



HAL
open science

Amélioration des performances d'une antenne patch rectangulaire en impression additive DFF par cavité d'air

T Fougroux, A Douyere, N M Murad, Jean-Lou Dubard, L Chane-Kuang-Sang

► To cite this version:

T Fougroux, A Douyere, N M Murad, Jean-Lou Dubard, L Chane-Kuang-Sang. Amélioration des performances d'une antenne patch rectangulaire en impression additive DFF par cavité d'air. Journées Nationales des Microondes 2022, Jun 2022, Limoges, France. pp.4. hal-03693687

HAL Id: hal-03693687

<https://hal.science/hal-03693687v1>

Submitted on 13 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.

Amélioration des performances d'une antenne patch rectangulaire en impression additive DFF par cavité d'air

T. FOUGEROUX¹, A. DOUYERE¹, N. M. MURAD¹, J-L. DUBARD² et L. CHANE-KUANG-SANG¹

¹ENERGY-Lab, Université de La Réunion, CS 92003- 97744 Saint Denis Cedex 9, France

²Universite Côte d'Azur, CNRS, LEAT, 930 route des Colles, 06903 Sophia Antipolis, France

tristan.fougeroux@univ-reunion.fr

Résumé — L'étude proposée dans cet article porte sur l'amélioration des performances d'une antenne patch rectangulaire, réalisée par fabrication additive via la technologie de dépôt de fil fondu (DFF). La méthode proposée consiste à insérer une cavité d'air dans le substrat de l'antenne entre la ligne d'alimentation et le plan de masse, afin de diminuer les pertes par propagation et d'adapter l'antenne. Les résultats de mesure, à la fréquence de 2,45 GHz, montrent une amélioration de la valeur $|S_{11}|_{dB}$ de 57% et un gain de +0,55 dB en transmission par rapport à une antenne non adaptée. Après la validation expérimentale des paramètres simulés de l'antenne, une comparaison numérique est présentée entre la méthode proposée et d'autres méthodes plus classiques.

1. Introduction

Les techniques de fabrication additive telles que l'impression 3D connaissent un intérêt grandissant depuis leur apparition [1]. L'impression 3D peut être décrite comme un processus additif permettant la réalisation d'un objet à partir d'un modèle numérique. Son utilisation est aujourd'hui présente dans plusieurs domaines, notamment dans le secteur industriel, automobile ou aéronautique, principalement pour sa capacité à produire rapidement des structures complexes à un coût réduit et sans perte de matière. À l'opposé, on retrouve des méthodes de fabrication dites soustractives qui sont privilégiées pour la production en grande série d'éléments avec une géométrie simple. Il existe différentes technologies d'impression additive, chacune d'entre elles comporte leurs avantages et inconvénients [2]. Notre choix s'est porté sur la technique d'impression DFF pour son faible coût et son accessibilité. De plus, cette technique de réalisation nous permettra de réaliser des antennes avec des géométries plus complexes (multicouches) et une certaine reproductibilité, ce qui n'est pas forcément le cas avec des méthodes traditionnelles.

La méthode proposée consiste à améliorer la propagation de l'onde à l'intérieur d'un substrat en insérant une cavité d'air entre la ligne d'alimentation et le plan de masse de l'antenne patch. Ce procédé introduit par Dahlehno dans ses travaux [3] a été utilisé afin de pouvoir fabriquer une antenne avec une fréquence de résonance reconfigu-

rable. De même, Ghazali [4] a présenté une antenne composée d'un substrat d'air, réalisée avec une technique d'assemblage comme le LEGO. Ces travaux ont mis en évidence la réduction des pertes et l'augmentation du gain des antennes. Ainsi, nous proposons d'intégrer la cavité directement dans le substrat de l'antenne entre la ligne d'alimentation et le plan de masse afin de faciliter la conception de l'antenne, de réduire les pertes en transmission et d'adapter l'impédance de l'antenne en modifiant la permittivité relative ϵ_r sous la ligne.

