



HAL
open science

Métasurface composite pour l'excitation d'ondes de surface

Gildas Briand, André Barka, Shah Nawaz Burokur

► **To cite this version:**

Gildas Briand, André Barka, Shah Nawaz Burokur. Métasurface composite pour l'excitation d'ondes de surface. 23ème Journées Nationales Microondes, Jun 2024, Antibes Juan Les Pins, France. hal-04597019

HAL Id: hal-04597019

<https://hal.parisnanterre.fr/hal-04597019v1>

Submitted on 30 Sep 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Métasurface composite pour l'excitation d'ondes de surface

G. Briand¹, A. Barka¹, S.N. Burokur²

¹ONERA/DEMR, Université de Toulouse, France

²LEME, UPL, Univ Paris Nanterre, F92410 Ville d'Avray, France
gildas.briand@onera.fr

Résumé — Cette étude présente la conception, la réalisation et la validation expérimentale d'une métasurface composite compacte à destination d'un système radar à ondes de surface en bande HF. L'objectif est de rendre ce type de radar plus efficace en modifiant le rayonnement de l'antenne source à l'aide d'une métasurface.

1. Introduction

Les radars HF à ondes de surface constituent une solution efficace pour la surveillance maritime. En effet avec une portée théorique d'environ 400 km, ils pourraient permettre de couvrir la totalité de la Zone Économique Exclusive (ZEE), zone dans laquelle la France possède les droits d'exploitation pétrolière, minière et halieutique. En raison de l'importance stratégique de ces zones mais aussi pour prévenir les trafics illégaux et assurer un secours plus rapide aux navires en perdition, les radars HF (3 – 30 MHz) à ondes de surface sont voués à être déployés en métropole et en outre-mer. Les radars à ondes de surface sont utilisés depuis la Guerre Froide par les grandes puissances militaires mais en France les tests sur ce type de radars sont plus récents [1]. Lors de ces essais, des interférences dues à la réflexion des ondes sur l'ionosphère ont été jugées problématiques [2]. En conséquence, un métamatériau a été proposé afin de réduire la propagation en direction du ciel mais aussi dans le but d'améliorer la puissance de l'onde de surface [3, 4]. En dépit des résultats satisfaisants, cette structure reste néanmoins trop haute (3 m – $\lambda/10$ à 10 MHz) par rapport à la législation en vigueur sur le littoral français. Enfin, une métasurface plus compacte d'épaisseur 10,26 mm, correspondant à $\lambda/27$ a été proposée à 1,1 GHz [5]. Elle répond aux mêmes objectifs et a des performances comparables à la solution précédente à 10 MHz. En revanche, sa réalisation dépend d'un substrat de haute permittivité et à faibles pertes, qui reste à identifier en bande HF.

Dans cette communication, nous présentons la conception d'une métasurface composite et compacte à 1,1 GHz, un travail particulier a été effectué sur l'élaboration d'un diélectrique composite réalisable en bande HF. Avec une hauteur de structure de $\lambda/27$ (10,26 mm à 1,1 GHz) et composée de matériaux rendant la structure réalisable en HF, la métasurface proposée permettrait d'obtenir un gain de champ électrique vertical de 8 dB à 100 m selon la définition du gain spécifique à cette application donnée

dans cet article. Cette contribution est développée de la façon suivante. Dans la section 2, la conception de la métasurface composite est présentée ainsi que le prototype à l'échelle 1/100. La section 3 présente les performances simulées et mesurées en champ proche de la métasurface. Enfin, la section 4 conclut sur les résultats obtenus, mettant en évidence le rôle de la métasurface dans l'amélioration du gain de l'onde de surface.

