



HAL
open science

Conception et réalisation d'un convertisseur RF/DC dédié à la collecte de faibles niveaux de puissance

Alexandre Douyère, Samuel Emilien Rivière, Jérôme Rivière, Frédéric
Aicalapa, Jean-Daniel Lan Sun Luk

► **To cite this version:**

Alexandre Douyère, Samuel Emilien Rivière, Jérôme Rivière, Frédéric Aicalapa, Jean-Daniel Lan Sun Luk. Conception et réalisation d'un convertisseur RF/DC dédié à la collecte de faibles niveaux de puissance. Journées Nationales Microondes, May 2013, Paris, France. hal-01137832

HAL Id: hal-01137832

<https://hal.science/hal-01137832>

Submitted on 31 Mar 2015

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 et réalisation d'un convertisseur RF/DC dédié à la collecte de faibles niveaux de puissance

Alexandre Douyère¹, Samuel Rivière², Jérôme Rivière¹, Frédéric Alicalapa¹ et J.-D Lan Sun Luk¹

¹LE2P, Université de la Réunion, 15 Av. René Cassin, 97715 Saint Denis

²OSCAD, 81 rue Georges Lebeau, 97431 La Plaine des Palmistes

Alexandre.douyere@univ-reunion.fr : correspondant principal

Résumé

Cet article présente la conception et la réalisation d'une rectenna optimisée à $f_0=2,45\text{GHz}$ pour de faibles niveaux de puissance. En effet, un des principaux défis est de pouvoir récupérer l'énergie RF ambiante dans le but de collecter une puissance globale $P_{collectée}=-20\text{dBm}$. Ainsi, le choix du convertisseur RF/DC s'est orienté vers une topologie série du circuit de redressement couplé à une antenne patch circulaire à fente, permettant une diminution de la taille globale du circuit ($51*61\text{mm}^2$). Cette étude montre qu'un rendement de conversion RF/DC d'environ 20% est obtenu pour une puissance collectée $P_{collectée}=10\mu\text{W}$ avec une charge optimale $R_{Load}=3,5\text{k}\Omega$.

1. Introduction

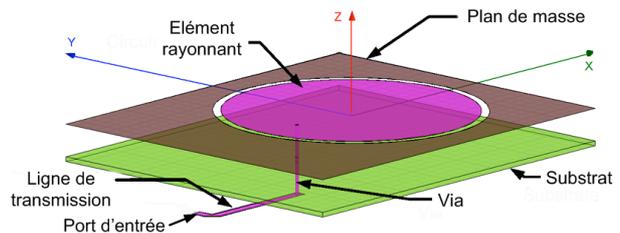
De nos jours, l'émergence du transport d'énergie sans fil [1] est motivée par le souhait à terme, d'éliminer la majorité des câbles de liaison entre les systèmes. Ce concept novateur, sans danger pour l'Homme, élimine les problèmes inhérents aux connexions filaires et permet de s'affranchir des contraintes liées à la maintenance des batteries. Ainsi deux techniques ont vu le jour et permettent un tel résultat : la première assure un transfert de l'énergie sans fil via des résonances magnétiques fortement couplées [2]. La seconde convertit le rayonnement des ondes électromagnétiques en courant continu (la rectenna) [3]. Cet article s'appuie sur cette deuxième technique dont l'objectif est de développer une rectenna compacte et performante pouvant récupérer les ondes électromagnétiques de faibles densités de puissance (de l'ordre du $\mu\text{W}/\text{cm}^2$) et de les convertir en courant continu. Cette rectenna sera par la suite couplée à un circuit de gestion d'énergie pour l'alimentation de dispositifs à faible consommation.

