



**HAL**  
open science

## Réalisation d'un réseau de rectennas en impression 3D-DFE pour la récupération d'énergie électromagnétique

Tristan Fougeroux, Alexandre Douyère, Nour Mohammad Murad, Laurent  
Chane Kuang Sang, Jean-Lou Dubard

► **To cite this version:**

Tristan Fougeroux, Alexandre Douyère, Nour Mohammad Murad, Laurent Chane Kuang Sang, Jean-Lou Dubard. Réalisation d'un réseau de rectennas en impression 3D-DFE pour la récupération d'énergie électromagnétique. Journées Nationales Microondes (JNM), Jun 2024, Antibes, France. , 2024. hal-04630420

**HAL Id: hal-04630420**

**<https://hal.science/hal-04630420v1>**

Submitted on 1 Jul 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.

# Réalisation d'un réseau de rectennas en impression 3D-DFF pour la récupération d'énergie électromagnétique

T. Fougeroux<sup>1</sup>, A. Douyère<sup>1</sup>, N. M. Murad<sup>2</sup>, L. Chane-Kuang-Sang<sup>1</sup>, J.-L. Dubard<sup>3</sup>

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

<sup>2</sup>PIMENT Lab, Network and Telecom Dpt, 40, Avenue de Soweto, Saint Pierre, France

<sup>3</sup>LEAT, Campus SophiaTech 930 Route des Colles 06903 Sophia Antipolis

tristan.fougeroux\_univ-reunion.fr

**Résumé** — Cet article présente la conception et la réalisation, via l'impression 3D, d'un convertisseur RF/DC. La technologie de dépôt de fil fondu (DFF) est utilisée pour fabriquer les éléments dans la bande passante du Wifi. L'antenne étudiée est un dipôle en forme de H dont le substrat est imprimé en acide polylactique (PLA) et la partie conductrice en filament conducteur Electrifi. Une première étude est effectuée sur la conception d'une rectenna unitaire et montre une efficacité de 17,5 % pour une puissance collectée de -3,5 dBm. Puis une étude expérimentale est menée sur l'optimisation d'un réseau de deux éléments avec une configuration de connexion en série. Les résultats confirment l'amélioration significative des performances du réseau avec plus du double de la tension continue mesurée en sortie. Cette approche, axée sur l'impression 3D-DFF, présente une perspective prometteuse pour la réalisation de rectenna.

## 1. Introduction

L'émergence et l'expansion rapide de l'Internet des Objets (IoT) ont soulevé des questions cruciales quant à l'autonomie énergétique des multiples nœuds de capteurs déployés dans divers environnements. Bien que les batteries sont utilisées pour alimenter les nœuds, elles présentent des inconvénients notables tels que leur durée de vie limitée, leur besoin de remplacement ou de recharge, ainsi que leurs implications environnementales. Une alternative prometteuse pour surmonter ces contraintes consiste à mettre en œuvre des solutions de récupération d'énergie, offrant la possibilité de convertir de manière efficace l'énergie disponible dans l'environnement immédiat en une source d'alimentation renouvelable pour ces appareils connectés [1]. Dans ce contexte, les rectennas, ou rectifying antenna, sont des dispositifs capables de capter des ondes électromagnétiques et de les convertir en énergie électrique directement exploitable. Elles peuvent être utilisées en transmission d'énergie sans fil (TESF) ou en récupération d'énergie sans fil.

Habituellement, la gravure chimique et mécanique sont utilisées pour réaliser des rectennas. La gravure chimique est largement utilisée pour le prototypage, ainsi que dans la fabrication industrielle de circuit RF, mais elle

présente des limites. En effet, elle nécessite l'utilisation de produits chimiques corrosifs et potentiellement dangereux. La gravure mécanique est une option plus respectueuse de l'environnement qui offre une flexibilité lors du prototypage mais entraîne souvent des coûts plus élevés et nécessite un équipement spécialisé. Ces deux méthodes soustractives produisent des pertes de matériaux plus ou moins importantes liées à leur principe de fonctionnement. Ainsi, l'utilisation de l'imprimante 3D est une alternative intéressante permettant de se soustraire à certaines contraintes imposées par les méthodes de fabrication soustractives [2].

Des travaux antérieurs ont démontré la faisabilité d'une rectenna fabriquée en impression 3D-DFF selon une topologie série [3]. Cependant, ces travaux ont révélé une efficacité limitée de la rectenna avec une structure composée d'un substrat en PLA, de métallisation en filament conducteur Electrifi et d'un plan de masse en cuivre. Le maximum de rendement obtenu dans cette configuration pour une puissance d'entrée de +10 dBm est de 17,3 % avec une charge optimale de 400  $\Omega$ . La conductivité électrique du filament Electrifi est bien inférieure à celle du cuivre, ce qui explique les pertes supplémentaires (pertes par métallisation).

