

Métasurfaces pour les radômes : Camouflage de joints diélectriques
Metasurfaces for radomes: Camouflaging of dielectric seams

R. Cacocciola^{1,2}, B. Ratni¹, N. Mielec², E. Mimoun², S. N. Burokur¹

¹ LEME, UPL, Univ Paris Nanterre, F92410 Ville d'Avray, France

² Saint-Gobain Research Paris, 93300 Aubervilliers, France, riccardo.cacocciola@saint-gobain.com

Mots clés : métasurface, radôme, camouflage.

Keywords: metasurface, radome, camouflaging.

Résumé/Abstract

Une solution à base de métasurfaces est présentée pour l'amélioration des performances de structures radômes terrestres. Le problème de diffusion parasite due aux joints à forte permittivité de radôme est traité en intégrant des métasurfaces dans le volume du joint diélectrique. Une approche basée sur la théorie des lignes de transmission est utilisée pour modéliser le joint à métasurfaces afin de calculer analytiquement l'impédance de surface qui permettrait de le camoufler par rapport aux panneaux à faible permittivité du radôme. Cette impédance de surface permet par la suite de concevoir les métasurfaces. Une validation expérimentale est faite à plusieurs fréquences pour démontrer le camouflage du joint diélectrique.

A metasurface solution for the performance enhancement of ground-based radome structures is presented. The problem of parasitic scattering of high-permittivity radome seams is addressed by integrating carefully designed metasurfaces within the dielectric seam's volume. An approach based on transmission line theory is used to model the metasurface-tuned seam to analytically calculate the surface impedance required to camouflage it with respect to low-permittivity panels of the radome. This surface impedance then allows to design the metasurfaces. An experimental validation is performed at several frequencies to demonstrate the camouflaging of the dielectric seam.

1 Introduction

L'utilisation de joints mécaniques est souvent nécessaire pour la réalisation de systèmes radiofréquences (RF). A permittivité élevée et rarement optimisées à la fréquence d'utilisation, ces pièces mécaniques peuvent avoir un impact négatif sur la performance RF du système. Ce problème est rencontré, par exemple, dans les radômes de grande taille, réalisés à partir de panneaux diélectriques transparents au rayonnement électromagnétique (EM). La présence de joints à forte permittivité réduit la transparence du radôme et induit des effets de diffusion parasites, visibles dans les diagrammes de rayonnement d'une antenne illuminant le radôme [1]. La suppression de cet effet parasite permet de fortement améliorer les performances RF du radôme.

Les métasurfaces sont des structures composites électriquement fines constituées d'une répétition de cellules unitaires, appelées méta-atomes, dont les paramètres géométriques sont contrôlés afin de manipuler le comportement d'un rayonnement EM incident et ainsi être exploitées dans une large gamme d'applications [2-4]. Depuis le début des années 2000, de nombreux exemples de métasurfaces ont été présentés dans la littérature pour des applications diverses et variées, telles que la conversion de polarisation [5-6], l'holographie [7-8], l'absorption des ondes [9-11], la création d'ondes complexes [12-13] et bien d'autres [14]. Les métasurfaces jouent aussi un rôle clé dans le développement d'applications liées à l'invisibilité, la furtivité et le camouflage d'objets [15-21]. Des « manteaux d'invisibilité », consistant à envelopper l'objet à camoufler par une métasurface, sont basés sur le principe de suppression des effets de diffusion qui rendent un objet invisible à un observateur, par exemple un radar. En modélisant les paramètres géométriques du manteau à métasurface, il est possible de fortement réduire la signature radar de l'objet, en supprimant ses modes de diffusion, et ainsi le rendre indétectable et donc effectivement « invisible » à un rayonnement EM incident. Si des nombreuses validations numériques et expérimentales ont été présentées dans la littérature, une limitation importante de ses

manteaux d'invisibilité réside dans la taille sub-longueur d'onde de l'objet camouflé. En effet, lorsqu'un objet est électriquement grand par rapport au rayonnement incident, le nombre de modes de diffusion à supprimer augmente considérablement, ce qui implique une complication importante de la conception de la métasurface et donc une limite à sa réalisation [15]. Le développement de solutions alternatives pour le camouflage d'objets électriquement grands reste donc une problématique importante dans le domaine.

Dans cette étude, un joint à haute permittivité ($\epsilon_r = 3$) est camouflé par rapport à des panneaux à faible permittivité (ϵ_r proche de 1) en incluant dans son volume deux métasurfaces [22-24]. Le joint à métasurfaces est modélisé par des lignes de transmission et sa conception est présentée de façon détaillée. Les métasurfaces intégrées dans le joint sont traitées comme des impédances surfaciques, dont la valeur analytique est déduite à partir du coefficient de réflexion d'un panneau de référence (panneau à faible permittivité) du radôme. La conception de la cellule unitaire de la métasurface est introduite et optimisée pour plusieurs fréquences de travail. Un prototype du joint à métasurface est enfin réalisé et l'effet de camouflage est validé par des mesures en champ lointain dans le cas d'illumination normale (0°) et oblique (15° , 30° , 45°), polarisée TE (transverse électrique) et TM (transverse magnétique). Une validation expérimentale est aussi faite sur un prototype bi-bande fonctionnant à deux fréquences simultanément.

