



RADIO SCIENCE FOR HUMANITY

Caractérisation de la récupération de l'énergie solaire pour les capteurs communicants

Taoufik BOUGUERA (1)(2), Jean-François Diouris (1), Guillaume Andrieux (1), Jean-Jacques Chaillout (2)

IETR (Institute of Electronics and Telecommunications of Rennes) Laboratory

(1) LUNAM Université, Université de Nantes, Polytech Nantes, 44306 Nantes Cedex 3, France

(2) CEA Leti/DSYS/SSCE/LCHP, MINATEC Campus, F-38054 Grenoble Cedex 3, France

Key words : Récupération d'énergie, Énergie solaire, MPPT, Capteurs communicants

Résumé Une grande partie des nouvelles générations d'objets connectés ne pourra se développer que s'il est possible de les rendre entièrement autonomes sur le plan énergétique. Même si l'utilisation de batteries ou de piles résout une partie de ce problème en assurant une autonomie qui peut être importante, elle introduit de très nombreux problèmes tels que la maintenance incompatible avec certaines applications et la pollution de l'environnement. La récupération de l'énergie solaire, constitue alors une solution très attractive bien que la quantité d'énergie obtenue soit généralement assez faible. Notre objectif est de proposer une solution de capteur autonome basée sur un système de récupération d'énergie solaire et pouvant être mise en oeuvre dans différentes applications. Nous présentons dans cet article une étude permettant d'effectuer cette caractérisation. On s'intéresse tout d'abord à la modélisation du panneau solaire à travers la caractérisation des modules solaires photovoltaïques. Ensuite, on se propose de modéliser et estimer la quantité d'énergie solaire incidente. Dans cet étude, nous avons utilisé des bases de données qui montrent l'évolution de l'éclairement en fonction du temps. Enfin, des mesures d'énergie solaire ont été réalisées puis validées.

Abstract Nowadays, researchers aim to develop entirely autonomous sensors. Even if the use of batteries resolve a part of the energy problem by ensuring an important autonomy, it introduces many problems such as maintenance and environmental pollution. Solar harvesting energy, then constitutes a very attractive solution although the low quantity of energy obtained. Our goal is to provide an autonomous sensor based on a harvesting system of solar energy which can be used in various applications. In this article we present a study to perform this characterization. We look first at the solar panel modeling through the characterization of photovoltaic solar modules. Next, we propose to model and quantify the incident solar energy amount. In this study, we used databases that show the illumination evolution as a function of time. Finally, solar energy measurements were carried out and validated.

1 Introduction

Actuellement il y a deux façons principales pour maximiser la durée de vie d'un objet communicant. La première façon consiste au stockage de l'énergie accompagné de la réduction systématique de la consommation d'énergie par les différents blocs du capteur (notamment le bloc radio). Alors que la deuxième façon consiste à obtenir de l'énergie à partir de l'environnement [1],[2]. En effet, les énergies renouvelables telles que l'énergie éolienne et l'énergie solaire ainsi que l'énergie vibratoire sont devenues des sources prometteuses pour fournir une partie du bilan énergétique du capteur ou remplacer totalement les batteries utilisées pour avoir un Capteur Communicant Autonome en Energie. La récupération de l'énergie solaire est devenue alors un élément clé pour prolonger la durée de vie des capteurs sans fil. Cette technique permet non seulement d'alimenter le capteur pour de différentes classes d'applications, mais aussi de s'affranchir de tous les soucis causés par l'utilisation des piles [1],[3].

Ainsi pour assurer un fonctionnement neutre en énergie, il est nécessaire de connaître et de prédire la quantité d'énergie pouvant être récupérée à tout moment. Nous présentons dans cet article une étude permettant d'effectuer cette caractérisation. On s'intéresse tout d'abord à la modélisation du panneau solaire puis à celle de l'éclairement. En effet, dans la première partie du projet, il s'agit de modéliser et estimer la quantité d'énergie solaire récupérée

à travers la caractérisation des modules solaires photovoltaïques. Il est également nécessaire de connaître l'énergie incidente. Nous avons alors basé nos modèles de caractérisation sur une base de données qui montrent l'évolution de l'éclairement en fonction du temps. Puis, nous avons réalisé des mesures d'énergie solaire pour valider les modèles développés.

