



## L'HOMME CONNECTÉ

### Conception de topologies de rectenna à très faible puissance dédiées à la récupération d'énergie RF

Aya MABROUKI <sup>1,2</sup>, Mohamed LATRACH <sup>1,2</sup>, Vincent LORRAIN <sup>1</sup>, Esthelladi RAMANANDRAIBE <sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Groupe de recherche : Radio et Hyperfréquences, LUNAM Université, ESEO Ecole Supérieure d'Electronique de l'Ouest, 10 Boulevard Jean Jeanneteau 49100 Angers, France

<sup>2</sup> IETR, 20 Avenue des Buttes de Coësmes, CS 70839 F - 35708 Rennes Cedex 7, France

aya.mabrouki@eseo.fr

mohamed.latrach@eseo.fr

vincent.lorrain@reseau.eseo.fr

Esthelladi.ramanandraibe@eseo.fr

Mots-clefs : Rectenna, récupération d'énergie, rendement de conversion en puissance, energy harvesting, power conversion efficiency.

#### Résumé

Dans cet article, nous présentons la conception et la réalisation de deux structures de conversion RF-DC à très faibles puissances dédiées à la récupération d'énergie RF à 875MHz et à 1.72GHz. Les mesures d'une rectenna miniature à 875MHz seront également présentées et discutées. Les deux topologies proposées ne contiennent pas de filtre HF en entrée et elles sont optimisées pour un meilleur rendement à des faibles niveaux de puissance (<-10dBm). Les résultats expérimentaux montrent de bonnes performances en termes de rendement de conversion RF-DC (>20%) par rapport à l'état de l'art, pour des faibles niveaux d'énergie microonde incidente. Les mesures en chambre anéchoïque de la rectenna miniature réalisée montrent qu'il est possible de récupérer une tension de 137mV sous une charge de 10KΩ à 875MHz pour une puissance reçue de -20dBm avec un rendement de conversion RF-DC de 19%.

#### Introduction

Au vu de la multiplication des systèmes embarqués (téléphones portables, capteurs RFID...), la question de stockage et de la consommation d'énergie est devenue primordiale dans la conception de tels systèmes. Dans l'optique d'augmentation du temps d'utilisation de tels systèmes, les chercheurs se sont orientés vers des systèmes d'alimentation sans fil ou de récupération d'énergie. Le but de tels procédés est de fournir une source d'énergie sans fil capable d'alimenter ou d'assister les batteries (augmentation de la durée d'utilisation). Un tel procédé est décomposable en deux étapes. La première, consiste à récupérer une forme d'énergie (vibration, différentiel de température, onde électromagnétique ...) et la convertir en énergie électrique. La seconde consiste en une mise en forme de cette énergie électrique pour obtenir une source d'énergie électrique exploitable.

L'idée de transmission par micro-ondes a suscité un réel intérêt et de nombreuses démonstrations ont vu le jour [1] [2] [3]. Il a été ainsi prouvé par expérimentation qu'il était possible de transmettre de l'énergie RF avec des rendements le plus souvent supérieurs à 70 %. Mais les problèmes d'encombrement des antennes et les questions sanitaires que posait l'utilisation d'ondes de fortes puissances sont encore au cœur de la problématique. De nos jours, l'apparition de composants et de technologie de faible puissance permet aux chercheurs de concevoir des microsystèmes radiofréquences ultra-miniaturisés pour les réseaux corporels sans fil (Body Area Networks ou BAN) dédiés aux dispositifs portables ou implants à des fins médicales et biomédicales, de bien-être ou de confort dans la vie quotidienne [4] [5] [6].

