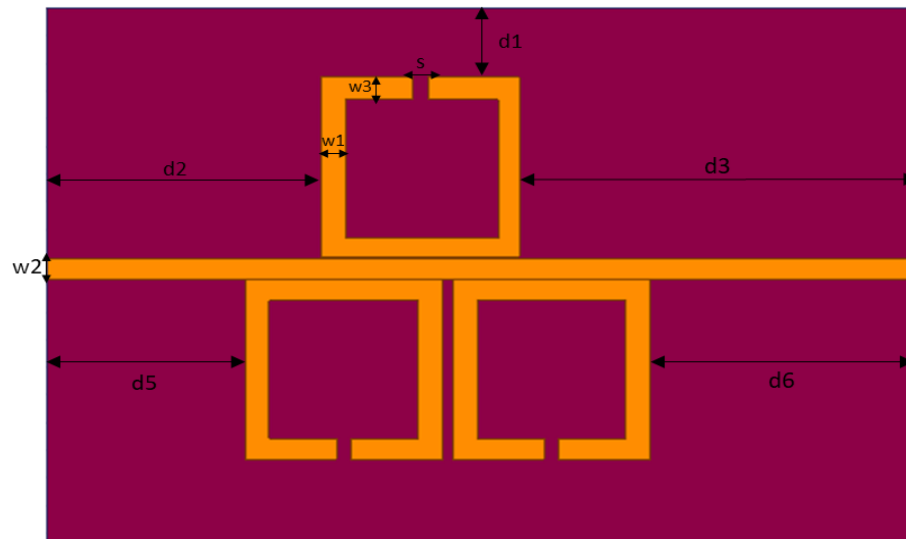


Figure IV.22. Ligne microruban + trois résonateurs de rectangulaires.

L'ajout d'un troisième résonateur dans le système permet d'introduire des paramètres supplémentaires, menant à des résultats expérimentaux significatifs.

Tableau IV.5. Les dimensions de la ligne+ trois résonateurs de rectangulaires

d2	18.01	d1	5	s	0.64
d3	26.03	w1	1.6		
d5	13	w2	1.5		
d6	17.4	w3	1.49		

Les dimensions citées dans le tableau IV.5 sont utilisées pour la conception et la simulation de résonateur en HFSS.

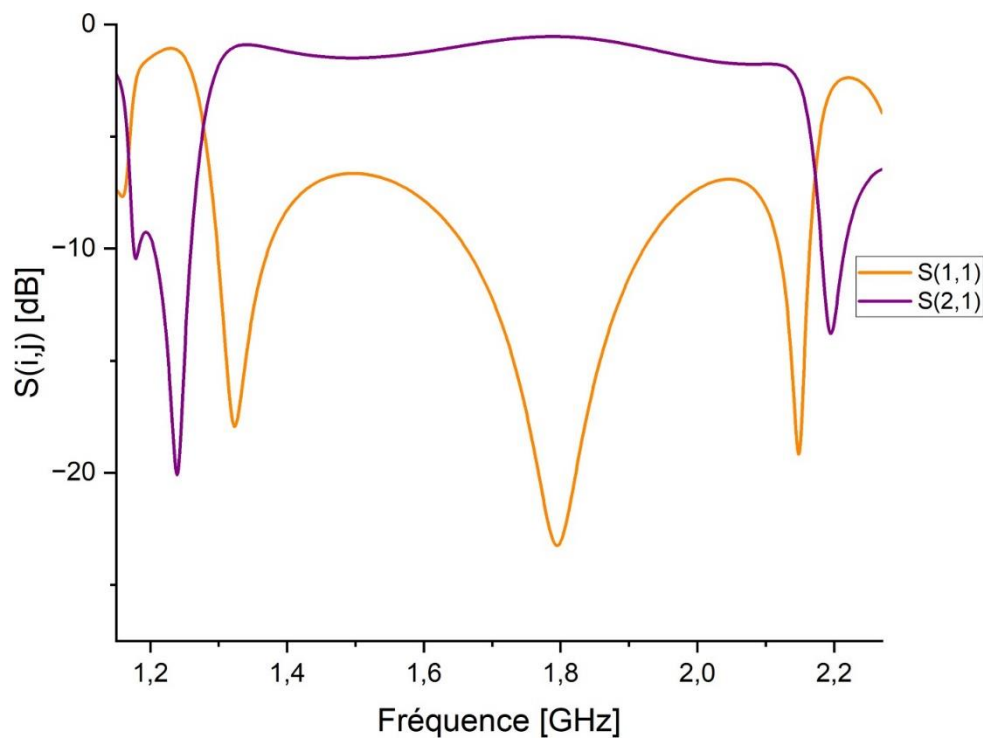


Figure IV.23. La réponse fréquentielle d'une ligne microruban + trois résonateurs en rectangulaires.