Dans la perspective d'améliorer le rendement de conversion RF/DC d'une rectenna en impression 3D-DFF, une première étude est menée sur l'optimisation de celui-ci en adoptant la topologie parallèle. Puis pour accroître la puissance reçue en réception d'un système TESH, l'étude d'un réseau de 2 rectennas est présentée. Finalement, les résultats sont analysés et interprétés.

## 2. Conception d'une rectenna H

### 2.a. Caractérisation des matériaux

Dans cette sous-section, l'accent est mis sur la caractérisation des matériaux utilisés lors de la conception de la rectenna. De nos jours, de nombreux matériaux existent et peuvent être utilisés avec l'impression 3D-DFF, néanmoins pour fabriquer une rectenna, l'utilisation d'un matériau isolant pour le substrat et d'un matériau conducteur pour l'élément rayonnant sont nécessaires. Pour le substrat, le PLA a été sélectionné pour sa facilité d'utilisation et son bas coût. Cependant, c'est un matériau dit biodé-

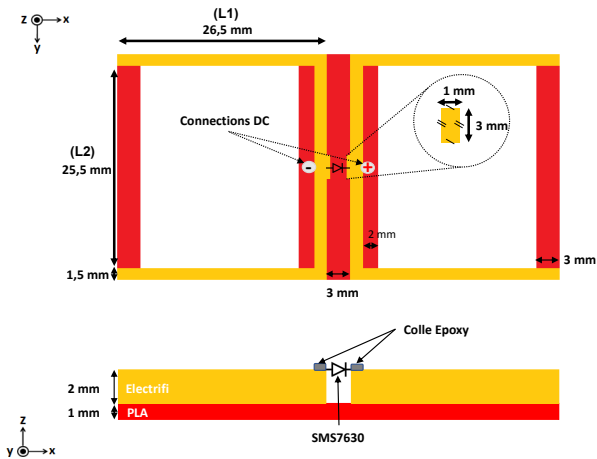


FIGURE 1. Dimensions de la rectenna H

gradable et il est également sensible aux fortes variations de température. Selon les conditions d'utilisation, il pourrait être remplacé par de l'ABS (Acrylonitrile butadiène styrène) qui est beaucoup plus robuste mais présente plus de contraintes à l'impression. Un banc de test a été mis en oeuvre pour la caractérisation électromagnétique du PLA et est présenté dans [4]. Nous obtenons une permittivité  $\epsilon_r = 2,56$  et des pertes tangentielles  $\tan\delta = 0,02$ . Pour la partie conductrice de la rectenna, le filament Electrifi [5] est sélectionné. Sa conductivité électrique mesurée est environ égale à  $2500 S.m^{-1}$ . Les paramètres d'impression sont détaillés dans le tableau 1.

Paramètres d'impression	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

### 2.b. Antenne de réception

Notre choix s'est porté sur l'antenne en H de type dipôle pour sa simplicité de conception et sa compatibilité avec le redresseur de topologie parallèle. Pour les dimensions de l'antenne, nous fixons dans un premier temps les longueurs L1 et L2 à  $\frac{\lambda}{4}$ . Puis, les dimensions sont ajustées empiriquement à l'aide du logiciel de simulation EMPro (voir figure 1).

À cet étape, la diode n'est pas encore connectée mais un câble SMA est collé à l'antenne avec de la colle conductrice (voir figure 2) pour effectuer la mesure des paramètres S. La figure 2 illustre la simulation et la mesure du coefficient de réflexion de l'antenne H. Le gain simulé de l'antenne est de 1,5 dBi.

Les résultats montrent une tendance similaire avec une résonance observée à la fréquence de 2,45 GHz. Cependant, la mesure montre la présence de plusieurs résonances potentiellement induites par l'ajout du câble SMA. En effet, la calibration du VNA est effectuée dans le plan de

