



**HAL**  
open science

## Contrôle de l'anisotropie dans des surfaces absorbantes réalisées par technologie additive

Vincent Laur, A Chevalier, A Maalouf

► **To cite this version:**

Vincent Laur, A Chevalier, A Maalouf. Contrôle de l'anisotropie dans des surfaces absorbantes réalisées par technologie additive. 16èmes Journées de Caractérisation Microondes et Matériaux 2020, Nov 2020, Toulouse, France. hal-03706563

**HAL Id: hal-03706563**

**<https://hal.univ-brest.fr/hal-03706563v1>**

Submitted on 27 Jun 2022

**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.

# Contrôle de l'anisotropie dans des surfaces absorbantes réalisées par technologie additive

V. Laur<sup>1</sup>, A. Chevalier<sup>1</sup> et A. Maalouf<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Lab-STICC, Université de Bretagne Occidentale, Brest, France

e-mail : vincent.laur@univ-brest.fr

**Résumé** — Dans cet article, une surface absorbante multicouche imprimée fonctionnant en bande Ka est présentée. En simulation, cette surface présente une absorption supérieure à 35 dB à 26,7 GHz avec une bande passante à -20 dB de 24,7%. Sa caractérisation met en évidence une dépendance angulaire dont l'origine peut s'expliquer par une anisotropie planaire induite par le procédé d'impression. La dépendance angulaire, et donc l'anisotropie effective de la surface, peut être maîtrisée par les conditions de réalisation.

## I. INTRODUCTION

La croissance exponentielle du déploiement des technologies de communication sans fil (hyperfréquences) a aujourd'hui un impact important sur les absorbants électromagnétiques (EM). Autrefois bornée à une utilisation liée aux besoins militaires (furtivité des systèmes de défense), les absorbants sont désormais utilisés dans de nombreux systèmes pour, notamment, régler des problèmes de compatibilité électromagnétique (CEM) dans des systèmes compacts ou encore supprimer des rayonnements parasites au niveau des antennes. Les bandes de fréquence dans lesquelles les besoins sont prégnants couvrent évidemment les bandes militaires (jusqu'à 18 GHz) mais également des fréquences plus élevées liées à des applications spatiales (bandes Ka et Q notamment).

Les absorbants EM sont généralement des polymères chargés par des particules leur procurant des pertes diélectriques ou magnétiques. Pour les applications à basses fréquences, des céramiques magnétiques (ferrites) peuvent également être utilisées. Ces besoins nouveaux nécessitent de faire évoluer les matériaux et méthodes de fabrication des absorbants EM et des structures dans lesquelles ils sont utilisés.

L'impression 3D, technologie additive bas coût et permettant de réaliser des structures complexes multi-matériaux, apparaît comme un moyen de rupture pour la mise en forme et la production de ces absorbants EM. En effet, de nombreux matériaux composites, présentant des propriétés compatibles avec les applications visées, sont aujourd'hui disponibles dans cette technologie. L'intérêt de l'impression 3D pour la réalisation de charges [1], [2] ou de surfaces absorbantes originales [3] a déjà été expérimentalement démontré. Des études sont également menées en parallèle pour développer des matériaux dédiés aux applications d'absorption et compatibles avec ce procédé d'impression [4], [5].

Dans cet article, nous proposons d'utiliser ce procédé d'impression pour réaliser une surface absorbante multicouche, basée sur le principe d'un écran de Salisbury,

en bande Ka. Dans un premier temps, le principe de la surface absorbante est présenté au travers de simulations EM. La réalisation et la caractérisation de cette surface sont ensuite détaillées. Les mesures mettent en évidence la présence d'une anisotropie planaire induite par le procédé de fabrication mais dont l'intensité peut être maîtrisée technologiquement.