Les résultats obtenus mettent en évidence un comportement de filtre passe-bande type Tchebychev d'ordre 3. Cependant, la réponse en fréquence observée ne satisfait pas pleinement les objectifs de performance visés. Bien que l'ajout du troisième résonateur ait permis un élargissement de la bande passante, la sélectivité et les pertes d'insertion peuvent encore être optimisées. En raison des contraintes de temps, une optimisation approfondie de la structure n'a pas pu être menée à terme. Ce travail constitue donc une base prometteuse pour des recherches futures, en vue d'une amélioration des performances du dispositif.

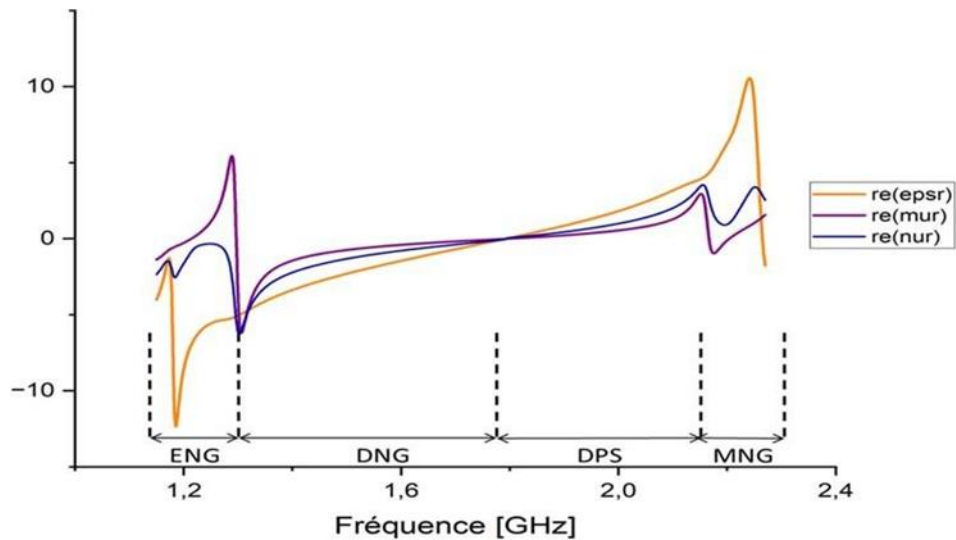


Figure IV.24. Permittivité, perméabilité et l'indice de réfraction de trois rectangles de type SRR.

La structure manifeste un comportement typique de métamatériau multi-bande, en traversant successivement plusieurs régimes : ENG (matériau à permittivité négative), DNG (indice de réfraction négatif), DPS (matériau à double positivité), puis MNG (matériau à perméabilité négative). Cette progression atteste non seulement du caractère artificiel de la structure, mais aussi de sa capacité à reproduire des comportements électromagnétiques absents dans les matériaux naturels.

IV.4. Conclusion

Ce chapitre a permis de mener une analyse approfondie sur la modélisation, la simulation et l'optimisation de structures de filtres micro-ondes intégrant des résonateurs de type métamatériau. En utilisant le logiciel HFSS d'Ansys, plusieurs configurations ont été testées, allant de la ligne microruban simple à des structures plus complexes avec un, deux, puis trois

résonateurs en forme rectangle. Chaque configuration a été étudiée en termes de réponse fréquentielle, de comportement résonant, de paramètres S, et d'extraction des propriétés électromagnétiques (permittivité, perméabilité et indice de réfraction effectif).