2 Modélisation du panneau solaire photovoltaïque

Dans la littérature, modéliser un panneau solaire revient à caractériser le comportement des cellules photovoltaïques qui le composent [4]. Cette caractérisation passe nécessairement par un choix judicieux des modèles électriques équivalents de la cellule ainsi que ses différentes caractéristiques électriques. Le modèle obtenu de la cellule solaire sera ensuite généralisé pour caractériser le panneau solaire photovoltaïque, en le considérant comme un ensemble de cellules identiques branchées en série et/ou en parallèle [5]. De nombreux modèles mathématiques de générateurs photovoltaïques ont été développés pour représenter son comportement non linéaire. Ces modèles se différencient entre eux par les procédures mathématiques et le nombre de paramètres utilisés pour le calcul de la caractéristique courant-tension du module photovoltaïque [4],[5]. Les différents modèles développés se basent tous sur l'utilisation de l'équation de Shockley (1), qui met en relation le courant traversant une diode (un des éléments principaux pour modéliser un module photovoltaïque) en fonction des différents paramètres du circuit [6].

$$I_D = I_{sat} \cdot \left(\exp\left(\frac{V_D}{V_T}\right) - 1 \right) \quad (1)$$

Avec :

- I_{sat} : Le courant de saturation de la diode.
- V_D : Le potentiel aux bornes de la diode.
- V_T : Le potentiel thermodynamique.

2.1 Modélisation de la cellule photovoltaïque

Le schéma électrique équivalent de la cellule photovoltaïque est présenté par la figure 1 :

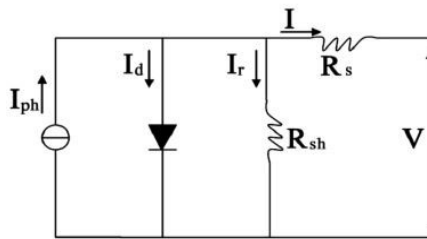


FIGURE 1 – Circuit équivalent de la cellule photovoltaïque [7]

En se basant sur cette figure et en utilisant la loi de Kirshoff et la loi de Shockley [8], le courant délivré par la cellule photovoltaïque a comme expression :

$$I = I_{ph} - I_d - I_r \quad (2)$$

Avec :

- I_{ph} est le photo-courant de la cellule (courant photo-généré) qui est proportionnel à l'ensoleillement E (ou éclairement) [9]. Il est également proportionnel au courant de court-circuit I_{cc} , où ce dernier est atteint lorsque l'ensoleillement E atteint la valeur maximale 1000 w/m^2 . On a alors :

$$I_{ph} = I_{cc} \cdot \frac{E}{1000} \quad (3)$$

- I_d est le courant qui circule dans la diode, il s'exprime de la façon suivante :

$$I_d = I_{sat} * \left(\exp\left(\frac{q(V + R_s \cdot I)}{nKT}\right) - 1 \right) \quad (4)$$

Sachant que le potentiel thermodynamique V_T a comme expression :

$$V_T = \frac{nKT}{q} \quad (5)$$

Alors l'expression finale du courant circulant dans la diode s'écrit :

$$I_d = I_{sat} \cdot \left(\exp\left(\frac{V + R_s \cdot I}{V_T}\right) - 1 \right) \quad (6)$$

- I_r est le courant circulant dans la résistance en parallèle à la diode, il suit la formule 7 :

$$I_r = \frac{V_d}{R_{sh}} = \frac{V + R_s \cdot I}{R_{sh}} \quad (7)$$

A partir des équations (2), (3), (6) et (7), on peut déterminer l'expression du courant délivré par une cellule photovoltaïque en fonction de sa tension ainsi que sa caractéristique courant-tension (8) :

$$I = I_{cc} \cdot \frac{E}{1000} - I_{sat} \cdot \left(\exp\left(\frac{V + R_s \cdot I}{V_T}\right) - 1 \right) - \frac{V + R_s \cdot I}{R_{sh}} \quad (8)$$

Avec :

- I_{sat} : Le courant de saturation de la diode
- I_{cc} : Le courant de court-circuit
- E : L'éclairement en W/m^2

