



**HAL**  
open science

## Conception d'une charge imprimée en 3D pour les applications en bande millimétrique

Evan Roué, Vincent Laur, Alexis Chevalier, Gérard Tanné, Camille Patris,  
Olivier Vendier, Rose-Marie Sauvage

### ► To cite this version:

Evan Roué, Vincent Laur, Alexis Chevalier, Gérard Tanné, Camille Patris, et al.. Conception d'une charge imprimée en 3D pour les applications en bande millimétrique. XXIIèmes Journées Nationales Micro-ondes 2022, XLIM, Jun 2022, Limoges, France. hal-04047246

**HAL Id: hal-04047246**

**<https://hal.univ-brest.fr/hal-04047246>**

Submitted on 27 Mar 2023

**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.

## Conception d'une charge imprimée en 3D pour les applications en bande millimétrique

Evan Roué<sup>1</sup>, Vincent Laur<sup>1</sup>, Alexis Chevalier<sup>1</sup>, Gérard Tanné<sup>1</sup>, Camille Patris<sup>2</sup>, Olivier Vendier<sup>2</sup>, Rose-Marie Sauvage<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Univ. Brest, Lab-STICC, UMR 6285, CNRS, F-29200, Brest, France

<sup>2</sup>Thales Alenia Space, Toulouse, France

<sup>3</sup>Agence de l'Innovation de Défense, Direction Générale de l'Armement, F-75509, Paris, France

[Evan.Roue@univ-brest.fr](mailto:Evan.Roue@univ-brest.fr)

**Résumé** – Cet article présente une charge imprimée en 3D pour les guides d'ondes en bande millimétrique. Une caractérisation des propriétés diélectriques du matériau absorbant imprimable ainsi que des simulations électromagnétiques ont été réalisées afin de dimensionner le composant. Les performances ont été optimisées pour les futures bandes de télécommunications spatiales en bande E (81 – 86 GHz). Le coefficient de réflexion mesuré est inférieur à -28 dB dans la bande (81-86 GHz) et reste en dessous de -24 dB sur l'ensemble de la bande W (75 – 110 GHz). Cette charge a par ailleurs l'avantage d'être très légère et bon marché.

### 1. Introduction

L'impression 3D ouvre des perspectives très intéressantes pour l'intégration de systèmes RF [1, 2, 3]. Ainsi, un front-end complexe a pu être réalisé en fabrication additive [4], ce qui aurait été plus compliqué avec les techniques d'usinages classiques. Auparavant, l'impression 3D était une technologie chère et peu accessible. Cependant, depuis quelques années, la technique de dépôt de filament fondu (FDM) s'est grandement répandue grâce à l'apparition d'imprimantes 3D bon marché. Les cycles de prototypes rapides (quelques jours maximum) permettent aux designers et ingénieurs de valider leur conception avant la production de masse.

Dans cette étude, nous voulons démontrer la capacité des imprimantes 3D FDM grand public à réaliser des charges en bande millimétrique au format guide d'onde WR-10. Une caractérisation des propriétés diélectriques en bande W d'un matériau absorbant imprimable a été réalisée ainsi que des simulations électromagnétiques afin de déterminer les performances théoriques du composant. Le composant a ensuite été imprimé et mesuré afin de valider la faisabilité de fabriquer ces charges en FDM.

### 2. Technologie et matériau

La technique de dépôt de fil fondu est la technique d'impression 3D la plus répandue en raison de son faible coût mais aussi du large choix de matériaux à disposition.

Dans cette technique, un filament polymère ou composite est fondu à travers un bloc chauffant avant son passage dans une buse. Celle-ci se déplace suivant les 3

directions de l'espace (X, Y et Z) au-dessus d'un lit chauffant, selon le chemin généré par le logiciel de tranchage en fonction du modèle 3D de l'objet à imprimer. Le matériau est ainsi déposé couche par couche pour former l'objet. Ici, un filament de PLA conducteur de la société Proto-Pasta est utilisé. Ce matériau a été choisi pour ses pertes diélectriques importantes et fut déjà utilisé pour créer des absorbants à plus basses fréquences [5]. Ces filaments sont disponibles sur le marché de l'impression 3D à des prix abordables. Une imprimante 3D (A2v4 de 3NTR) a été utilisée pour mettre en forme le matériau avec les paramètres d'impression suivants : température de la buse = 200°C et température du lit = 60°C. En bandes E ou W, les dimensions des guides d'onde sont de l'ordre du millimètre ce qui constitue une difficulté particulière en technologie FDM. Dans le but d'assurer une résolution suffisante, la hauteur des couches imprimées a été fixée à 100 µm.