Nous proposons dans cet article l'étude et la conception de deux redresseurs à très faible puissance dédiés à la récupération d'énergie RF à 875MHz et à 1.72GHz. Dans la première section, nous présentons le principe de fonctionnement des deux structures de conversion RF-DC proposées ainsi que la méthodologie de conception adoptée pour optimiser leurs rendements. Les résultats de mesures du redresseur à 875MHz et du redresseur bibandes sont présentés et commentés en section 2. Enfin, nous détaillons les résultats expérimentaux de la rectenna miniature à 875MHz obtenus en chambre anéchoïque et nous terminerons par une conclusion générale.

## 1. Méthodologie de conception et résultats de simulation

### 1.1. Méthodologie de conception

La méthodologie utilisée dans la simulation des différents montages et l'outil de simulation utilisé sont les suivants : Dans un premier temps, nous avons créé le circuit avec des éléments passifs parfaits et le modèle de diode HSMS2852 fournie par le constructeur incluant tous les composants parasites. Cette diode est adaptée à la récupération d'énergie

sous contrainte de faible puissance (<-20dBm) grâce à sa faible tension de seuil (150mV) et à sa faible capacité de jonction de 0.18pF. Nous avons par la suite utilisé une simulation en Harmonic balance (HB) sous ADS, qui nous donne pour résultat les puissances en entrée et en sortie de notre système ainsi que leur spectre. Ces résultats ont permis de calculer le rendement en puissance de chaque système à fin de les comparer. Les circuits sont constitués de condensateurs de 100pF et d'une charge purement résistive de 10KΩ, celle qui permet d'avoir le meilleur rendement de conversion RF-DC. Les simulations HB sont ensuite effectuées avec le circuit d'adaptation et en tenant compte des éléments parasites ou les pistes conductrices de connexions. La gamme de puissance utilisée par Harmonic Balance est comprise entre -30 dBm et 0 dBm. Les résultats de simulation de paramètre  $S_{11}$ , entre 700 MHz et 1.5 GHz, nous permettent de quantifier l'adaptation de nos circuits. Les deux structures retenues pour la conception des redresseurs, que nous allons par la suite optimiser pour un meilleur rendement, sont celles de LATOUR et de SCHENKEL décrites en Fig. 1. Elles permettent, à l'aide de deux diodes et de deux condensateurs, de redresser la tension et théoriquement de la doubler.

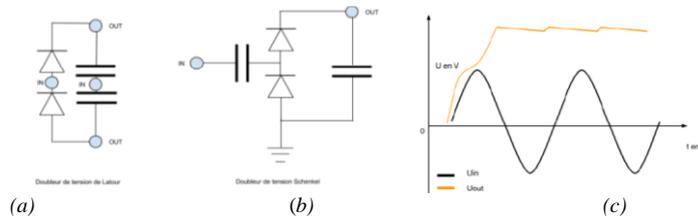


Figure 1 : (a) Structure de LATOUR, (b) Structure SCHENKEL, (c) tension de sortie du redresseur

**1.2. Résultats de simulations**

**1.2.1. Redresseur à 915MHz**

Le circuit de conversion réalisé est un doubleur de LATOUR avec un circuit d'adaptation L, C (L = 39 nH et C = 3.3 pF) et une piste à 50 Ohms réalisé sur un substrat FR4 ( $\epsilon_r=4.5$ ,  $\tan\delta=0.025$  et  $h=1.58\text{mm}$ ). Le circuit est adapté à 915MHz et le rendement obtenu à cette fréquence est de 33% pour une puissance d'entrée de -20dBm sous une charge de 10Kohms comme montré en Fig. 2.