2.2 Modélisation du panneau solaire

Comme expliqué précédemment, un panneau solaire photovoltaïque n'est autre qu'un ensemble de cellules photovoltaïques montées en série et/ou en parallèle [10]. En se référant à la section 2.1, on peut alors déterminer la caractéristique courant-tension du panneau solaire qui est constitué de N_s cellules en série et de N_p cellules en parallèles [11]. Le modèle Courant-Tension (I-V) du panneau solaire est présenté par l'équation (9) :

$$I_{pv} = N_p \cdot I_{cc} \cdot \frac{E}{1000} - N_p \cdot I_{sat} \cdot \left(\exp\left(\frac{V_{pv}}{N_s \cdot V_T} + \frac{R_s \cdot I_{pv}}{N_p \cdot V_T}\right) - 1 \right) - \frac{V_{pv} + R_s \cdot I_{pv}}{R_{sh}} \quad (9)$$

La caractéristique puissance-tension du panneau solaire est présentée par l'équation 10. Cette équation montre le modèle Puissance-Tension (P-V) du panneau solaire qui est utilisé pour tracer l'évolution de la puissance délivrée par le module photovoltaïque en fonction de sa tension :

$$P_{pv} = I_{pv} \cdot V_{pv} = \left[N_p \cdot I_{cc} \cdot \frac{E}{1000} - N_p \cdot I_{sat} \cdot \left(\exp\left(\frac{V_{pv}}{N_s \cdot V_T} + \frac{R_s \cdot I_{pv}}{N_p \cdot V_T}\right) - 1 \right) - \frac{V_{pv} + R_s \cdot I_{pv}}{R_{sh}} \right] \cdot V_{pv} \quad (10)$$

3 Modèle d'éclairement solaire et résultats de mesure

3.1 Modèle d'éclairement

Dans le but de modéliser l'évolution de l'éclairement en fonction du temps et quantifier l'énergie reçue par le panneau solaire, on commence par le calcul du rayonnement global reçu par un module solaire photovoltaïque plan orienté selon l'axe N-S à partir des données de mesure de l'ensoleillement (figure 2) :

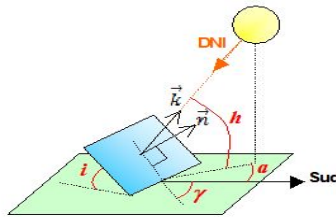


FIGURE 2 – Calcul du rayonnement solaire global

Le rayonnement solaire global a comme expression :

$$R_{global} = R_{directe} + R_{diffus} = DNI(i) \cdot \cos(\theta) + DTI(i) \quad (11)$$

Tels que :

- $DNI(i)$: Composante normale du rayonnement directe
- $DTI(i)$: Composante normale du rayonnement diffus
- θ : Angle d'incidence du rayonnement direct sur la surface S

3.2 Résultats de mesures de l'éclairement

Pour étudier l'évolution de l'éclairement en fonction du temps, nous avons utilisé des bases de données qui présentent des mesures toutes les heures de l'ensoleillement pendant 20 ans [12]. La figure 3 montre la variation de l'éclairement moyen pendant une année en commençant par le mois de janvier :

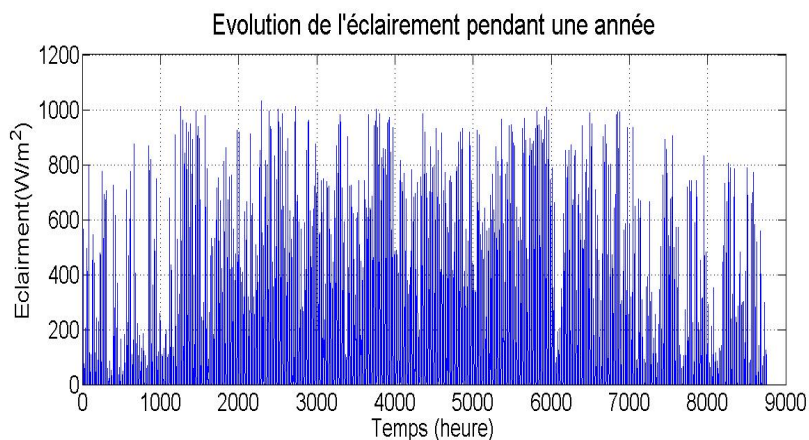


FIGURE 3 – Évolution de l'éclairement moyen pendant une année

Cette variation peut être expliquée par la figure 4, qui présente l'évolution de l'éclairement pendant deux jours consécutifs de l'année. On remarque que l'éclairement atteint ses valeurs maximales pendant l'été (où on peut avoir 1000 W/m^2) et qu'il diminue et atteint des valeurs minimales pendant l'hiver.