### 3. Etude des propriétés diélectriques de l'absorbant imprimable

Les propriétés diélectriques du PLA-C ont été mesurées à l'aide d'une cellule de mesure « WR-10+ Material Characterization Kit (MCK) » commercialisée par la société Swissto12 [6] connectée à un analyseur de réseau vectoriel Rohde & Schwartz ZVA67 équipé de têtes millimétriques ZVA-110 (Figure 1). L'échantillon du matériau sous test est placé entre les deux antennes réalisées à partir de guides d'onde circulaires corrugués du MCK et fonctionnant en mode HE<sub>11</sub>. Le MCK intègre directement des transitions vers le guide d'onde standard (WR-10) pour la connexion avec l'analyseur. Un pied à coulisse numérique permet la mesure de l'épaisseur de l'échantillon, information essentielle à l'extraction des propriétés diélectriques. Le MCK est étalonné en Gated Reflect Line (GRL). Il est également possible d'utiliser d'autres méthodes d'étalonnage plus complexes pour améliorer la précision en particulier pour des matériaux à faibles pertes [7]. Dans notre cas, le PLA conducteur présentant des pertes élevées, la méthode GRL est suffisante pour garantir une bonne précision de mesure.

La cellule de caractérisation est fournie avec un logiciel dédié qui contrôle l'analyseur de réseaux et qui effectue l'extraction de la permittivité et de la tangente de pertes. Deux modèles sont disponibles : avec ou sans dispersion fréquentielle.

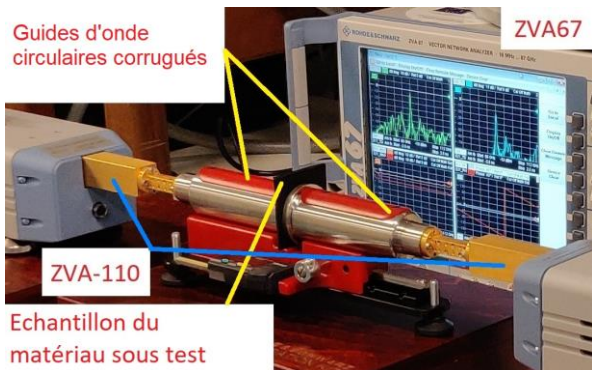


Figure 1. Banc de mesure disponible au Lab-STICC

La technique de dépôt de fil fondu peut induire une anisotropie des propriétés des matériaux à cause de l'étape de tranchage. Les objets imprimés ne sont pas uniformes mais sont composés de différentes couches de filaments empilées les unes sur les autres et déposées dans des directions différentes. Ainsi, deux couches successives sont imprimées dans des directions à 90° l'une de l'autre.

Comme les effets dépolarisants sont différents pour les orientations parallèle et perpendiculaire, la permittivité effective mesurée devient alors anisotrope. Pour étudier l'impact de cette anisotropie, deux échantillons de 50 mm x 50 mm x 1.6 mm ont été fabriqués. L'un imprimé « à plat » (appelé horizontal par la suite), est constitué d'empilements de couches orientées successivement à 90°. L'autre, imprimé à la verticale, est constitué d'empilements de couches déposées toujours dans la même direction.

L'échantillon vertical est mesuré deux fois : une fois avec le champ électrique du mode HE<sub>11</sub> parallèle à la direction privilégiée des filaments et une autre fois dans la direction perpendiculaire (Figure 2). Une seule mesure est nécessaire pour l'échantillon horizontal puisque la direction privilégiée des filaments change à chaque couche d'impression ; les effets dépolarisants seront alors moyennés. Les épaisseurs réelles sont mesurées avec le pied à coulisse intégré à la cellule de mesure MCK : 1,5 mm pour l'échantillon horizontal et 1,67 mm pour l'échantillon vertical.