## II. MODELISATION DES SURFACES ABSORBANTES

Les deux structures historiques utilisées pour concevoir des surfaces absorbantes sont l'écran de Dällenbach et l'écran de Salisbury. La première consiste à positionner un matériau à pertes sur un plan métallique. Lorsque l'épaisseur du matériau correspond au quart de la longueur d'onde guidée  $\lambda_g$  (dans le cas d'un matériau purement diélectrique), l'impédance équivalente du matériau peut être égale à celle de l'air. Il en résulte une absorption importante pouvant être exploitée, par exemple, pour des applications de furtivité. La seconde structure, l'écran de Salisbury, est constituée d'un diélectrique à faibles pertes d'épaisseur  $\lambda_g/4$ , également appelé « spacer », sur lequel est déposé un matériau à pertes (généralement une fine couche de matériau résistif). Si l'impédance surfacique du matériau à pertes est égale à celle de l'air  $377\Omega/\square$ , l'onde incidente est alors absorbée dans la couche résistive. Dans cette étude, le diélectrique utilisé est un acide polylactique (PLA) dont les propriétés EM ont été mesurées à l'aide d'une méthode résonante à 7 GHz :  $\epsilon_r = 2,48$  et  $\tan\delta = 4,6 \cdot 10^{-3}$ . A titre de référence, un écran de Salisbury associant un diélectrique PLA d'épaisseur  $d = 1,78$  mm et une couche résistive de nitrure de tantale ( $\sigma = 7400$  S/m) d'épaisseur  $\tau = 0,358$   $\mu\text{m}$  a été simulé. La figure 1 présente sa réponse dans la bande 18-33 GHz à incidence normale ( $\theta = 0^\circ$ ). Cet écran de référence présente une bande passante à 20 dB d'absorption de 4,26 GHz (15,9%).

Dans le cadre d'une étude précédente, nous avons utilisé un matériau composite PLA à fortes pertes pour concevoir des absorbants alvéolaires imprimés. A 18 GHz, ce matériau, noté ici PLA-C, présente une permittivité  $\epsilon_r = 15,6$  et des pertes diélectriques élevées  $\tan\delta = 0,9$  [3] et peut donc être utilisé comme couche à pertes dans un multicouche de type pseudo-Salisbury. Pour modéliser ce matériau dans la bande 18-33 GHz, une extrapolation des propriétés mesurées jusqu'à 18 GHz a été réalisée.

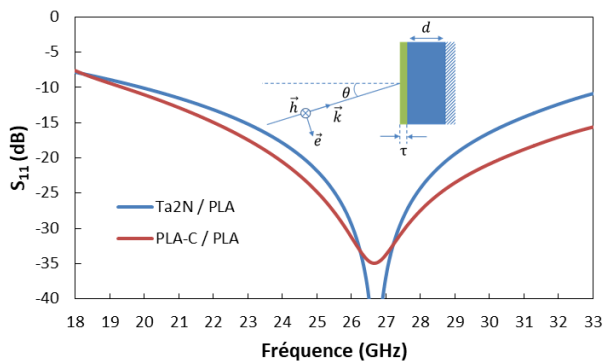


Fig. 1. Coefficients de réflexion calculés d'un écran de Salisbury  $Ta_2N/PLA$  et d'un absorbant bicouche  $PLA-C/PLA$  dans la bande 18-33 GHz.

La méthode envisagée pour la réalisation entraîne certaines limitations dans le choix des épaisseurs. En technologie d'impression filaire, la réalisation de l'objet se fait couche par couche avec des pas discrets d'épaisseur (typiquement 50  $\mu m$ , 100  $\mu m$  ou 200  $\mu m$ ). Dans un premier temps, nous avons choisi de travailler avec des couches de 200  $\mu m$  considérant ainsi une structure constituée d'un diélectrique PLA d'épaisseur  $d = 1$  mm et d'une couche unique de PLA-C d'épaisseur  $\tau = 200$   $\mu m$ . Cette surface ne peut pas être totalement considérée comme un écran de Salisbury car la partie réelle de la permittivité du matériau à pertes n'est pas négligeable devant sa partie imaginaire. Ainsi, l'épaisseur de la couche à pertes aura un impact sur la fréquence maximale d'absorption contrairement à un écran de Salisbury. Néanmoins, le fonctionnement en est similaire ; nous parlerons ainsi dans cet article d'écran pseudo-Salisbury. Les paramètres S simulés de cette surface sont présentés et comparés à ceux de la surface référence sur la figure 1. La fréquence de fonctionnement est identique à celle de l'écran de Salisbury de référence pour une épaisseur totale plus faible (diminution de 33%). Par ailleurs, une nette augmentation de la bande passante est observée en comparaison de l'écran de Salisbury puisqu'elle atteint ici 6,58 GHz (24,7%).

### III. REALISATION ET CARACTERISATION DES SURFACES ABSORBANTES

La surface absorbante multicouche décrite précédemment a été réalisée à l'aide d'une machine d'impression filaire de marque 3NTR. Cette imprimante est équipée de 3 têtes d'impression (extrudeurs) permettant, en une seule étape, d'imprimer la surface bi-matériaux ainsi qu'un support réalisé en Poly(Acétate de Vinyle) ou PVA, matériau pouvant être dissout dans l'eau à l'issue de l'impression. Pour réaliser cette surface, une épaisseur de couche constante de 200  $\mu m$  a été utilisée dans un premier temps ; le spacer diélectrique est ainsi constitué de 5 couches de PLA et la couche de matériau à pertes d'une unique couche de PLA-C.