Les résultats ont révélé que les structures métamatériaux peuvent adopter plusieurs comportements (DPS, ENG, MNG, DNG) selon la fréquence, confirmant leur nature artificielle et leur flexibilité. Le filtre avec deux résonateurs inversés s'est montré particulièrement performant, réalisant une transmission efficace dans une large bande passante. L'ajout d'un troisième résonateur a permis un enrichissement de la réponse, bien que l'optimisation complète n'ait pas pu être réalisée par manque de temps.

Cette étude pose ainsi les bases d'une intégration future de ces structures dans des dispositifs micro-ondes compacts, adaptatifs et à hautes performances, tout en ouvrant la voie à de nouveaux axes de recherche autour de la miniaturisation, de la sélectivité et de l'exploitation des régimes de résonance multiples.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Ce mémoire a porté sur la conception et l'amélioration de dispositifs micro-ondes utilisant des résonateurs métamatériaux, un sujet au cœur des avancées technologiques actuelles dans des domaines tels que les télécommunications, les radars, les capteurs et d'autres systèmes fonctionnant à haute fréquence. L'objectif principal de cette étude était d'analyser l'impact de l'intégration de structures métamatériaux, caractérisées par des propriétés électromagnétiques singulières notamment une permittivité et/ou une perméabilité négative sur les performances des circuits micro-ondes. Cette intégration vise à optimiser plusieurs aspects clés des dispositifs, en particulier leur miniaturisation, leur sélectivité en fréquence et leur efficacité dans des plages spectrales ciblées.

Les travaux de recherche menés dans le cadre de cette mémoire ont porté sur l'étude et la simulation des filtres microruban basé sur des résonateur métamatériaux.

Dans le premier chapitre, un aperçu des principales lignes de transmission a été présenté, mettant en lumière leurs avantages respectifs ainsi que leurs domaines d'application. Une attention particulière a ensuite été portée aux circuits planaires, notamment à la ligne microruban, dont les caractéristiques ont été analysées en détail afin de souligner son intérêt pour les dispositifs micro-ondes modernes.

Dans le deuxième chapitre, nous avons exploré le domaine fascinant des métamatériaux, des structures artificielles dotées de propriétés électromagnétiques extraordinaires que l'on ne retrouve pas dans les matériaux naturels. Ce chapitre a présenté leur classification, leurs principes physiques fondamentaux, ainsi que les mécanismes à l'origine de leurs comportements uniques. Une attention particulière a été accordée aux structures basées sur les résonateurs SRR (Split Ring Resonator) et CSRR (Complementary Split Ring Resonator), en mettant en évidence leurs applications potentielles dans divers domaines, tels que les filtres sélectifs, les antennes miniaturisées, ou encore les dispositifs à réfraction négative.

Le troisième chapitre a été consacré à une étude approfondie des filtres en traitement du signal, en présentant de manière structurée leurs différentes catégories : filtres passe-bas, passe-haut, passe-bande et coupe-bande. Les caractéristiques de leurs réponses fréquentielles ont été analysées, avec un accent particulier sur les profils Butterworth, Chebyshev et elliptique, chacun offrant un compromis spécifique entre sélectivité, atténuation et

ondulation. Ce chapitre a également abordé les techniques de transformation de filtres, permettant de dériver diverses configurations à partir de prototypes passe-bas normalisés. Ces concepts fondamentaux forment une base théorique solide pour comprendre les mécanismes du filtrage en général, que ce soit dans les systèmes analogiques, numériques ou à haute fréquence, et constituent un prérequis indispensable à toute conception de filtre efficace.

Le dernier chapitre de ce mémoire a constitué la phase finale de notre travail, dédiée à la conception, la simulation et l'optimisation de filtres micro-ondes à base de lignes microrubans intégrant des résonateurs métamatériaux en forme rectangle. L'objectif était d'évaluer l'impact de ces structures artificielles sur la réponse fréquentielle des dispositifs et de démontrer leur potentiel en matière de miniaturisation, de sélectivité et d'adaptabilité aux exigences des systèmes à haute fréquence.

Les différentes configurations ont été modélisées à l'aide du simulateur électromagnétique HFSS (High Frequency Structure Simulator) et analysées sur deux plages de fréquences distinctes : [1,75 GHz – 2,5 GHz] et [1,15 GHz – 2,27 GHz]. Les résultats de simulation ont ensuite été post-traités à l'aide du logiciel Origin, afin de faciliter l'analyse comparative des performances des structures étudiées.

