

Conception et optimisation d'un absorbant large bande à métamatériaux avec des matériaux composites structuraux

Anne Claire Lepage, Olivier Rance, Xavier Begaud, Michel Soiron, André Barka, Patrick Parneix

▶ **To cite this version:**

Anne Claire Lepage, Olivier Rance, Xavier Begaud, Michel Soiron, André Barka, et al.. Conception et optimisation d'un absorbant large bande à métamatériaux avec des matériaux composites structuraux. 21èmes Journées Nationales Micro-Ondes, May 2019, CAEN, France. hal-02193118

HAL Id: hal-02193118
https://hal.science/hal-02193118

Submitted on 24 Jul 2019

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.

XXI[èmes] Journées Nationales Microondes
14-17 mai 2019 – Caen

Conception et optimisation d'un absorbant large bande à métamatériaux avec des matériaux composites structuraux

A.C. Lepage[1], O. Rance[1], X. Begaud[1], M. Soiron[2], A. Barka[3], P. Parneix[4]

[1] *LTCI, Télécom ParisTech, Université Paris Saclay, 46, rue Barrault, 75013 Paris*
[2]*SART, 16, allée des Quatre Coins, 91190 Gif sur Yvette*
[3]*ONERA-DEMR, Université de Toulouse, 2 avenue Edouard Belin, 31055 Toulouse*
[4]*NAVAL GROUP, Technocampus Océan, 5 rue de l'Halbrane, 44340 Bouguenais*
Anne-claire.lepage@telecom-paristech.fr

Résumé *– Dans cet article, nous démontrons qu'il est possible de remplacer les couches diélectriques d'un absorbant à métamatériaux initialement conçu avec des matériaux RF par des matériaux composites structuraux, i.e. renforcés de fibres. Ces matériaux, compatibles avec les procédés de fabrication du domaine naval militaire ont été réalisés et mesurés. L'effet des différentes couches de l'absorbant sur la bande passante est détaillé. Après optimisation de l'épaisseur de chaque couche grâce à un modèle analytique, l'absorbant présente un coefficient de réflexion inférieur à -14 dB dans la bande 4.6 GHz – 17.2 GHz en incidence normale, pour une épaisseur totale de 8.9 mm. Le comportement de l'absorbant en incidence oblique est aussi discuté.*

1. Introduction

Les matériaux absorbants radar sont communément employés à des fins de furtivité dans le domaine militaire. Plus récemment, ils ont également suscité un grand intérêt pour la résolution des problèmes d'interférence électromagnétique dans de nombreuses applications du domaine civil.

Le consortium constitué dans le cadre du projet SAFASNAV (Surface Auto-complémentaire à FAible Signature pour applications NAVales) vise ainsi à développer un concept innovant de paroi structurale en matériaux composites utilisable sur des plateformes navales.

Le haut niveau d'exigences en termes de furtivité des navires militaires pousse en effet à la mise au point de technologies nouvelles notamment en termes de matériaux limitant la réflectivité des ondes radar. Parallèlement les superstructures (topsides) deviennent des métasystèmes complexes intégrant un nombre élevé de senseurs, et générant des problématiques délicates de compatibilité électromagnétique.

Les matériaux composites ont un rôle clé à jouer devant ces nouvelles problématiques, à la fois parce que ce sont des matériaux parfaitement bien adaptés à l'environnement naval comme l'a montré près d'un demi-siècle d'exploitation sur tous les océans, mais également parce qu'ils peuvent être des matériaux multifonctionnels capables d'assurer un rôle structural, aussi bien que d'autres fonctions, notamment d'ordre électromagnétique [1].

Dans cet article, nous considérons un absorbant large bande initialement conçu avec des matériaux RF et nous remplaçons les couches diélectriques par des matériaux composites structuraux, l'objectif étant la conception d'un absorbant ultra-large bande de faible épaisseur. Les contraintes sont multiples [2] : caractéristiques radioélectriques des couches diélectriques, mais également intégration des motifs périodiques conducteurs ou résistifs, compatibilité avec la fonction mécanique de la paroi, prise en compte des process industriels de réalisation de grandes structures… Les différentes épaisseurs et choix des constituants des couches composites sont de nouveau optimisés afin d'évaluer les performances pouvant être obtenues avec ces nouveaux matériaux. Ces travaux constituent les résultats préliminaires du projet SAFASNAV.

