



Réalisation d'un rectenna dans la bande des 1.8 GHz, fonctionnant à faibles niveaux de puissance RF et optimisé par des techniques source-pull

Jérôme Tissier*, Mohamed Latrach**

*ESEO-IETR, 10 Bd Jeanneteau CS90717, 49107 Angers cedex 2, jerome.tissier@eseo.fr

** ESEO-IETR, 10 Bd Jeanneteau CS90717, 49107 Angers cedex 2, mohamed.latrach@eseo.fr

Mots clés : récupération d'énergie ; redresseur ; diode Schottky ; energy harvesting ; rectenna ; rectifier ; source-pull.

Résumés

L'autonomie énergétique des systèmes et objets communicants est devenue un enjeu de recherche majeur. Pour rendre ces systèmes et objets communicants plus autonomes en énergie et augmenter la durée de vie de la batterie, les systèmes de récupération d'énergie électromagnétique sont une alternative très intéressante. Les rectennas (rectifier+antennas) développés doivent posséder une forte sensibilité (faible puissance disponible), être compact et à faible coût.

Dans cet article, nous présentons la réalisation d'un rectenna dans la bande des 1.8 GHz, fonctionnant à faibles niveaux de puissances RF et ayant des applications dans la récupération d'énergie électromagnétique. Il a été optimisé à l'aide de simulations source-pull, qui est une technique d'optimisation très efficace pour maximiser le rendement de conversion RF-DC en puissance, pour de faibles niveaux de puissance RF (inférieur à -10 dBm). Cette technique nous a permis de réaliser un rectenna pour lequel le rendement de conversion en puissance du redresseur a été mesuré à 34 % à -20 dBm avec un maximum de 55 % à -9 dBm (à 1.86 GHz, sur une charge optimale de 6.8 kΩ).

Energy autonomy of connected systems and objects has become a major research challenge. To make these connected objects and systems more autonomous and increase the lifetime of the battery, the electromagnetic energy harvesting systems are an attractive alternative. The rectennas (rectifier + antennas) developed must have a high sensitivity (low power available), be compact and low cost.

In this paper, a rectenna, designed for low RF input incident power is presented. The rectenna operates in the 1.8 GHz band and has applications in RF energy harvesting. It has been optimized thanks to source-pull simulations, which are shown to be an effective technique for maximizing RF-DC conversion efficiency at low input powers below -10dBm. Measurement results show a high RF-DC power conversion efficiency of 34 % at -20 dBm input power, with a maximum of 55 % at -9 dBm, at 1.86 GHz with an optimal 6.8-kOhms DC load.

Introduction

Le principal problème rencontré quand on souhaite faire de la récupération d'énergie électromagnétique, en particulier s'il on cherche à récupérer l'énergie ambiante, est le faible niveau de puissance disponible que l'on peut récupérer et convertir. Les principales caractéristiques qui doivent être optimisées et maximisées quand on réalise un rectenna sont la tension continue de sortie V_{out} et le rendement de conversion RF-DC en puissance défini par :

$$\eta_{RF-DC} = \frac{P_{DCout}}{P_{RFin}} = \frac{V_{out}^2}{R_{DC}} \times \frac{1}{P_{RFin}} \quad (1) \quad \text{où } R_{DC} \text{ représente la résistance de charge}$$

Une technique très intéressante d'optimisation consiste à réaliser au préalable une étude source-pull de la diode de redressement. Cette étude source-pull permet de connaître précisément l'impédance Z_{opt} , impédance d'entrée optimale à présenter à la diode, donnant la puissance de sortie DC maximale et donc le rendement de conversion RF-DC maximal. De nombreux travaux utilisant cette technique d'optimisation ont été publiés par Z. Popovic et al. ([1] [2]), pour des puissances RF incidentes relativement élevées (supérieures à 0dBm), avec une diode du commerce Skyworks SMS7630.

Dans cet article, nous nous proposons de montrer que cette technique d'optimisation peut se révéler également très intéressante pour maximiser le rendement de conversion RF-DC pour des puissances RF incidentes beaucoup plus faibles (inférieures à -10dBm). Nous verrons également dans cet article les problèmes rencontrés, liés à ces faibles niveaux de puissance RF en entrée, et les moyens mis en œuvre pour y remédier.