2 Conception de la métasurface

2.1 Diffusion parasitique de joints diélectriques

Lorsqu'un matériau diélectrique est soumis à un champ électromagnétique, nous observons des phénomènes de diffusion internes au matériau dus à l'interaction dipolaire de ses constituants avec le champ. La présence de courants de polarisation, au sein du matériau, engendre l'apparition d'un champ électrique additionnel se superposant au champ extérieur incident. Dans le cas des radômes, la présence de joints diélectriques, liant mécaniquement les panneaux du radôme, est visible dans le diagramme de rayonnement d'une antenne illuminant la structure à cause de ces effets de diffusion internes au joint. L'effet de diffusion localisé au niveau du joint (souvent appelé « forward scattering » du joint) perturbe le diagramme de rayonnement de l'antenne et diminue la transparence aux ondes électromagnétiques du radôme entier.

Une solution pour supprimer cet effet parasitique consiste à intégrer des structures métalliques dans le volume du joint [25-27] : en induisant des courants le long des éléments métalliques, il est en effet possible de contrebalancer les courants de polarisation et ainsi supprimer l'effet de diffusion localisé du joint. Cette technique de modification du joint par des éléments métalliques, tels que des fils ou des grilles, est connue comme du « tuning » du joint dans le domaine des radômes. Cependant, elle présente deux limitations importantes. Premièrement, la réduction de l'effet de diffusion via l'intégration d'éléments filaires métalliques est souvent limitée à un état de polarisation bien précis de l'onde EM incidente. L'effet de correction ne sera donc pas atteint de façon homogène indépendamment de la polarisation de l'onde, limitant l'efficacité de la solution. L'utilisation de grilles métalliques, au lieu de fils monodirectionnels, peut partiellement pallier ce problème. Deuxièmement, ces techniques de modifications relèvent souvent de méthodes « essai-erreur » et ne définissent pas de façon systématique une procédure à suivre pour réduire les phénomènes de diffusion du joint à une fréquence bien donnée.

Ici, nous proposons une alternative aux méthodes décrites ci-dessus, qui est basée sur l'intégration de métasurfaces dans le volume du joint de radôme. La conception des cellules unitaires de la métasurface (les méta-atomes) est déterminée de façon analytique en considérant le coefficient de réflexion d'une structure diélectrique de référence (dans notre cas, un panneau de radôme transparent aux ondes EM). La fréquence de camouflage à laquelle les effets de diffusion du joint sont réduites, est contrôlée via les paramètres géométriques des cellules unitaires de la métasurface. Un organigramme détaillant la procédure de synthèse de la métasurface et des résultats de mesure, validant l'effet de camouflage, sont présentés par la suite. Le protocole de synthèse de la métasurface est décomposé en quatre étapes, détaillées sur la Figure 1.

2.2 Modélisation et conception du joint à métasurfaces

Une vision explosée du joint à métasurfaces est représentée dans la première partie de la Figure 1. Il est composé de trois pièces de matériau diélectrique ($\epsilon_r = 3$) et de deux métasurfaces. Les méta-atomes des métasurfaces sont des motifs en cuivre imprimés sur un substrat diélectrique ayant une constante diélectrique $\epsilon_r = 2,2$. Les données, à savoir l'épaisseur finale du joint est de 27 mm et la constante diélectrique $\epsilon_r = 3$, sont conformes aux paramètres d'un joint de radôme commercial. Il est important de souligner que pour notre première fréquence de camouflage souhaitée de 10,5 GHz ($\lambda_0 = 28,5$ mm), l'épaisseur du joint est du même ordre de grandeur que la longueur d'ondes. La méthode présentée n'est donc pas limitée aux objets « électriquement petits », mais elle est aussi valable pour le camouflage d'obstacles considérés comme grands devant la longueur d'onde.