2. Structure de l'absorbant

L'absorbant initial a été conçu dans le cadre d'une étude précédente intitulée SAFAS [3,4]. Sa structure est présentée sur la Figure 1a. Il est composé d'un plan de masse afin d'éviter la transmission, d'un substrat diélectrique et d'une structure auto-complémentaire (damier), intrinsèquement large bande. Les parties métalliques du damier sont chargées d'éléments résistifs pour améliorer l'absorption. L'espaceur, la grille résistive et une couche WAIM (Wide Angle Impedance Matching) situés au-dessus du damier ont été utilisés pour améliorer la bande d'absorption et le comportement de la structure en fonction de l'angle d'incidence.

Cet absorbant peut être modélisé par un circuit équivalent représenté sur la Figure 1b. Chaque couche diélectrique est associée à une section de ligne de transmission et les deux surfaces sont associées à leurs admittances. Les circuits équivalents du damier auto-complémentaire [5] et de la grille résistive [6] sont donnés sur la Figure 2a et la Figure 2b respectivement. La mise en cascade des matrices ABCD de chaque couche permet de calculer de manière très efficace le coefficient de réflexion de la structure entière [6]. Le modèle équivalent permet d'analyser et d'optimiser rapidement l'absorbant avec des outils de calcul tels que

Matlab. Le résultat optimisé est ensuite comparé aux simulations Full Wave réalisées avec CST Microwave Studio avec le solveur fréquentiel en considérant une structure infinie.

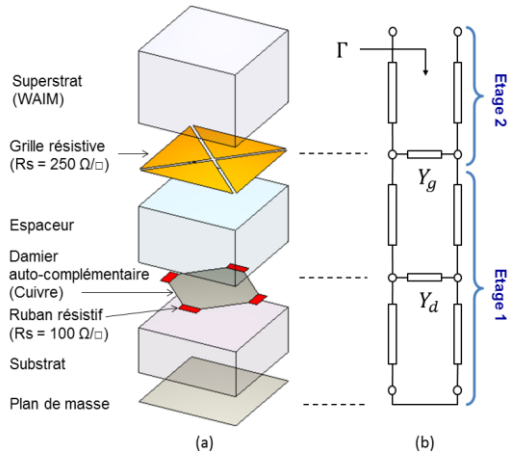


Figure 1. Cellule unitaire de l'absorbant : Géométrie (a) et circuit équivalent (b).

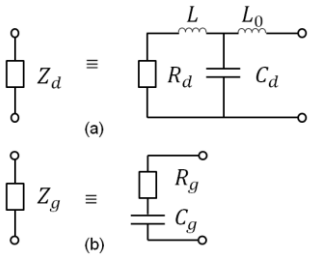


Figure 2. (a) Circuit équivalent du damier et (b) Circuit équivalent de la grille.

3. Principe de fonctionnement

La structure de l'absorbant peut être décomposée en deux étages fonctionnels qui sont décrits sur la Figure 1b. Le premier étage réalise à la fois une adaptation large bande et une stabilisation angulaire, tandis que le second permet d'accroître la largeur de bande.

3.a. Analyse du premier étage

Le premier étage est composé d'un substrat diélectrique au-dessus d'un plan métallique, du damier auto-complémentaire chargé d'éléments résistifs et d'un espaceur diélectrique. L'épaisseur totale de cet étage est de 5.2 mm. Sur la Figure 3, l'admittance de chaque couche ainsi que l'admittance totale de l'étage 1 sont représentées sur l'abaque de Smith normalisé par rapport à l'admittance de l'espace libre. La conception d'un absorbant est un problème d'adaptation où l'objectif est de se situer au plus près du centre de l'abaque [7]. L'admittance du plan de masse et du substrat ① est équivalente à celle d'une ligne de transmission court-circuitée. Elle est donc inductive à basse fréquence f_L et devient capacitive à haute fréquence f_H. L'admittance du damier auto-complémentaire chargé par des rubans résistifs en espace libre ② est représentée par une courbe quasiment assimilable à un point sur l'abaque, ce qui montre son caractère intrinsèquement large bande [8]. Il est également légèrement capacitif, ce qui compense la composante inductive du court-circuit à f_0. En d'autres termes, l'ajout du damier chargé au-dessus du substrat court-circuité permet au point correspondant à f_0 de passer de l'inductif dans ① à l'axe réel dans ③. La courbe est ensuite ramenée au centre de l'abaque ④ grâce à la section de ligne de transmission correspondant à l'espaceur.