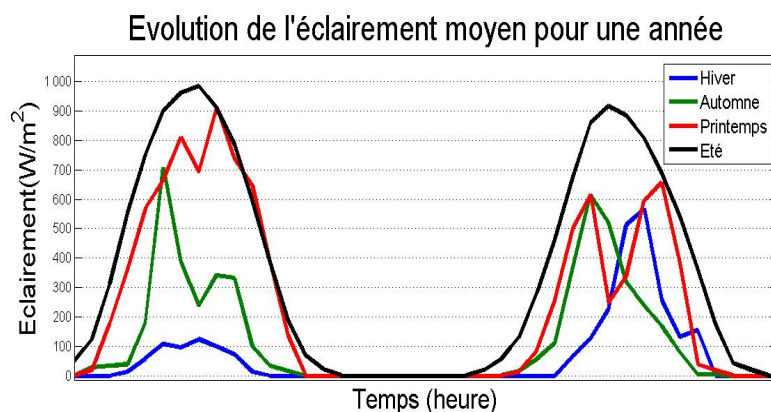


FIGURE 4 – Évolution de l'éclairement pendant deux jours consécutifs de l'année

Toutes ces informations relatives à l'éclairement seront ensuite utiles pour prédire la quantité d'énergie qu'on peut récupérer à court et à long terme, et établir ainsi nos modèles de prédictions des énergies disponibles et consommées par le capteur afin de converger vers son fonctionnement neutre en énergie et prolonger ainsi sa durée de vie.

4 Modélisation du contrôleur MPPT

Pour obtenir la puissance maximale de sortie du panneau solaire qui varie avec les conditions météorologiques (ensoleillement et température) [13], on a besoin d'un contrôleur (Maximum Power Point Tracker) servant à extraire le maximum de la puissance en agissant sur la tension ou le courant du module solaire (figure 5).

Cette méthode se base sur l'algorithme de perturbation et d'observation qui fonctionne tout d'abord par la perturbation périodique (incrémentation ou décrémentation) du courant sortant du système photovoltaïque. Il compare ensuite entre la puissance de sortie du présent cycle avec celle du cycle précédent [13], [14]. Enfin, Pour converger vers la valeur maximale de la puissance (le point MPP) il contrôle le sens de la perturbation : si la puissance augmente alors la perturbation continue dans le même sens pendant le cycle suivant, sinon la direction de perturbation sera inversée pour trouver la valeur maximale cherchée [15], [16].

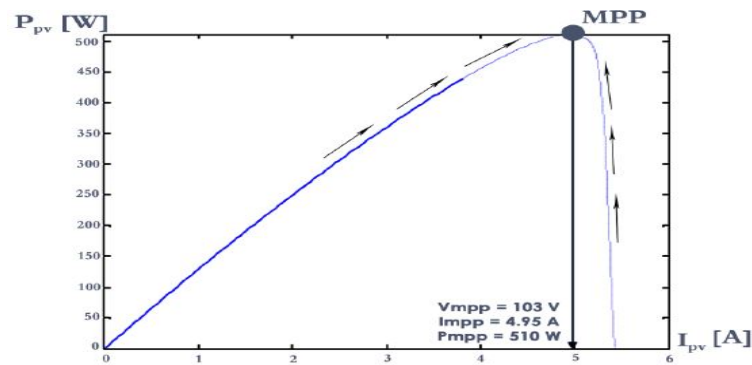


FIGURE 5 – Principe de fonctionnement du contrôleur MPPT

5 Résultats de simulations obtenus

Pour tracer les caractéristiques $P-V$ et $I-V$ du panneau solaire et voir l'effet de l'éclairement sur sa puissance de sortie, nous avons utilisé les caractéristiques électriques d'un panneau solaire disponible dans le laboratoire. Ce module est composé de 8 cellules en série (c'est-à-dire $N_p = 1$ et $N_s = 8$), il a respectivement les caractéristiques électriques de P_{max} , I_{cc} et V_{co} suivantes : 800 mW, 0.23 A et 4.8 V. Les simulations sont faites dans les conditions standards de températures (25°C) et d'éclairement ($1000\text{W}/\text{m}^2$).