Processus de Synthèse de la Métasurface

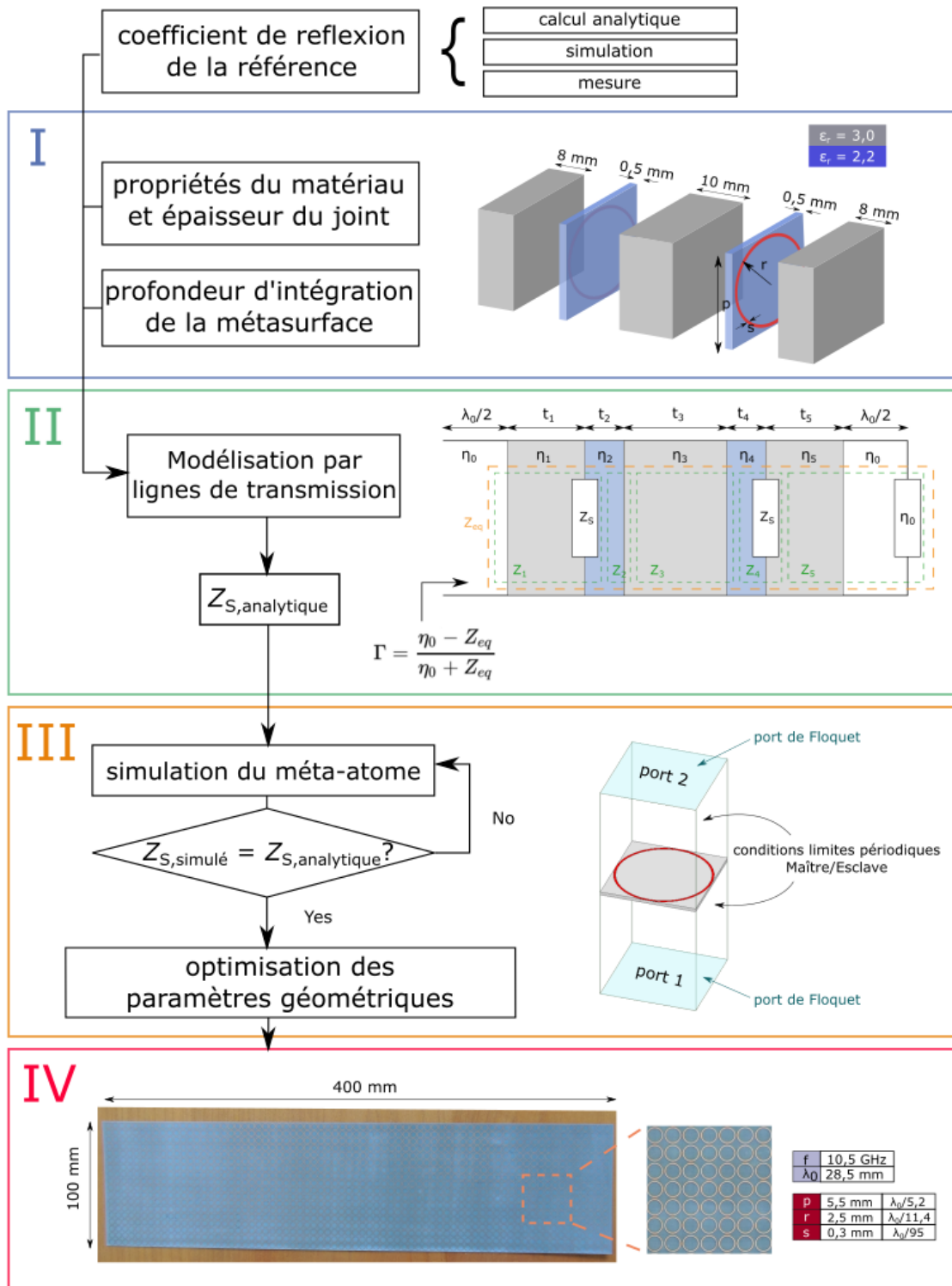


Figure 1. Organigramme de la synthèse d'une métasurface pour le camouflage d'un joint de radôme. (I) Vue éclatée du joint à métasurfaces. (II) Modélisation du joint à métasurfaces par des lignes de transmission. (III) Simulation et optimisation des paramètres géométriques du méta-atome de la métasurface. (IV) Photographie de la métasurface réalisée ; zoom sur le design de la métasurface et tableau avec les paramètres géométriques du méta-atome optimisés à 10,5 GHz.

Le joint à métasurfaces est modélisé analytiquement à l'aide de la théorie des lignes de transmission [27], comme présenté dans la deuxième partie de la Figure 1. Le modèle consiste à traiter les zones définies par les pièces diélectriques et les substrats des métasurfaces comme des lignes d'impédance Z_i et les métasurfaces comme des impédances Z_S , inconnues dans notre système d'équations. Le joint à métasurfaces peut ensuite être décrit en termes d'une impédance équivalente Z_{eq} , fonction des Z_i et des Z_S . Le coefficient de réflexion Γ à l'entrée du système peut ensuite être décrit en termes des longueurs des lignes t_i et des impédances des milieux η_i :

$$\Gamma = \frac{\eta_0 - Z_{eq}}{\eta_0 + Z_{eq}} = \Gamma_{ref} \# (1)$$

$$\text{avec } \frac{1}{Z_{eq}} = \sum_{i=1}^{i=5} \frac{1}{Z_i} \text{ où } Z_i = \begin{cases} \eta_i \frac{Z_S + j\eta_i \tan\left(\frac{2\pi}{\lambda_0} \sqrt{\epsilon_{ri}} t_i\right)}{\eta_i + jZ_S \tan\left(\frac{2\pi}{\lambda_0} \sqrt{\epsilon_{ri}} t_i\right)} & \text{for } i = 1, 4 \\ \eta_i \frac{\eta_{i+1} + j\eta_i \tan\left(\frac{2\pi}{\lambda_0} \sqrt{\epsilon_{ri}} t_i\right)}{\eta_i + j\eta_{i+1} \tan\left(\frac{2\pi}{\lambda_0} \sqrt{\epsilon_{ri}} t_i\right)} & \text{for } i = 2, 3 \\ \eta_i \frac{\eta_0 + j\eta_i \tan\left(\frac{2\pi}{\lambda_0} \sqrt{\epsilon_{ri}} t_i\right)}{\eta_i + j\eta_0 \tan\left(\frac{2\pi}{\lambda_0} \sqrt{\epsilon_{ri}} t_i\right)} & \text{for } i = 5 \end{cases}$$

A cette étape, le problème analytique peut être résolu en spécifiant la valeur du coefficient de réflexion Γ . Etant donné que notre objectif est ici de camoufler le joint à métasurfaces par rapport à son environnement, c'est à dire les panneaux reliés par le joint, nous pouvons considérer la valeur du coefficient de réflexion du panneau de référence Γ_{ref} du radôme. Ce paramètre peut être obtenu par des mesures en guide d'ondes (ou en espace libre), ou via des approches analytiques ou de simulations. Dans le cadre de cette étude, Γ_{ref} a été obtenu en mesurant en guide d'ondes un morceau du panneau de référence du radôme. Cette valeur est de $\Gamma_{ref} = -0,0576 - j0,2046$ à 10,5 GHz. Etant la seule inconnue dans l'Equation 1, l'impédance Z_S des métasurfaces peut enfin être déduite analytiquement. La valeur de $Z_S = -1,7e^{-4} - j41,8 \Omega$ est obtenue à 10,5 GHz. La partie réelle de l'impédance est ici faible et peut donc être négligée. Une fois la valeur de l'impédance Z_S déterminée, nous pouvons ensuite procéder au choix du motif de la cellule unitaire composant la métasurface.