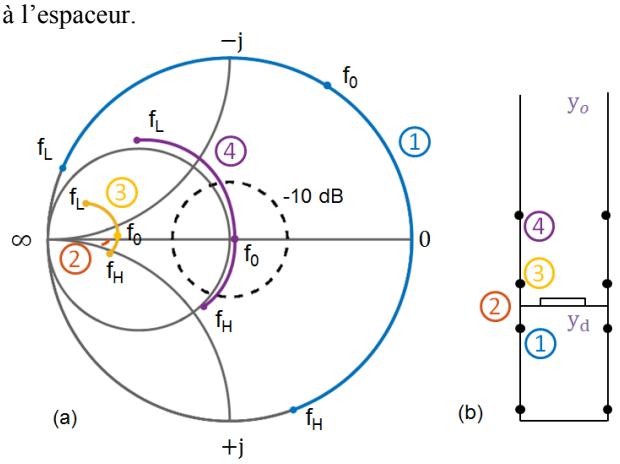


Figure 3. (a) Admittance du 1er étage couche par couche. Impédance de normalisation = 377 Ohms. Les cercles correspondent aux admittances au niveau des couches représentées sur b). ① est l'admittance du substrat court-circuité, ② est l'admittance du damier seul en espace libre, ③ est la somme de ① et ②, et ④ est l'admittance totale du 1er étage.

3.b. Analyse du second étage

Le second étage est composé d'un ensemble de patchs résistifs réalisés avec un film résistif et d'un superstrat diélectrique jouant le rôle d'une couche d'adaptation d'impédance grand angle (WAIM). L'admittance de chaque élément est représentée sur la Figure 4.

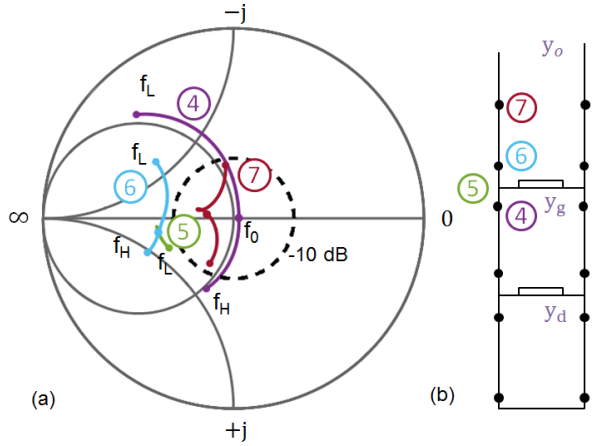


Figure 4. (a) Admittance du 2nd étage couche par couche. Les cercles correspondent aux admittances au niveau des couches représentées sur b). ④ est l'admittance de l'étage 1, ⑤ est l'admittance de la grille résistive seule en espace libre, ⑥ est la somme de ④ et ⑤, et ⑦ est l'admittance totale du 2nd étage.

La grille résistive seule a un comportement capacitif ⑤, ce qui permet de compenser le comportement inductif de l'étage 1 à basse fréquence ④. On obtient ainsi une courbe ⑥ presque symétrique par rapport à l'axe réel du graphique. La couche diélectrique WAIM,

modélisée par une section de ligne de transmission, fait pivoter la courbe ⑦. En choisissant une épaisseur d'environ λ / 4 à la fréquence centrale, nous introduisons une rotation inférieure à 180° à la fréquence basse f_L et supérieure à 180° à la fréquence haute f_H. Le résultat est l'apparition d'une boucle sur l'abaque de Smith.