Dans la première bande de fréquence, plusieurs variantes ont été simulées. L'introduction d'un unique résonateur en forme rectangle a généré un filtre coupe-bande centré sur sa fréquence de résonance. L'ajout d'un second résonateur a permis d'élargir la bande de réjection, produisant un comportement de type coupe-bande à large bande. Ces résultats ont démontré que l'augmentation du nombre de résonateurs améliore la sélectivité du filtre et étend la plage de fréquences rejetées.

Dans la seconde bande, l'étude s'est orientée vers des configurations plus complexes. En conservant la même géométrie mais en élargissant la bande d'étude, la structure a montré un comportement passe-bande. Une légère variation du paramètre de couplage a conduit à une réponse coupe-bande plus marquée, confirmant la sensibilité de la structure aux paramètres géométriques. L'inversion des deux résonateurs a ensuite permis d'améliorer considérablement la transmission dans la bande passante, donnant lieu à une réponse passe-bande optimisée. Enfin, l'ajout d'un troisième résonateur a stabilisé la réponse globale du filtre et renforcé sa sélectivité, bien que des optimisations supplémentaires restent envisageables.

Les analyses réalisées à partir des paramètres S (S_{11} et S_{21}) ont permis d'évaluer la réflexion, la transmission, les pertes d'insertion et la qualité de la bande passante. Elles ont confirmé que les résonateurs métamatériaux en forme rectangulaire permettent un contrôle précis et efficace de la réponse fréquentielle. Une variation minimale de la géométrie peut suffire à faire basculer la structure d'un comportement coupe-bande à un comportement passe-bande, illustrant la flexibilité mais aussi la complexité de la conception de ces dispositifs.

Par ailleurs, l'extraction des propriétés électromagnétiques (permittivité, perméabilité et indice de réfraction) a montré que ces structures sont capables de simuler différents types de milieux : matériaux à permittivité négative (ENG), à perméabilité négative (MNG), à double négativité (DNG) et à double positivité (DPS). Cette capacité à passer d'un régime à un autre selon la fréquence confirme la nature artificielle et multi-bande des métamatériaux étudiés.

En conclusion, ce travail a démontré que l'association de lignes microrubans et de structures métamatériaux bien conçues permet de concevoir des filtres micro-ondes innovants, compacts et performants. Ces filtres présentent des réponses en fréquence ajustables, adaptées aux systèmes de télécommunication modernes qui exigent des composants miniaturisés, sélectifs, multifonctionnels et économes en énergie. Ce type de conception offre ainsi une voie prometteuse pour le développement de dispositifs à haute performance dans des domaines variés tels que les radars, les capteurs, ou encore les systèmes de détection et de traitement de signaux à haute fréquence.

Perspectives

À la lumière de ces résultats encourageants, plusieurs pistes de travail peuvent être envisagées :

1. Approfondir l'optimisation des configurations étudiées, notamment celles à trois résonateurs, en ajustant les paramètres géométriques et de couplage pour améliorer la sélectivité, la stabilité et réduire les pertes d'insertion.
2. Exploration de nouvelles formes de résonateurs (spirales, structures en S, topologies fractales, etc.) afin d'élargir la bande passante ou d'atteindre des réponses multifréquences.

3. Une validation croisée des résultats obtenus avec d'autres logiciels de simulation électromagnétique (tels que CST Microwave Studio, ADS ou COMSOL) permettrait de confirmer la cohérence des performances simulées et de renforcer la fiabilité du modèle.
4. Intégration de composants actifs ou reconfigurables (diodes varicap, MEMS) pour concevoir des filtres dynamiques, capables de s'adapter à plusieurs bandes selon l'application.
5. Utilisation de métamatériaux pour d'autres dispositifs RF comme les antennes à gain élevé, réseaux d'antennes intelligentes ou circuits multibandes.
6. Il serait pertinent de réaliser la fabrication expérimentale des structures simulées, suivie de mesures à l'aide d'un analyseur de réseau vectoriel, afin de comparer les résultats réels avec ceux issus de la simulation et d'évaluer les écarts éventuels.