L'étude débute par l'élément de collecte du système constitué par une antenne patch circulaire à fente. Dans ce paragraphe, les avantages de ce type d'antenne sont développés, notamment celui permettant la diminution des dimensions du circuit. Puis, dans le paragraphe 3, le circuit de conversion RF/DC est introduit. L'optimisation de ce dernier est effectuée à $f_0=2,45\text{GHz}$, au moyen d'un circuit d'adaptation à stub fermé entre l'antenne et le redresseur. Dans ce même paragraphe, une étude est

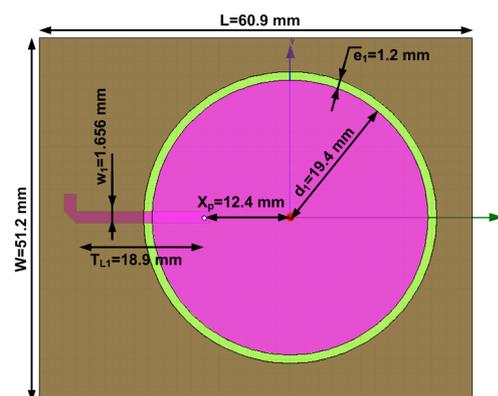
menée sur la modélisation circuit de l'élément central du dispositif de redressement RF/DC, à savoir la diode Schottky. En outre, une confrontation est effectuée entre les paramètres S simulés par notre modèle et ceux mesurés. Enfin, les dernières parties décrivent le banc de mesure mis en place, les conditions de test et concluent sur les résultats.

2. Antenne patch circulaire à fente

Pour l'élément de collecte notre choix s'est porté sur une antenne circulaire à fente introduite par [4].



(a)



(b)

Figure 1. (a) Illustration de l'antenne patch circulaire à fente (b) Dimensions de l'antenne

L'antenne illustrée à la figure 1 est réalisée sur un substrat ARLONS AD d'une épaisseur $h=0,762\text{mm}$, ayant une constante diélectrique $\epsilon_r=3,2$ et des pertes tangentielles $\delta=0,003$. Cette configuration d'antenne présente de nombreux avantages pour la conception d'une rectenna, notamment:

- Une désadaptation d'impédance pour les harmoniques d'ordres supérieures : $2f_0$, $3f_0$, etc.
- Un comportement large bande (jusqu'à 23,4%).
- Une réduction de la taille de l'antenne.
- La présence de deux lobes majeurs orientés dans deux directions opposées (plan +z et -z).
- Une réalisation simple.

En effet, les propriétés naturelles de l'antenne à rejeter les harmoniques [5] permettent d'éliminer le filtre passe bande en amont de la diode Schottky et par conséquent conduit à une diminution de la taille globale de la rectenna ($51 \times 61 \text{ mm}^2$) (voir Figure 1-b).

Une première étude paramétrique est effectuée sur la largeur de la ligne d'alimentation W_1 et le diamètre du patch rayonnant d_1 . Ainsi, une largeur $W_1=1,656 \text{ mm}$ est obtenue pour fixer l'impédance de la ligne de transmission à 50Ω . De même, une deuxième étude est effectuée sur la localisation optimale du via conduisant à une impédance de l'antenne de 50Ω pour $f_0=2.45 \text{ GHz}$. Les résultats de ces études paramétriques et les dimensions de l'antenne sont donnés par la Figure 1-b.

Le coefficient de réflexion (S_{11}) de l'antenne est mesuré grâce à un analyseur de réseau vectoriel (VNA HP 8719D). La Figure 2 montre l'évolution de ce coefficient sur une bande de fréquence variant de 1GHz à 5GHz. Les mesures confirment la désadaptation obtenue à la première harmonique $2f_0$ générée par la diode.

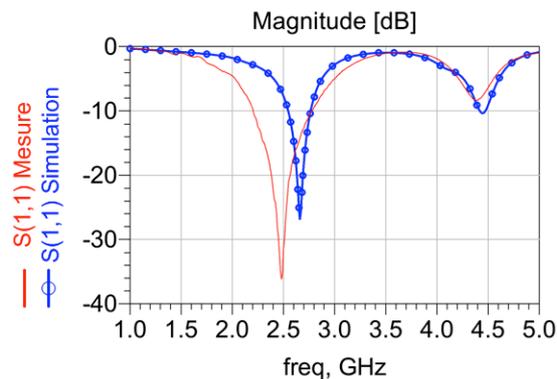


Figure 2. Coefficient de réflexion (S_{11}) de l'antenne

En simulation, l'optimisation a été réalisée à une fréquence de résonance de 2,7GHz, ceci afin de corriger l'offset présent entre la simulation et la mesure auquel nous avons déjà été confronté dans le passé [6]. En effet, la simulation sous Momentum du plan de masse avec le logiciel ADS d'Agilent utilise un plan de masse et un substrat infinis, à l'inverse de la réalisation où les dimensions de l'antenne sont finies et agissent sur les propriétés de rayonnement.