Un échantillon de 10 cm x 10 cm a été réalisé pour la caractérisation. Pour ce type d'échantillons, le trancheur utilisé pour générer le fichier de commande de l'imprimante impose dans notre cas une impression pour chaque couche suivant une direction parallèle à la diagonale du carré. Chaque couche est ensuite imprimée suivant une direction perpendiculaire à la précédente. La dernière couche

imprimée (en PLA-C) est de ce fait constituée d'un réseau de filaments dirigés suivant une des diagonales du carré (Fig. 2).

Pour caractériser ces surfaces, un banc constitué d'une arche et de deux antennes cornets a été utilisé (Fig. 2). Le rayon de l'arche a été choisi, à partir des caractéristiques des antennes (dimensions et angle d'ouverture à 3dB), de façon à assurer une distance antenne/échantillon suffisante pour s'assurer de placer l'échantillon en champ lointain et à minimiser sa taille.

Les antennes cornets sont reliées à un analyseur de réseaux vectoriels ZVA67 (Rhode&Schwarz). Un absorbant a été placé sous l'échantillon à caractériser de façon à minimiser les réflexions sur le plan de travail (Fig. 3). Dans un premier temps, un étalonnage SOLT a été réalisé de façon à ramener les plans de mesure aux accès des antennes. Une mesure de référence a été effectuée sur une plaque métallique. Un filtrage temporel a été mis en place pour éliminer les réflexions parasites multi-trajets. L'absorption de la surface a été obtenue par rapport à la mesure de la plaque métallique de référence. La mesure a été réalisée à incidence fixe ( $\theta = 5^\circ$ ) en polarisation TE en faisant varier l'angle  $\phi$ , soit la direction entre le champ électrique de l'onde EM et la direction des filaments de la couche de PLA-C (Fig. 3).

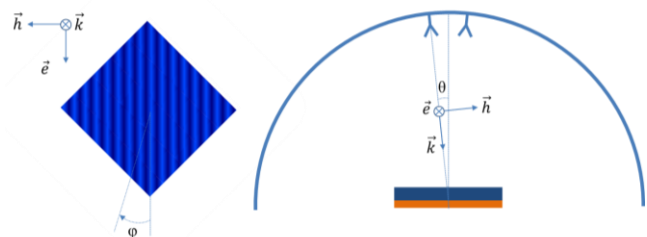


Fig. 2. (à gauche) Vue de principe d'une coupe de la surface absorbante et (à droite) synoptique du banc de mesure.

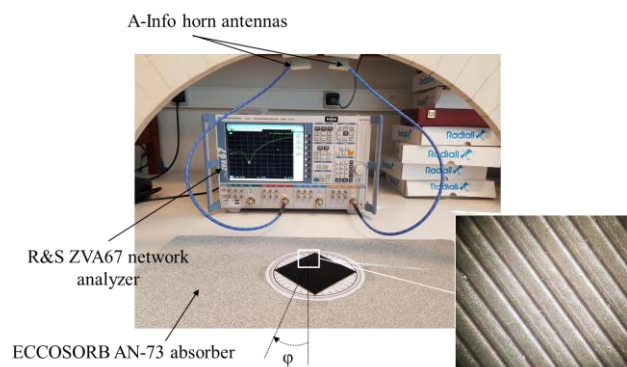


Fig. 3. Banc de mesure des surfaces absorbantes. Insert : Photographie prise au microscope de la surface de l'échantillon.

La figure 4 présente les courbes d'absorption mesurées pour  $\phi$  variant de  $0^\circ$  à  $90^\circ$ . A  $0^\circ$ , la surface présente un niveau d'absorption supérieur à 35 dB à 22 GHz. Lorsque l'échantillon pivote suivant  $\phi$ , la fréquence d'absorption maximale, notée  $f_{abs}$ , se décale vers les hautes fréquences jusqu'à atteindre 24,2 GHz, soit un décalage fréquentiel de 10,3%. Pour des angles supérieurs à  $90^\circ$ ,  $f_{abs}$  diminue pour retrouver une valeur proche de 22 GHz à  $180^\circ$ .