La Figure 3 montre les propriétés diélectriques des échantillons imprimés en PLA conducteur. La permittivité relative de l'échantillon horizontal est d'environ 10,5 et la tangente de pertes diélectriques est d'environ 0,4 à 90 GHz. Une légère dispersion fréquentielle a été observée pour les deux propriétés : la permittivité relative diminue d'environ 0,5 et la tangente de pertes diminue de 0,1 sur l'ensemble de la bande de fréquences. Ces propriétés dispersives en fréquence seront prises en compte dans les simulations électromagnétiques de la bride, via une approximation linéaire. En effet, la bride est large et épaisse et peut donc être imprimée à l'horizontal avec des empilements croisés.

Au contraire, les dimensions fines et élancées du biseau de la charge imposent que celui-ci soit imprimé verticalement. Pour cet échantillon vertical, les permittivités dites parallèle et perpendiculaire présentent des comportements très différents, signe de l'anisotropie marquée de l'échantillon. En effet, l'échantillon présente à 70 GHz une permittivité perpendiculaire de 8,5 alors que sa permittivité parallèle est de 11. La dispersion fréquentielle est similaire à celle de l'échantillon imprimé à l'horizontal. L'anisotropie est également observée sur les pertes diélectriques puisque celles-ci varient d'environ 0,1 entre les deux directions. La permittivité perpendiculaire sera utilisée dans la simulation pour modéliser le biseau car la direction du champ électrique par rapport au plan des couches dans le guide d'onde correspond à cette configuration.

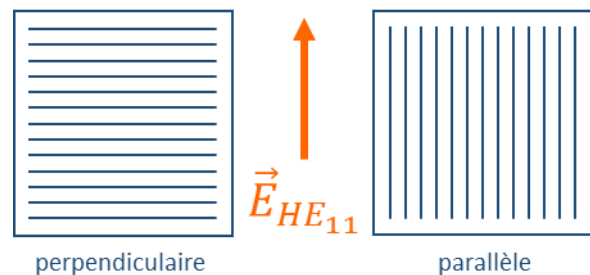


Figure 2. Direction d'impression (couches de l'échantillon représentées par les lignes bleues) par rapport à la direction du champ électrique du mode HE<sub>11</sub> de la cellule MCK