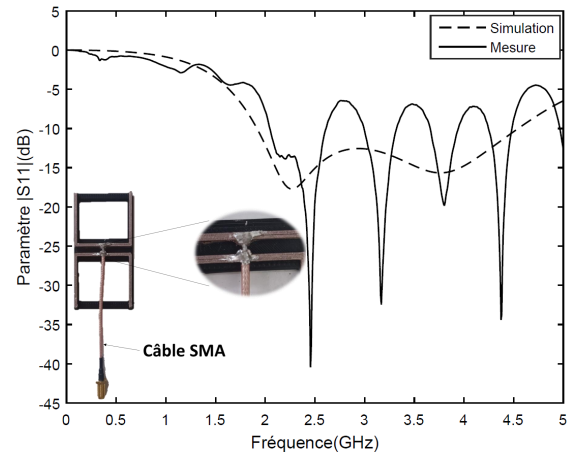


FIGURE 2. Coefficient de réflexion de l'antenne H simulé et mesuré

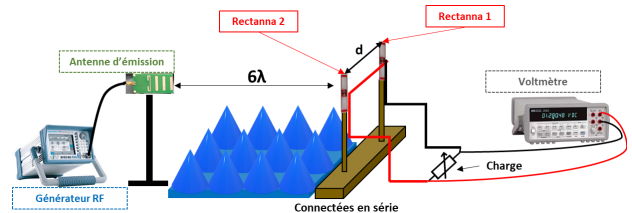


FIGURE 3. Banc de mesure du couplage optimal entre deux rectennas

référence situé à l'extrémité du câble SMA.

### 2.c. Circuit de redressement

Comme précisé précédemment, nous faisons le choix d'une topologie parallèle pour le redresseur. Pour l'élément actif notre choix s'est porté sur la diode Schottky SMS7630 en raison de ses performances adaptées aux faibles niveaux de puissance [6]. La diode est connectée au centre de l'antenne à l'aide d'une colle conductrice [7]. Les performances de la rectenna réalisée sont mesurées à l'aide d'un banc de test et détaillées dans la section 4..

## 3. Mise en réseau de 2 rectennas

Pour accroître la quantité d'énergie reçue, un réseau de 2 rectennas est conçu. L'objectif principal de cette section est de déterminer la distance optimale entre deux éléments afin d'obtenir un couplage électromagnétique optimal.

Un banc de mesure, représenté sur la figure 3, a été mis en place et est composé d'un générateur RF, d'une antenne d'émission, et d'un support en réception positionné à une distance de  $6\lambda$ . Les deux rectennas ont été mises en série dans le but d'accroître la tension de sortie.

L'étude paramétrique consiste à faire varier la distance  $d$  entre les 2 rectennas par incréments de 1 cm et de relever la tension combinée maximale de sortie correspondante. Les résultats sont présentés sur la figure 4 et montrent une distance optimale de 9 cm par rapport au centre des rectennas. Ainsi, la photo du réseau réalisé est ajoutée sur la figure 7.

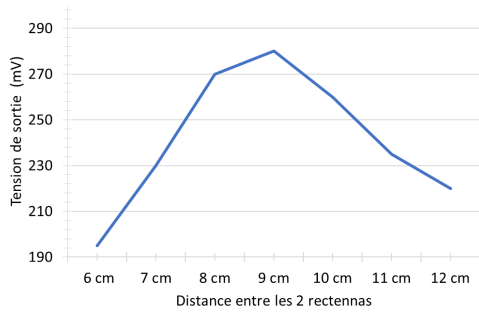


FIGURE 4. Tension de sortie en fonction de la distance entre 2 rectennas H mise en série

## 4. Résultats et discussions

### 4.a. Rectenna unitaire

Les résultats de mesure de la rectenna unitaire sont exposés dans cette sous-section. Étant donné que le redresseur est intrinsèquement lié à l'antenne dans le cas de notre rectenna H, nous calculons l'efficacité globale de la rectenna. Pour ce faire, nous commençons par mesurer la puissance reçue par l'antenne H dans une configuration spécifique, en utilisant un powermeter et en tenant compte des pertes dans les câbles. Ensuite, nous procédons à la mesure de la puissance DC en sortie de la rectenna dans la même configuration, afin d'en déduire son rendement. Des simulations TLM sont également exécutées et les résultats sont comparés aux mesures pour renforcer l'estimation de la puissance d'entrée de la rectenna. Les performances de celle-ci pour plusieurs points de fonctionnement, sont présentées respectivement sur les figures 5 et 6. Les tensions simulées et mesurées concordent bien. Les écarts entre les efficacités simulées et mesurées résultent des incertitudes de mesure et d'une possible surestimation des pertes dans l'épaisseur de colle simulée avec seulement une cellule TLM. L'ajout de la diode à l'antenne H peut perturber l'impédance totale (antenne + diode). Cependant, en effectuant une variation de fréquence autour de 2,45 GHz, il est observé que le point de fonctionnement optimal demeure à cette fréquence. De plus, les performances restent quasi-identiques entre 2 GHz et 2,8 GHz. La rectenna proposée démontre ainsi une large bande passante. Sur la figure 5, on peut observer que la charge optimale de la rectenna a tendance à diminuer avec l'augmentation de la puissance collectée. Nous avons respectivement 250  $\Omega$ , 350  $\Omega$  et 700  $\Omega$  pour des puissances reçues de -3,5 dBm, -8,5 dBm et -12 dBm. Il est relevé dans la littérature que les charges optimales des rectennas réalisées en Electrifi sont inférieures à 1000  $\Omega$  [3, 8]. Ceci peut être attribué à la résistance électrique du filament qui est supérieure à celle du cuivre. Ainsi, la résistance intrinsèque de la rectenna réalisée en Electrifi est plus élevée ce qui impact directement le courant et donc la charge.