2. Métasurface composite

2.a. Conception de la cellule unitaire

La cellule unitaire de la métasurface est composée d'un anneau métallique sur le dessus, d'un diélectrique composite composé de PTFE (téflon); d'eau distillée et enfin d'un plan de masse en dessous. Nous cherchons dans un premier temps à connaître la proportion nécessaire d'eau distillée dans le PTFE pour avoir une permittivité $\varepsilon_{\text{eff}} = 6$ sachant que $\varepsilon_{\text{ptfe}} \cong 2.1$ et $\varepsilon_{\text{eau}} \cong 78.4$. Cette valeur de permittivité de 6 a montré son efficacité pour la réalisation de la métasurface dans l'étude précédente [5]. On estime donc qu'il faudrait une fraction volumique f de 0,05 pour obtenir la permittivité effective souhaitée, soit une répartition de 5% d'eau distillée et 95% de PTFE [6], selon la loi de mélange suivante :

$$\varepsilon_{\text{effx}} = \varepsilon_{\text{effy}} = f\varepsilon_{\text{eau}} + (1 - f)\varepsilon_{\text{ptfe}} \quad (1)$$

$$\varepsilon_{\text{effz}} = \frac{\varepsilon_{\text{eau}}\varepsilon_{\text{ptfe}}}{(1 - f)\varepsilon_{\text{eau}} + f\varepsilon_{\text{ptfe}}} \quad (2)$$

Pour la métasurface, nous utilisons le motif élémentaire employé précédemment [5]. On se place dans son fonctionnement fortement inductif suivant le modèle illustré sur la Figure 1a et proposé dans [7] : L_a et C_a représentent l'inductance et la capacité équivalente de l'anneau carré, respectivement. Z_d est l'impédance équivalente du diélectrique, comme donnée par l'équation 2.45c de [8]. Le paramètre à faire varier ici est l'épaisseur du diélectrique utilisé pour la métasurface. A l'aide du modèle et de simulations électromagnétiques, une épaisseur de substrat de 10,26 mm est fixée comme dans l'étude [5]. La Figure 1b présente la réactance obtenue pour cette hauteur de diélectrique.

2.b. Conception et réalisation de la métasurface

La Figure 2a présente la cellule unitaire utilisée dans cette étude. Les dimensions géométriques optimisées sont : $d = 31,7$ mm et $g = 8,04$ mm. Pour des raisons de réalisation, un fond et un capot de PTFE servent à recevoir l'eau distillée au sein de la tranchée dans le volume de PTFE (en violet sur la Figure 2a).

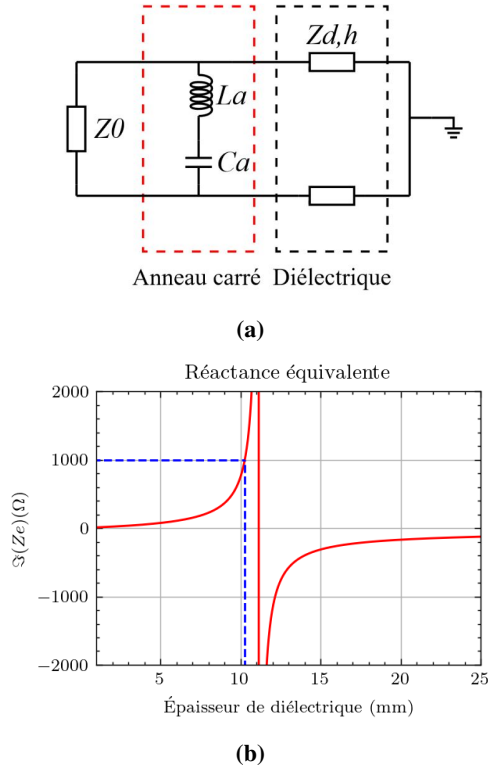


FIGURE 1. (a) Circuit électrique équivalent de la cellule unitaire. (b) Variation de la réactance de la métasurface en fonction de l'épaisseur de diélectrique.