References Bibliographiques

Références Bibliographiques

- [1] A. Louaar et M. Korichi, “Conception et analyse d’une cellule métamatériau pour les applications RFID”, mémoire de Master, Université Kasdi Merbah, Ouargla, Algérie, 2021.
- [2] D. I. Khelil et I. Mendjel, “Étude et analyse d’une antenne MIMO 4×4 à deux bandes rejetées pour les applications ULB,” mémoire de Master, Université 8 Mai 1945, Guelma, Algérie, 2024.
- [3] E. Atia et A. E. Williams, “Narrow-band waveguide filters ”, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 20, no 4, pp. 258–265, avril 1972.
- [4] M. Barbuto, A. Monti, F. Bilotti, and A. Toscano, “Metamaterials-based RF microsystems for telecommunication applications”, Microsyst. Nanoeng., vol. 11, no. 1, p. 2, Jan. 2025.
- [5] P. M. Martin, G. Tanné, É. Rius, D. L. Berre, and J.-F. Favennec, “Travaux pratiques supports de transmission en hyperfréquence : synthèse, réalisation et mesure d’un filtre passe-bas en technologie microruban,” J3eA, vol. 4, no. 021, 2005.
- [6] P.-F. Combes, Micro-ondes : lignes, guides et cavités – cours et exercices, 2e éd., Paris : Dunod, coll. Sciences Sup, 2007.
- [7] M. TELACHE, “Modélisation et caractérisation des circuits micro-ondes : application aux discontinuités et antennes planaires”, thèse de Doctorat, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene, Alger, Algérie, 2008.
- [8] S. Mekhancha, “Contribution à l’étude et à la synthèse d’antennes intelligentes : applications aux communications mobiles”, mémoire de Master, Université 8 Mai 1945, Guelma, Algérie, 2012.
- [9] S.N. Nomenjanahary André, “Ligne de transmission analogique et détection de la sonnerie d’appel”, mémoire de Master, Université d’Antananarivo, Antananarivo, Madagascar, 2006.
- [10] Jean-Guy Lionel G. Tremblay, “Les autoroutes de l’information : Un produit de la convergence” mémoire de Master, Université du Québec, Québec, Canada, 1995.
- [11] D.Seret, “Architecture des réseaux : les transmissions et les supports”, 2e éd. Paris : Pearson France, 2009.
- [12] I. R. Bouazza et M. Mokhtari, “Étude et analyse des guides d’onde à base de métamatériaux anisotropes”, mémoire de Master, Université Kasdi Merbah, Ouargla, Algérie, 2021.
- [13] T. Ditchi, “Lignes de transmission”, support de cours, Sorbonne Université, Paris, France, octobre 2023.
- [14] M. A. Bousmaha, “Analyse et Conception de Nouvelles Structures de Filtres Larges Bandes

- pour des Applications en Télécommunications”, mémoire de Master, Université Abou Bakr Belkaid, Tlemcen, Algérie, 2011.
- [15] K. Saadi, “Modélisation électromagnétique des lignes de transmission”, mémoire de Master, Université Saad Dahlab, Blida, Algérie, 2020.
- [16] N. Dermouchi et F. Bouabdallah, “Conception et la caractérisation des filtres en technologie microruban”, mémoire de Master, École Nationale Supérieure des Technologies Avancées, Algérie, 2024.
- [17] Joël Redoutey, Calcul et applications des lignes microstrip, document PDF, [en ligne], disponible sur : <https://f6csx.free.fr/techni/LIGNES%20MICROSTRIP.pdf>.
- [18] J.S. Hong et M. J. Lancaster, “Microstrip Filters for RF/Microwave Applications”, 1^{re} éd., USA: John Wiley & Sons, 2001.
- [19] M. C. Bailey et M. D. Deshpande, “Characteristic impedance of microstrip lines”, publication indépendante, 1989.
- [20] J.S.Hong, “Microstrip Filters for RF/Microwave”, 2^e éd., Canada: Wiley-Blackwell, 2011.
- [21] K. C. Gupta, R. Garg et I. J. Bahl, “Microstrip Lines and Slotlines”, Boston, MA : Artech House Publishers, 1979. ISBN 0-89006-074-6.
- [22] “Microstrip Line Calculator,” em:talk, 2006–2009. [Online]. Available: <https://www.emtalk.com>
- [23] F. Deneuville, “ Étude de la dynamique électronique des plasmas denses et tièdes par interférométrie optique ”, thèse de doctorat, Université Sciences et Technologies Bordeaux I, Bordeaux, France, 2013.
- [24] R. Ghasemi, “Métamatériaux pour l’infrarouge et applications,” thèse de Doctorat, Université Paris-Sud, Orsay, France, 2012.
- [25] S.Lannebère, “Étude théorique de métamatériaux formés de particules diélectriques résonantes dans la gamme submillimétrique”, thèse de Doctorat, Université Bordeaux 1, Bordeaux, France, 2011.
- [26] C.Caloz et T.Itoh, Electromagnetic Metamaterials: Transmission Line Theory and Microwave Applications, 1^{ère} édition. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2006.
- [27] S.Saidi, “Absorbant à métamatériau hyperfréquence pour des applications de détection”, mémoire de Master, Université Abou Bakr Belkaid, Tlemcen, Algérie, 2021.
- [28] A.Priou, Matériaux composites en électromagnétisme : Matériaux chargés, matériaux électroniques et métamatériaux, Techniques de l'Ingénieur, article E1165, 2009.
- [29] R.Arseneault, “Les métamatériaux”, Université de Moncton, Canada, 2005.