### 4.b. Réseau de 2 rectennas

Afin de montrer l'efficacité du réseau de rectennas, une analyse comparative est menée entre la tension de sortie de

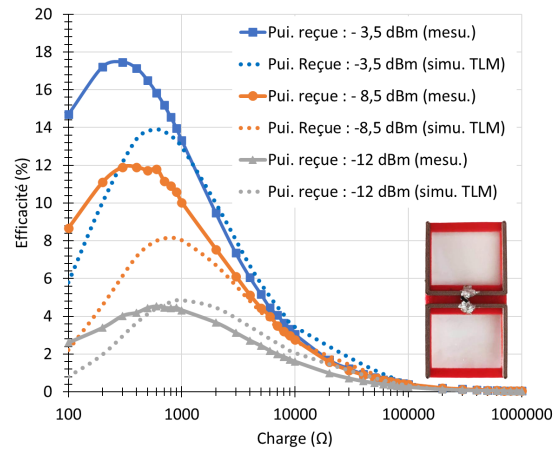


FIGURE 5. Efficacité de la rectenna proposée H en fonction de la charge et pour différentes puissances d'entrées

ce réseau et une seule rectenna, dans des conditions de mesure identiques. Autrement dit, la distance entre l'antenne d'émission et les rectennas est de  $6\lambda$  et la puissance injectée à l'antenne d'émission est de +15,7 dBm. Dans cette configuration, une rectenna reçoit -13,5 dBm de puissance et le réseau de 2 rectenna reçoit une puissance de -10,2 dBm. Les résultats de cette comparaison sont illustrés sur la figure 7. Pour une charge de 1 M $\Omega$ , on note une augmentation de la tension de sortie avec le réseau de 112% ( $\times 2,12$ ), ce qui conforte l'optimisation de la distance effectuée entre les rectennas et donc de son efficacité. Ces résultats mettent en évidence les avantages et le potentiel d'augmentation de la tension de sortie lorsque plusieurs rectennas sont combinées en réseau.

### 4.c. Comparaison des performances

Dans le but de démontrer les avantages de la topologie parallèle lors de l'utilisation du filament Electrifi, la rectenna en H seule est comparée à une rectenna en topologie série introduite dans [3]. De même, une troisième rectenna en topologie parallèle introduite dans [8] est également comparée. Ce sont à ce jour les seules rectennas réalisées avec le filament Electrifi. Les résultats sont présentés dans le tableau 2. On constate que pour un niveau de puissance en entrée moins élevé, la rectenna proposée affiche une efficacité de 17,5 %. En revanche, pour atteindre une efficacité similaire, la rectenna en topologie série [3] nécessite une puissance d'entrée de plus de +10 dBm. Ces observations démontrent clairement que la topologie parallèle est nettement plus efficace que celle en série lorsqu'il s'agit d'utiliser la technique d'impression 3D-DFP d'une rectenna avec le filament conducteur Electrifi. La petite taille du circuit redresseur et le mode de propagation des ondes dans une antenne de type dipôle permettent donc de réduire les pertes ohmiques. De plus, la rectenna proposée affiche des performances supérieures à celle introduite dans [8] et ceci malgré une configuration similaire.

Références	Fréquence	Topologie	Puissance reçue par l'antenne	Charge optimale ( $\Omega$ )	Efficacité
[3]	2,45 GHz	Série (SMS7630)	+10 dBm	400	17,3 %
[8]	2,4 GHz	Parallèle (HSMS 285B)	+14,61 dBm	400	7 %
Ce travail	2,45 GHz	Parallèle (SMS7630)	- 3,5 dBm	350	17,5 %