Le coefficient de réflexion de l'étage 1 et celui de l'étage 2, correspondant respectivement aux courbes ④ et ⑦ de la Figure 4 sont comparés sur la Figure 5. On constate que l'apport du 2nd étage permet d'atteindre une réponse large bande mais au détriment du niveau du coefficient de réflexion.

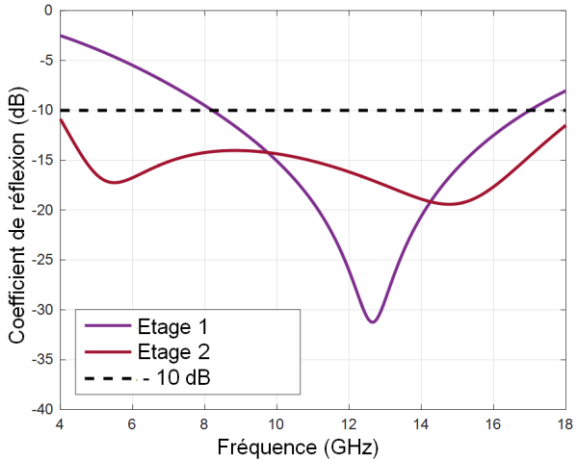


Figure 5. Coefficient de réflexion après le 1er et le 2nd étage de l'absorbant SAFASNAV.

4. Optimisation de l'absorbant avec des matériaux composites structuraux

4.a. Caractéristiques des matériaux composites

La permittivité des couches diélectriques RF initiales (WAIM, espaceur, substrat) était respectivement de 2.2, 2.3 et 4.3 [3]. Ces matériaux RF sont remplacés par des composites structuraux qui ont été réalisés par infusion sous vide et dont la permittivité a été mesurée. La composition et les caractéristiques électriques sont indiquées dans le Tableau 1.

Couche	WAIM	Espaceur	Substrat
Renfort	Quartz	Verre S	Verre E
Résine	Vinylester	Vinylester	Polyester
Permittivité	3.1	4	4.7
Pertes (tan δ)	0.02	0.02	0.02

Tableau 1. Composition et caractéristiques électriques mesurées des matériaux composites structuraux.

Par rapport aux matériaux initiaux, nous notons une augmentation significative de la permittivité pour toutes les couches. L'angle de pertes est également plus important pour les deux premières couches mais cela n'affecte pas le comportement de l'absorbant.

4.b. Performances

Le module du coefficient de réflexion de l'absorbant conçu avec des matériaux composites structuraux est présenté sur la Figure 6 pour des incidences normale et oblique. Ces résultats sont issus de l'optimisation avec Matlab des épaisseurs à l'aide du modèle analytique. Nous avons reporté également le résultat de la simulation CST (solveur dans le domaine fréquentiel avec conditions aux limites de Floquet) en incidence normale.

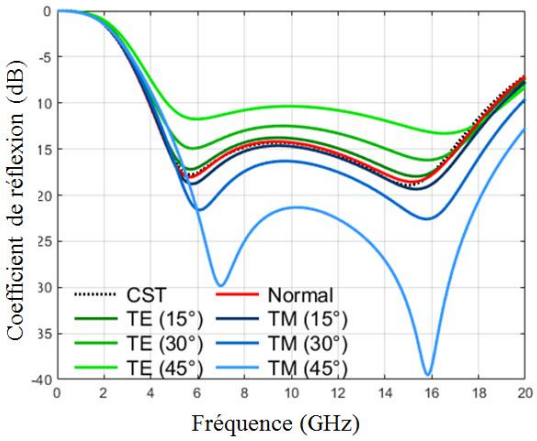


Figure 6. Module du coefficient de réflexion de l'absorbant SAFASNAV.

D'après la Figure 6, on note que le modèle analytique est en très bon accord avec la simulation électromagnétique. L'épaisseur totale de l'absorbant est de 8.9 mm. Le module du coefficient de réflexion est inférieur à -14 dB dans la bande 4.6 GHz – 17.2 GHz en incidence normale. En incidence oblique, le coefficient de réflexion reste inférieur à -10 dB sur la même bande de fréquences, pour un angle allant jusqu'à 45° en polarisation TE et TM.