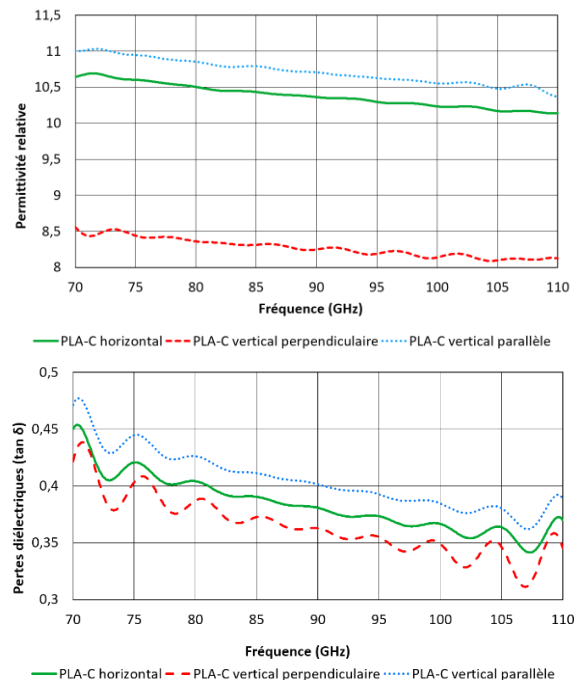


Figure 3. Propriétés diélectriques mesurées du PLA conducteur

#### 4. Conception de la charge WR-10

Les limitations techniques de l'impression 3D FDM génèrent des contraintes sur les géométries possibles de la charge. Dans ce travail, nous avons décidé de rester sur un simple biseau (Figure 4). Dans son plan transverse, la charge fait 2,4 mm x 1,2 mm soit des dimensions légèrement inférieures au standard du guide de façon à permettre l'insertion de la charge dans celui-ci. La zone biseautée a une longueur de 10 mm. De façon à disposer d'un composant pouvant être directement connecté à un guide d'onde standard, la bride a été imprimée avec le même matériau. Elle est basée sur le standard des brides (UG-384/U-M) des guides d'ondes WR-10. Elle dispose d'un trou rectangulaire au centre (2.6mm x 1.4 mm) afin d'insérer la charge. Les incertitudes dimensionnelles de l'impression permettent d'éviter l'ajout d'une colle (assemblage en force). Le biseau est imprimé suivant la hauteur du guide et son interaction avec le champ électrique dans le guide d'onde correspondra ainsi à l'échantillon vertical mesuré dans sa direction perpendiculaire. La bride étant imprimée suivant son épaisseur, son interaction avec l'onde électromagnétique correspondra à celle de l'échantillon horizontal.

La Figure 5 montre la charge imprimée où la discrétisation en couches suivant la hauteur du guide est bien visible sur le cliché réalisé au microscope.

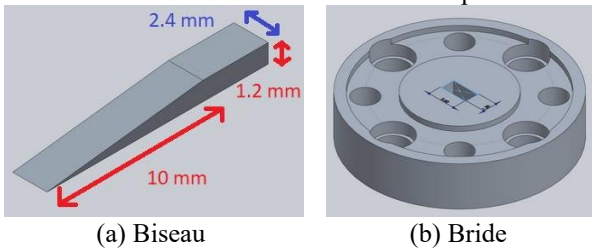
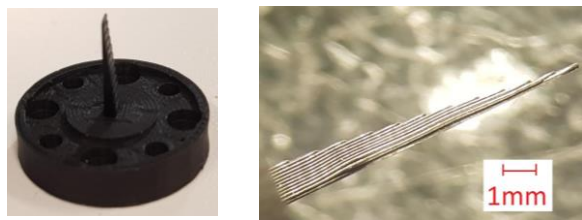


Figure 4. Modèles 3D sous SolidWorks



(a) Charge complète avec bride

(b) Détails de la charge

Figure 5. Charge imprimée

Des simulations électromagnétiques sous Ansys HFSS ont été réalisées afin de dimensionner le composant. Les propriétés diélectriques mesurées ont été importées dans ces simulations dans les conditions précédemment détaillées. La simulation tient compte de la découpe en tranches du modèle 3D de la charge par le logiciel de tranchage permettant de générer le fichier de commande de l'imprimante. Les conditions aux limites sont de type « conducteur parfait » au niveau du guide et de type « rayonnement » au niveau de la bride. L'absence de la bride dans les simulations n'impacte pas les performances électriques ce qui démontre que l'absorption par le biseau est suffisante pour éviter un rayonnement arrière de la charge, confirmée par la carte de l'intensité du champ

électrique calculée par HFSS dont l'intensité devient négligeable à proximité de la bride (Figure 6).

En ce qui concerne les mesures, nous avons utilisé les mêmes appareils que pour les mesures des propriétés diélectriques : l'analyseur de réseaux Rohde & Schwartz ZVA67 avec les têtes millimétriques ZVA-110. La bande de fréquences de mesure est réglée entre 70 et 110 GHz, afin d'obtenir les performances électriques en bande W en plus des performances dans les futures bandes de télécommunications satellitaires bande E (71 – 76 GHz et 81 – 86 GHz). L'étalonnage a été réalisé par la méthode thru-reflect-line (TRL) avec un kit Rohde & Schwartz ZV-WR10.

Les performances simulées et mesurées sont présentées sur la Figure 7. Le coefficient de réflexion est inférieur à -21,8 dB sur toute la bande de mesure et en dessous de -24,2 dB sur la bande W. Dans la bande 81 – 86 GHz, le coefficient  $S_{11}$  reste inférieur à -28,3 dB. Un bon accord simulation – mesure peut être globalement observé. Le pic d'absorption très marqué, observé en simulation, pourrait provenir de phénomènes de résonances liés à l'aspect discontinu de la découpe en tranches du modèle 3D. On ne retrouve pas ce pic en mesure probablement en raison des tolérances de l'impression FDM. Ces tolérances restent difficiles à contrôler en raison des très faibles dimensions du composant mais permettent néanmoins de démontrer la faisabilité.

