

# Recherche Préliminaire sur les Métamatériaux et leur Utilisation dans le domaine des Radiofréquences

DOUADI Khaled, TIOU Amina  
Sorbonne Université

**Abstract**—Les métamatériaux sont des matériaux artificiels ayant des propriétés électromagnétiques non trouvées dans la nature. Cette recherche se concentre sur les métamatériaux utilisés pour manipuler la propagation des ondes électromagnétiques (EM) dans la plage des radiofréquences (RF), spécifiquement entre 100 MHz et quelques GHz. Ce document présente les concepts, les technologies de conception et les applications des métamatériaux RF.

## I. INTRODUCTION

Le terme de métamatériau a été synthétisé par Rodger M. Walser, de l'Université du Texas à Austin, en 1999, qui a été initialement défini comme des composites macroscopiques ayant une architecture cellulaire synthétique, tridimensionnelle et périodique, conçue pour produire une combinaison optimisée, non disponible dans la nature, de deux ou plusieurs réponses à des excitations spécifiques { [1], [2]}. Le métamatériau est défini comme un matériau qui acquiert ses propriétés de sa structure plutôt que directement de sa composition [2]. Les définitions ci-dessus reflètent certaines natures des métamatériaux, mais pas toutes. En fait, un métamatériau est un composite macroscopique de structure périodique ou non périodique, dont la fonction est due à la fois à l'architecture cellulaire et à la composition chimique. Si le métamatériau est considéré comme un milieu effectif, il y a une exigence supplémentaire selon laquelle la taille cellulaire est inférieure ou égale à la sous-longueur d'onde. [3].

## II. CONCEPTS DE BASE

### A. Définition et Propriétés des Métamatériaux

Les métamatériaux sont composés de structures périodiques plus petites que la longueur d'onde des ondes EM qu'ils affectent. Cela leur permet d'avoir une permittivité et une perméabilité effectives négatives, conduisant à des phénomènes tels que la réfraction négative. La relation entre l'indice de réfraction  $n$ , la permittivité  $\epsilon$  et la perméabilité  $\mu$  est donnée par :

$$n = \sqrt{\epsilon\mu} \quad (1)$$

Un matériau avec une permittivité et une perméabilité négatives présente une réfraction négative, ce qui signifie que les ondes EM se plient dans la direction opposée par rapport aux matériaux conventionnels.

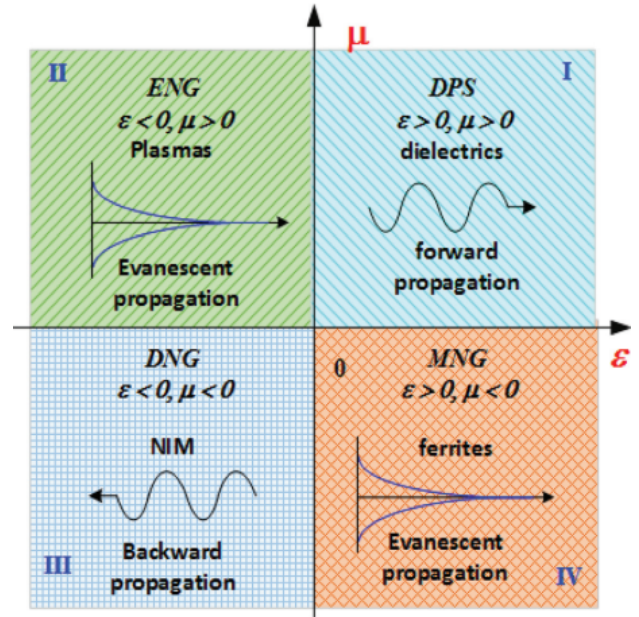


Fig. 1: classification des métamatériaux électromagnétiques basée sur les signes de  $\epsilon$  et  $\mu$ . [4]

## III. TECHNOLOGIES DE CONCEPTION

### A. Conception de Métamatériaux

La conception des métamatériaux repose sur l'ingénierie des structures sub-longueur d'onde pour obtenir les propriétés électromagnétiques souhaitées [3]. Les techniques incluent la lithographie, la fabrication additive et l'auto-assemblage

1) **Lithographie**: La lithographie est une technique de microfabrication couramment utilisée pour créer des motifs précis à l'échelle nanométrique. Elle peut être divisée en plusieurs types, tels que la photolithographie, la lithographie par faisceau d'électrons (EBL) et la nano-impression. Ces techniques permettent de fabriquer des structures complexes comme les résonateurs annulaires fendus (SRR) et les réseaux de fils métalliques, qui sont essentiels pour obtenir des propriétés de permittivité et de perméabilité négatives.