On note que l'antenne réalisée possède une large bande passante (2,2GHz à 2,78 GHz) améliorant ainsi la capacité de réception de l'antenne. En comparaison de la bande passante d'une antenne patch conventionnelle qui est de l'ordre de 3%, on atteint ici une bande passante de 23,4%, soit 20% de plus avec un $VWSR < 1,5$ à f_0 .

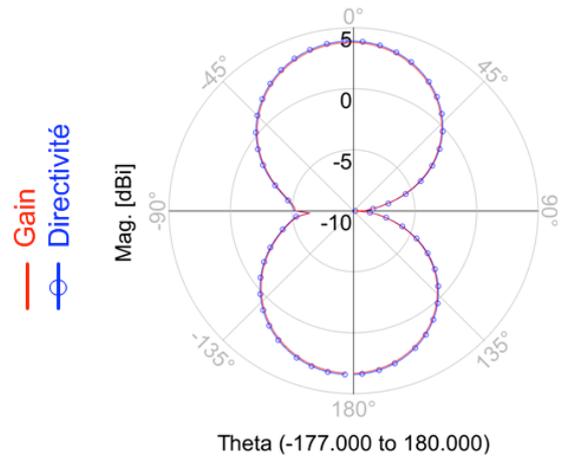


Figure 3. Diagramme de rayonnement de l'antenne simulée

En plus d'une taille réduite, l'antenne montre un diagramme de rayonnement quasi-omnidirectionnelle (Figure 3). En effet, deux lobes de directions opposées apparaissent dans le plan +z et -z. L'antenne peut alors collecter, les ondes directes ou réfléchies, dans plusieurs directions de l'espace. À $\theta=0^\circ$, le gain et la directivité simulés de l'antenne sont respectivement $G_{r0}=3,31 \text{ dBi}$ et $D_{r0}=3,42 \text{ dBi}$ tandis que pour $\theta=180^\circ$, on obtient respectivement $G_{r180}=3,79 \text{ dBi}$ et $D_{r180}=3,89 \text{ dBi}$.

Il est intéressant de noter que lors de nos travaux antérieurs [6], la rectenna étudiée était composée de deux substrats (antenne + circuit de redressement). Cet aspect multicouche imposait alors une procédure de fabrication plus contraignante. Dans cet article, le circuit de redressement est situé au dessous de l'antenne permettant ainsi la réalisation de la globalité de la rectenna sur un seul et même substrat (voir Figure 4).

3. Circuit de redressement

3.a. Topologie du circuit de redressement

Le circuit de redressement abordé dans ce paragraphe possède une structure simple (voir Figure 4). Cette structure a pour avantage d'être compacte et efficace pour de faibles niveaux de puissance en entrée.

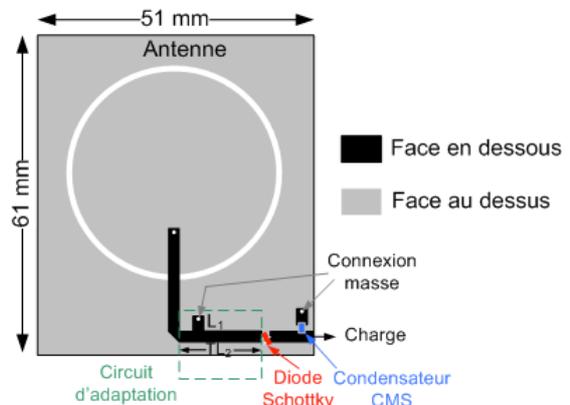


Figure 4. Illustration de la rectenna complète

La configuration série du redresseur a été retenue pour des raisons de simplicité d'adaptation. Le circuit d'adaptation est suivi d'une diode Schottky positionnée