Ce papier s'articule comme suit : dans un premier temps, la conception et la réalisation de l'antenne patch rectangulaire en technologie DFF sont effectuées pour valider la concordance entre la simulation et la mesure. Puis une comparaison entre une antenne non adaptée et des antennes adaptées par encoches, par ligne quart d'onde et par cavité d'air est présentée. Enfin, une discussion est menée sur les résultats et positionne l'efficacité de notre méthode quant aux performances des antennes imprimées.

2. Conception et réalisation de l'antenne patch rectangulaire en impression additive

2.a. Caractérisation du substrat imprimé en PLA et du filament conducteur

Les matériaux utilisés pour la fabrication de l'antenne patch rectangulaire, en technologie DFF, sont en partie des bobines de filament imprimable. Pour le substrat de l'antenne nous choisissons un filament à base d'acide polylactique, plus communément appelé PLA. Nous fixons son épaisseur à 2 mm. Ses caractéristiques électromagnétiques (ϵ_r et $\tan \delta$) sont connues dans la littérature scientifique mais peuvent varier en fonction de sa composition et des paramètres d'impression. Aussi, la méthode du Stub [5] est utilisée pour préciser la permittivité relative du substrat imprimé et nous permet de déduire $\epsilon_r = 2,56$. De même, la méthode décrite dans les travaux de Pizarro [6] permet de déduire que $\tan \delta = 0,02$ pour le PLA utilisé. Les pertes dans le PLA sont donc proches de celles de l'époxy FR4. Le filament conducteur Electrifi [7] est utilisé pour concevoir l'élément rayonnant avec une conductance typique de $16667 S.m^{-1}$ pour un filament brut non imprimé qui varie en fonction des paramètres et de la géométrie d'impres-

sion. Pour notre configuration d'impression, en pratique, nous obtenons une conductance de $2500 S.m^{-1}$ et fixons une épaisseur d'1 mm pour l'impression des éléments rayonnants. De manière générale, l'efficacité de l'antenne patch réalisée en impression 3D DFF est plus faible que les antennes patches réalisées avec les méthodes de gravure chimique ou mécanique. Cela est dû aux pertes par métallisation venant de la conductance du filament Electrifi. Les paramètres d'impression du PLA et de l'Electrifi sont décrits dans le tableau 1 pour l'imprimante 3D Creality Ender 3 et une buse de diamètre 0,2 mm.

Paramètres d'impressions	PLA	Electrifi
Température d'extrusion	210°C	160°C
Température du plateau	60°C	27°C
Vitesse d'impression	60 mm/s	15 mm/s
Hauteur de couche	0,2 mm	0,2 mm

Tableau 1. Paramètres d'impression pour les différents matériaux

2.b. Étude de la cavité d'air dans le substrat pour une ligne de 50Ω et pour une antenne patch

Une étude paramétrique est menée afin de déterminer les dimensions optimales de la cavité d'air à insérer en dessous de la ligne tout en tenant compte des contraintes d'impression. L'imprimante 3D est capable d'imprimer 5 mm dans le vide, au-delà de cette valeur, un affaissement se produit et fragilise la structure. Aussi, toutes les études sont effectuées en fonction de la précision (axes X, Y et Z) de l'imprimante 3D quant à la réalisation des différents éléments de l'antenne.

Cette étude est réalisée en simulation et se focalise sur l'optimisation de la transmission de puissance (paramètre $|S_{12}|_{dB}$) entre 2 ports de 50Ω à la fréquence de 2,45 GHz. Dans un premier temps, la largeur est fixée à 4,9 mm, l'épaisseur de la cavité est fixée à 1 mm et la longueur varie de 5 mm à 20 mm par pas de 1 mm (figure 1(a)). Puis, la longueur de la cavité (L_{ligne}) est fixée à 20 mm, l'épaisseur de la cavité (h_{cav}) est fixée à 1 mm et la largeur (l_{ligne}) varie de 1 mm à 10 mm par pas de 1 mm (figure 1(b)). Et enfin, la longueur de la cavité est fixée à 20 mm, la largeur à 4,9 mm et l'épaisseur varie de 0,1 mm à 1 mm (figure 1(c)).