Dans le but de rester sur une structure aux performances comparables aux travaux précédents, la métasurface est composée de 5×12 cellules unitaires. La métasurface est composée de deux parties : un diélectrique F4BM220 de permittivité $\epsilon_r = 2,2$ et de pertes tangentielles $\tan\delta = 0,0002$ sur lequel sont imprimés les motifs en cuivre; d'une plaque de téflon PTFE de permittivité $\epsilon_r = 2,1$ et de pertes tangentielles $\tan\delta = 0,0002$. Un contour mécanique en PTFE et un joint silicone ont été ajoutés pour maintenir l'eau dans les tranchées usinées. De même, des vis nylon permettent de visser le diélectrique sur la plaque de PTFE, comme illustré sur la Figure 2b.

3. Performances et mesures de la métasurface

3.a. Gain espéré avec la métasurface

L'objectif de la métasurface est d'augmenter la composante verticale E_z du champ électrique en face de la métasurface et au niveau du sol. Nous utilisons une antenne

monopole quart-d'onde pour exciter un champ électrique vertical. Son adaptation simulée en fonction de la fréquence est présentée sur la Figure 3a. Les performances de la métasurface sont évaluées par comparaison des champs électriques environnant l'antenne avec et sans la métasurface. Les simulations électromagnétiques sont conduites en utilisant les solveurs fréquentiels et temporels du logiciel CST Microwave Studio. Le monopole est alimenté par un port discret d'impédance 50Ω . Les conditions aux limites appliquées autour de la structure simulée sont de type ouvertes (Open Boundaries).

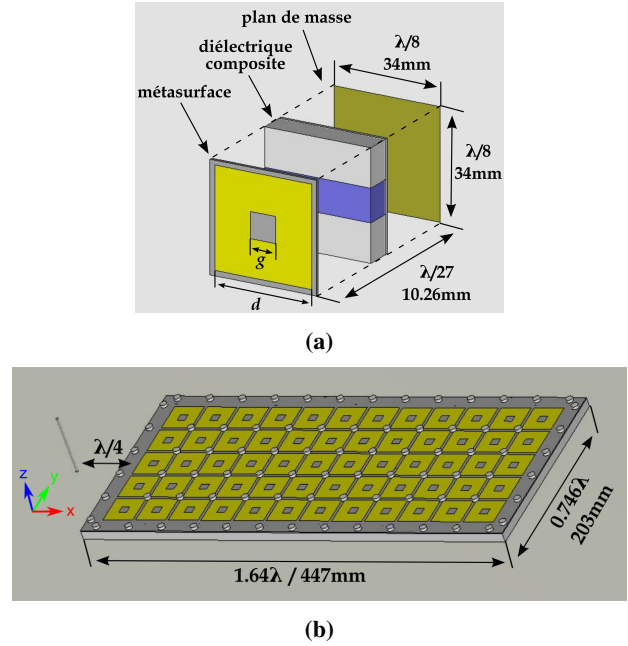


FIGURE 2. (a) Cellule unitaire de la métasurface proposée. (b) Vue schématique de la métasurface composite composée d'un échantillon PCB placé sur un bloc de téflon PTFE usiné.

A l'issue des premières simulations, un fort décalage en fréquence lié à l'estimation du volume d'eau nécessaire pour atteindre une permittivité effective $\epsilon_r = 6$ est observé. Cela est dû premièrement au modèle équivalent de l'anneau carré qui est non adapté à l'utilisation d'un diélectrique composite et deuxièmement à l'utilisation d'un nombre faible de périodes au sein de la métasurface. La fraction volumique d'eau a donc été réajustée par simulations paramétriques afin d'obtenir le régime de fonctionnement le plus performant. La configuration optimisée est donc composée de 25% d'eau distillée et 75% de PTFE. Dans ce cas, l'adaptation simulée de l'antenne monopôle en présence de la métasurface est quasi-similaire à celle du monopôle seul, hormis quelques effets de couplage entre la métasurface et le monopôle (Figure 3a). La Figure 3b présente le niveau de champ électrique avec et sans la métasurface suivant l'axe X avec $Z = 30$ mm et $Y = 0$ mm. De la même manière, la Figure 3c présente le niveau de champ électrique avec et sans la métasurface suivant l'axe Z à $X = 590$ mm et $Y = 0$ mm. En comparant les résultats de simulation avec le prototype précédent [5], on retrouve