Dans un article récent [3], les auteurs ont présenté une intéressante et utile comparaison des rendements de conversion mesurés pour un certain nombre de circuits de redressement publiés ces dernières années. Il apparait que ce rendement

de conversion ne dépasse pas 20 % et 40 %, pour respectivement -20 et -10 dBm de puissance d'entrée, en utilisant des diodes Schottky du commerce. Notre objectif est d'obtenir une amélioration de plus de 10 points par rapport à l'état de l'art de [3] et donc de dépasser les 30 et 50 % de rendement de conversion pour respectivement -20 et -10 dBm de puissance d'entrée.

1. Analyse source-pull du circuit de redressement choisi

1.1. Structures de redressement conventionnelles

Sur la figure 1, nous présentons quelques structures conventionnelles de rectenna fréquemment vues dans la littérature (comme par exemple dans [4]). Les structures conventionnelles de redressement sont principalement des structures à base d'une diode simple en série ou parallèle ou à base de plusieurs diodes montées en doubleur ou en pont.

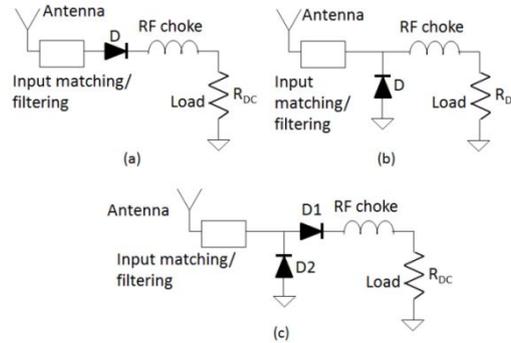


Figure 1. Structures conventionnelles de rectenna :
(a) série ; (b) parallèle ; (c) doubleur

Grâce à des études antérieures [5], nous avons montré que le rendement de conversion RF-DC en puissance est un peu meilleur à faibles puissances (<-15 dBm) pour une topologie à simple diode comparée à une topologie en doubleur de tension, même si cette dernière a l'avantage de maintenir le rendement à une valeur élevée quand la puissance augmente. Un autre avantage de la topologie à simple diode, est que la résistance optimale de charge R_{DCopt} est plus faible et donc plus réaliste que pour une topologie à doubleur de tension. Ces remarques, combinées au fait que nous voulions implémenter le plus simple redresseur possible, nous ont orientées vers le choix d'une simple diode en série comme circuit de redressement.

1.2. Etude source-pull de la topologie choisie

Le circuit de redressement est seulement composé d'une diode Schottky, d'une capacité parallèle en sortie qui agit comme un filtre passe-bas et comme un élément de stockage d'énergie ainsi que d'une charge purement résistive R_{DC} . Parmi les différentes modèles de diodes que nous avons testés, nous avons retenu la diode Avago HSMS2850 car elle représente le meilleur compromis entre performances et facilité de réalisation de l'impédance optimale Z_{opt} dans la bande des 1.8 GHz. Des simulations source-pull ont été menées à l'aide du logiciel ADS d'Agilent dans le but d'obtenir l'impédance optimale Z_{opt} , impédance d'entrée optimale à présenter à la diode, donnant la puissance de sortie DC maximale et donc le rendement de conversion RF-DC maximal. Cette impédance est fortement dépendante de la puissance RF d'entrée, de la fréquence et de la charge [1]. Le tableau 1, présente un résumé des résultats obtenus, pour différentes puissances RF, à une fréquence fixe de 1.84 GHz et sous une charge optimale de 7 k Ω .

Input Power P_{RF} (dBm)	Z_{opt} (Ω)	DC output power max (dBm)	RF-DC conversion efficiency max (%)
-30	30+j325	-39.3	11.6
-20	35+j355	-24.6	34.6
-10	41.2+j422.6	-12.4	58.4
0	172+j480	-5.3	29.7

Tableau 1. Impédance optimale à présenter à la diode et rendement de conversion maximal associé

Une nouvelle série de simulations en Harmonic Balance a alors été effectuée pour chaque valeur de Z_{opt} donnée dans le Tableau 1, pour vérifier le comportement du redresseur quand la puissance d'entrée RF varie (la charge est prise à une valeur optimale déduite par simulation). A la lumière de cette étude, présentée sur la figure 2, l'impédance que nous avons cherché à atteindre par la suite est celle obtenue pour $P_{RF} = -20$ dBm ($Z_{opt} = 35+j355 \Omega$), car elle représente le meilleur compromis pour obtenir un bon rendement pour une large gamme de puissances en entrée du redresseur.

