

« Modélisation d'un convertisseur de paquet d'énergies WI-FI en énergie électrique à base de minéral du tungstène pour la recharge sans fil d'appareils électronique »

1-Nantonisoa Rabearivonona

Ecole Doctorale Ingénierie et Géosciences (INGE)

2- Tafitasoloniaina H Ralijaona

Maitre de Conférences

Ecole Doctorale Ingénierie et Géosciences (INGE)

3- Fidihery Toky Tantely

Maitre de Conférences

Université de Toliara

4- RAHOBIARISOA Jasmin

Maitre de Conférences

Ecole Doctorale Ingénierie et Géosciences (INGE)

4- RANDRIANJA Roger

Professeur Titulaire

Ecole Doctorale Ingénierie et Géosciences (INGE)

Résumé

L'une des expériences les plus frustrantes et universellement partagées dans l'utilisation quotidienne des appareils électroniques comme les Smartphones est la redoutable notification "Low Battery". La dépendance à l'égard de l'énergie électrique est devenue un élément incontournable du quotidien et les experts prédisent une augmentation de nos besoins en énergie de 250 % d'ici 2050. Comme les batteries ont des capacités limitées, les utilisateurs sont contraints de rester à proximité d'une source d'alimentation électrique pour recharger leurs appareils dans un certain endroit où il n'y a pas d'accès direct à une source d'énergie électrique. L'idée de convertir de l'énergie mise en paquet sous WI-FI, qui est déjà à la portée du large public, en un courant continu exploitable pour la recharge offre déjà une solution novatrice et omniprésente à ce problème en éliminant les contraintes liées à la recharge traditionnelle par câble. Cette étude aborde la modélisation d'un système de conversion de paquet d'énergies WI-FI en énergie électrique à base du minéral du tungstène pour la recharge sans fil d'appareils électroniques. Dans cette approche sont décrits les principaux composants du système notamment les convertisseurs familles de diode Schottky et le système de filtrage des paquets, l'évaluation de la performance technique d'un tel système, ainsi que les résultats des simulations confirmant la viabilité du concept.

Mots clés : *conversion, énergie électrique, paquet, wifi, tungstène*

Abstract

One of the most frustrating and universally shared experiences in the daily use of electronic devices like Smartphones is the dreaded "Low Battery" notification. Dependence on electrical energy has become an essential part of daily life and experts predict our energy needs will increase by 250% by 2050. As batteries have limited capacities, users are forced to stay near an electrical power source to charge their devices in a certain location where there is no direct access to a source of electrical energy. The idea of converting energy packaged under WI-FI, which is already within the reach of the general public, into a direct current usable for recharging already offers an innovative and ubiquitous solution to this problem by eliminating the constraints linked to traditional cable charging. This study addresses the modeling of a system for converting WI-FI energy packets into electrical energy based on the mineral tungsten for wireless charging of electronic devices. In this approach, the main components of the system are described, notably the Schottky diode family converters and the packet filtering system, the evaluation of the technical performance of such a system, as well as the results of the simulations confirming the viability of the concept.

Keywords: *conversion, electrical energy, package, Wi-Fi, tungsten*

I. INTRODUCTION

La prolifération croissante des appareils électroniques portables et mobiles a conduit à une demande croissante en méthodes de recharge plus efficaces et pratiques. Dans ce contexte, les technologies de recharge sans fil ont émergé comme une solution prometteuse pour répondre à ces besoins. Cet article explore une approche novatrice pour la recharge sans fil en proposant un système de conversion de paquets d'énergies WI-FI en électricité qui va ouvrir la voie à des avancées significatives de transmission dans le domaine de la recharge sans fil.

II. MODELISATION DE BASE DU SYSTEME DE CONVERSION

L'idée est fortement inspirée du système de conversion d'énergie moderne qui est basée sur la technologie rectenna, abréviation de « rectify ing antenna », un circuit redresseur de signaux RF (Radio Fréquence) captés à l'aide d'une antenne spécifique. RF fait référence à des fréquences aussi élevées que 300 GHz et aussi basses que 30 KHz, une plage de fréquences dans laquelle opère la technologie WI-FI adaptée à la transmission qui est de l'ordre de 2,5 GHz à 5 GHz [1].

De par sa topologie, on peut dire que les circuits rectenna présentent une configuration commune comme celle qui est montrée à la figure 1.