La figure 1 montre les résultats obtenus et permet d'observer que : l'augmentation de la largeur de la cavité permet de réduire les pertes en transmission de puissance. Au-delà de 5 mm, il n'y a plus d'amélioration significative.

L'augmentation de la longueur entraîne une diminution des pertes en transmission.

De même, une augmentation de l'épaisseur de la cavité diminue les pertes en transmission qui semblent se stabiliser autour d'1 mm.

Les dimensions optimales retenues pour la suite, à partir de cette étude, prenant en compte à la fois les contraintes d'impression et le minimum de pertes en transmission de puissance entre 2 ports 50Ω sont précisées sur la figure 3.

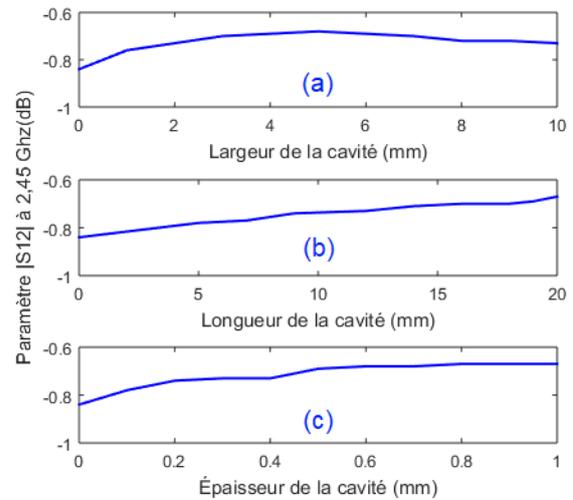


Figure 1. Étude paramétrique sur la largeur (a), longueur (b) et l'épaisseur (c) en simulation de l'impact de la cavité d'air dans le substrat sur une ligne 50Ω en transmission

Afin de confirmer l'impact de la cavité d'air sur la transmission de puissance d'une ligne 50Ω , une mesure du paramètre $|S_{12}|_{dB}$ est effectuée. La réalisation de la ligne avec et sans cavité se fait pour les dimensions optimales trouvées (figure 3) et pour une ligne de longueur fixée à 30 mm. La figure 2 montre les résultats de mesures. La diminution des pertes dans le substrat augmente en fonction de la fréquence. À la fréquence de 2,45 GHz, on a une diminution des pertes d'environ 0,33 dB, ce qui correspond à une augmentation de 8,6% de la puissance transmise.

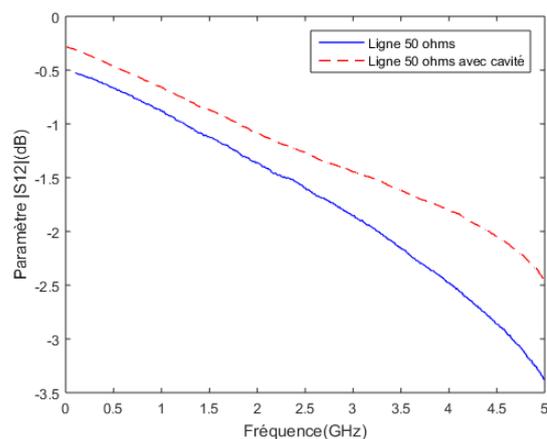


Figure 2. Mesure en transmission d'une ligne 50Ω avec et sans cavité

2.c. Conception des antennes patches rectangulaires en impression 3D DFF

Les dimensions du patch rectangulaire sont déterminées pour une fréquence de fonctionnement de 2,45 GHz

à l'aide du logiciel EMPro[®] et sont présentées sur la figure 3. La figure 4 montre une photo de la réalisation de cette antenne.