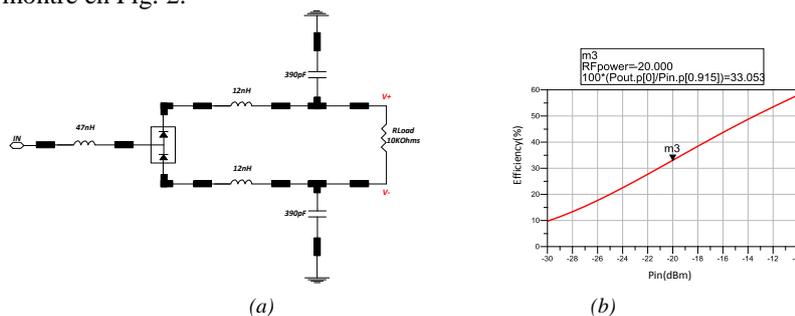


Figure 2 : (a) Redresseur, (b) Rendement de conversion de puissance en fonction de Pin

**1.2.2. Redresseur bi-bandes**

Ce redresseur est constitué de deux doubleurs de tensions SCHENKEL avec deux systèmes d'adaptation d'impédances (une pour GSM 900MHz et une pour GSM 1800MHz). Nous avons choisi cette structure car elle présente une capacité en entrée qui évite les fuites de courant continu vers l'antenne. Un rendement de conversion de puissance de 33% est obtenu à 915 MHz pour une puissance d'entrée de -20dBm sous une charge de 10Kohms comme montré en Fig. 3.

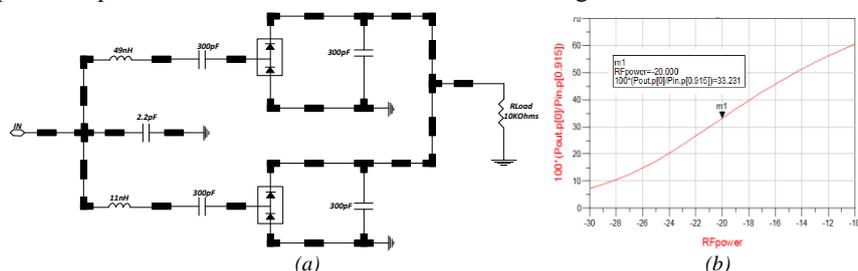


Figure 3 : (a) Redresseur bi-bandes, (b) Rendement de conversion de puissance en fonction de Pin

**2. Résultats expérimentaux des structures de conversion RF-DC**

Les topologies de conversion décrites précédemment ont été réalisées en technologie hybride et réalisé à base de composant passif discret CMS0805 hautes fréquence et ayant une faible résistance série équivalente. Les circuits ont été testés aussi bien en « conduit » (puissance RF fournie par un générateur de signaux), Fig. 4, mais également « en rayonné » (puissance captée par une antenne). L'adaptation d'impédances a été dans un premier temps vérifiée, ensuite, une série de mesure a été effectuée pour déterminer le rendement et la tension récupérée aux bonnes fréquences. Le rendement de conversion a été déterminé selon l'expression suivante en fonction de la puissance RF incidente  $P_{RFin}$ , de la tension de sortie  $V_{out}$  et de la résistance de charge  $R_{charge}$ :

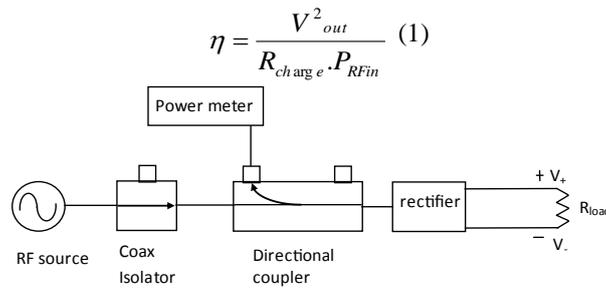


Figure 4 : Banc de mesure des circuits de conversion RF-DC

**2.1. Redresseur à 875MHz**

Les mesures montrent que le circuit est très bien adapté à 855MHz avec un paramètre  $S_{11}$  de -19.5dB, Fig. 5(a). Ce shift de fréquence par rapport à la simulation peut être expliqué par les tolérances de 10% des composants CMS utilisés pour l’adaptation. Des tensions continues de 156mV et 650mV sont récupérées respectivement pour des puissances incidentes de -20dBm et -10dBm pour une charge de 10K $\Omega$ , Fig. 5(b). Les rendements respectifs sont de 24% et 42% à 875MHz. On note également une haute performance à 0dBm avec un rendement de conversion de 50.8%, Fig. 5(c). Ce circuit sera utilisé ultérieurement pour la réalisation et la mesure d’une rectenna miniature à 875MHz.