Afin de comparer les résultats obtenus et évaluer les performances du panneau solaire utilisé, nous avons développé trois modèles de panneaux solaire. Le premier modèle est développé avec Matlab/Simscape en utilisant le circuit électrique équivalent de la cellule solaire (figure 1). Le deuxième modèle est implémenté avec un script Matlab en utilisant les équations (9) et (10). Ces deux premiers modèles sont ensuite comparés à un troisième modèle de référence de la cellule solaire, qui est disponible sous Matlab/Simscape.

5.1 Caractéristiques P-V et I-V du panneau

5.1.1 Caractéristique P-V du panneau

La figure 6 montre la caractéristique puissance-tension du panneau solaire utilisé. On remarque que les deux modèles développés donnent le même résultat que le modèle de référence (modèle 3). On retrouve en outre les mêmes caractéristiques constructeur du module solaire utilisé (la puissance maximale est égale à 805 mW et la tension de circuit-ouvert est égale à 4.8 V).

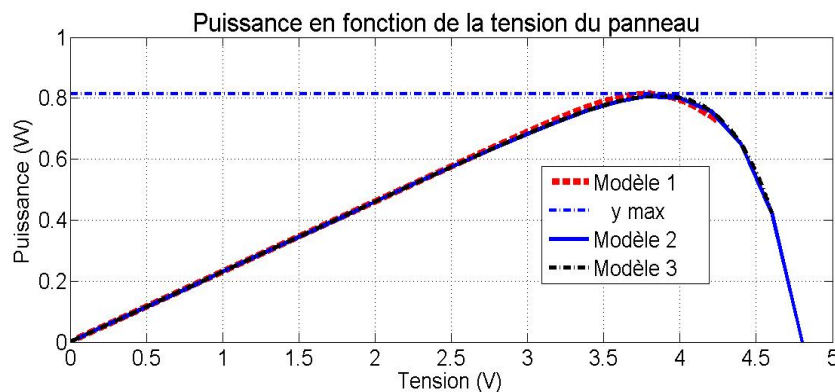


FIGURE 6 – Caractéristique P-V du panneau

5.1.2 Caractéristique I-V du panneau

La caractéristique courant-tension du panneau est présentée par la figure 7. On remarque que les trois courbes obtenues sont similaires, avec les mêmes caractéristiques électriques du module solaire utilisé (le courant de court-circuit est égale à 0.23 A et la tension de circuit ouvert est égale à 4.8 V).

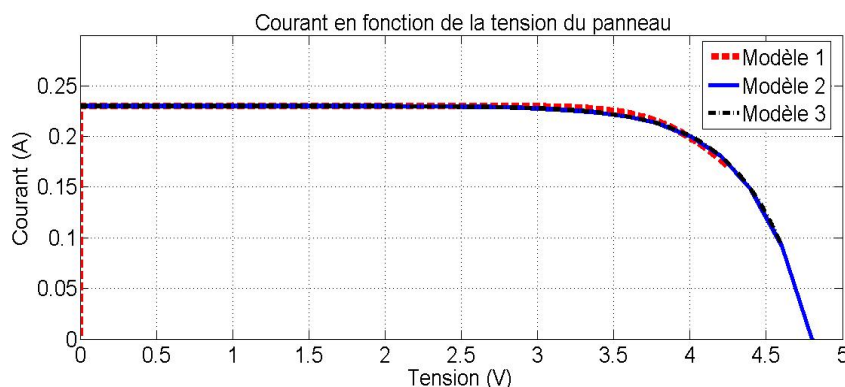


FIGURE 7 – Caractéristique I-V du panneau

5.2 Effet de l'éclairement sur la puissance du panneau

Comme expliqué dans la section 3, les caractéristiques de la cellule photovoltaïque sont directement liées à la variation de l'éclairement. La figure 8 montre l'effet de cette variation sur la puissance du module utilisé à une température maintenue constante égale à 25°C. En se basant sur les données de mesure de l'éclairement (figure 3), nous remarquons que l'évolution de la puissance est liée à l'évolution de l'éclairement pendant une année : on obtient la puissance maximale du panneau (800mW) si l'éclairement est maximum (1000W/m²).