4.c. Discussion relative à l'incidence oblique

On observe sur la Figure 6 que le comportement du coefficient de réflexion en fonction de l'incidence est différent pour les polarisations TE et TM. La Figure 7 montre le coefficient de réflexion à 9.8 GHz en fonction de l'angle d'incidence sur une plage angulaire plus large.

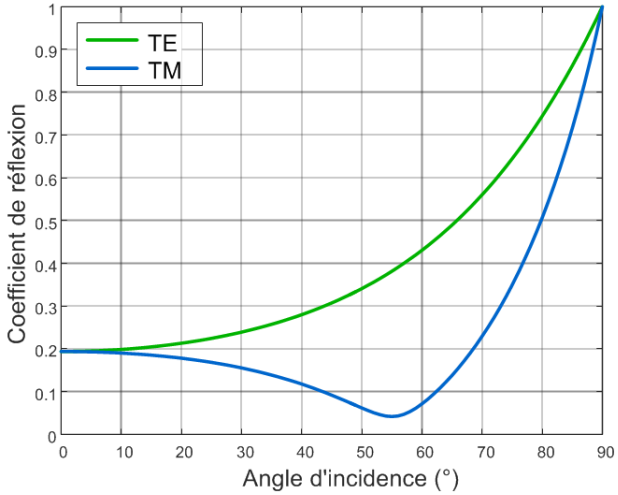


Figure 7. Evolution du coefficient de réflexion à 9.8 GHz en fonction de l'angle d'incidence pour les polarisations TE et TM.

On observe en TM un minimum à 55° et la courbe partage des similarités importantes avec l'angle de Brewster pour une interface diélectrique. Cette différence de comportement entre TE et TM s'explique

simplement par l'admittance de surface de l'onde incidente qui dépend à la fois de l'angle d'incidence θ_0 et de la polarisation [9] :

$$Y_0^{TE} = Y_0 \cdot \cos\theta_0 \quad (1)$$

$$Y_0^{TM} = Y_0 / \cos\theta_0 \quad (2)$$

Le coefficient de réflexion de l'absorbant est alors donné pour chacune des polarisations par :

$$\Gamma^{TE} = \frac{Y_0 \cdot \cos\theta_0 - G}{Y_0 \cdot \cos\theta_0 + G} \quad (3)$$

$$\Gamma^{TM} = \frac{Y_0 / \cos\theta_0 - G}{Y_0 / \cos\theta_0 + G} \quad (4)$$

où *G* est l'admittance totale de l'absorbant qui est fonction de l'angle, de la polarisation et des constituants de l'absorbant. La partie réelle de l'admittance *G* est représentée pour les polarisations TM et TE sur la Figure 8 à la fréquence de 9.8 GHz. En polarisation TM, le coefficient de réflexion est minimum lorsque la partie réelle du numérateur de (4) s'annule, ce qui correspond à l'intersection des courbes bleues à 55°. En polarisation TE, on voit que l'écart entre les courbes vertes s'accroit lorsque l'angle d'incidence augmente et l'on n'observe pas l'apparition de l'équivalent d'un angle de Brewster.

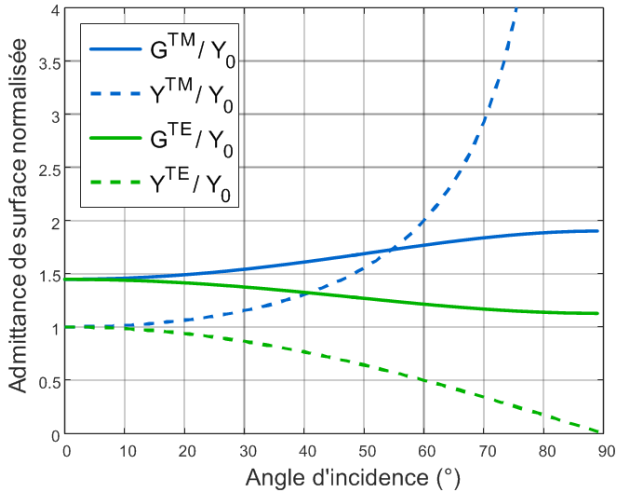


Figure 8. Evolution de la partie réelle de l'admittance de l'absorbant à 9.8 GHz en fonction de l'angle d'incidence pour les polarisations TE et TM.