- **Photolithographie** : Utilisée pour des motifs à grande échelle, elle utilise la lumière pour transférer un motif d'un masque à une couche sensible (résist).

- **Lithographie par faisceau d'électrons (EBL)** : Permet une résolution beaucoup plus fine, jusqu'à quelques nanomètres, en utilisant un faisceau d'électrons pour dessiner directement sur la couche résist.
- **Nano-impression** : Une technique émergente qui utilise un tampon pour imprimer des motifs nanométriques sur une surface, combinant la précision de la lithographie avec des coûts de production potentiellement plus faibles.

2) *Fabrication Additive*: La fabrication additive, également connue sous le nom d'impression 3D, permet de créer des structures complexes couche par couche. Cette technique est particulièrement utile pour la fabrication de métamatériaux car elle permet une grande flexibilité de conception et la possibilité de créer des structures tridimensionnelles avec des propriétés électromagnétiques sur mesure [5].

- **Stérolithographie (SLA)** : Utilise un laser pour solidifier une résine photosensible, permettant la création de structures détaillées et complexes.
- **Frittage sélectif par laser (SLS)** : Utilise un laser pour fritter des particules de poudre, créant des structures solides couche par couche.
- **Dépôt de matière fondue (FDM)** : Dépose de la matière fondue à travers une buse pour construire des objets couche par couche, bien adapté pour des prototypes rapides.

3) *Auto-assemblage*: L'auto-assemblage est une technique où les composants individuels d'un système s'organisent spontanément en structures ordonnées sans intervention humaine directe. Cette méthode peut être utilisée pour créer des métamatériaux avec des structures complexes à l'échelle nanométrique.

- **Auto-assemblage dirigé par gabarit** : Utilise des gabarits pour guider l'auto-organisation de nanoparticules ou de molécules, permettant un contrôle précis sur la structure finale.
- **Assemblage de bloc-copolymères** : Utilise des polymères qui s'auto-assemblent en structures périodiques, pouvant être utilisées pour créer des réseaux de nanoparticules ou des motifs à l'échelle nanométrique.
- **Assemblage par capillarité** : Utilise les forces capillaires pour organiser des particules sur des surfaces, permettant la formation de structures régulières et répétitives.

#### IV. APPLICATIONS DES MÉTAMATÉRIAUX

##### Introduction

Les outils de simulation numérique, tels que la méthode des éléments finis (FEM) et la méthode des différences finies dans le domaine temporel (FDTD), sont essentiels pour modéliser et optimiser les performances des métamatériaux [6]. Ces techniques permettent de prédire les comportements complexes des métamatériaux dans diverses applications, facilitant ainsi leur développement et leur mise en œuvre dans des domaines variés.

##### A. Application dans les Antennes

Les métamatériaux ont transformé radicalement la conception des antennes en levant de nombreuses contraintes associées aux modèles traditionnels. Dotés de propriétés exceptionnelles comme la permittivité et la perméabilité négatives, ces matériaux innovent en permettant de développer des antennes aux performances accrues, caractérisées par une large bande passante, un gain supérieur, et une miniaturisation notable [4]. Ils sont particulièrement adaptés pour concevoir des antennes utilisées dans les systèmes de communication mobiles modernes, telles que les technologies 5G et les configurations MIMO, offrant ainsi une capacité et une efficacité sans précédent [7].

Par exemple, les résonateurs annulaires fendus (SRR) et les résonateurs en anneau complémetaires (CSRR) sont couramment intégrés dans les antennes pour améliorer leur efficacité et leur bande passante. Une antenne monopole chargée avec un résonateur CRLH (Composite Right/Left Handed) peut être utilisée pour des applications LTE et WiMax, offrant une miniaturisation significative tout en maintenant une large bande de fréquences opérationnelles [8].