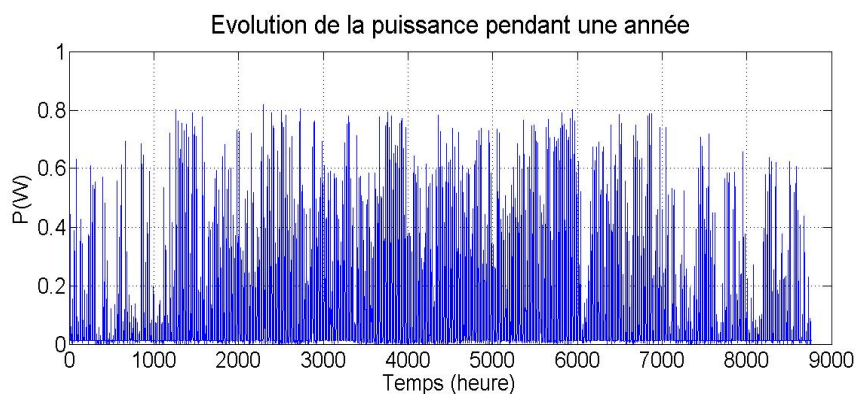


FIGURE 8 – Évolution de la puissance du panneau pendant une année

Le résultat de caractérisation de l'énergie solaire est présenté par la figure 9, qui montre l'évolution de la quantité de l'énergie récupérée par jour pendant la même année (en commençant par le mois de janvier). Nous remarquons ainsi que cette énergie est maximale pendant l'été où l'éclairement atteint ses valeurs maximales, alors qu'elle est minimale en hiver.

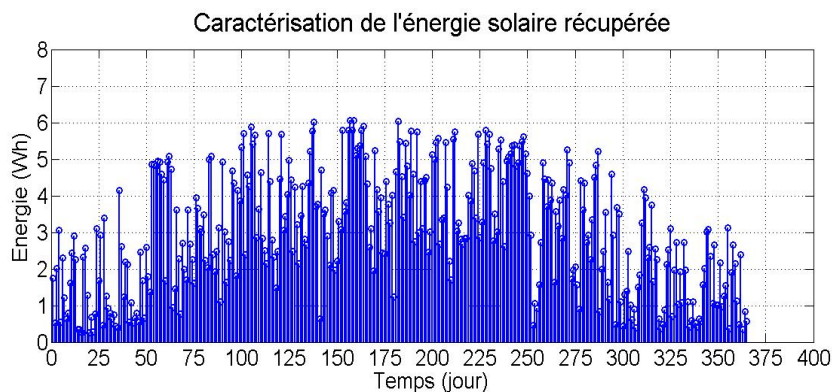


FIGURE 9 – Énergie solaire récupérée par jour pendant une année

5.3 Effet du MPPT sur les caractéristiques du panneau

En appliquant l'algorithme du MPPT, on retrouve les caractéristiques optimales du module photovoltaïque utilisé. Les figures 10 et 11 permettent de présenter la tension et la puissance optimale du panneau. On remarque qu'après les 200 ms, on peut obtenir les valeurs optimales de tension (3.85 V) et de puissance (800 mW) données par la fiche technique du module solaire.