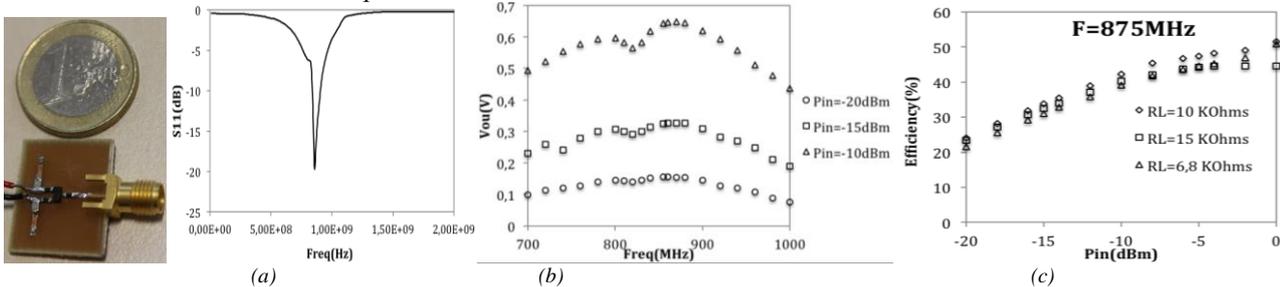


Figure 5 : (a)  $S_{11}$ , (b)  $V_{out}$  en fonction de la fréquence, (c) Rendement à 875MHz en fonction de  $P_{in}$

**2.2. Redresseur bibandes (820MHz et 1.72MHz)**

Le circuit de conversion bibandes est adapté à 820MHz et 1.72GHz avec un paramètre  $S_{11}$  de -15dB et -18dB respectivement, Fig. 6(a). Les mesures de la tension récupérée en sortie  $V_{out}$  montrent deux maximums de 0.6V et 0.55V aux fréquences de fonctionnement, Fig. 6(b), pour une puissance incidente de -10dBm. La fréquence 1.72GHz est très proche de la fréquence limite de fonctionnement de la diode ce qui explique la petite réduction de la tension de sortie à cette fréquence par rapport à celle obtenue à 820MHz. Les rendements de conversion RF-DC obtenus à cette même puissance, avec une charge de 10K $\Omega$ , sont respectivement de 34% et de 28.5%, Fig. 6(c). Les résultats expérimentaux confirment les hautes performances du redresseur en termes de rendement en comparaison avec l’état de l’art [7].

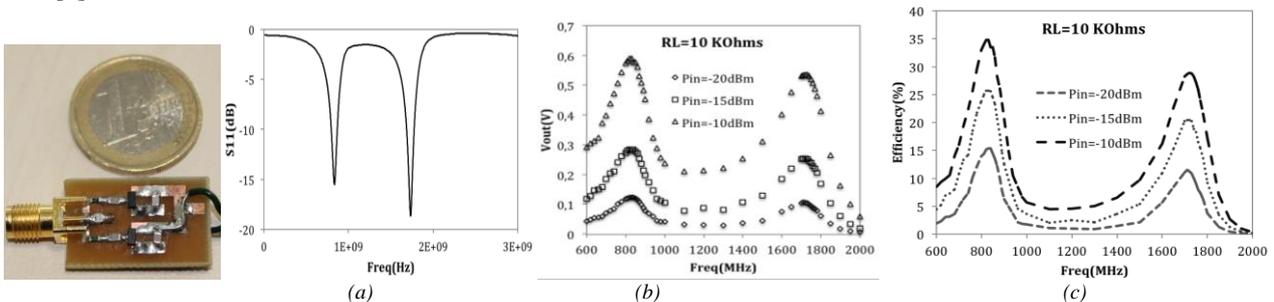


Figure 6 : (a)  $S_{11}$ , (b)  $V_{out}$  en fonction de la fréquence, (c) Rendement en fonction de la fréquence pour  $R_{charge}=10K\Omega$