en série et d'un filtre passe bas. Le filtrage DC en sortie est effectué par une capacité CMS de 12pF présentant un facteur de qualité $Q=10$ à 2,45GHz. Enfin, le circuit d'adaptation d'impédance est réalisé par un stub fermé de longueur L_1 et d'une ligne de transmission T_{L2} , qui sera développé dans la partie 3-c.

3.b. Diode de redressement

Lorsque l'on utilise une diode dans le cadre du transport de l'énergie sans fil et notamment dans le contexte de la récupération d'énergie électromagnétique ambiante, il est impératif d'avoir une diode à haut rendement de conversion [3]. La diode utilisée dans notre circuit est la SMS7630-001, optimisée pour la détection de faibles niveaux jusqu'à 10GHz [7]. Une attention particulière est portée à sa modélisation pour décrire son comportement non-linéaire et prendre en compte tous les effets parasites internes au boîtier d'encapsulation. Ainsi, une optimisation paramétrique de son modèle générique est effectuée pour un point de fonctionnement optimal, $V_{bias}=-0,2V$, ce qui correspond à un compromis entre de faibles densités de puissance collectées et la valeur de la résistance de charge R_{Load} [8]. Les effets parasites sont modélisés par une capacité en série C_p et une inductance L_p en parallèle dont les valeurs sont respectivement 0,18pF et 1,5nH. Le modèle équivalent de la diode utilisé en simulation ainsi que la comparaison entre les paramètres S simulés et ceux mesurés sont montrés sur la Figure 5 ci-dessous.

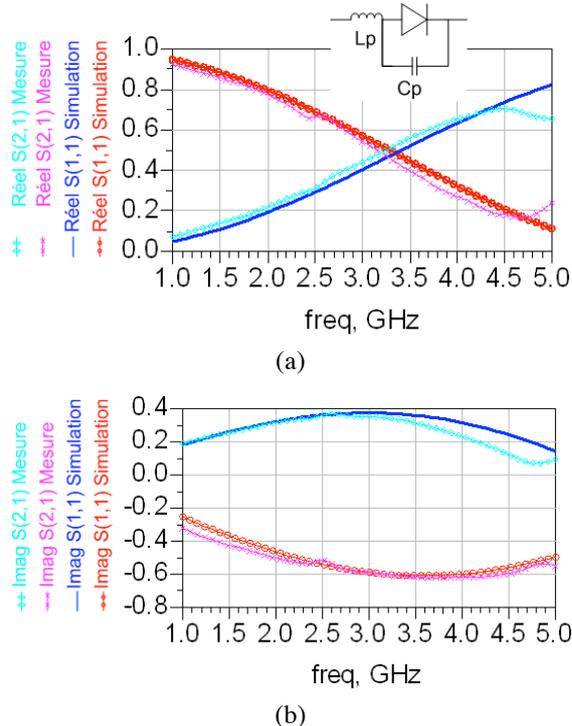


Figure 5. Comparaison entre paramètres S simulés et mesurés pour $P_{in}=-20\text{dBm}$, $R_{charge}=3,5k\Omega$ et $V_{bias}=-0,2V$ (a) Partie réelle (b) Partie imaginaire

3.c. Circuit d'adaptation d'impédance

L'adaptation d'impédance entre l'antenne et le redresseur est effectuée par un stub fermé. L'optimisation de cette adaptation repose sur le choix des longueurs du stub fermé L_1 et de la ligne de

transmission T_{L2} (voir Figure 4). Cette recherche d'optima est réalisée via une optimisation paramétrique sous Momentum par le logiciel ADS pour une puissance d'entrée $P_{collectée}=-20$ dBm. Les longueurs ainsi trouvées sont : $L_1=2,9\text{mm}$ et $T_{L2}=10,9\text{mm}$ pour une charge optimale $R_{Load}=3,5k\Omega$. En pratique, nous obtenons un coefficient de réflexion $S_{11}=-19,6\text{dB}$ du redresseur à $f_0=2,45\text{GHz}$ tandis qu'en simulation, un coefficient de réflexion $S_{11}=-30,7\text{dB}$ est obtenu. Cette différence provient du processus de fabrication et plus précisément du perçage des vias dans le circuit de redressement dont la modélisation reste difficile à appréhender en simulation.