5. Conclusion

Un absorbant à métamatériaux initialement conçu avec des matériaux RF a été optimisé avec succès avec des matériaux composites. Le module du coefficient de réflexion est inférieur à -14 dB dans la bande de fréquences comprise entre 4.6 GHz et 17.2 GHz en incidence normale. Il reste inférieur à -10 dB sur une largeur de bande similaire en incidence oblique jusqu'à 45°. Cette étude montre que des matériaux composites renforcés de fibres utilisés en combinaison avec des métamatériaux peuvent être utilisés pour concevoir un absorbant structural mince et large bande.

Ces travaux seront prochainement complétés par la réalisation de démonstrateurs de surfaces comprises entre 0.25 m^2 et 1 m^2. Des simulations « full-wave » de ces structures composites, périodiques et finies seront mises en œuvre avec le code FACTOPO [10] de l'ONERA sur des calculateurs hautes performances du GENCI. Les résultats de réflectivité simulés seront comparés à des mesures expérimentales réalisées dans la chambre CAMERA de l'ONERA et dans la chambre Cheops de DGA/MI.

6. Remerciements

Les recherches qui ont abouti à ces résultats ont été financées par le ministère français de la Défense (DGA), par l'intermédiaire de l'Agence nationale de la recherche (ANR) et du programme Astrid Maturation dans le cadre du projet SAFASNAV.

Références

[1] P. Parneix, M. Priser, «*Matériaux composites multifonctionnels pour applications navales militaires*», Journées de l'Association Technique Maritime et Aéronautique (ATMA), Paris, Juin 2013.

[2] C. Wang, M. Chen, H. Lei, K. Yao, H. Li, W. Wen, D. Fang, « *Radar stealth and mechanical properties of a broadband radar absorbing structure* », *Compos. Part B Eng.*, vol. 123, p. 19-27, August 2017.

[3] X. Begaud, A-C. Lepage, S. Varault, M. Soiron, A. Barka, «*Ultra-Wideband and Wide-Angle Microwave Metamaterial Absorber*», Materials, Vol. 11, n° 10, 2045, 2018.

[4] S. Varault, M. Soiron, A. Barka, A-C. Lepage, X. Begaud, «*RCS reduction with a Dual Polarized Self-Complementary Connected Array Antenna*», IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 65, n° 2, pp. 567-575, Dec. 2016.

[5] O. Luukkonen, C. Simovski, G. Granet, G. Goussetis, D. Lioubtchenko, A. V. Räisänen, S. A. Tretyakov, « *Simple and Accurate Analytical Model of Planar Grids and High-Impedance Surfaces Comprising Metal Strips or Patches*», IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 56, n° 6, pp. 1624-1632, June 2008.

[6] X. Begaud, F. Linot , M. Soiron, C. Renard, «*Analytical model of a self-complementary connected antenna array on high impedance surface*», Applied Physics A, Vol. 115, Issue 2, pp 517-522, May 2014.

[7] B. A. Munk, «*Frequency Selective Surfaces – Theory and Design*», New York, Wiley-Blackwell, 2000.

[8] Y. Mushiake, «*Self-complementary antennas*», in IEEE Antennas and Propagation Magazine, vol. 34, no. 6, pp. 23-29, Dec. 1992.

[9] B. A. Munk, P. Munk and J. Pryor, «*On Designing Jaumann and Circuit Analog Absorbers (CA Absorbers) for Oblique Angle of Incidence*», in IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 55, no. 1, pp. 186-193, Jan. 2007.

[10] F. Roux and A. Barka, «*Block Krylov Recycling Algorithms for FETI-2LM Applied to 3-D Electromagnetic Wave Scattering and Radiation*», IEEE Trans. Antennas Propag., vol.65, n° 4, pp. 1886-1895, April 2017.