**3. Mesures de la rectenna miniature**

La rectenna miniature réalisée à 875MHz pour des faible niveaux de puissance incidente est constituée autour d’une antenne miniature demi-boucle couplée avec une cellule de SRR réalisée sur un substrat duroid ( $\epsilon_r=2.2$ ,  $\tan\delta=0.0009$  et  $h=0.78mm$ ) avec un plan de masse 100mm x 100mm [8] et du rectifier décrit en section 2.1, Fig. 7(a).

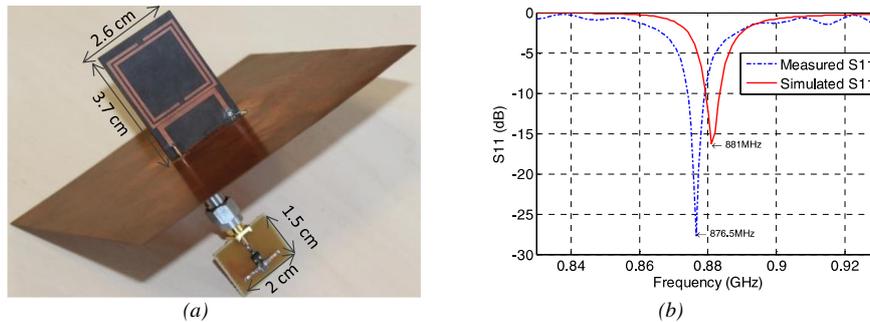


Figure 7 : (a) Rectenna miniature à 875MHz, (b) S11 simulé et mesuré de l'antenne

L'antenne miniature possède un gain de 2.78dBi à 875MHz. Elle a une bande passante à -10dB de 5MHz, Fig. 7(b), et elle est directive selon l'axe z. Les mesures sont effectuées à 875MHz pour assurer une meilleure adaptation entre l'antenne et le redresseur. La rectenna a été caractérisée dans une chambre anéchoïque avec une antenne cornet en émission, de 4dBi de gain, distante de 1m par rapport à l'antenne réceptrice, Fig. 8(a). Etant dédiée à des applications faible puissance, seul un générateur de puissance a été utilisé dans le banc de mesure avec une gamme de puissance en entrée comprise entre -5dBm et 25dBm. Les pertes dans les câbles sont prises en compte afin de déterminer la bonne densité de puissance (dP) au niveau de la rectenna. Elle dépend de la puissance RF en émission ( $P_t$ ), du gain de l'antenne d'émission ( $G_t$ ) et de la distance entre l'antenne cornet et la rectenna (R), exprimée comme suit :