Des travaux complémentaires ont mis en évidence l'importance du positionnement du capteur de fin de course en Z. Ceci peut entraîner une différence dans la hauteur des marches du biseau entre la première couche d'impression et les suivantes. Une grande attention doit alors être observée lors de l'étalonnage de l'imprimante.

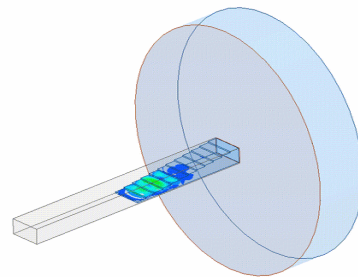


Figure 6. Amplitude du champ électrique simulée sous HFSS

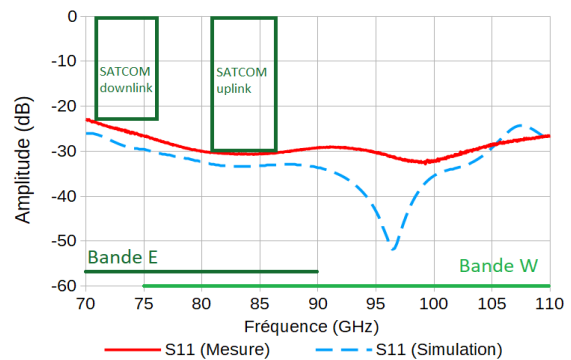


Figure 7. Comparaison des performances simulées et mesurées de la charge imprimée WR-10

## 5. A propos de la tenue en puissance

La tenue en puissance de ces charges n'a pas pu être mesurée directement. Le design en biseau offre une plus grande surface en contact avec le métal du guide que d'autres types de charge (pyramidale par exemple), facilitant l'évacuation de la chaleur. Néanmoins, la principale limite viendrait des températures de transition vitreuse ( $\sim 60$  °C) et de fusion ( $\sim 170$  °C) du PLA qui restent faibles ce qui laisse penser que les charges fabriquées auront une tenue en puissance limitée par rapport à des charges plus traditionnelles intégrant des céramiques. Une solution à ce problème pourrait être d'utiliser des composites imprimables dont les matrices présentent des températures maximales en service continu plus élevées comme le PEKK, le PEEK ou le PPS [8].

## 6. Conclusion

Nous avons démontré la faisabilité d'une charge pour guide d'onde millimétrique (WR-10) en utilisant un matériau commercial et des imprimantes 3D grand public. Cette charge permet d'assurer de bonnes performances ( $S_{11} < -21,8$  dB @ 70 – 110 GHz). Ce travail montre les possibilités offertes aux concepteurs de systèmes RF pour prototyper des composants rapidement et à bas coût. Il démontre aussi les capacités de réalisation de futurs front-ends imprimés en bande millimétrique.

## Références

- [1] Y. Arbaoui et al., « *Full 3D printed microwave termination: a simple and low cost solution* », IEEE Trans. Micr. Th. & Tech., vol. 64, n°1, pp. 271-278, 2016.
- [2] A. M. Cook et al., « *3D-printed mold electroforming for microfabrication of W-band TWT circuits* », 18th International Vacuum Electronics Conference (IVEC), 2017
- [3] A. Tamayo-Domínguez et al., « *3-D-Printed Modified Butler Matrix Based on Gap Waveguide at W-Band for Monopulse Radar* », IEEE Trans. Micr. Th. & Tech., vol 68, n°3, pp. 926-938, 2020
- [4] F. L. Borgne et al., « *An Integrated Monobloc 3D Printed Front-end in Ku-band* », 49th European Microwave Conference (EuMC), oct. 2019
- [5] V. Laur et al., « *Three-Dimensional Printing of Honeycomb Microwave Absorbers: Feasibility and Innovative Multiscale Topologies* », IEEE Trans. Electromagn. Compat., p. 1-8, 2020
- [6] Material Characterization Kit, Site internet de Swissto12, <https://mck.swissto12.ch/>
- [7] Y. Wang et al., « *Material Measurements Using VNA-based Material Characterization Kits Subject to Thru Reflect-Line Calibration.* », IEEE Trans. on THz Science and Tech., 2020
- [8] V. Laur et al., « *Heat-Resistant 3D Printed Microwave Devices* », 2018 Asia-Pacific Microwave Conference (APMC), Kyoto, nov. 2018.