- [30] J. B. Pendry, “Negative Refraction Makes a Perfect Lens ”, Physical Review Letters, vol. 85, no. 18, pp. 3966–3969, 2000.
- [31] “Overview on metamaterial: History, types and applications”, [Online] Available: materialstoday: proceedings,2022.
- [32] T.Ghadbane, “Simulation des métamatériaux à indice de réfraction négatif ”, mémoire de Master, Université de Sétif, Algérie, 2011.
- [33] Y.Mouhoub et G.Djaballah, “Conception et réalisation de Métamatériau non linéaire pour application de capteur de liquides”, mémoire de Master, Université Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi, Bordj Bou Arreridj, Algérie, 2024.
- [34] D. R. Smith et N. Kroll, “Negative refractive index in left-handed materials ”, Physical Review Letters, vol. 85, no. 14, pp. 2933–2936, 2000.
- [35] C. R. Simovski et S. He, “Frequency range and explicit expressions for negative permittivity and permeability for an isotropic medium formed by a lattice of perfectly conducting omega particles ”, Physics Letters A, vol. 311, no. 2–3, pp. 254–263, mai 2003.
- [36] J. Huangfu, “Experimental confirmation of negative refractive index of a metamaterial composed of omega-like metallic patterns ”, Applied Physics Letters, vol. 84, no. 9, pp. 1537–1539, mars 2004.
- [37] J. D. Baena, J. Bonache, F. Martin, and T. Lopetegui, “Equivalent-circuit models for split ring resonators and complementary split-ring resonators coupled to planar transmission lines”, IEEE Trans. Microw. Theory Techn., vol. 53, no. 4, pp. 1451–1460, Apr. 2005.
- [38] N. Engheta, “Thin absorbing screens using metamaterial surfaces”, in Proc. IEEE Antennas Propag. Soc. Int. Symp., vol. 2, pp. 392–395, 2002.
- [39] Z. W. Zhang and Zhu, “Microwave & Optical”, Technol. Lett., vol. 52, n. 2, Feb. 2010.
- [40] S. Gargour, M. Gabrea, D. Bensoussan et V. Ramachandran, “ Théorie et conception des filtres analogiques”, 2^e éd., Québec : Presses de l’Université du Québec, 1993.
- [41] A. Soltani, “Conception d’un filtre volumique à base de la technologie SIW ”, Mémoire de Master, Université Dr. Tahar Moulay – Saïda, Saïda, Algérie, sept. 2014, pp. 18, 79.
- [42] A. Otmani, B. Rahali et N. Benmostefa, “Conception et optimisation d’un filtre passe-bande dans la bande Ku”, Projet de fin d’études, Université Abou Bekr Belkaid , Tlemcen, Algérie, 2018.
- [43] H. Dedieu, C. Dehollain, M. Hasler et J. Neirynck, “Filtres électriques (Traité d’Électricité, volume XIX) ”, 3^e éd., Lausanne : École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2016.
- [44] K. Filali et B. Sofiane, “ Étude et simulation d’un filtre passe-bande pour des applications