$$dP = \frac{P_t \cdot G_t}{4\pi R^2} \quad (2)$$

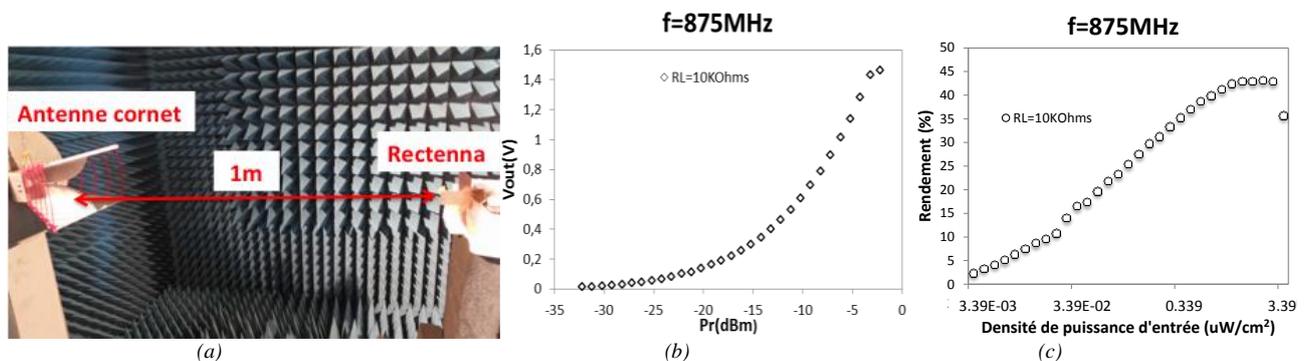


Figure 8: (a) Banc de mesure en chambre anéchoïque, (b) tension de sortie DC en fonction de la puissance reçue à l'entrée du redresseur, (c) Rendement de conversion RF-DC en fonction de la densité de puissance d'entrée

Les mesures de la rectenna effectuées en chambre anéchoïque valident ses hautes performances en termes de rendement de conversion comme décrit en Figure 8(b) et (c). En effet, il est possible de récupérer une tension continue en sortie de 137mV pour une puissance reçue à l'entrée du redresseur de -20dBm. Un rendement de conversion RF-DC de 38.5% à 875MHz sous une charge de 10KOhms pour une densité de puissance au niveau de l'antenne réceptrice de 0.54  $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ .

## Conclusion

Deux topologies de redressement dédiées à la récupération d'énergie pour des faibles niveaux de puissance (<-10dBm) ont été conçues et mesurées. Les rectifieurs réalisés peuvent récupérer des tensions de 160mV et de 100mV respectivement à 875MHz et 1.72GHz. Une rectenna miniature à 875MHz à haute performance et à faible puissance a été également validée par les mesures. Les résultats expérimentaux obtenus situent ce travail au niveau de l'état de l'art international.

## Références bibliographiques

- [1] H. Takhedmit et. al., "A 2.45-GHz low cost and efficient rectenna," in Antennas and Propagation (EuCAP), 2010 Proceedings of the Fourth European Conference, pp. 1-5.
- [2] M. Roberg, T. Revevrand, I. Ramos, E. A. Falkenstein, Z. nanović, "High-Efficiency Harmonically Terminated Diode and Transistor Rectifiers," IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 60, No. 12 December 2012, pp. 4043-4052.
- [3] A. Mabrouki, M. Latrach, Z. Sayegh, "Design and experiment of RF rectifiers for wireless power transmission," 13<sup>th</sup> Mediterranean Microwave Symposium, Sep 2013, pp. 1-4.
- [4] A. Dolgov, R. Zane, and Z. Popovic, "Power management system for online low power rf energy harvesting optimization," Circuits and Systems I: Regular Papers, IEEE Transactions on, vol. 57, no. 7, pp. 1802-1811, 2010.
- [5] S. Riviere, A. Douyere, FI Alicalapa, and J.-D. Lan Sun Luk, "Study of complete WPT system for WSN applications at low power level," Electronics letter, vol. 46, No. 8, 597-598, April 2010.

- [6] J. Zbitou, M. Latrach, S. Toutain, "Hybrid Rectenna and monolithic integrated zero bias microwave rectifier," *Microwave theory and techniques, IEEE transactions on*, vol. 54, no. 1, pp. 147-152, Jan 2006.
- [7] V. Marian, C. Menudier, M. Thevenot, C. Vollaire, J. Verdier, B. Allard, "Efficient design of rectifying antennas for low power detection," *2011 MTT –S International Microwave Symposium Digest*, June 2011, pp 1- 4.
- [8] E. Ramanandraibe, M. Latrach, W. Abdouni, A. Sharaiha, "Miniaturisation d'une antenne demi-boucle par couplage magnétique avec un SRR – Application dans la bande UHF", *18<sup>ème</sup> Journées Nationales Microondes*, May 2013.