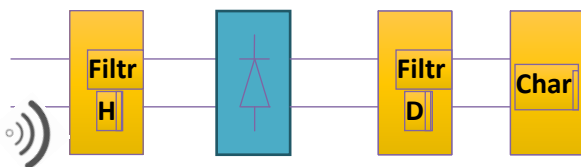


Figure 1 : Schéma représentatif d'un circuit rectenna

Derrière une antenne réceptrice RF se trouve un filtre passe-bas HF (High Fréquence) qui, comme son nom l'indique, filtre les perturbations hautes fréquence à l'entrée du convertisseur. Ceci est utile car les harmoniques engendreraient sinon un taux de réflexion non négligeable sur l'antenne réceptrice RF, et par conséquent le résultat de conversion se retrouverait avec un rendement affaibli. Pour obtenir un maximum de puissance, le filtre adaptera l'impédance du circuit rectenna à celle de l'antenne. Un redresseur à base de diodes Schottky est monté entre le filtre HF et un autre filtre passe-bas DC utile pour la protection de la charge contre les harmoniques HF [2] [3].

1. *Diodes Schottky*

A la différence des diodes classiques qui sont des jonctions p-n, les diodes Schottky sont une jonction métal – semi-conducteur. Cette particularité leur procure une tension de seuil plus basse que celle des diodes classiques, mais surtout un temps de commutation très court ce qui rend leur utilisation en hyper-fréquence fort répandue [4].

a. *Éléments caractéristiques de diodes Schottky*

Trois éléments impactent sur le modèle équivalent de cette diode : une résistance linéaire montée en série avec une résistance et une capacité non-linéaires en dérivation.

Capacité non-linéaire :

$$C(V) = \frac{dQ}{dV} = \frac{C_{j0}}{\left(1 - \frac{V}{\Phi}\right)^\gamma}$$

où $Q(V) = \frac{-C_{j0}}{1-\gamma} \left(1 - \frac{V}{\Phi}\right)^{1-\gamma}$ [4]

Cette capacité de jonction non-linéaire dépend alors des propriétés géométriques de la diode au travers de C_{j0} , et de la tension qui est appliquée à la jonction. La tension de seuil de la diode présentée dans la grandeur Q peut aussi avoir un impact sur le comportement de la diode, ainsi que la tension de claquage qui réduit le rendement de la diode au-delà d'une puissance critique donnée par [5] :

$$P_{cri} = \frac{V_{br}^2}{4 \cdot R_L}$$

b. *Un exemple de modèle de diodes Schottky déjà développé*

Un parmi les nombreux modèles développés est la diode à gallium créée par la technologie MBE (Moléculaire Beam Epitaxy). La diode peut redresser jusqu'à une fréquence de 15 GHz, couvrant largement la bande de fréquences WI-FI [6].

c. *Diodes Schottky à base de tungstène*

Les convertisseurs rectennas à base de semi-conducteur (silicium) peuvent couvrir la bande WI-FI mais offrant peu de flexibilité. Il existe déjà des convertisseurs LF (Low Frequency) plus flexibles mais ne peuvent pas convertir le paquet d'énergies en hyperfréquences.

Pour pallier à ce problème, l'idée de modéliser un système de conversion de paquet d'énergie WI-FI en énergie électrique abordée dans ce travail est apparue avec un nouveau semi-conducteur ultraperformant: le disulfure de tungstène (WS₂).

Le disulfure de tungstène (WS2) est un composé chimique constitué d'atomes de tungstène (W) et de soufre (S). C'est un matériau appartenant à la famille des dichalcogénures de métaux de transition. On a particulièrement choisi le WS2 pour ses propriétés uniques en tant que matériau semi-conducteur bidimensionnel. Le WS2 se présente sous différentes formes, allant de couches individuelles à des cristaux tridimensionnels. À l'échelle atomique, il cristallise généralement dans une structure hexagonale, où les atomes de tungstène et de soufre sont arrangés de manière alternée en couches.

Comme mentionné précédemment, la capacité de conversion énergétique dépend en grande partie des propriétés géométriques du semi-conducteur. Avec une épaisseur de couche plus fine d'environ 0,65 nm, le WS2 peut montrer des propriétés allant de semi-conducteur à métallique. C'est cette structure qui donne naissance à un tout nouveau modèle de diode Schottky plus performant lorsqu'il est réduit à une seule couche.