des niveaux comparables de champ. Le gain est défini tel que :

$$Gain_{\text{métasurface}} = 20 \log \left(\frac{E_z \text{ métasurface}}{E_z \text{ monopôle}} \right) \quad (3)$$

avec $E_z \text{ métasurface}$, le champ électrique vertical du monopôle avec métasurface; et $E_z \text{ monopôle}$, le champ du monopôle sans métasurface. On peut observer que la métasurface permet d'obtenir un gain de 8 dB à 1 m du monopôle et 10 dB au-dessus du sol. Cette augmentation significative du champ électrique permet d'améliorer l'efficacité et la directivité du système antennaire.

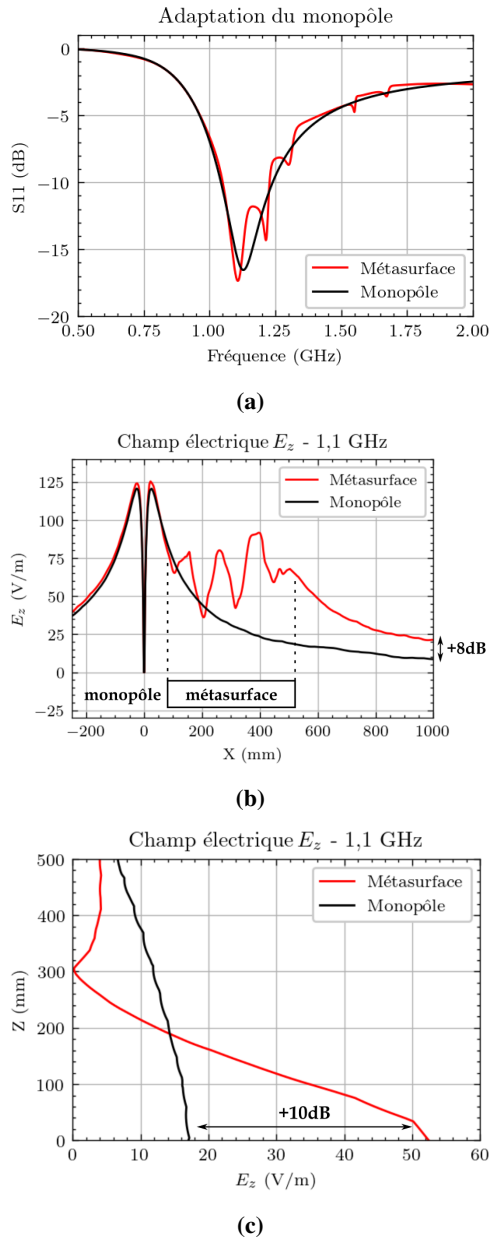


FIGURE 3. Résultats de simulation. (a) Adaptation du monopôle sans et avec la métasurface composite. (b) Champ électrique E_z suivant l'axe X depuis le monopôle. (c) Champ électrique E_z suivant l'axe Z depuis le plan de masse

3.b. Validation expérimentale planifiée

Afin de pouvoir valider expérimentalement le concept, un prototype a été réalisé. Les anneaux sont réalisés par gravure chimique sur un substrat F4BM220 (le même qu'en simulation). Une photographie de l'échantillon est présentée sur la Figure 4a. Un bloc de téflon PTFE est usiné et des rainures de largeur 10 mm sont faites pour accueillir l'eau distillée, comme montré sur la Figure 4b. Des trous de perçage sont aussi prévus pour des vis en nylon, ces dernières viendront fixer la métasurface sur le bloc téflon. Enfin, un joint éponge silicone de diamètre 2 mm entre le PCB réalisé de la Figure 4a et la plaque de téflon usinée de la Figure 4b, permet d'améliorer l'étanchéité du système. Pour évaluer les performances du prototype réalisé, un banc sera monté. La métasurface sera placée sur un plan de masse (1 m x 2 m soit $3\lambda \times 5\lambda$) devant un monopôle accordé à 1,1 GHz. Un analyseur de réseau Rohde & Schwarz ZVL est utilisé pour les mesures d'adaptation (S_{11}).