2.3 Cellule unitaire de la métasurface

La cellule unitaire consiste en un anneau circulaire de rayon r et d'épaisseur s , périodisé avec une période p . L'impédance Z_S du méta-atome est déterminée en le simulant dans un environnement périodique avec des conditions limites Maître/Esclave, excité par des ports de Floquet, comme détaillé dans la troisième partie de la Figure 1. L'impédance peut être contrôlée en modifiant les paramètres r , s et p . Un premier jeu de paramètres de la cellule unitaire peut ainsi être déterminé en identifiant les valeurs de r , s et p tels que $Z_{S, \text{simulé}} = Z_{S, \text{analytique}}$. Les simulations ont été effectuées avec le logiciel Ansys HFSS. Ces paramètres sont ensuite optimisés en simulant la structure entière (joint avec les métasurfaces) et en étudiant la réduction de l'effet de diffusion du joint. Les paramètres géométriques de la cellule unitaire, optimisés à 10,5 GHz sont les suivants : $(p, r, s) = (5,5, 2,5, 0,3)$ mm = $(\lambda_0/5,2, \lambda_0/11,4, \lambda_0/95,2)$. La métasurface peut ensuite être réalisée par la technologie des circuits imprimés classique.

Une photographie de la métasurface est présentée dans la quatrième partie de la Figure 1. La métasurface a été réalisée par gravure chimique sur un substrat d'épaisseur 0,5 mm et de constante diélectrique 2,2. Les méta-atomes sont en cuivre. Des prototypes de joints à métasurfaces ont ensuite été réalisés en gluant des pièces de matériau diélectrique et les métasurfaces, comme présenté dans la vue explosée de la première partie de la Figure 1. A part le prototype à 10,5 GHz détaillé dans cette partie, d'autres prototypes optimisés en bande C et S, ainsi qu'un prototype bi-bande ont été réalisés. Les résultats de mesures sur le prototype à 10,5 GHz sont détaillés dans la partie 3.1. Des résultats additionnels sur les autres prototypes sont présentés dans la partie 3.2.

3 Validation expérimentale de l'effet de camouflage

3.1 Joint à métasurfaces en bande X

L'effet de camouflage est étudié en mesurant en chambre anéchoïque les diagrammes de rayonnement du prototype de joint à métasurfaces reliant deux pièces du panneau diélectrique de référence, comme schématisée sur la Figure 2a. La structure panneau/joint est placée sur un bras rotatif sur 360° et est illuminée à l'aide d'une antenne émettrice (Tx), tournant avec la structure, et d'une antenne réceptrice fixe, comme présenté dans la Figure 2b,c. L'antenne émettrice (Tx) peut aussi être tournée par rapport à la structure afin de mesurer les diagrammes de rayonnement dans le cas d'une onde incidente oblique (15°, 30° et 45°). Les diagrammes de

rayonnements dans le cas du panneau de référence ainsi que dans le cas du panneau perturbé par un joint sans métasurface ont aussi été mesurés.

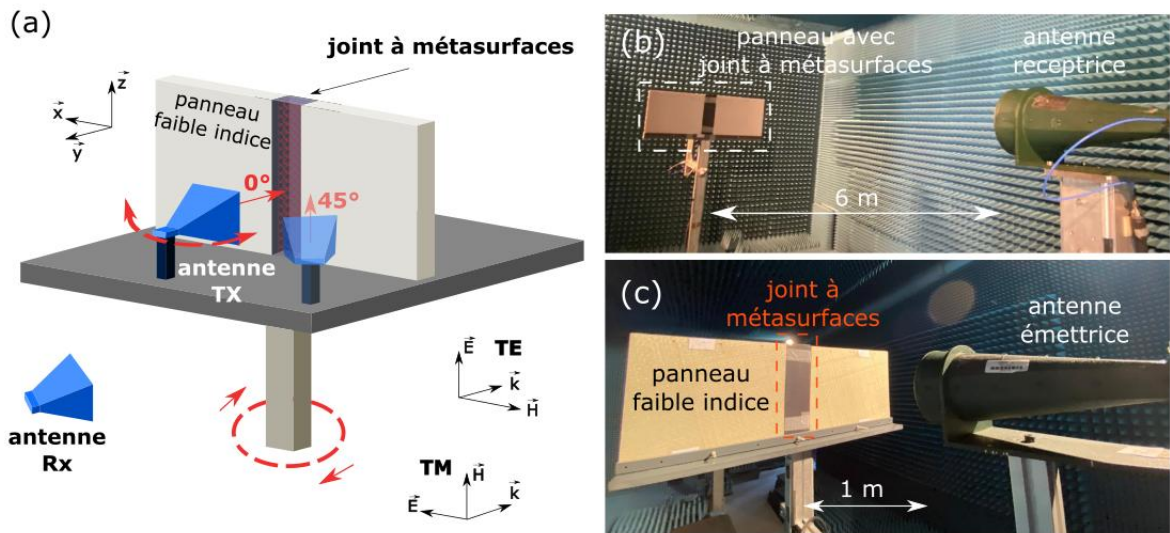


Figure 2. Schéma du banc de mesure en chambre anéchoïque comprenant le prototype de joint à métasurfaces reliant deux pièces du panneau de référence, monté sur un bras rotatif. Deux antennes (Tx et Rx) sont employées afin d'obtenir les diagrammes. (b) Photographie de l'antenne Rx et de la structure en chambre anéchoïque. (c) Photographie de l'antenne Tx placée en face de la structure étudiée.

