Projet GP CODS - 2026/2027

Optimisation de la forme d'onde impulsionnelle pour le transfert d'énergie sans fil

Le transfert d'énergie sans fil par ondes radio (WPT - Wireless Power Transfer) constitue une solution particulièrement intéressante pour l'alimentation à distance de dispositifs électroniques et de capteurs à faible consommation. Il permet notamment d'envisager des objets communicants autonomes, sans batterie ou avec une dépendance réduite aux batteries. L'un des principaux verrous du WPT en champ lointain reste cependant le faible niveau de puissance disponible au niveau du récepteur et, par conséquent, la dégradation des performances de la conversion RF-DC lorsque la puissance incidente diminue. Les recherches ont longtemps porté principalement sur l'optimisation du récepteur, et notamment de la rectenna associant antenne et circuit de conversion RF-DC. Une autre approche consiste à agir en amont sur le signal transmis afin d'exploiter le caractère fortement non linéaire du redresseur RF-DC. C'est le principe de l'optimisation de la forme d'onde (POW - Power Optimized Waveform), pour lequel la forme d'onde devient elle-même un degré de liberté permettant d'améliorer la puissance continue récupérée. Les signaux présentant de fortes variations d'enveloppe et un PAPR (Peak-to-Average Power Ratio) élevé, tels que les signaux multi-tons ou impulsionnels, présentent à ce titre un intérêt particulier.

Les travaux réalisés au laboratoire ESYCOM dans le cadre de la thèse de Viet-Duc Pham ont permis de mettre en évidence expérimentalement le potentiel de cette approche. Une rectenna large bande fonctionnant entre 1,6 et 2,8 GHz a été caractérisée sous excitation impulsionnelle en faisant varier notamment le rapport cyclique et la fréquence de modulation (Figure 1). À puissance RF moyenne constante, la diminution du rapport cyclique permet d'augmenter fortement la puissance crête et le PAPR du signal et ainsi de mieux exploiter les non-linéarités du circuit de rectification. L'optimisation de ces paramètres a permis d'obtenir des améliorations importantes de la tension continue et du rendement de conversion RF-DC par rapport à une excitation sinusoïdale continue (CW), avec notamment des gains proches de 14 dB dans certaines conditions de faible puissance. Ces travaux ont également montré que la forme d'onde optimale dépend du point de fonctionnement du redresseur, notamment de la fréquence, de la puissance RF incidente et de la charge.

Les travaux plus récents menés dans la thèse de Amine-Mahdi Hamidouche ont approfondi cette problématique en montrant que l'optimisation de la forme d'onde seule n'est pas suffisante. Les performances du redresseur sous excitation impulsionnelle résultent d'une interaction entre les caractéristiques temporelles du signal et les paramètres du circuit. Une méthodologie associant simulation sous ADS et caractérisation expérimentale a ainsi permis

d'étudier conjointement la fréquence, la puissance incidente, le rapport cyclique et la charge de sortie, et de mettre en évidence la nécessité d'une optimisation conjointe de la forme d'onde et du point de fonctionnement du récepteur. Ces résultats ouvrent naturellement la voie à une approche plus générale de co-conception du signal et du circuit de conversion RF-DC.

Le projet proposé s'inscrit directement dans la continuité de ces deux travaux. Son objectif principal sera d'approfondir l'étude des formes d'onde impulsionnelles optimisées pour le WPT, en ne considérant plus uniquement le rapport cyclique mais plus généralement la forme de l'enveloppe, sa fréquence de répétition, sa bande passante, son PAPR ainsi que leur interaction avec les caractéristiques du circuit RF-DC. Différentes formes d'impulsions pourront notamment être comparées : rectangulaire, gaussienne, fenêtres de type Hann ou autres formes à définir. L'un des enjeux sera de déterminer si le PAPR constitue à lui seul une métrique pertinente pour prédire les performances de conversion ou si d'autres caractéristiques temporelles et statistiques du signal doivent être prises en compte. Une attention particulière sera également portée au compromis entre PAPR, bande passante occupée et performances de conversion RF-DC, la diminution du rapport cyclique conduisant simultanément à une augmentation du PAPR et à un élargissement spectral du signal. Cette question est importante dans la perspective d'une utilisation réelle des POW, soumise à des contraintes de bande passante et de puissance d'émission.

Le travail proposé s'appuiera sur une approche combinant simulation et expérimentation et s'articulera notamment autour des tâches suivantes:

- La génération et la caractérisation sous MATLAB/Python de différentes formes d'onde impulsionnelles et l'étude de métriques telles que le PAPR, la bande passante et la distribution statistique de l'enveloppe.
- La modélisation et la simulation sous ADS du comportement non linéaire de circuits de conversion RF-DC soumis à ces différentes excitations, en s'appuyant notamment sur Envelope Analysis.
- L'étude paramétrique et l'optimisation conjointe de la forme d'onde et du récepteur en fonction de la fréquence, de la puissance incidente, de la charge et des paramètres du filtre de sortie.
- L'évolution et l'automatisation du banc de mesure existant afin de générer les formes d'onde retenues, caractériser expérimentalement les circuits RF-DC et confronter systématiquement simulations et mesures.