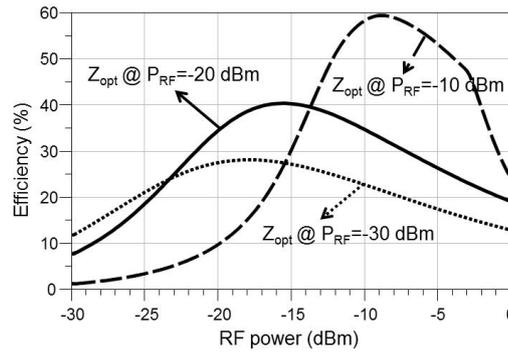


Figure 2. Rendement de conversion (en %) en fonction de la puissance RF d'entrée (en dBm) pour différentes valeurs de Z_{opt}

2. Réalisation du rectenna

2.1. Réalisation d'une antenne patch 35 Ω

Pour limiter les pertes du réseau d'adaptation entre l'antenne et le redresseur (qui sont très influentes sur le rendement de conversion RF-DC pour de faibles niveaux de puissance d'entrée), nous avons décidé de concevoir une antenne directement adaptée sur la partie réelle de Z_{opt} (35 Ω , comme vu dans l'étude source-pull précédente). Notre choix s'est porté sur une antenne patch alimentée par ligne microstrip (figure 4), car il est très simple d'obtenir l'impédance désirée (35 Ω) en optimisant la position de la ligne d'alimentation à l'intérieur du patch. La simulation et l'optimisation de l'antenne patch a été faite sur le logiciel HFSS d'Ansys avec un substrat Duroid 4003C à faibles pertes ($\epsilon_r=3.55$, $H=1.524$ mm, $\tan \delta=0.0027$). Le paramètre S_{11} et le gain (et directivité) maximum obtenus sont présentés sur la figure 3, en fonction de la fréquence.

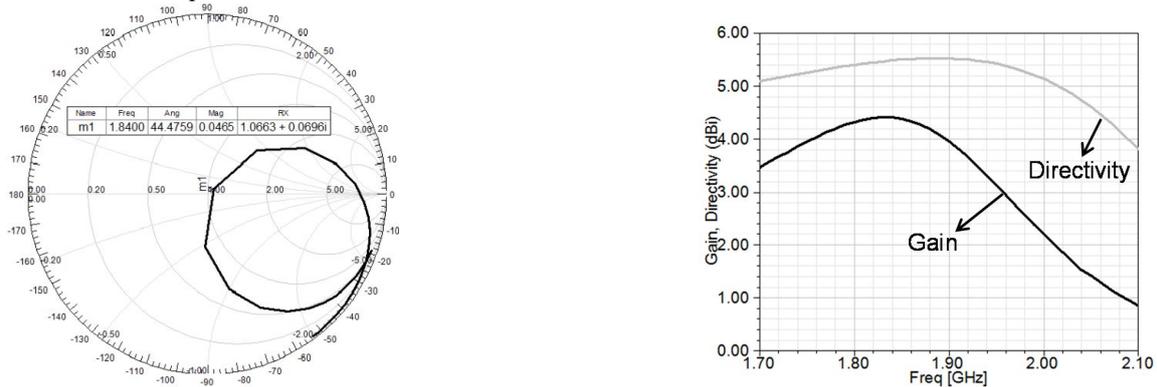


Figure 3. Paramètre S_{11} (référéncé sur 35 Ω) et gain, directivité (en dBi) de l'antenne patch en fonction de la fréquence (en GHz)

Nous pouvons voir sur l'abaque de Smith de la figure 3 que, à 1.84 GHz, la partie réelle de l'impédance de l'antenne patch atteint parfaitement la partie réelle de Z_{opt} (35 Ω), donnant la puissance de sortie DC maximale et donc le rendement de conversion RF-DC maximal. En ce qui concerne la partie imaginaire, elle est proche de 0. Un circuit d'adaptation simple stub sera ajouté pour atteindre la partie imaginaire de Z_{opt} (355 Ω). Sur la figure 3, nous pouvons également noter un gain maximal de l'antenne patch de 4.4 dBi à 1.84 GHz pour une directivité de 5.5 dBi.