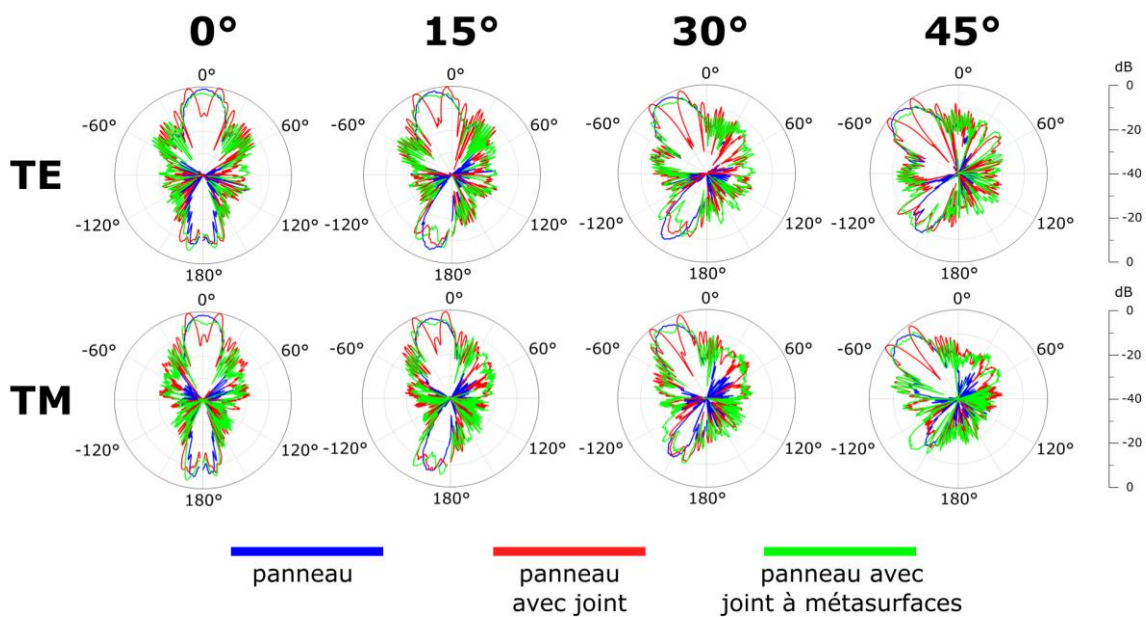


Figure 3. Diagrammes de rayonnement à 10,5 GHz du panneau de référence (bleu), du panneau perturbé par le joint sans la métasurface (rouge), du panneau relié par le joint à métasurfaces (vert) dans le cas d'une incidence normale (0°) et oblique à 15° , 30° et 45° pour une illumination polarisée TE (transverse électrique) et TM (transverse magnétique).

Les résultats de mesures dans le cas d'incidence à 0° , 15° , 30° et 45° polarisée TE et TM sont présentés sur la Figure 3. Le diagramme de rayonnement dans le cas du panneau de référence seul (courbes bleues) présente un seul lobe principal. La présence parasitique du joint est clairement visible sur les diagrammes (en rouge) sous la forme de deux lobes parasites redirigeant l'énergie vers des directions non désirées. La taille du joint étant du

même ordre de grandeur que la longueur d'onde associée à cette fréquence de 10,5 GHz perturbe fortement le rayonnement de l'antenne émettrice. Après avoir modifié le volume du joint avec les métasurfaces (traits verts), les lobes parasites sont correctement supprimés et les diagrammes se rapprochent fortement de ceux du panneau de référence. L'absence de la signature parasitique du joint après l'inclusion des métasurfaces indique la suppression de l'effet de diffusion du joint et valide expérimentalement l'effet de camouflage dans le cas d'illumination normale (0°) et oblique jusqu'à 45°, ainsi que la robustesse de l'effet aux changements de polarisation de l'onde incidente. Au-delà de 45°, la transmission à travers la métasurface est beaucoup plus faible et donc, l'effet de camouflage est nettement moindre.