Par expérience, la diode Schottky à tungstène réduit considérablement la résistance en série et la capacité parasite dans le modèle classique de diode Schottky. Certains matériaux stockent, en effet, un peu de charge électrique, ce qui ralentit le circuit redresseur. Donc, une capacité minimale résulte en des vitesses de redressement accrues, des fréquences de fonctionnement plus élevées, une conversion du signal plus rapide d'une fréquence allant jusqu'à 10 GHz.

2. *Filtres passe-bas RF et DC*

Ces filtres minimisent les harmoniques créés par les diodes non-linéaires et adaptent le circuit à l'impédance d'antenne. Ils sont généralement réalisés à partir d'une technologie dite « répartie » [7]. Voici les éléments essentiels de cette technologie : elle utilise les tronçons de ligne de propagation d'onde caractérisés par ses composantes électrique et magnétique pour constituer un élément passif. Chaque ligne peut être représentée sous la forme :

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\beta l) & jZ_c \sin(\beta l) \\ \frac{j \sin(\beta l)}{Z_c} & \cos(\beta l) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_2 \\ -I_2 \end{bmatrix}$$

Si $\beta l \ll 1$, développement limité de la matrice centrale donne :

$$M = \begin{bmatrix} 1 & jZ_c \beta l \\ \frac{j\beta l}{Z_c} & 1 \end{bmatrix}$$

A une réactance série, pour une valeur très faible de βl , on a :

$$M = \begin{bmatrix} 1 & jZ_c \beta l \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

A une réactance parallèle, pour une valeur très grande de βl , on a :

$$Z_c$$

$$M = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{j\beta l}{Z_c} & 1 \end{bmatrix}$$

Par identification, on en déduit qu'un tronçon de ligne très court et de forte impédance caractéristique se comporte comme une inductance série alors qu'un tronçon court et doté d'une impédance faible se comporte comme une capacité parallèle. L'inductance et la capacité équivalentes peuvent être calculées par les relations qui suivent :

$$L = \frac{Z_c l}{v_p} \quad \text{Avec } v_p = \frac{\omega}{\beta}$$

$$C = \frac{l}{Z_c v_p}$$

III. EVALUATION DE LA PERFORMANCE TECHNIQUE DU SYSTEME DE CONVERSION

Pour évaluer la performance et technique du système proposé, des simulations ont été effectuées en utilisant un modèle numérique du convertisseur à diode et des outils de simulation ADS et PSpice.

1. Simulation

Pour la simulation, on a modélisé le récepteur électromagnétique par une source de tension dotée d'une impédance interne constante de 50Ω . Cette supposition est valide seulement dans des conditions spécifiques, car l'impédance d'une antenne n'est pas constante sur l'ensemble du spectre électromagnétique. En réalité, elle ne demeure constante qu'à la fréquence pour laquelle elle a été optimisée. Pour faire cette hypothèse, il serait nécessaire de faire fonctionner le circuit à une fréquence unique tout en maintenant des rejets harmoniques extrêmement faibles [8].

On évalue la puissance du modèle par la relation :

Le rendement $P_{opt} = \frac{V_{eff}^2}{4 \cdot R_0}$ est alors donné par :

Deux simulations $\eta = \frac{P_{DC}}{P_{opt}}$ ont été réalisées à des fins d'études comparatives des modèles numériques des circuits. Le modèle de circuit rectenna à base de diode HSMS2862 obtenu sous PSpice de la

figure 2 est un modèle simplifié qui permet de comprendre l'influence des valeurs intrinsèques des composants du circuit.

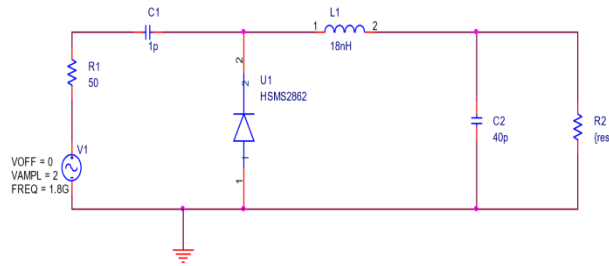


Figure 2 : Modèle de circuit sous Pspice à base de diode HSMS2862.