- radiofréquences”, Mémoire de Master, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, Tizi-Ouzou, Algérie, 26 sept. 2018.
- [45] Z. Kameli et K. Kebiri, “ Conception des filtres micro-ondes par différentes technologies”, Mémoire de Master, Université Abou Bekr Belkaid , Tlemcen, Algérie, 2024.
- [46] G. A. Campbell, “Electric wave-filter”, Brev. US, no. 1,227,113, p. 15, 1915
- [47] J. Zobel, “Theory and design of uniform and composite electric wave-filters”, The Bell System Technical Journal, vol. 2, no. 1, pp. 1–46, Jan. 1923.
- [48] J. Zobel, “Theory and design of uniform and composite electric wave-filters”, The Bell System Technical Journal, vol. 2, no. 1, pp. 1–46, Jan. 1923.
- [49] H. Epheser and H. Glubrecht, “Die Grundlagen der Siebschaltungstheorien und ihre Anwendungen”, Elektrische Nachrichtentechnik, vol. 17, no. 8, pp. 169–192, Aug. 1940.
- [50] C. Thomas, “Active filters: new tools for separating frequencies”, Bell Laboratories Record, vol. 49, no. 4, pp. 121–125, Apr. 1971.
- [51] K.-S. Tan and P. R. Gray, “Fully integrated analog filters using bipolar-JFET technology”, IEEE Journal of Solid-State Circuits, vol. SC-13, no. 6, pp. 814–821, Dec. 1978.
- [52] Gao Feng and Lv Bo, “Low pass filter”, patent, Mar. 12, 2014.
- [53] R. Tama, C. Summatta and S. Sonasang, “A fail-safe high-pass filter circuits with diode recovery time”, patent, Oct. 16, 2024.
- [54] J. Ramírez-Angulo, “Bandpass filters”, in Encyclopedia of RF and Microwave Engineering, Apr. 15, 2005.
- [55] G. Louvel, “Hyperfrequency band-cut filter”, patent, Jan. 24, 1975
- [56] S. Seghier , “Caractérisation de nouvelles structures de filtres micro-ondes pour des applications en télécommunications”, Thèse de doctorat, Université Abou Bakr Belkaid, Tlemcen, Algérie, 2013, p. 10.
- [57] A. Otmani, “Les métamatériaux dans les circuits et systèmes à base de technologie SIW : application aux filtres chargés par des résonateurs”, Thèse de doctorat, Université Abou Bakr Belkaid , Tlemcen, Algérie, 13 juin 2021, p. 8.
- [58] S. Atoui, “ Mise en forme des signaux (tension – courant) + onduleur pour la commande d’une machine asynchrone”, Mémoire de Master, Université Mohamed Khider , Biskra, Algérie, 4 juin 2014.
- [59] K. Bencherif, “ Caractérisation des filtres microruban à couplage capacitif et/ou parallèle par une formulation en ondes transverses”, Mémoire de Master, Université Hadj Lakhdar, Batna,

Algérie, 9 mars 2015.

- [60] A. Bouaziz et B. Ferkha, “ Synthèse des filtres de Tchebychev”, Mémoire de Master , option microélectronique, Université de Jijel, Jijel, Algérie, 2020/2021
- [61] S. Winder, “Analog and Digital Filter Design”, 2nd ed. Oxford, UK: Newnes, 2002.
- [62] R. Hajj, “Conception et réalisation de fonctions de filtrage dans les domaines millimétriques et submillimétriques”, Thèse de doctorat, Université de Limoges, Limoges, France, 13 juillet 2010.
- [63] V. Crnojević-Bengin, “Advances in Multi-Band Microstrip Filters”, EuMA High Frequency Technologies Series. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2015.
- [64] M. Kamel, “Techniques de mesure hyperfréquences large bande appliquées aux matériaux hétérogènes solide”s, Mémoire de Master, option Instrumentation, Université Ferhat Abbas, Sétif, Algérie, 2012.
- [65] OriginLab, Origin User Guide, [En ligne]. Disponible : <https://www.originlab.com> [Consulté en 2016].