2.2. Réalisation du rectenna complet fonctionnant dans la bande des 1.8 GHz

Le rectenna complet a été réalisé sur un substrat Duroid 4003C à faibles pertes ($\epsilon_r=3.55$, $H=1.524$ mm, $\tan \delta=0.0027$). L'utilisation de ce type de substrat nous a permis de limiter au mieux les pertes d'insertion, qui sont très influentes sur le rendement à faibles niveaux de puissance RF. Une photographie de ce rectenna est présentée sur la figure 4. Sur cette figure, nous pouvons voir l'antenne patch, adaptée à 35 Ω . Juste après la ligne d'alimentation de l'antenne patch, nous avons ajouté un circuit d'adaptation simple stub en circuit ouvert. Nous avons également rajouté un stub $\lambda/4$ en court-circuit à proximité de la diode, qui n'a aucune influence sur l'impédance en RF, mais qui assure un chemin à la masse en continu [6]. Le circuit de redressement a, quant à lui, été soudé à 90° de l'ensemble antenne patch + circuit d'adaptation (figure 4), pour le protéger des radiations de l'antenne émettrice.

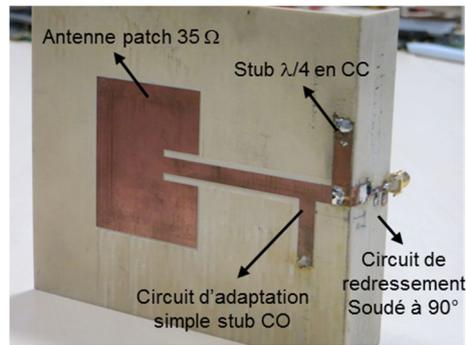


Figure 4. Photographie du rectenna réalisé

3. Mesures du rectenna

Le rectenna a été mesuré en chambre anéchoïde. Le rendement de conversion RF-DC a été calculé par l'équation des télécommunications (comme dans [1] ou [6]) :

$$\eta_{RF-DC} = \frac{V_{out}^2}{R_{DC}} \times \frac{1}{P_r} = \frac{V_{out}^2}{R_{DC}} \times \frac{1}{G_t G_r P_t \left(\frac{c}{4\pi f d}\right)^2} \quad (2) \quad \text{avec :}$$

- V_{out} , la tension continue de sortie,
- $R_{DC}=6.8 \text{ k}\Omega$, la charge (valeur normalisée),
- P_r la puissance reçue par le rectenna (à la sortie de l'antenne patch, correspondant à la puissance entrante du redresseur),
- $G_t=7.5 \text{ dBi}$, le gain de l'antenne cornet émettrice,
- $G_r=4.4 \text{ dBi}$, le gain de l'antenne patch déduit par simulation (figure 3),
- P_t , la puissance transmise,
- $f=1.86 \text{ GHz}$ la fréquence pour laquelle V_{out} est maximale (léger décalage en fréquence par rapport à la fréquence de simulation (1.84 GHz)),
- $d=2.6 \text{ m}$, la distance entre les deux antennes.

Les résultats de mesure de la tension DC de sortie et du rendement de conversion RF-DC, en fonction de la puissance reçue P_r sont présentés sur la figure 5.