Ce modèle présente l'absence de pistes de connexion et l'utilisation de composants sans boîtiers. Cependant, il ne tient pas compte des éléments parasites ni des désadaptations causées par les pistes. Malgré cela, il offre l'avantage de simuler le circuit temporellement en prenant en compte les pertes principalement dans le semi-conducteur. Les résultats obtenus sont légèrement supérieurs à ceux des simulations ADS et des essais expérimentaux. Il est important de noter que la charge optimale obtenue avec ce circuit diffère des autres modèles en raison de l'impact des éléments parasites sur l'adaptation de la structure.

La présence des éléments parasites causés par les boîtiers des composants CMS a conduit à choisir le deuxième logiciel de simulation ADS.

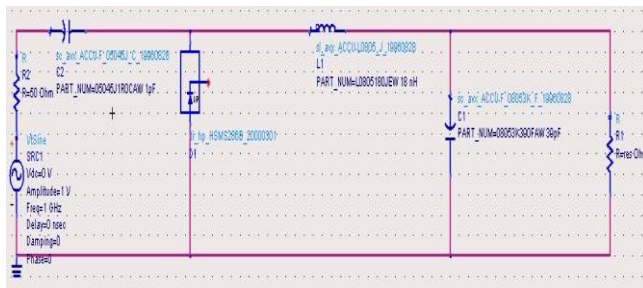


Figure 3 : Modèle de circuit sous ADS à base de diode HSMS2862.

Il est important de noter que le modèle ne tient pas compte des couplages qui peuvent survenir entre pistes. Ces couplages peuvent s'avérer déterminant pour le comportement de la structure.

Ainsi, un troisième modèle a été développé pour inclure ces couplages. La simulation effectuée n'est plus restreinte au domaine circuit, mais intègre également des calculs électromagnétiques, ce qui la qualifie de simulation globale.

La figure 4 illustre les performances des différents modèles. L'introduction des éléments parasites des boîtiers entraîne une détérioration du rendement et des variations dans la charge optimale. La prise en compte des effets des pistes entraîne une amélioration de l'adaptation du circuit. Le rendement optimal est obtenu avec une structure optimisée où tous les éléments parasites sont pris en compte, et les résultats expérimentaux correspondent à ceux de la simulation globale.

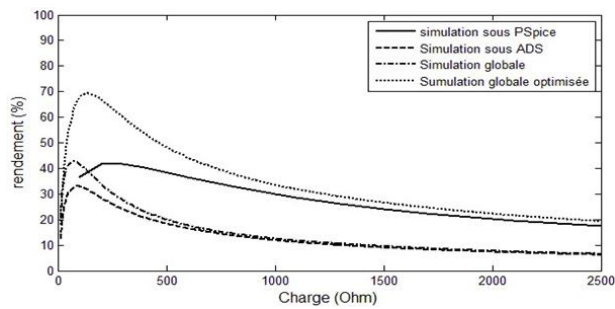


Figure 4 : Rendements obtenus sur différents simulateurs.

Ces simulations ont été menées pour une tension d'entrée de 2 V et une plage de charges de 10 à 2500 Ω . Dans la simulation Pspice, la plage de charges variait de 100 à 2500 Ω pour des raisons de calcul et de mémoire. Cela n'affecte pas l'analyse car la charge optimale de ce circuit est de 300 Ω .

2. Résultats de la simulation et interprétations

Les résultats présentés ici sont obtenus par la simulation d'un modèle comportant d'une diode HSMS2860 qui est une diode Schottky dotée d'une résistance série et d'une capacité de jonction de valeurs faibles.

Des simulations comparables ont été aussi réalisées sur la toute nouvelle variante de diode de Schottky avec un semi-conducteur de type bidimensionnel qui est le disulfure de tungstène (WS₂). Ce dernier présente des résultats assez satisfaisants en termes de rendement de conversion.

La courbe de rendement représentée à la figure 5 révèle le rendement obtenu avec la structure non flexible de la diode HSMS2860 dont la capacité RF est de 5.6 pF, les inductances DC 15nH et 10pH pour une puissance d'entrée de 10 mW.