4. Performances de la rectenna

4.a. Protocole de mesure

On étudie les performances de la rectenna pour une puissance collectée comprise entre $-30\text{dBm} < P_{collectée} < 0\text{dBm}$. En raison de la sensibilité de la rectenna face aux perturbations environnementales, un protocole de mesure est développé (voir Figure 6) et les données mesurées sont alors moyennées.

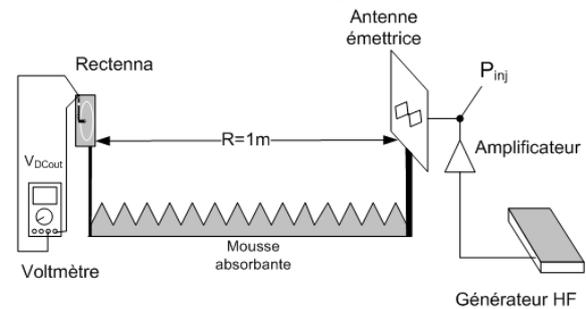


Figure 6. Illustration du banc de mesure

Une antenne biquad à polarisation linéaire est utilisée en émission pour transmettre la puissance RF vers la rectenna. Le but de l'expérience est d'estimer expérimentalement la tension continue V_{DCout} en fonction de la puissance collectée. Pour cela, on valide au préalable la mesure de la puissance à l'entrée de la rectenna $P_{collectée}$ en fonction de la puissance injectée P_{inj} . L'environnement de mesure alors considéré est constitué du canal de transmission avec la puissance injectée P_{inj} sur l'antenne d'émission positionnée à une distance d'un mètre par rapport à l'antenne de réception décrite à la partie 2 (voir Figure 6).

4.b. Résultats des mesures

Les photos des faces avant et arrière de la rectenna réalisée sont montrées sur les Figures 7-a et 7-b. Le calcul du rendement en pourcentage de la rectenna en fonction de la puissance collectée et de la tension DC mesurée est donné par l'équation:

$$\eta = \frac{P_{DC}}{P_{collectée}} = \frac{V_{DCout}^2}{R_{Load}} \cdot \frac{1}{P_{collectée}} \quad (1)$$

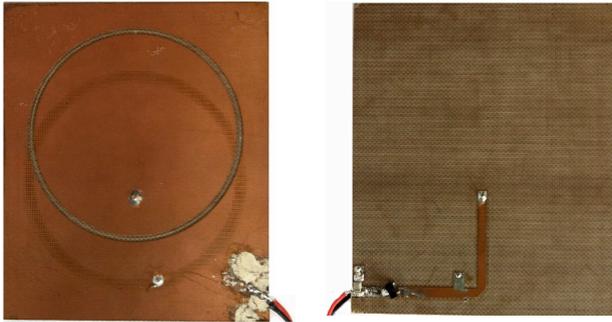


Figure 7. Photo de la rectenna fabriquée (a) Face avant (b) Face arrière

Le rendement maximal du dispositif est d'environ $\eta=50\%$ pour $-4\text{dBm} < P_{\text{collectée}} < 0\text{dBm}$. Cependant, pour la puissance collectée qui nous intéresse et pour laquelle l'optimisation a été réalisée, $P_{\text{collectée}}=-20\text{dBm}$, le rendement max obtenu est d'approximativement $\eta=20\%$ pour une charge de $3,5\text{k}\Omega$.