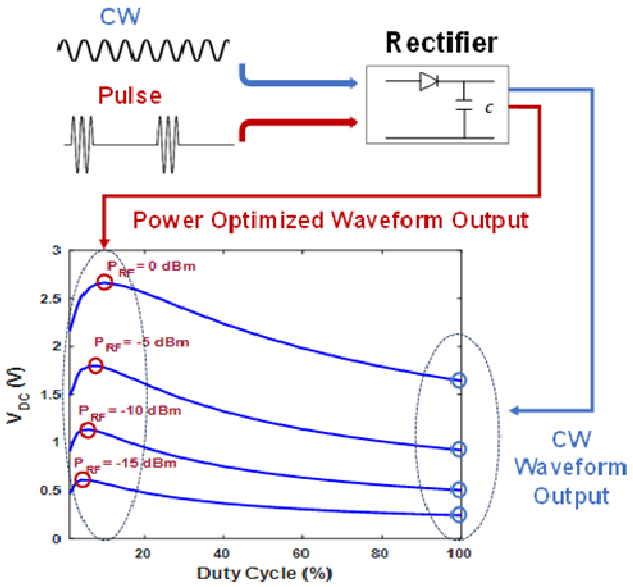

Figure 1 Tension de sortie DC en fonction du rapport cyclique, pour différents niveaux de puissance RF

À plus long terme, l'optimisation des formes d'onde pour le WPT pourra être étendue au SWIPT (Simultaneous Wireless Information and Power Transfer), dans lequel une même forme d'onde est exploitée pour transférer simultanément de l'énergie et de l'information. Cette évolution conduit à dépasser une optimisation exclusivement énergétique de la forme d'onde pour rechercher un compromis entre plusieurs fonctions potentiellement antagonistes. En particulier, les formes d'onde à fort PAPR, favorables à l'exploitation des non-linéarités du redresseur et à l'amélioration de la conversion RF-DC, doivent également satisfaire les contraintes propres à la transmission de données, notamment en termes de fiabilité et de bande passante. Une extension supplémentaire consiste à intégrer une fonction de sensing, en associant au récepteur (ou rectenna) un capteur RF dont la réponse dépend d'une grandeur physique, de l'environnement ou des propriétés d'un matériau. Le circuit de conversion RF-DC peut alors être intégré à la fonction de mesure, de sorte que la tension continue en sortie puisse constituer non seulement une source d'énergie, mais également un indicateur de la grandeur observée. Une telle évolution conduit naturellement à envisager une optimisation multi-objectif de la forme d'onde, recherchant un compromis entre la puissance récupérée, la fiabilité de la transmission de l'information et la qualité de la mesure. Le WPT et l'optimisation des formes d'onde (POW) constituent ainsi le cœur du présent projet, avec comme perspective une évolution vers une architecture RF plus intégrée dans laquelle une même forme d'onde et une même infrastructure radio contribueraient conjointement au transfert de puissance, à la transmission d'information et à l'acquisition de données issues de capteurs.

Contact : Hakim TAKHEDMIT (hakim.takhedmit@univ-eiffel.fr)

Références bibliographiques

- M. Hamidouche, H. Takhedmit, P. Poulichet, V.-D. Pham and L. Cirio, "Joint Duty-Cycle and Load Optimization of a Broadband RF Rectifier under Pulsed Excitation," IEEE Journal on Wireless Power Technologies, 2026, doi: 10.1109/JWPT.2026.3727971.
- V.-D. Pham, H. Takhedmit and L. Cirio, "Waveform Optimization Using RF Pulse Signal on Voltage-Doubler Broadband Rectenna," IEEE Journal of Radio Frequency Identification, vol. 5, no. 2, pp. 139–147, June 2021, doi: 10.1109/JRFID.2020.3039878.
- A. Collado and A. Georgiadis, "Optimal Waveforms for Efficient Wireless Power Transmission," IEEE Microwave and Wireless Components Letters, vol. 24, no. 5, pp. 354–356, May 2014.
- B. Clerckx and E. Bayguzina, "Waveform Design for Wireless Power Transfer," IEEE Transactions on Signal Processing, vol. 64, no. 23, pp. 6313–6328, Dec. 2016.
- B. Clerckx, "Wireless Information and Power Transfer: Nonlinearity, Waveform Design, and Rate-Energy Tradeoff," IEEE Transactions on Signal Processing, vol. 66, no. 4, pp. 847–862, Feb. 2018.