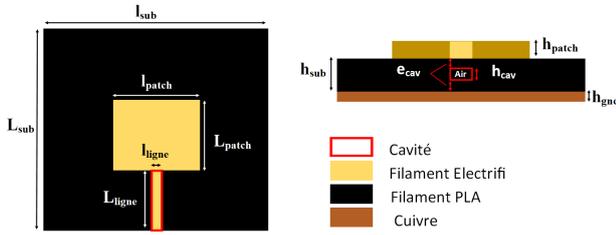


Figure 3. Dimensions de l'antenne patch et de la cavité

$$\begin{aligned}
 l_{patch} &= 43,2 \text{ mm}; L_{patch} = 34,7 \text{ mm}; \\
 l_{ligne} &= 4,9 \text{ mm}; L_{ligne} = 20 \text{ mm}; \\
 l_{sub} = L_{sub} &= 90 \text{ mm}; h_{gnd} = 50 \mu\text{m}; h_{sub} = 2 \text{ mm}; \\
 h_{patch} &= 1 \text{ mm}; h_{cav} = 1 \text{ mm}; e_{cav} = 0,5 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

La cavité d'air est introduite sous la ligne d'amenée de l'antenne patch. La figure 5 montre l'impact de la cavité d'air sur le coefficient de réflexion de l'antenne.

En plus de permettre la diminution des pertes en transmission, on observe que la cavité d'air apporte une modification sur l'impédance caractéristique de la ligne d'alimentation de l'antenne. L'introduction d'air dans le substrat a pour conséquence la modification de ϵ_r entre la ligne et le plan de masse. Il devient alors possible d'adapter une antenne et d'augmenter la puissance transmise à l'élément rayonnant.

Une deuxième étude paramétrique est faite sur la cavité d'air en présence de l'élément rayonnant de l'antenne. Cette étude permet de montrer l'évolution du coefficient de réflexion en fonction des dimensions de la longueur de la cavité d'air de l'antenne. La figure 6 nous montre les résultats de cette étude.

Afin d'évaluer les performances de la cavité d'air sur une antenne patch, une comparaison entre différentes méthodes d'adaptation est effectuée. Des antennes patchs rectangulaires en PLA et Electrifi adaptées par encoche et ligne quart d'onde sont donc conçues. Les dimensions des encoches et de la ligne quart d'onde sont calculées à l'aide des méthodes présentes dans la littérature [8, 9], et optimisées en simulation.

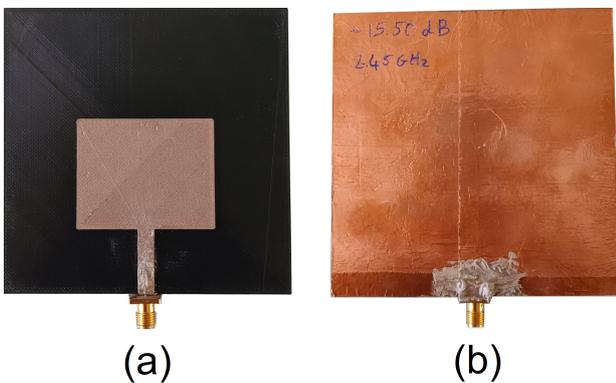


Figure 4. Photo (a) recto (b) verso de l'antenne patch réalisée en impression additive DFF

3. Résultats et discussion

3.a. Résultats de mesure de l'antenne patch rectangulaire avec et sans cavité

Nous présentons sur la figure 5 la simulation et la mesure du paramètre $|S_{11}|_{dB}$ d'une antenne réalisée avec et sans cavité. Les résultats obtenus montrent une bonne concordance. L'erreur présente pour l'antenne avec cavité peut être expliquée par la non homogénéité de la partie supérieure de la cavité d'air dans le substrat lors de la réalisation. Cela nous permet tout de même de valider les valeurs de ϵ_r , de $\tan \delta$, et de la conductance du filament Electrifi. Nous observons également que l'antenne patch sans méthode d'adaptation possède un paramètre $|S_{11}|_{dB}$ inférieur à -10 dB pour 2,45 GHz bien que son impédance complexe (Tableau 2) ne soit pas adaptée à 50 Ω . La conductance du filament Electrifi augmente les pertes par métallisation de l'antenne, ce qui a potentiellement pour effet d'absorber la puissance réfléchiée et permettrait d'expliquer ce phénomène observable sur le paramètre $|S_{11}|_{dB}$.