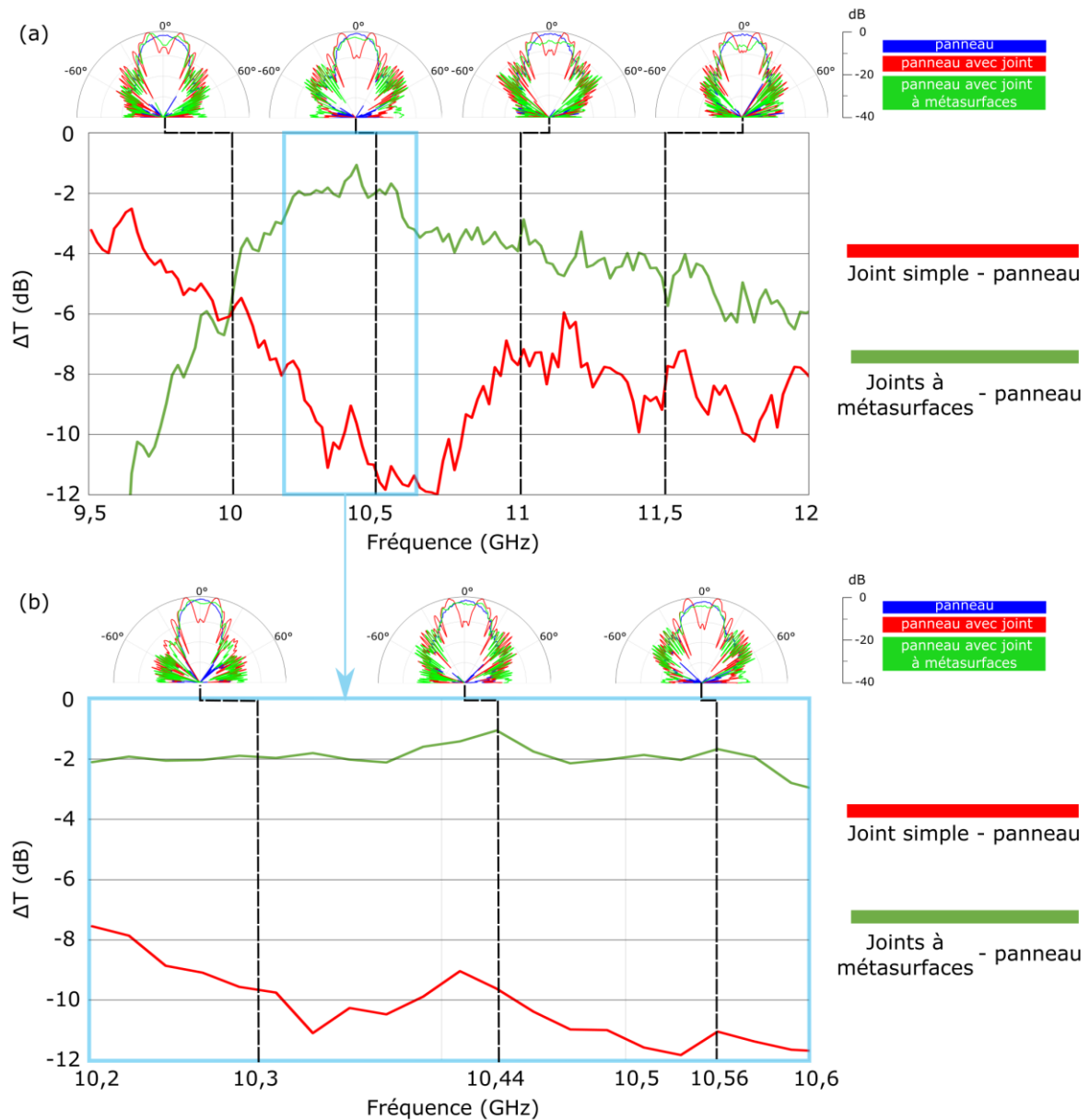


Figure 4. Pertes en transmission dans la bande de fréquences de (a) 9,5 GHz à 12 GHz et (b) 10,2 GHz à 10,6 GHz dans le cas de la transmission d'une onde EM à travers un joint simple (en rouge) et un joint à métasurfaces (en vert). Des diagrammes de rayonnement du panneau de référence (bleu), du panneau perturbé par le joint sans la métasurface (rouge), du panneau relié par le joint à métasurfaces (vert) à certaines fréquences sont aussi présentés.

En ce qui concerne la stabilité en fréquence de la suppression de l'effet parasitique (Figure 4), nous étudions la différence ΔT entre la transmission du panneau perturbé par un joint sans métasurfaces (en rouge) et avec métasurfaces (en vert) et le panneau seul dans la direction normale (0°) dans la gamme de fréquences allant de

9,5 GHz à 12 GHz dans le cas d'illumination polarisée TE. L'effet de suppression de l'effet de diffusion est optimal dans la bande de fréquences allant de 10,2 GHz à 10,6 GHz, comme clairement illustré sur la Figure 4b. En particulier, les diagrammes de la structure intégrant les métasurfaces se rapprochent considérablement de ceux du panneau de référence (sans joint). Nous pouvons ainsi définir une bande de camouflage d'environ 400 MHz (bande passante de 3,85 %) dans laquelle la perturbation du joint est supprimé et la transparence du radome est donc optimisée.

3.2 Fonctionnement bi-bande

En suivant la procédure décrit dans la partie 2, la solution de joint à métasurfaces peut facilement être transposée à d'autres bandes de fréquences. D'autres prototypes de joint à métasurfaces ont ainsi été réalisés et mesurés en bande S (2 GHz – 4 GHz) et C (4 GHz – 8 GHz). Les diagrammes de rayonnement de ces deux autres prototypes sont présentés sur la Figure 5. Il est important de souligner que le même joint et le même panneau de référence présentés dans les parties précédentes ont été utilisés pour ces mesures. En effet, la seule différence entre les différents prototypes réalisés est le motif des cellules unitaires, dont les paramètres géométriques évoluent en fonction de la fréquence de camouflage visée. Les photographies des motifs des métasurfaces et des tableaux avec les valeurs des paramètres géométriques respectifs sont présentés sur la Figure 5 pour les deux cas.