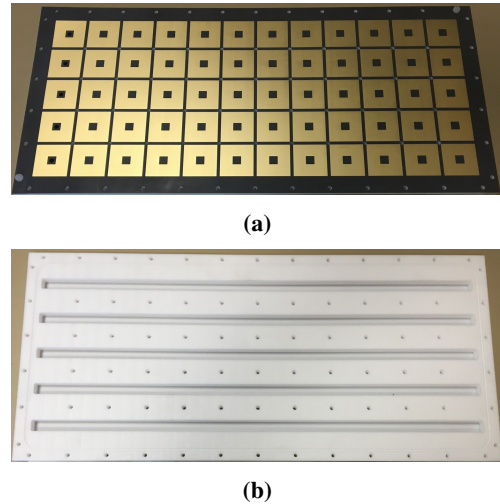


FIGURE 4. (a) Échantillon PCB réalisé. (b) Bloc téflon usiné avec des rainures pour injecter de l'eau distillée.

Afin de mesurer le champ électrique devant la métasurface, nous prévoyons d'utiliser dans un premier temps une sonde de champ tri-composantes ETS-Lindgren HI-6005. Ensuite, la mesure de champ électrique sera réalisée par thermographie infrarouge EMIR [9] afin de valider le fonctionnement de la métasurface. Enfin, des mesures en chambre anéchoïque permettront de caractériser l'influence en champ lointain de la métasurface sur un monopôle.

4. Conclusion

Cette étude a présenté la conception d'une métasurface avec un substrat composite afin de modifier le champ d'une antenne monopôle pour des applications radar à ondes de surface. Les résultats des mesures prochainement effectuées seront présentés dans la version finale de cet article et lors de la conférence.

5. Remerciements

Cette thèse bénéficie d'un cofinancement de l'AID.

Références

- [1] M. Menelle *et al.*, "Full digital High Frequency Surface Wave Radar : French trials in the biscay bay," in *2008 International Conference on Radar*. Adelaide, SA : IEEE, Sep. 2008, pp. 224–229.
- [2] M. J. Abi Akl *et al.*, "Modelling the ionospheric effects in HF radar long term integration," in *2016 10th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*. Davos, Switzerland : IEEE, Apr. 2016, pp. 1–4.
- [3] Q. Herbette *et al.*, "Using a 3D Metamaterial to Enhance the Surface Wave Propagation for High Frequency Over -the-Horizon Radars : from Simulation to Outdoor Measurements," *Progress In Electromagnetics Research C*, vol. 115, pp. 81–93, 2021.
- [4] Q. Herbette *et al.*, "Antenne HF à métamatériau : un défi technologique relevé pour améliorer les performances d'un radar de surveillance maritime à ondes de surface," in *XXII èmes Journées Nationales Microondes*, Limoges, Jun. 2022, pp. 157–161.
- [5] A. Barka and D. Prost, "Low-profile inductive metasurface for surface wave excitation in L-band : design, manufacture and electromagnetic infrared measurements," *Advanced Electromagnetics*, vol. 11, no. 2, pp. 49–53, Jun. 2022.
- [6] V. A. Markel, "Introduction to the Maxwell Garnett approximation : tutorial," *Journal of the Optical Society of America A*, vol. 33, no. 7, p. 1244, Jul. 2016.
- [7] D. Ferreira *et al.*, "Square Loop and Slot Frequency Selective Surfaces Study for Equivalent Circuit Model Optimization," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 63, no. 9, pp. 3947–3955, Sep. 2015.
- [8] D. M. Pozar, *Microwave engineering*, 4th ed. Hoboken, NJ : Wiley, 2012.
- [9] D. Prost, "Measurement of the amplitude and polarization of the electric field by electromagnetic infrared thermography," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 70, no. 5, pp. 3799–3805, 2022.