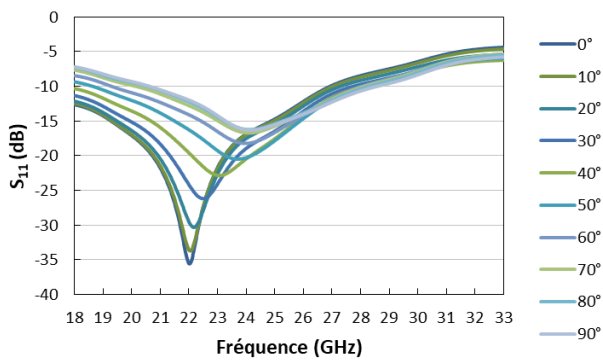


Fig. 4. Evolution du coefficient de réflexion mesuré d'un bicouche PLA-C/PLA pour différentes valeurs d'angle  $\varphi$  dans le cas d'une couche unique de PLA-C d'épaisseur 200  $\mu\text{m}$ .

Ce comportement typique d'une anisotropie planaire est également illustré sur la figure 5 présentant l'évolution de la fréquence d'absorption maximale  $f_{\text{abs}}$  mesurée en fonction de l'angle  $\varphi$ . La prise en compte d'une structure réaliste constituée de filaments orientés est une opération délicate en simulation compte tenu de la difficulté d'identifier précisément les rapports de forme des filaments et les taux de recouvrement entre-eux à partir de simples observations au microscope.

Ces mesures ont ainsi été analysées au travers de rétro-simulations considérant une couche de PLA-C monobloc présentant dans le plan une permittivité anisotrope. Un accord simulation/mesure satisfaisant peut être obtenu en prenant en compte une permittivité dans la direction des filaments  $\epsilon_{//} = 13,16-j10,2$  et une permittivité perpendiculaire à la direction des filaments  $\epsilon_{\perp} = 10,82-j6,58$ . Cette modélisation de l'anisotropie de forme, induite par le procédé d'impression, par une couche pleine de permittivité anisotrope, permet de retrouver les variations de fréquences maximales d'absorption en fonction de l'angle  $\varphi$  (Fig. 5).

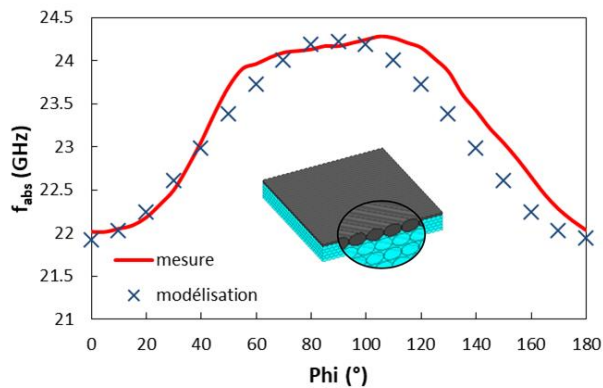


Fig. 5. Evolution de  $f_{\text{abs}}$  en fonction de l'angle  $\varphi$  dans le cas d'une couche unique de PLA-C d'épaisseur 200  $\mu\text{m}$  (mesure : trait plein rouge, simulation EM : croix bleues).

Ce type de surface présentant une anisotropie diélectrique planaire peut induire des niveaux de polarisation croisée élevés (i.e. une conversion d'une onde incidente polarisée TE à une onde réfléchie polarisée TM et inversement) de sorte qu'un faible coefficient de réflexion peut être lié principalement à une conversion de polarisation et non à l'absorption de l'onde par la surface. En simulation, une augmentation importante du niveau de

polarisation croisée ( $S_{11 \text{ TE/TM}}$ ) a été observée avec une valeur maximale de -18 dB pour un angle  $\varphi = 45^\circ$ . Néanmoins, cette forte valeur de polarisation croisée ne contribue qu'à environ 1,6% sur le niveau d'absorption linéaire de la surface.

Le contrôle de cette anisotropie est possible au travers du paramétrage de l'imprimante. Ainsi, une nouvelle surface absorbante a été réalisée ; elle est constituée de 5 couches de PLA d'épaisseur 200  $\mu\text{m}$  chacune et de deux couches de PLA-C d'épaisseur 100  $\mu\text{m}$  chacune. Les épaisseurs des couches de PLA et PLA-C restent inchangées. Cependant, les deux dernières couches constituées de PLA-C sont imprimées à 90° l'une par rapport à l'autre.