Résumé

Les avancées technologiques dans le domaine des télécommunications s'orientent, depuis plusieurs années, vers la miniaturisation des dispositifs, la réduction des coûts de fabrication, la diminution des pertes et l'amélioration de l'efficacité des composants haute fréquence.

Parmi les lignes de transmission planaires, la ligne microruban s'impose comme une solution largement utilisée grâce à sa facilité d'intégration, son faible encombrement et sa compatibilité avec les circuits imprimés. Cependant, ses performances peuvent être limitées dans certaines applications exigeantes.

Pour surmonter ces limitations, les métamatériaux offrent des perspectives prometteuses. Ces structures artificielles, caractérisées par des propriétés électromagnétiques inhabituelles, permettent de concevoir des dispositifs innovants capables d'atteindre des performances supérieures. En particulier, l'intégration de résonateurs métamatériaux dans les filtres micro-ondes permet d'améliorer des paramètres essentiels tels que la sélectivité, la bande passante, la réjection et le facteur de qualité.

Dans ce contexte, notre travail vise à concevoir et à simuler des filtres micro-ondes basés sur la technologie microruban, en y intégrant des résonateurs métamatériaux. L'objectif est d'optimiser leurs performances électromagnétiques à l'aide du logiciel HFSS (High Frequency Structure Simulator) et d'analyser l'impact des métamatériaux sur le comportement global des dispositifs étudiés.

Mots-clés : Métamatériaux, Micro-ondes, Résonateur, Simulation électromagnétique, HFSS.

Abstract

Technological advances in the field of telecommunications have, for several years, focused on device miniaturization, reduced manufacturing costs, lower losses, and improved efficiency of high-frequency components.

Among planar transmission lines, microstrip lines are widely used due to their ease of integration, compact size, and compatibility with printed circuit boards. However, their performance may be limited in certain demanding applications.

To overcome these limitations, metamaterials offer promising prospects. These artificial structures, characterized by unusual electromagnetic properties, enable the design of innovative devices capable of achieving enhanced performance. In particular, integrating metamaterial resonators into microwave filters improves key parameters such as selectivity, bandwidth, rejection, and quality factor.

In this context, our work aims to design and simulate microwave filters based on microstrip technology, integrating metamaterial resonators. The objective is to optimize their electromagnetic performance using HFSS (High Frequency Structure Simulator) software and to analyze the impact of metamaterials on the overall behavior of the studied devices.

Keywords: Metamaterials, Microwave, Resonator, Electromagnetic Simulation, HFSS.

المخلص

تتجه التطورات التكنولوجية في مجال الاتصالات منذ عدة سنوات نحو تصغير حجم الأجهزة، وخفض تكاليف التصنيع، وتقليل الخسائر، وتحسين كفاءة المكونات عالية التردد من بين خطوط النقل المستوية، يعتبر خط الميكروشريط حلاً شائع الاستخدام بفضل سهولة دمجه وصغر حجمه وتوافقه مع الدوائر المطبوعة. ومع ذلك، قد تكون أدائه محدوداً في بعض التطبيقات الصعبة للتغلب على هذه القيود، توفر المواد الفائقة إمكانات واعدة. تسمح هذه الهياكل الاصطناعية، التي تتميز بخصائص كهرومغناطيسية غير عادية، بتصميم أجهزة مبتكرة قادرة على تحقيق أداء أعلى. على وجه الخصوص، يتيح دمج مرنانات المواد الفائقة في مرشحات الميكروويف تحسين المعلومات الأساسية مثل الانتقائية وعرض النطاق الترددي والرفض وعامل الجودة في هذا السياق، يهدف عملنا إلى تصميم ومحاكاة مرشحات الميكروويف القائمة على تقنية الشريط الدقيق، من خلال دمج مرنانات الميتاماتيريال فيها. والهدف هو تحسين أدائها الكهرومغناطيسي باستخدام برنامج (Simulator) HFSS (High Frequency Structure) وتحليل تأثير الميتاماتيريال على السلوك العام للأجهزة المدروسة. الكلمات المفتاحية: المواد الفائقة، الميكروويف، المرنان، المحاكاة الكهرومغناطيسية، HFSS.