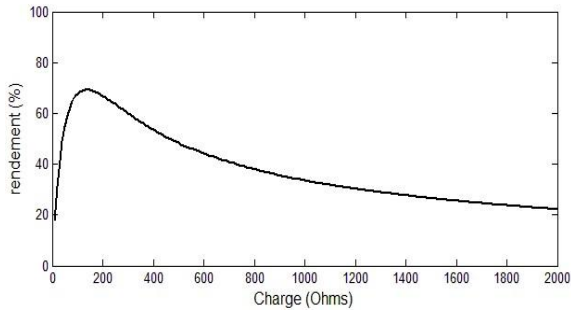


Figure 5 : Rendement obtenu en simulation du modèle de diode HSMS2860.

Le rendement optimal obtenu pour une charge résistive de 140 Ω est de 69.3%. La simulation a montré que pour la même charge inductive, le rendement de conversion pour le modèle à tungstène est de 39,6% (valeur optimale), un rendement non négligeable vis-à-vis de celui des rectennas classiques. Ce rendement varie en fonction de la puissance d'entrée. Avec un niveau de puissance assez significatif, l'efficacité du redresseur à tungstène va de 25 à 30% environ. On en conclut donc que la technologie Tungstène est déjà très prometteuse. Elle offre plus de portabilité et de flexibilité par rapport à la technologie rectenna classique. Ce qui va s'adapter facilement au concept mobile de la conversion du paquet d'énergie WI-FI pour l'alimentation des appareils électroniques peu énergivores (puissances allant de 0,1 à 50 mW).

IV. CONCLUSION

Cet article a présenté une approche novatrice pour la recharge sans fil d'appareils électroniques en proposant un système de conversion des paquets d'énergie Wi-Fi en électricité au moyen d'un convertisseur spécifique comportant des minéraux de tungstène. Pour mieux comprendre le comportement d'un tel convertisseur, on a fait référence au convertisseur classique à diode de la famille HSMS respectant la norme Schottky. Les résultats de la simulation présentés montrent que le choix du modèle de la diode Schottky à utiliser est avant tout défini par la puissance à convertir souhaitée. Pour les très faibles puissances, inférieures à 1,5 mW, dans le cas de la structure habituelle du circuit redresseur, il est préférable d'utiliser des diodes Schottky ayant une capacité de jonction et une tension de seuil faibles. Pour ce qui est des puissances faibles, au-delà de 1,5 mW mais inférieures à 50 mW, il est préférable d'utiliser des diodes Schottky ayant une capacité de jonction faible et une résistance série faible même si cela implique une valeur de la tension de seuil relativement élevée. Tout ceci explique l'intérêt d'utiliser la diode à disulfure de tungstène, une nouvelle famille des diodes Schottky, connue en plus pour sa vitesse de commutation élevée et très pratique pour exploiter la bande HF de la technologie WI-FI. Les avantages potentiels de ce système en termes d'efficacité, de rendement et de flexibilité en font une option prometteuse pour l'avenir de la recharge sans fil.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] L. Deschamps, "Transmission d'Énergie sans fil", Revue de l'électronique et de l'électricité, n° 8, Septembre 2004, pp 75-81.
- [2] A. Van Zyl, J. H. R. Enslin, R. Spée, "A New Unified Approach to Power Quality Management", IEEE Trans. On Power Electronics, Vol. 11, N° 5, pp 691-697.
- [3] T. paing, J. Shin, R. Zane, Z. Popovic, "Resistor Emulation Approach to Low Power RF Energy Harvesting", IEEE Trans. On Power Electronics, Vol. 23, N° 3, Mai 2008, pp 14941501.
- [4] S. A. Maas, "Nonlinear Microwave and RF Circuits", second edition, Artech House INC, 2003.
- [5] S. A. Maas, "Nonlinear Microwave and RF Circuits", second edition, Artech House INC, 2003.
- [6] W. Jeon, T. M. Firestone, J. C. Rodgers, J. Melngialis, "Design and fabrication of Schottky diodes on-chip RF power detector", Solid-state electronics 48 (2004), pp : 20892093.
- [7] H. Baudrand, "Conducteurs en haute fréquence", Techniques de l'ingénieur, E 1 205.
- [8] Y. Tsui, "Analysis and Design Strategy of UHF Micro-Power CMOS Rectifiers for Micro-Sensor and RFID Applications", IEEE Trans. On Circuit and Systems, Vol. 54, N° 1, January 2007.