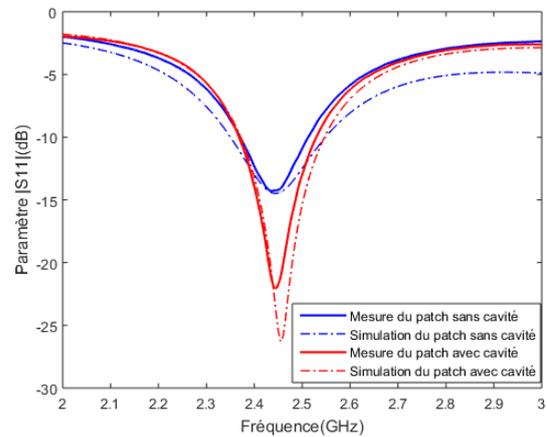


Figure 5. Simulation et mesure du coefficient de réflexion de l'antenne patch avec et sans cavité

Afin de vérifier l'amélioration apportée par la cavité, une étude consiste à mesurer le paramètre $|S_{12}|_{dB}$ en transmission entre deux antennes identiques, avec et sans cavité d'air, alignées à une distance de 2λ . La puissance injectée à l'antenne est de 0 dBm. A partir de la mesure et de la relation de FRIIS, on déduit un gain de +0,55 dB en transmission pour les antennes avec cavité soit 13,3% de puissance transmise en plus.

3.b. Résultats de l'étude paramétrique sur la longueur de la cavité d'air dans l'antenne patch

L'étude paramétrique sur la longueur de la cavité d'air montre la modification de l'impédance globale de l'antenne ramenée au port d'entrée. Il est donc possible d'adapter l'antenne patch rectangulaire en insérant une cavité d'air dans son substrat entre la ligne d'alimentation et le plan de masse. La figure 6 montre que dans notre configuration, l'augmentation de la longueur de la cavité augmente le réel de l'impédance complexe de l'antenne. Cependant le meilleur point d'adaptation ne se trouve pas à la longueur maximale de la cavité (20 mm).

Un compromis doit donc être fait entre les diminutions des pertes en transmission et l'adaptation de l'antenne. La meilleure adaptation de l'antenne se fait pour une cavité de longueur 15 mm.

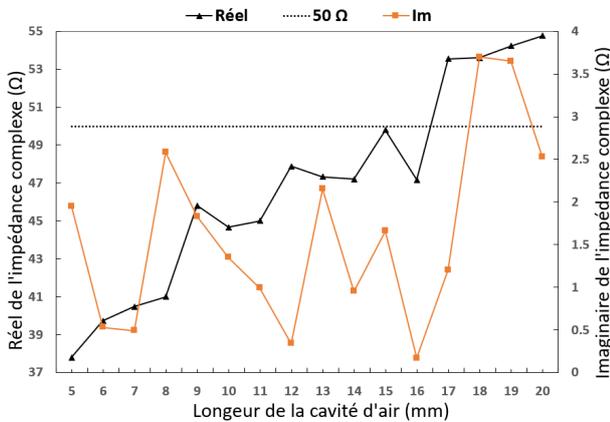


Figure 6. Étude paramétrique de l'impact de la longueur de la cavité sur l'adaptation de l'antenne patch rectangulaire à la fréquence 2,45 GHz

3.c. Comparaison des méthodes d'adaptation

Une deuxième étude porte sur la comparaison entre les différentes méthodes d'adaptation d'antenne patch, à savoir par encoches, par ligne quart d'onde et celle proposée par cavité d'air. Les dimensions des encoches et de la ligne quart d'onde ont été optimisées en tenant compte de la précision de l'impression. Le tableau 2 résume les performances des antennes pour chaque méthode d'adaptation : ① antenne non adaptée (réalisée), ② antenne adaptée par encoches (simulée), ③ antenne adaptée par ligne quart d'onde (simulée), ④ antenne adaptée par cavité d'air (réalisée) et ⑤ antenne adaptée par cavité d'air (simulée pour la meilleure adaptation d'impédance).