Les antennes basées sur des métamatériaux permettent également de réaliser des dispositifs à gain élevé et à faible encombrement, essentiels pour les applications embarquées et les dispositifs portables. En ajustant les dimensions et les propriétés des métamatériaux utilisés, ces antennes peuvent être conçues pour fonctionner à des fréquences spécifiques [9].

De plus, les métamatériaux offrent la possibilité de créer des antennes à bande interdite électromagnétique (EBG), qui peuvent supprimer les interférences et améliorer la directivité et l'efficacité des antennes. Ces structures EBG sont particulièrement utiles dans les environnements à haute densité de signaux, comme les centres urbains et les installations industrielles [10]. En outre, les métamatériaux peuvent être appliqués comme substrats magnéto-dialectiques (MD) pour les antennes patch, réduisant considérablement la taille de l'antenne sans utiliser une permittivité élevée.

##### 1) Exemple:

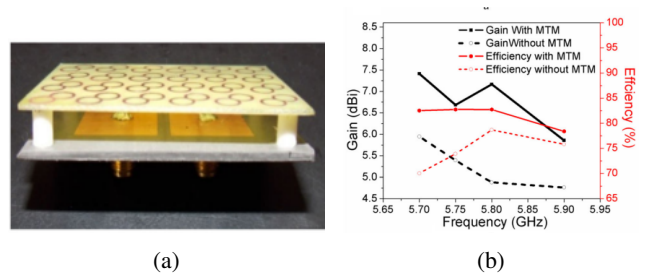


Fig. 2: a) Photographie de l'antenne fabriquée. Les paramètres de conception (en mm) :  $L = 56$ ,  $l = 38$ ,  $L_p = 18$ ,  $l_p = 16$ ,  $S = 2,2$ ,  $f = 4$  b) Gain mesuré et efficacité simulée de l'antenne avec et sans MTM. [11]

L'étude présente une amélioration significative des systèmes d'antennes MIMO en utilisant un superstrat à métamatériau

avec permittivité ( $\epsilon$ ) et perméabilité ( $\mu$ ) quasi nulles. Ce nouveau design atteint une isolation maximale de 41 dB avec une séparation bord à bord réduite de  $0,042\lambda_0$ , améliorant ainsi l'isolation de 30 dB. De plus, le gain mesuré atteint 7,41 dBi avec une efficacité supérieure à 78 %, sans altérer les caractéristiques de directivité d'origine. Cette conception offre une technique efficace pour obtenir un système MIMO à haute densité et à gain élevé, adapté aux applications WLAN, tout en maintenant une faible corrélation et une perte de capacité de canal minimale.

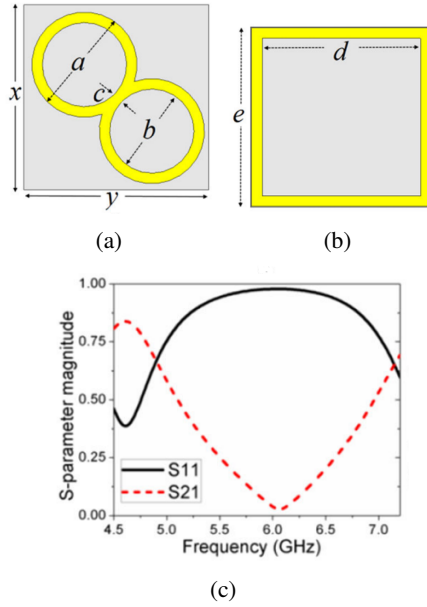


Fig. 3: Configuration géométrique de la cellule unitaire : (a) Vue de face, (b) Vue arrière, (c) Paramètre S de la cellule unitaire proposée. Les paramètres de conception (en mm) sont :  $x = 9$ ,  $y = 9$ ,  $a = 5.2$ ,  $b = 4.15$ ,  $c = 0.52$ ,  $d = 8.3$ ,  $e = 9$ . [11]