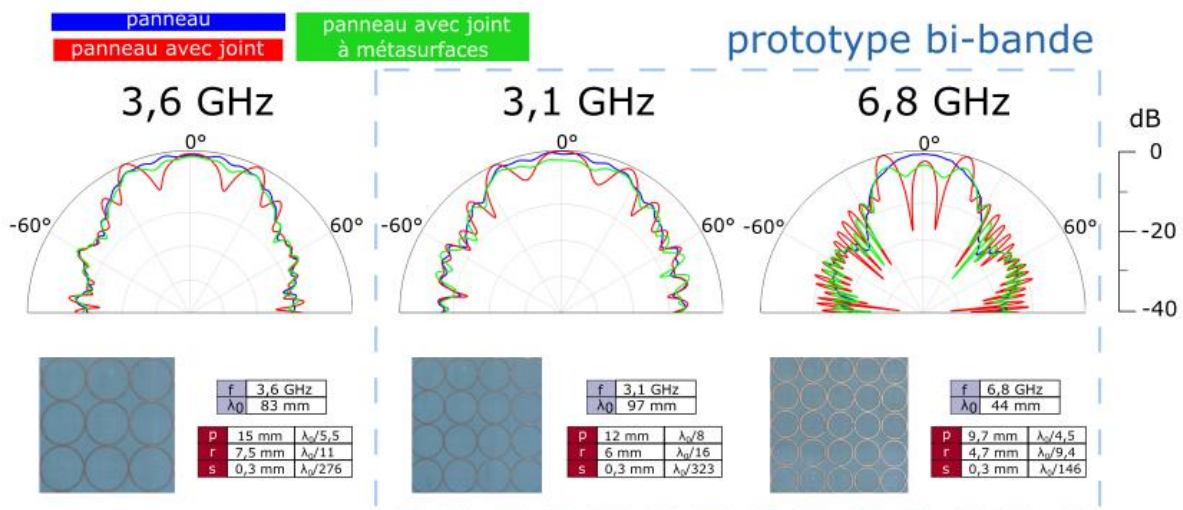


Figure 5. Diagrammes de rayonnement du panneau de référence (bleu), du panneau perturbé par le joint sans la métasurface (rouge), du panneau relié par le joint à métasurfaces (vert) dans le cas d'une incidence normale (0°) pour une illumination polarisée TM (transverse magnetic) pour un prototype de joint à métasurface à 4 GHz et un prototype bi-bande à 3,1 GHz et 6,8 GHz. Photographie des méta-atomes des métasurfaces et tableaux avec les paramètres géométriques respectifs.

Le premier prototype de joint, optimisé en bande S, est montré dans la photographie respective de la Figure 5. La métasurface utilisée comprend une seule face de motifs métalliques tout comme la solution présentée en bande X. Le deuxième prototype de joint qui doit fonctionner à deux fréquences différentes, présente des métasurfaces avec des motifs imprimés sur les deux faces (double-face). Sur chaque face, les dimensions géométriques des motifs ont été optimisées pour la fréquence souhaitée. En intégrant ces métasurfaces dans le joint, il est possible de réduire l'effet de diffusion à deux fréquences simultanément : 3,1 GHz et 6,8 GHz. Nous pouvons donc décrire cette solution comme étant bi-bande, avec l'effet de camouflage étant atteint simultanément en bandes S et C.

4 Conclusion

Dans cette travail, nous avons proposé une méthode de conception de joints avec un effet parasite moindre sur le rayonnement électromagnétique. Un joint à métasurfaces a été conçu et validé expérimentalement. L'effet de camouflage induit par les métasurfaces a été clairement illustré. En modélisant le joint à métasurfaces avec des lignes de transmission et en considérant le coefficient de réflexion d'un matériau de référence, il est possible de calculer analytiquement la valeur de l'impédance surfacique nécessaire pour camoufler le joint à forte permittivité par rapport à la référence à faible permittivité. Le motif de la cellule unitaire de la métasurface est

ensuite obtenu à partir de l'impédance surfacique calculée. L'effet de camouflage est validé avec des mesures en chambre anéchoïque dans le cas d'illuminations normale et oblique, polarisées TE et TM. La solution présentée est facilement réalisable et implémentable dans des systèmes RF, tels que les structures radômes. De plus, la solution proposée présente l'avantage de pouvoir être facilement transposable à d'autres bandes de fréquences. Un exemple de prototype bi-bande est aussi présenté et validé expérimentalement.