Type d'antenne	①	②	③	④	⑤
$ S_{11} $ (dB)	-14	-27,1	-22,7	-22	-35,6
Gain réalisé (dBi)	0,8	0,3	1,2	1,27	1,04
Impédance C (Ω)	34,8+j5,3	50,15+j4,4	54-j9,2	53,2+j1	49,8+j1,66
Efficacité (%)	18,66	17,3	21	20,52	19,67

Tableau 2. Caractéristiques simulées des antennes en fonction de la technique d'adaptation à la fréquence 2,45 GHz

Les résultats (en réalisation) confirment que la cavité d'air améliore de 57% la valeur du $|S_{11}|_{dB}$ à 2,45 GHz par rapport à l'antenne sans cavité, fournit une bonne efficacité de rayonnement par rapport aux autres techniques mais n'apporte aucune amélioration significative sur la bande passante de l'antenne. Nous observons une faible efficacité du rayonnement de l'antenne pour l'adaptation par encoches ce qui peut-être expliquer par la diminution de la surface de l'élément rayonnant. L'antenne ⑤, bien qu'elle soit mieux adaptée que l'antenne ④, possède une efficacité de rayonnement et un gain moins élevé. Cela peut-être expliqué par la plus petite longueur de la cavité

entraînant des pertes supplémentaires au niveau de la ligne et donc une efficacité moindre.

4. Conclusion

L'optimisation d'une antenne patch rectangulaire réalisée en impression additive par technologie DFF avec du PLA et du filament conducteur Electrifi a été présentée. L'insertion d'une cavité d'air dans le substrat améliore les performances de l'antenne. Il peut être également noté que cette technique est plus efficace que les techniques classiques d'adaptation.

5. Remerciements

Ces travaux ont reçu le soutien financier de la Région Réunion et de l'Union Européenne - Fonds européen de développement régional (FEDER) PO -2020.

Références

- [1] D. Helena et al., "Antenna Design Using Modern Additive Manufacturing Technology : A Review," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 177 064–177 083, 2020, conference Name : IEEE Access.
- [2] P. Shakor et al., "Review of Emerging Additive Manufacturing Technologies in 3D Printing of Cementitious Materials in the Construction Industry," *Frontiers in Built Environment*, vol. 4, p. 85, 2019.
- [3] R. Al-Dahleh et al., "Frequency-agile microstrip patch antenna using a reconfigurable mems ground plane," *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 43, no. 1, pp. 64–67, 2004.
- [4] M. I. M. Ghazali et al., "3-d printed air substrates for the design and fabrication of rf components," *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, vol. 7, no. 6, pp. 982–989, 2017.
- [5] Y.-H. Chou et al., "Measurement of rf pcb dielectric properties and losses," *Progress in Electromagnetics Research Letters*, vol. 4, pp. 139–148, 2008.
- [6] F. Pizarro et al., "Parametric Study of 3d additive printing parameters using conductive filaments on microwave topologies," *IEEE Access*, vol. 7, 2019.
- [7] "Electrifi," www.multi3dillc.com/product/electrifi/.
- [8] M. Ramesh and Y. KB, "Design formula for inset fed microstrip patch antenna," *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications (JMoe)*, vol. 3, no. 3, p. 5–10, May 2002. [Online]. Available : <http://www.jmoe.org/index.php/jmoe/article/view/108>
- [9] H. ERRIFI et al., "Étude comparative de l'influence des deux méthodes d'adaptation d'impédance sur la performance de l'antenne patch rectangulaire a la fréquence 10 ghz," 05 2014.