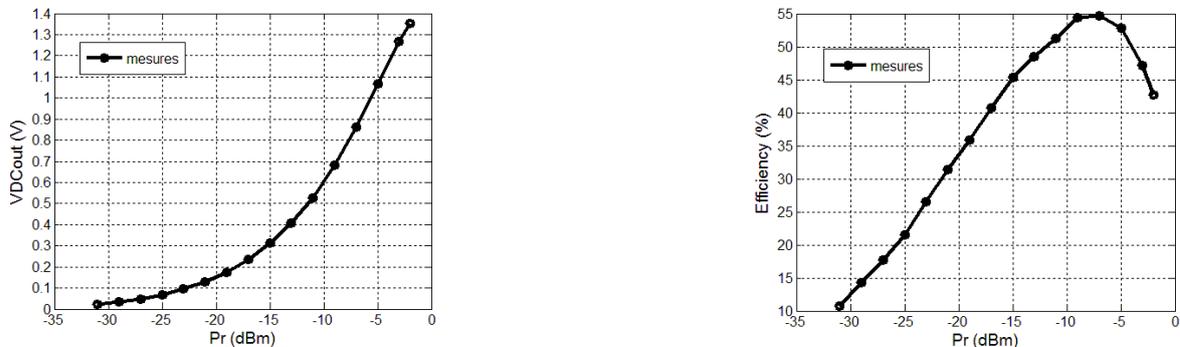


Figure 5. Mesures de la tension continue de sortie et du rendement de conversion en puissance du redresseur du rectenna en fonction de la puissance reçue sur le rectenna (après l'antenne)

Pour de si faibles puissances RF, nous obtenons de très fortes tensions continues redressées en sortie (0.15 V et 0.6 V pour respectivement -20 dBm et -10 dBm de puissance reçue sur le redresseur). Cette tension est même supérieure à 1 V pour $P_r \geq -6 \text{ dBm}$.

A 1.86 GHz, nous mesurons des rendements de conversion RF-DC en puissance de 34 % et 53 % pour des puissances RF en entrée du redresseur de respectivement -20 et -10 dBm. Nous obtenons ainsi, par cette méthode de conception et d'optimisation, de très bons résultats, d'environ 13 points au-dessus des valeurs de l'état de l'art présenté en [3], pour de si faibles valeurs de puissance RF avec des diodes du commerce. Le rendement de conversion mesuré atteint une valeur maximale de 55 % à -9 dBm.

4. Conclusion

Dans cet article, nous avons montré que des techniques source-pull pouvaient être un moyen efficace pour maximiser le rendement de conversion RF-DC en puissance d'un rectenna, même pour de faibles valeurs de puissances RF à l'entrée. Des simulations source-pull sur une diode redresseuse en série ont été effectuées pour déterminer précisément l'impédance Z_{opt} , impédance d'entrée optimale à présenter à la diode, donnant la puissance de sortie DC maximale et donc le rendement de conversion RF-DC maximal. Une antenne patch, directement adaptée sur la partie réelle de Z_{opt} et

un circuit d'adaptation à simple stub ont été implémentés pour réaliser cette impédance optimale. Des résultats de mesure d'un rectenna, fonctionnant dans la bande des 1.8 GHz, sont également présentés, montrant un fort rendement de conversion RF-DC de 34 % à -20 dBm de puissance reçue sur le redresseur, avec un maximum de 55 % à -9 dBm, le tout à une fréquence de 1.86 GHz et sur une charge résistive de 6.8 k Ω .

Une perspective très intéressante de ces travaux, serait d'appliquer cette technique d'optimisation à la réalisation d'un rectenna multi-bande, pour assurer un rendement de conversion RF-DC maximal sur chaque bande de fréquences.

Références bibliographiques

- 1- E. Falkenstein, M. Roberg, and Z. Popovic, "Low-power wireless power delivery," IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol. 60, No. 7, pp. 2277-2286, Jul. 2012.
- 2- Z. Popovic, E. Falkenstein, D. Costinett, R. Zane, "Low-power far-field wireless powering for wireless sensors," Proc. IEEE, vol.101, no.6, pp.1397,1409, June 2013.
- 3- S. Hemour, Y. Zhao, C. H. P. Lorenz, D. Houssamedine, Y. Gui, C.-M. Hu K. Wu, "Towards low power high-efficiency RF and microwave energy harvesting," IEEE Trans. Microwave Theory Techn. vol. 62, pp. 965-976, April 2014.
- 4- J. Zbitou, M. Latrach, S. Toutain, "Hybrid Rectenna and monolithic integrated zero bias microwave rectifier," IEEE Trans. Microwave Theory Techn. vol.54, pp. 147-152, Jan 2006.
- 5- J. Tissier, M. Latrach, Z. Popovic, "Efficiency optimization of a compact low-power voltage doubler rectifier using source-pull techniques," Radio Science Conference (URSI AT-RASC), Gran Canaria, Spain, 16-24 May 2015.
- 6- H. Sun, Y. Guo, M. He, Z. Zhong, "A dual-band rectenna using broadband Yagi-antenna array for ambient RF power harvesting" IEEE Antennas Wireless Prop. Lett., Vol.12, 2013, pp. 918-921.