TABLEAU 2. Comparaison entre la rectenna proposée et la littérature

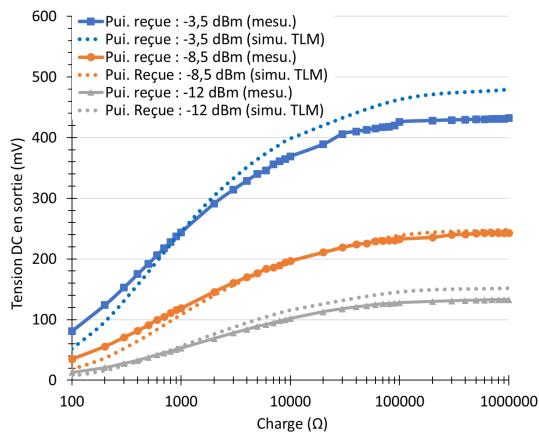


FIGURE 6. Tension en sortie d'une rectenna en fonction de la charge pour différentes puissances d'entrées

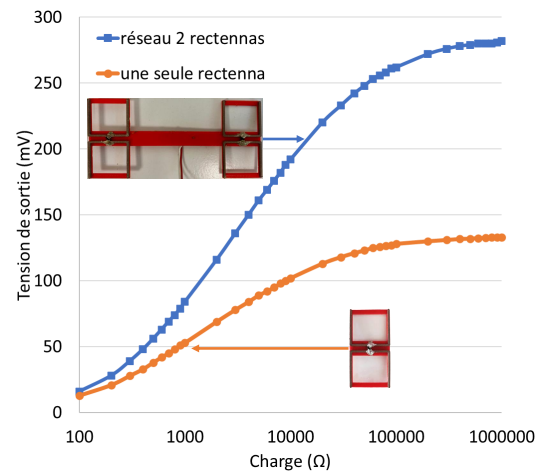


FIGURE 7. Comparaison des tensions de sortie d'une seule rectenna et d'un réseau de 2 rectennas en fonction de la charge

## 5. Conclusion

Dans cette étude, un réseau de rectennas de H réalisé par impression 3D-DFF pour la récupération d'énergie sans fil a été présenté. Le PLA a été utilisé comme substrat de l'antenne et le filament conducteur Electrifi pour la partie conductrice. Cette rectenna, de part sa fabrication, offre une alternative respectueuse de l'environnement aux méthodes de fabrication soustractives. La conception de l'antenne H, adaptée à une fréquence de 2,45 GHz, a été dans un premier développé. Les mesures de coefficient de réflexion et de gain ont validé les performances de l'antenne. La mise en réseau de deux rectennas visait à augmenter l'énergie récoltée en recherchant une distance optimale pour un couplage idéal. Les résultats expérimentaux ont permis de caractériser les performances du réseau de rectennas. En comparant nos résultats avec la rectenna de topologie série [3] et celle proposée par [8], notre rectenna en forme de H, en plus d'être plus efficace seule, affiche également des performances élevées et encourageantes en réseau.

## 6. 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. Ces travaux bénéficient d'un accès aux ressources informatiques du TGCC CEA à travers l'allocation de ressource 2023-AD010505122R2 attribuée par GENCI.

## Références

- [1] T. Bouguera, "Capteur Communicant Autonome en Énergie pour l'IoT," Theses, Université de Nantes, Mar. 2019. [Online]. Available : <https://hal.science/tel-02092386>
- [2] B. Redwood *et al.*, *The 3D printing handbook : technologies, design and applications.* 3D Hubs, 2017.
- [3] T. Fougeroux *et al.*, "A 3-d printed conformal rectenna with series topology using fused filament fabrication method," in *2023 IEEE Radio and Antenna Days of the Indian Ocean (RADIO)*, 2023, pp. 1–2.
- [4] —, "Amélioration des performances d'une antenne patch rectangulaire en impression additive DFF par cavité d'air," in *Journées Nationales des Microondes 2022*, ser. 22e Journées Nationales Microondes; Recueil des Actes, Limoges, France, Jun. 2022, p. 4.
- [5] "Electrifi," [www.multi3dillc.com/product/electrifi/](http://www.multi3dillc.com/product/electrifi/).
- [6] J. Rivière *et al.*, "A 2.45 GHz ISM Band CPW Rectenna for Low Power Levels," *Progress In Electromagnetics Research C*, vol. 77, pp. 101–110, Aug. 2017. [Online]. Available : <https://hal.univ-reunion.fr/hal-01633732>
- [7] "8331d - adhésif époxy conducteur argenté," <https://mgchemicals.com/products/adhesives/electrically-conductive-adhesives/silver-epoxy/>.
- [8] Z. Viskadourakis *et al.*, "3d-printed metasurface units for potential energy harvesting applications at the 2.4 ghz frequency band," *Crystals*, vol. 11, p. 1089, 09 2021.