En comparant nos résultats avec ceux de l'étude [6] : $7\% < \eta < 29\%$ pour $-25\text{dBm} < P_{\text{collectée}} < -15\text{dBm}$, ainsi que les résultats obtenus dans une de nos précédentes études [8], on s'aperçoit que les performances de la rectenna pour de faibles niveaux de puissance sont améliorées notamment à $P_{\text{collectée}}=-20\text{dBm}$ avec un gain d'environ 3 points (voir Figure 8). Pour les fortes puissances, la chute de rendement peut s'expliquer par la désadaptation du système au niveau de la charge optimale qui se retrouve être plus faible.

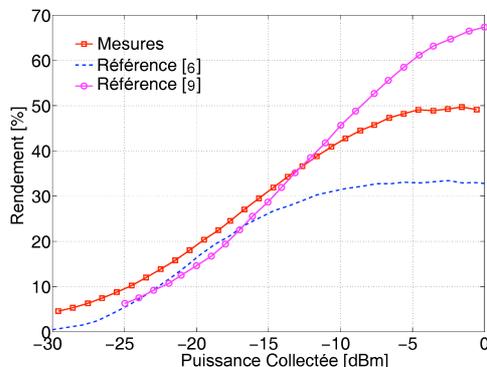


Figure 8. Rendement mesuré en fonction de la puissance collectée pour une charge de $3,5\text{k}\Omega$

5. Conclusion

Dans cet article, un dispositif efficace pour la récupération de faibles puissances RF a été testé pour une fréquence $f_0=2,45\text{GHz}$. La structure de la rectenna se compose d'une seule diode Schottky associée en série à une antenne patch circulaire à fente. Cette structure permet de diminuer notablement les dimensions du circuit global. De surcroît, l'antenne réceptrice présente un diagramme de rayonnement bidirectionnelle avec un gain intéressant à la fréquence fondamentale ($3,41\text{dBi}$ pour $\theta=0^\circ$ et $3,89\text{dBi}$ pour $\theta=180^\circ$). La rectenna réalisée peut ainsi convertir environ 20% de la puissance RF collectée au point de fonctionnement $P_{\text{collectée}}=-20\text{dBm}$ et une charge résistive de $3,5\text{k}\Omega$.

6. Bibliographie

- [1] L.Collins, « *Cutting the cord* », Engineering and Technology, Vol. 2, no. 6, p. 30-33, 2007.
- [2] A. Kurs, A. Karalis, R. Moffatt, J.-D Joannopoulos, P. Fischer and M. Soljacic, « *Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances* », Science, Vol. 317, no. 5834, p. 83-86, July 6, 2006
- [3] G.Andia Vera, « *Efficient Rectenna Design for Ambient Microwave Energy Recycling* », PhD Thesis, University of Catalunya, 2009
- [4] J. Heikkinen, M.Kivikoski, « *A Novel Dual-frequency Circularly Polarized Rectenna* », in IEEE Antennas Wireless Propag. Lett. Vol. 2, Iss. 22, p. 330-333, 2003
- [5] Park, J. Y., 2. M. Han et T. Itoh, « *A rectenna design with harmonic rejecting circular-sector antenna* », IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, Vol.5, No.1, 5254, 2004
- [6] S.Rivière, F.Alicalapa, A.Douyere et J. D. Lan Sun Luk, « *A compact rectenna device at low power level* », Progress in Electromagnetics Research C, Vol. 16, p. 137-146, 2010.
- [7] SKYWORKS, « *Surface Mount Mixer and Detector Schottky Diodes* », Technical Data, Skyworks Solutions, Inc., 2012.
- [8] A. Douyere, A. Celeste, C. Descharles and J.D. Lan Sun Luk, « *Non Linear Schottky Diode Characterization Used in a High Efficiency Rectenna Design Methodology* », IAC-05-C3.P.07, International Astronautical Conference, Nov. 2005, Fukuoka, Japan.
- [9] Ugur Olgun, chi-chih Chen et John L. Volakis, « *Wireless Power Harvesting with Planar rectennas for 2.45 GHz RFIDs* », URSI International Symposium on Electromagnetic Theory, 2010.