La figure 6 présente l'évolution de la fréquence maximale d'absorption de cette nouvelle structure en fonction de l'angle  $\varphi$ . Cette surface présente une plus faible dépendance en  $\varphi$  avec un décalage fréquentiel maximal de 3,7% démontrant la quasi-disparition de l'anisotropie effective de l'absorbant. Ce résultat est vérifié en simulation en considérant deux couches de PLA-C de même permittivité anisotrope que précédemment et superposées à 90°. Un décalage fréquentiel résiduel est bien présent mais n'est que de 0,6%. La dépendance en  $\varphi$  plus marquée en mesure peut s'expliquer par les difficultés expérimentales liées aux mesures angulaires et par les effets de bord non totalement annulés par le filtrage temporel.

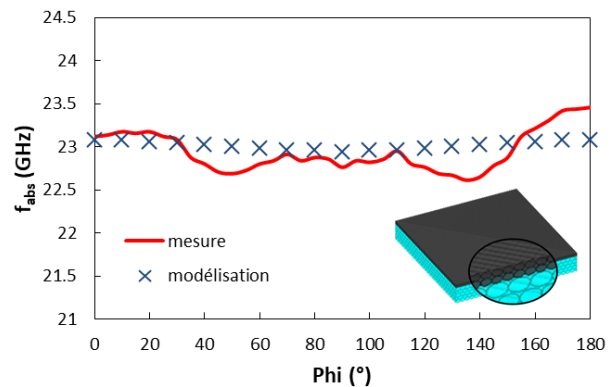


Fig. 6. Evolution de  $f_{\text{abs}}$  en fonction de l'angle  $\varphi$  dans le cas d'une double couche de PLA-C d'épaisseur totale 200  $\mu\text{m}$  (2 x 100  $\mu\text{m}$ ) (mesure : trait plein rouge, simulation EM : croix bleues).

#### IV. CONCLUSION

Dans cet article, la modélisation, la réalisation et la caractérisation de surfaces absorbantes multicouche imprimées fonctionnant en bande Ka sont présentées. Deux conclusions principales peuvent être tirées de cette étude.

Premièrement, la technique d'impression filaire peut être utilisée pour fabriquer de façon simple et à faible coût des absorbants multicouche, fonctionnement sur le principe d'un écran de Salisbury, en bande Ka. Ce concept, très générique, peut être étendu à d'autres bandes de fréquences avec, néanmoins, certaines limitations. En effet, ces structures stratifiées présentent une épaisseur correspondant à un multiple de l'épaisseur d'une couche unique définie lors de l'impression. Ainsi, s'il est possible de modifier la fréquence d'absorption via l'épaisseur du spacer ou de la couche à pertes, ces variations fréquentielles suivront un pas discret (non continu).

Par ailleurs, les caractérisations angulaires de ces surfaces ont mis en évidence une anisotropie planaire induite par le procédé d'impression. Cette anisotropie induite peut être contrôlée en ajustant les paramètres d'impression. Si une anisotropie planaire n'est généralement pas souhaitable dans le contexte de l'absorption EM, sa maîtrise pourrait cependant être utile pour concevoir, à titre d'exemple, des surfaces polarisantes pouvant trouver une utilité dans le domaine antennaire.

## REFERENCES

- [1] Y. Arbaoui, V. Laur, A. Maalouf, P. Queffelec, D. Passerieux, A. Delias, P. Blondy, "Full 3D printed microwave termination: a simple and low cost solution", *IEEE Trans. Micr. Th. & Tech.*, vol. 64, no. 1, pp. 271-278, janvier 2016.
- [2] Y. Arbaoui, V. Laur, A. Maalouf, P. Queffelec, "3D printing for microwave: materials characterization and application in the field of absorbers", *IEEE International Microwave Symposium*, Phoenix, mai 2015.
- [3] V. Laur, A. Maalouf, A. Chevalier, F. Comblet, "Study of 3D printed HoneyComb Microwave Absorbers", *IEEE International Symposium on Antennas and Propagation*, Atlanta-USA, juillet 2019.
- [4] Y. Arbaoui, P. Agaciak, A. Chevalier, V. Laur, A. Maalouf, J. Ville, P. Roquefort, T. Aubry, P. Queffelec, "3D printed ferromagnetic composites for microwave applications", *Journal of Materials Science*, vol. 52, no. 9, pp. 4988-4996, mai 2017.
- [5] D. Palessonga, P. Roquefort, H. Houssein, A. Maalouf, A. Chevalier, J. Ville, V. Laur, T. Aubry, "Développement d'un composite imprimable haute température pour des applications d'absorption hyperfréquence", 21<sup>èmes</sup> Journées Nationales Micro-ondes, Caen, mai 2019.