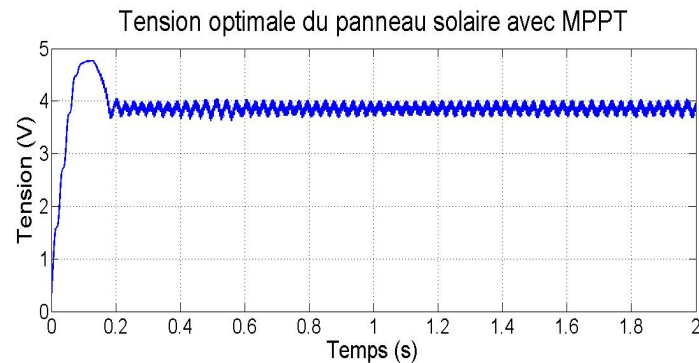


FIGURE 10 – Tension optimale du panneau avec le contrôle MPPT

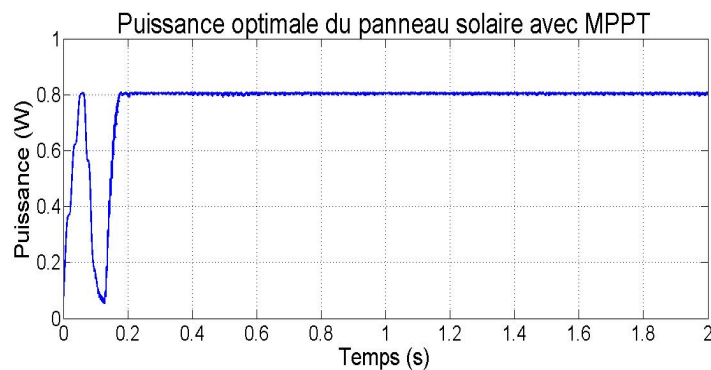


FIGURE 11 – Puissance optimale du panneau avec le contrôle MPPT

6 Résultats de mesures obtenus

Afin d'avoir une résolution temporelle plus importante que celle présentée par les bases de données (avoir un échelle de temps plus court) et pour faire des prédictions à court terme, nous avons caractérisé la récupération d'énergie solaire à travers un ensemble de mesures instantanées. Nous présentons dans cette partie les résultats obtenus avec le même panneau solaire utilisé dans les simulations. Ce panneau est placé à côté d'une fenêtre dans une salle éclairée durant une journée (de 9 à 17h) et il reçoit une alternance d'éclairage indoor et outdoor. La figure 12 montre l'évolution de la puissance optimale du panneau solaire en fonction du temps. Nous remarquons que cette puissance atteint des valeurs maximales vers 14h15 où l'irradiation est maximale. Alors qu'elle décroît vers la fin de la journée où l'éclairement est minimum.

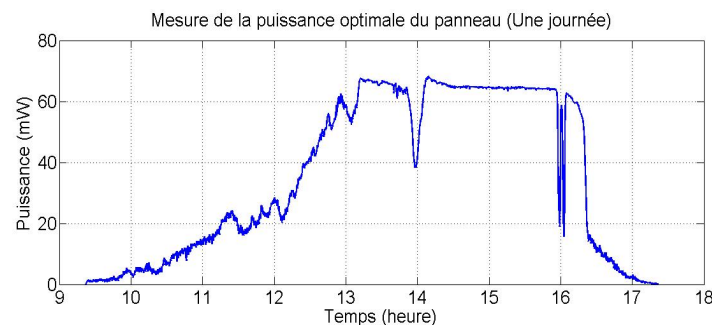


FIGURE 12 – Mesure de la puissance P_{opt} du panneau (Une journée)

7 Conclusion et perspectives

Cet article met l'accent sur la technique de récupération d'énergie solaire pour les objets communicants. Afin de remplacer les batteries et prolonger la durée de vie des capteurs sans fil, nous proposons des modèles de caractérisation de la récupération d'énergie solaire. Cette caractérisation s'appuie sur des équations mathématiques permettant de tracer la puissance récupérée en fonction de la tension d'un panneau solaire. En effet, pour assurer un fonctionnement neutre en énergie nous présentons dans cet article une étude permettant la modélisation de l'éclairement, du panneau solaire et de l'algorithme MPPT. Nous avons commencé tout d'abord par la caractérisation de la quantité d'énergie incidente. Nous avons ensuite validé les modèles développés en utilisant les caractéristiques électriques d'un module photovoltaïque disponible dans le laboratoire. Ces modèles de caractérisation, qui sont basés sur une base de données qui montrent l'évolution de l'éclairement en fonction du temps, sont ensuite validés par des mesures d'énergie solaire.

Ce travail ouvre les horizons à plusieurs perspectives au niveau récupération, optimisation et stockage d'énergie pour les capteurs communicants. Au niveau récupération et optimisation d'énergie, on vise la caractérisation de l'énergie vibratoire pour alimenter le capteur et s'affranchir de la non-disponibilité temporaire des sources d'énergie. Au niveau stockage d'énergie, on propose de modéliser le stockage d'énergie en multi-source. Il s'agit ensuite de modéliser la consommation du capteur pour converger vers son point de fonctionnement neutre et prolonger ainsi sa durée de vie.