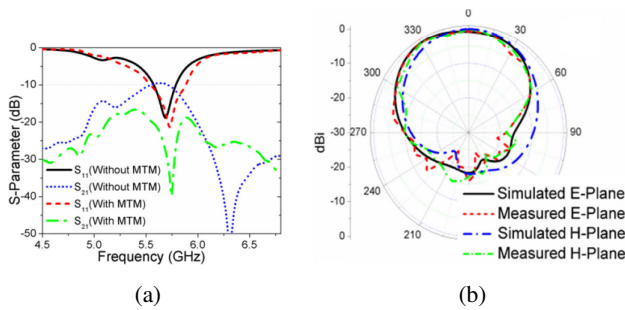


Fig. 4: a) Paramètre S simulé du MIMO avec et sans superstrat MTM. b) Diagramme de rayonnement normalisé simulé et mesuré en champ lointain de l'antenne 1 à 5,7 GHz (plan E : yz ; plan H : xz). [11]

### B. Application dans les Filtres RF

Les métamatériaux ont révolutionné la conception des filtres RF, en offrant des solutions innovantes pour les filtres

passes-bande, qu'ils soient à bande unique ou multiples. Cette avancée est rendue possible grâce à l'utilisation de guides d'onde intégrés au substrat (SIW), de polaritons de plasmon de surface simulés (SSPP), et de structures de surface déflectueuses (DSSs). Ces technologies permettent de construire des filtres compacts avec une meilleure gestion de la bande passante et une sélectivité accrue. En incorporant des résonateurs électriques-inductifs capacitifs (ELC) ajustables, cette méthode favorise la création de plusieurs filtres passe-bande, optimisant ainsi la performance dans diverses applications RF [12].

Les lignes de transmission à métamatériaux ont innové dans la conception de circuits micro-ondes planaires grâce à leur gestion avancée de la dispersion et de l'impédance. Ces technologies sont particulièrement utiles pour développer des filtres à large bande, des composants multibandes, ainsi que des tags dual-bande pour UHF-RFID et des capteurs exploitant les propriétés de symétrie des lignes équipées de résonateurs à anneaux fendus (SRR) [13].

Ces technologies innovantes de métamatériaux offrent des performances améliorées, essentielles pour les systèmes de communication modernes où la précision et la miniaturisation sont cruciales.

L'intégration des métamatériaux dans des substrats diélectriques pour les filtres offre une approche novatrice qui combine haute performance et compacité, adaptée aux applications nécessitant de petites tailles et un encombrement réduit [5].

#### 1) Exemple:

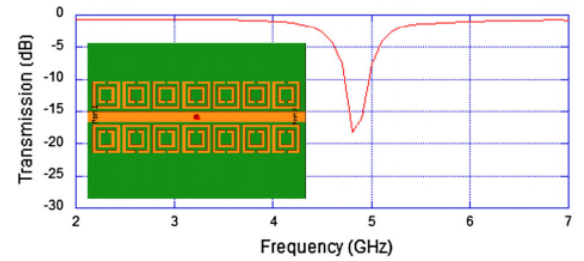


Fig. 5: Spectre de transmission d'une ligne microstrip associée à sept SRRs. [14]

L'usage stratégique de résonateurs à anneaux fendus (SRR) de tailles variées le long d'une ligne microstrip améliore la flexibilité et l'efficacité des filtres RF en élargissant leur bande d'atténuation (Fig.7c). Cette diversité de tailles permet d'adapter le filtre à un éventail plus large de fréquences de résonance (Fig.7a , Fig.7b), optimisant ainsi la réponse du filtre aux exigences spécifiques des systèmes de communication. Par ailleurs, augmenter le nombre de lignes de SRR contribue à intensifier le rejet des signaux indésirables, se traduisant par une amélioration des niveaux de réjection mesurée en décibels négatifs. Cette double approche de modulation des tailles et du nombre de SRR confère aux filtres une capacité de filtration accrue, essentielle pour les applications nécessitant une précision et une efficacité maximales.