Références bibliographiques

- [1] R. Shavit, "Radome Electromagnetic Theory and Design", Wiley/IEEE Press, Hoboken, NJ, 2018.
- [2] C.L. Holloway, E.F. Kuester, J.A. Gordon, J. O'Hara, J. Booth, D.R. Smith, "An overview of the theory and applications of metasurfaces: The two-dimensional equivalents of metamaterials", *IEEE Antennas Propag. Mag.*, vol. 54, p.10–35, 2012.
- [3] H.-T., Chen, A.J. Taylor, N. Yu, "A review of metasurfaces: Physics and applications", *Rep. Prog. Phys.*, vol. 79, 076401, 2016.
- [4] K. Achouri, C. Caloz, "Design, concepts, and applications of electromagnetic metasurfaces", *Nanophotonics* vol. 7, 1095, 2017.
- [5] B. Ratni, A. de Lustrac, G.-P. Piau, S.N. Burokur, "Electronic control of linear-to-circular polarization conversion using a reconfigurable metasurface", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 111, 214101, 2017.
- [6] Y. Qi, B. Zhang, C. Liu, X. Deng, "Ultra-broadband polarization conversion meta-surface and its application in polarization converter and RCS reduction", *IEEE Access*, vol. 8, p. 116675–116684, 2020.
- [7] T.R. Cameron, G.V. Eleftheriades, "Analysis and characterization of a wide-angle impedance matching metasurface for dipole phased arrays", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 63, p. 3928–3938, 2015.
- [8] Y. He, G.V. Eleftheriades, "A thin double-mesh metamaterial radome for wide-angle and broadband applications at millimeter-wave frequencies", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 68, p. 2176–2185, 2020.
- [9] N.I. Landy, S. Sajuyigbe, J.J. Mock, D.R. Smith, W.J. Padilla, "Perfect metamaterial absorber", *Phys. Rev. Lett.*, vol. 100, 207402, 2008.
- [10] Y. Kato, S. Morita, H. Shiomi, A. Sanada, "Ultrathin perfect absorbers for normal incident waves using Dirac cone metasur-faces with critical external coupling", *IEEE Microw. Wirel. Compon. Lett.*, vol. 30, p. 383–386, 2020.
- [11] A. Rastgordani, Z. Ghattan Kashani, "Robust design method for metasurface high-sensitivity sensors and absorbers", *J. Opt. Soc. Am. B.*, vol. 37, p. 2006-2011, 2020.
- [12] C. Guan, Z. Wang, X. Ding, K. Zhang, B. Ratni, S.N. Burokur, M. Jin, Q. Wu, "Coding Huygens' metasurface for enhanced quality holographic imaging", *Opt. Express*, vol. 27, p. 7108–7119, 2019.
- [13] H. Ren, X. Fang, J. Jang, J. Bürger, J. Rho, S.A. Maier, "Complex-amplitude metasurface-based orbital angular momentum holography in momentum space", *Nat. Nanotechnol.*, vol. 15, p. 948–955, 2020.
- [14] G. Shang, Z. Wang, H. Li, K. Zhang, Q. Wu, S.N. Burokur, X. Ding, "Metasurface holography in the microwave regime", *Photonics*, vol. 8, 135, 2021.
- [15] R. Fleury, A. Alu, "Cloaking and invisibility: A review", *Prog. Electromagn. Res.*, vol. 147, p. 171–202, 2014.
- [16] J. Yi, P.-H. Tichit, S.N. Burokur, A. de Lustrac, "Illusion optics: Optically transforming the nature and the location of electro-magnetic emissions", *J. Appl. Phys.*, vol. 117, 084903, 2015.
- [17] A. Monti, J.C. Soric, A. Alù, A. Toscano, F. Bilotti, "Anisotropic mantle cloaks for TM and TE scattering reduction", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 63, p. 1775–1788, 2015.
- [18] Y. Guo, L. Yan, W. Pan, L. Shao, "Scattering engineering in continuously shaped metasurface: An approach for electromag-netic illusion", *Sci. Rep.*, vol. 6, 30154, 2016.
- [19] S. Vellucci, A. Monti, A. Toscano, F. Bilotti, "Scattering manipulation and camouflage of electrically small objects through metasurfaces", *Phys. Rev. Appl.*, vol. 7, 034032, 2017.
- [20] T.V. Teperik, S.N. Burokur, A. de Lustrac, G. Sabanowski, G.-P. Piau, "Experimental validation of an ultra-thin metasurface cloak for hiding a metallic obstacle from an antenna radiation at low frequencies", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 111, 054105, 2017.

- [21] P.-Y. Chen, J. Soric, A. Alù, “Invisibility and cloaking based on scattering cancellation”, *Adv. Mater.*, vol. 24, p. 281-304, 2012.
- [22] R. Cacocciola, B. Ratni, N. Mielec, E. Mimoun, S.N. Burokur, “Metasurface-tuning: A camouflaging technique for dielectric obstacles”, *J. Appl. Phys.*, vol. 129, no. 12, p. 124902, 2021.
- [23] R. Cacocciola, B. Ratni, N. Mielec, E. Mimoun, S.N. Burokur, “Camouflaging a high-index dielectric scatterer with buried metasurfaces”, *Adv. Opt. Mater.*, 10.1002/adom.202101882, in press.
- [24] R. Cacocciola, B. Ratni, N. Mielec, E. Mimoun, S. N. Burokur, “Metasurfaces for far-field radiation pattern correction of antennas under dielectric seamed-radomes”, *Materials*, vol. 15, no. 2, p. 665, 2022.
- [25] E. Michielssen, R. Mittra, “RCS reduction of dielectric cylinders using the simulated annealing approach”, *IEEE Microw. Guided Wave Lett.*, vol. 2, p.146-148, 1992.
- [26] G. Virone, R. Tascone, G. Addamo, O.A. Peverini, “A design strategy for large dielectric radome compensated joints”, *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, vol. 8, p. 546-549, 2009.
- [27] M.E., MacDonald, “An overview of radomes for large ground-based antennas.” *IEEE Aerosp. Electron. Syst. Mag.*, vol. 34, p. 36-43, 2019.