Bibliographie

- [1] L. Atzori, A. Iera, and G. Morabito. The internet of things : A survey. *Computer Networks*, 2010.
- [2] L. Mainetti, L. Patrono, and A. Vilei. Evolution of wireless sensor networks towards the internet of things : A survey. In *International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM)*, 2011.
- [3] D. Christin, A. Reinhardt, P. S. Mogre, and R. Steinmetz. Wireless sensor networks and the internet of things : selected challenges. *Proceedings of GI/ITG KuVS Fachgespräch Drahtlose Sensornetze*, 2009.
- [4] Dondi, D.; Bertacchini, A.; Brunelli, D.; Larcher, L.; Benini, L.; Modeling and Optimization of a Solar Energy Harvester System for Self-Powered Wireless Sensor Networks *Industrial Electronics, IEEE Transactions on* Volume 55, Issue 7, July 2008.
- [5] Alippi, C.; Galperti, C.; An Adaptive System for Optimal Solar Energy Harvesting in Wireless Sensor Network Nodes *Circuits and Systems I: Regular Papers, IEEE Transactions on* Volume 55, Issue 6, July 2008.
- [6] Bhuvaneswari, P.T.V.; Balakumar, R.; Vaidehi, V.; Balamuralidhar, P.; Solar Energy Harvesting for Wireless Sensor Networks *Computational Intelligence, Communication Systems and Networks*, 2009. CICSYN '09. First International Conference on 23-25 July 2009.
- [7] Niyato, D.; Hossain, E.; Fallahi, A.; Analysis of Different Sleep and Wakeup Strategies in Solar Powered Wireless Sensor Networks *Communications, 2006 IEEE International Conference on* Volume 7, June 2006.
- [8] Voigt, T.; Ritter, H.; Schiller, J. Utilizing solar power in wireless sensor networks *Local Computer Networks*, 2003. LCN '03. Proceedings. 28th Annual IEEE International Conference on 20-24 Oct. 2003.
- [9] Wark, T.; Corke, P.; Sikka, P.; Klingbeil, L.; Ying Guo; Crossman, C.; Valencia, P.; Swain, D.; Bishop-Hurley, G.; Transforming Agriculture through Pervasive Wireless Sensor Networks *Pervasive Computing, IEEE* Volume 6, Issue 2, April-June 2007.
- [10] Jzau-Sheng Lin; Chun-Zu Liu; A monitoring system based on wireless sensor network and an SoC platform in precision agriculture *Communication Technology*, 2008. ICCT 2008. 11th IEEE International Conference on 10-12 Nov. 2008.
- [11] Konstantinos, Katsalis; Apostolos, Xenakis; Panagiotis, Kikiras; George, Stamoulis; Topology Optimization in Wireless Sensor Networks for Precision Agriculture *Applications Sensor Technologies and Applications*, 2007. SensorComm 2007. International Conference on 14-20 Oct. 2007.
- [12] François Neupveu; Calcul du rayonnement global sur une surface inclinée à partir des données sur une surface horizontale, 02/03/2015. CEA Tech Nantes.
- [13] Wang, Yang; Huang, Liusheng; Wu, Junmin; Xu, Hongli; Wireless Sensor Networks for Intensive Irrigated Agriculture *Consumer Communications and Networking Conference*, 2007. CCNC 2007. 2007 4th IEEE Jan. 2007.
- [14] Voigt, T.; Ritter, H.; Schiller, J. Utilizing solar power in wireless sensor networks *Local Computer Networks*, 2003. LCN '03. Proceedings. 28th Annual IEEE International Conference on 20-24 Oct. 2003.
- [15] Raghunathan Vijay, Schurgers Curt, Park Sung, Srivastava Mani B. Energy-Aware Wireless Microsensor Networks. *IEEE SignalProcessing Magazine* (S 1053-5888),2002.
- [16] Cesare Alippi . Cristian Galperti An Adaptive System for Optimal Solar Energy Harvesting in Wireless Sensor Network Nodes *IEEE TRANSACTIONS ON CIRCUITS AND SYSTEMS VOL. 55, NO.6,JULY 2008*.

Remerciement

Je tiens à remercier les chefs de projet du CEA : M. David Moussaud, M. François Neupveu et M. Nicolas Chaintreuil pour ses aides et ses conseils pertinents afin de réussir ce travail.