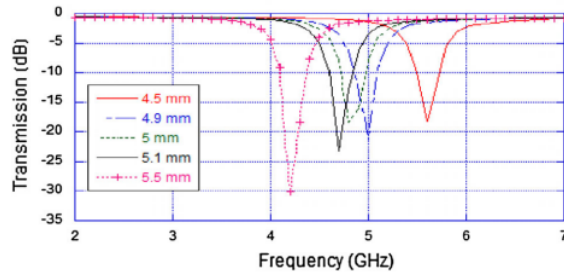


Fig. 6: Comparaison entre cinq structures de taille constante de résonateurs à anneaux fendus (SRR) de 4,5 mm à 5,5 mm de côté. [14]

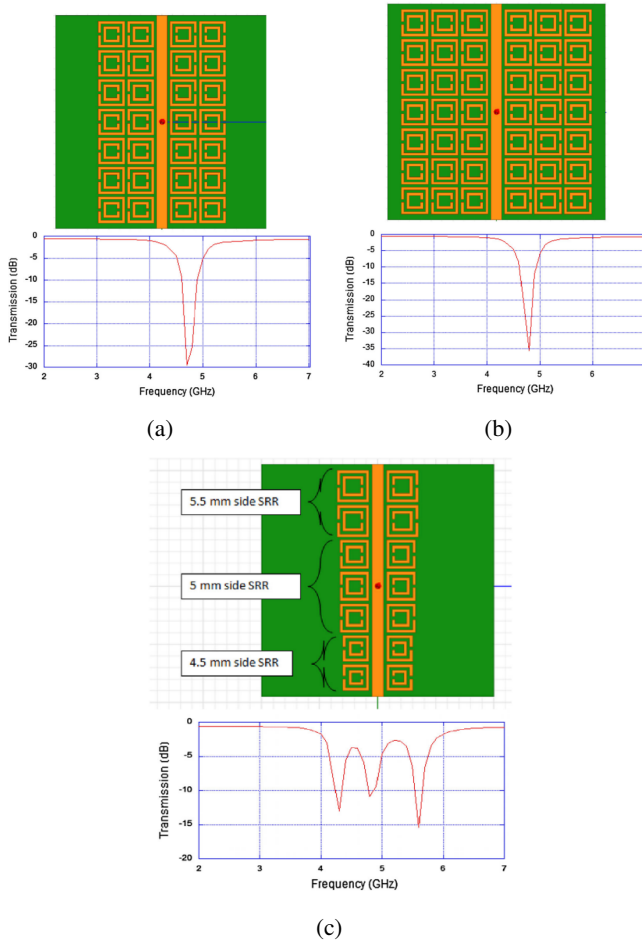


Fig. 7: a) Ligne microstrip chargée avec deux rangées de SRR de 5 mm de côté de chaque côté de la ligne. Conception du haut. En bas, spectre de transmission. b) Ligne microstrip chargée avec trois rangées de SRR de 5 mm de côté de chaque côté de la ligne. Conception du haut. En bas, spectre de transmission. c) Conception du haut de la structure avec des tailles mixtes de SRR. En bas, spectre de transmission de la ligne microstrip associée à trois rangées de SRRs : 4,5, 5 et 5,5 mm. [14]

### C. Application dans les guides ondes

Les métamatériaux révolutionnent la conception des guides d'ondes grâce à leurs propriétés électromagnétiques exceptionnelles. Ils permettent une miniaturisation significative des guides d'ondes, ce qui est cruciale dans des applications où l'espace est limité. Cette capacité à manipuler les paramètres diélectriques et magnétiques pour atteindre des perméabilités et permittivités négatives, réduit non seulement la taille mais améliore également l'efficacité des dispositifs [15].

En outre, les métamatériaux enrichissent la performance de filtrage dans les guides d'ondes, permettant la conception de filtres intégrés capables de supporter des bandes passantes larges avec une excellente sélectivité et des propriétés de rejet améliorées. Ces filtres trouvent des applications essentielles dans les secteurs des communications sans fil et des systèmes radar, où la suppression des interférences est indispensable [13].

Les propriétés avancées de propagation offertes par les métamatériaux, telles que la propagation d'ondes arrière et les perméabilités négatives transversales, ouvrent la porte à des fonctionnalités innovantes. Ces caractéristiques permettent de développer des dispositifs avec des capacités de réfraction inverse et de super-résolution, promettant des avancées dans les technologies de l'imagerie, les systèmes de communication, et même les dispositifs d'invisibilité potentiels [15].

Ces avancées technologiques, soutenues par les recherches continues dans le domaine des métamatériaux, démontrent un potentiel significatif pour transformer les systèmes de guide d'ondes, les rendant plus compacts, efficaces, et capables de répondre aux exigences croissantes des applications high-tech modernes.

## V. ÉTUDES D'AUTRE CAS ET APPLICATIONS PRATIQUES

### A. Invisibilité et Camouflage

Les métamatériaux peuvent être conçus pour créer des dispositifs d'invisibilité en guidant les ondes EM autour d'un objet. Cela a des applications potentielles dans la défense et le camouflage. [16] Une autre application passionnante des

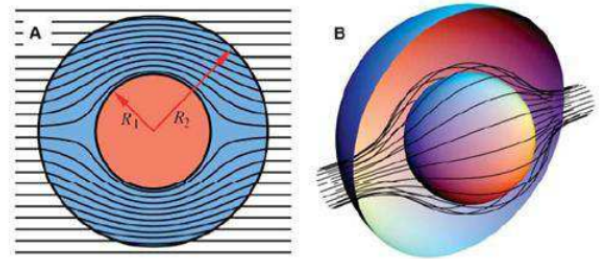


Fig. 8: Principe du Cloaking, les rayons contournent la sphère (objet) et se reconstruisent en aval, un observateur en aval ne voit pas l'objet. (a) vue 2D, (b) vue 3D [16]

métamatériaux est la cape d'invisibilité, ou "Cloaking". Cette technologie cherche à rendre un objet invisible en l'entourant de métamatériaux qui détournent la lumière ou les ondes

électromagnétiques, permettant ainsi de reconstruire les fronts d'onde après leur passage autour de l'objet. Cette avancée suscite un intérêt particulier pour les applications militaires et de furtivité [16].

### B. Superlentilles

Les superlentilles fabriquées à partir de métamatériaux permettent une résolution au-delà de la limite de diffraction, ce qui est crucial pour l'imagerie haute résolution en médecine et en science des matériaux.

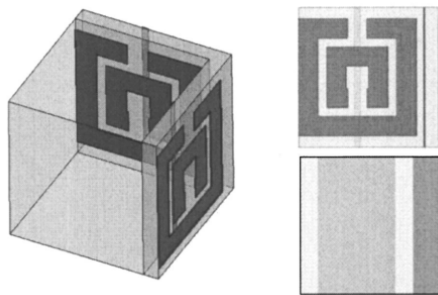


Fig. 9: Gauche: Une cellule unitaire d'un métamatériau à indice négatif. Le résonateur à anneau fendu (SRR) répond magnétiquement et le fil répond électriquement aux champs électromagnétiques. (Droite, haut) Vue en plan de la cellule unitaire. La propagation des ondes se fait de gauche à droite. (Droite, bas) Un modèle équivalent de la cellule unitaire, indiquant schématiquement qu'il s'agit d'une structure symétrique mais inhomogène. [17]

## VI. CONCLUSION

Dans cette étude, nous avons exploré l'impact des métamatériaux sur la conception de dispositifs RF, incluant les filtres, antennes, et guides d'onde. Les métamatériaux, avec leurs structures complexes et leurs propriétés électromagnétiques uniques, offrent des avancées significatives en permettant une miniaturisation, une amélioration de la bande passante et de la sélectivité. Ces matériaux transforment également la conception des antennes et des guides d'onde, augmentant l'efficacité et réduisant les interférences, ce qui est crucial pour les technologies de communication modernes. Cette recherche bibliographique met en lumière le potentiel des métamatériaux pour révolutionner l'ingénierie des radiofréquences à travers diverses applications, marquant ainsi un progrès notable dans ce domaine technologique.

## REFERENCES

- [1] W. S. Weiglhofer and A. Lakhtakia, *Introduction to Complex Mediums for Optics and Electromagnetics*. Bellingham, WA, USA: SPIE Press, 2003.
- [2] "wikipedia." [Online]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/Metamaterial>
- [3] T. J. Cui, D. Smith, and R. Liu, *Metamaterials: Theory, Design, and Applications*. Springer, 2010. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-0573-4>
- [4] T. N. Cao and W. J. Krzysztofik, "Metamaterials in application to improve antenna parameters," *IntechOpen*, 2018. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.80636>
- [5] B.-H. Lu, H.-B. Lan, and H.-Z. Liu, "Additive manufacturing frontier: 3d printing electronics," *Opto-Electronic Advances*, vol. 1, no. 1, p. 170004, 2018. [Online]. Available: <https://www.oajournal.org/article/doi/10.29026/oea.2018.170004>
- [6] C. Caloz and T. Itoh, *Electromagnetic Metamaterials: Transmission Line Theory and Microwave Applications*. Wiley, 2005, "(Table 1.1, page 10)". [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/profile/Pravesh-Belwal/post/How-to-insert-metamaterial-in-microstrip-antenna/attachment/5c381b3acfe4a764550fdcf8/AS%3A713742400618497%401547180857660/download/electromagnetic-metamaterials-transmission+line-theory+and-microwave+applications+caloz.2005.pdf>
- [7] F. C. D. R. J. D. R. W. Giampiero Lovat, Paolo Burghignoli, "A comparative study of conventional and metamaterial-based planar leaky-wave antennas for directive radiation at broadside," 2005. [Online]. Available: [https://www.researchgate.net/publication/229029220\\_A\\_comparative\\_study\\_of\\_conventional\\_and\\_metamaterial-based\\_planar\\_leaky-wave\\_antennas\\_for\\_directive\\_radiation\\_at\\_broadside](https://www.researchgate.net/publication/229029220_A_comparative_study_of_conventional_and_metamaterial-based_planar_leaky-wave_antennas_for_directive_radiation_at_broadside)
- [8] M. Lashab, M. Belattar, S. Hocine, and H. Ahmed, *Metamaterial Applications in Modern Antennas*. IntechOpen, 2018. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.108267>
- [9] M. P. M. Praveen Kumar, Tanweer Ali, "Electromagnetic metamaterials: A new paradigm of antenna design," 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3053100>
- [10] B. Virdee, "Grand challenges in metamaterial antennas," *Frontiers in Antennas and Propagation*, vol. 1, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3389/fanpr.2022.1032205>
- [11] K. M. S. D. Robert Mark, Harsh Verdhann Singh, "Mutual coupling reduction using near-zero  $\epsilon$  and  $\mu$  metamaterial-based superstrate for an mimo application," 2020. [Online]. Available: <https://ietresearch.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1049/iet-map.2019.0382>
- [12] X. B. H. S. W. Z. Liming Si, Kunlin Han, "Miniaturized bandpass metamaterials filters using hybrid plasmonic waveguide and defected surface structures," 2024. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1434841124002218>
- [13] F. Martín, "Metamaterials for wireless communications, radiofrequency identification, and sensors," *Tech. Rep.*, 2012. [Online]. Available: [https://www.researchgate.net/publication/258404624\\_Metamaterials\\_for\\_Wireless\\_Communications\\_Radiofrequency\\_Identification\\_and\\_Sensors](https://www.researchgate.net/publication/258404624_Metamaterials_for_Wireless_Communications_Radiofrequency_Identification_and_Sensors)
- [14] J. Carver, V. Reignault, and F. Gadot, "Engineering of the metamaterial-based cut-band filter," *Applied Physics A*, vol. 117, pp. 513–516, 2014. [Online]. Available: [https://www.researchgate.net/publication/266620956\\_Engineering\\_of\\_the\\_metamaterial-based\\_cut-band\\_filter](https://www.researchgate.net/publication/266620956_Engineering_of_the_metamaterial-based_cut-band_filter)
- [15] C.-T. Chiang, J.-C. Liu, Y.-C. Huang, C.-P. Kuei, Y.-S. Lee, K.-D. Yeh, and A. H.-C. Chen, "Both transversal negative permeability and backward-wave propagation in x-band waveguide with double-side srr metamaterials," *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, vol. 26, no. 3, pp. 240–246, 2016. [Online]. Available: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/mmce.20959>
- [16] B. Ouagague, "Etude théorique et expérimentale des métamatériaux et des techniques d'agilité (mems, bst) pour la conception des circuits rf miniatures et reconfigurables," 2014. [Online]. Available: <https://theses.hal.science/tel-01071682>
- [17] D. R. Smith, D. C. Vier, T. Koschny, and C. M. Soukoulis, "Electromagnetic parameter retrieval from inhomogeneous metamaterials," *Physical Review E*, vol. 71, no. 036617, 2005. [Online]. Available: <https://journals.aps.org/pre/abstract/10.1103/PhysRevE.71.036617>