

Etude et simulation d'un système de refroidissement par effet Peltier pour les cellules solaires photovoltaïques

B. Zouak * et M. S. Belkaïd

Laboratoire des Technologies Avancées du Génie Electrique, LATAGE
Université Mouloud Mammeri, UMMTO
B.P. N°17, Tizi-Ouzou, Algérie

(reçu le 20 Juin 2019 - accepté le 29 Juin 2019)

Résumé - Les cellules solaires photovoltaïques (PV) perdent de leur efficacité lorsqu'elles fonctionnent sous haute température, notamment dans les régions sahariennes comme le sud de l'Algérie. Dans cette étude, nous proposons un nouveau système de refroidissement des cellules photovoltaïques. Ce système est basé sur l'intégration d'un module Peltier sous la cellule PV afin de la refroidir. Ce dispositif constitue un module hybride photovoltaïque-thermoélectrique (PV-TE) faisant intervenir simultanément l'effet photovoltaïque et l'effet Peltier. L'effet de l'intégration du module Peltier dans la cellule a été simulé sous Comsol Multiphysics et Matlab/Simulink. Les résultats de la simulation ont montré que le module Peltier permet le refroidissement de la cellule PV et maintient son fonctionnement à une température ambiante lui permettant de générer sa puissance maximale. C'est ainsi que pour toutes les températures testées, il y a perte de puissance, mais dès que le module Peltier intervient, la cellule retrouve son fonctionnement normal à température ambiante avec une puissance maximale égale à celle initiale de 2.6 W.

Abstract - Photovoltaic (PV) cells lose in their efficiency when operating under high temperatures, particularly in the Saharan regions such as south Algeria. In this study we propose a new system of cooling the cells. This system is based on the integration of a Peltier module under the PV cells. This device constitutes a photovoltaic-thermoelectric hybrid system (PV-TEC), that combines simultaneously photovoltaic effect and Peltier effect. This hybrid system is simulated under Comsol Multiphysics and Matlab/Simulink. The results of the simulation show that the Peltier module allows cooling the cells and maintains their operation at an ambient temperature enabling them to generate their maximum power output. Thus, for all the temperatures tested, the cells lose in their power output, but as soon as the Peltier module is integrated it maintains the operating temperature of the cells at ambient so that to produce its initial power output of 2.6 W.

Mots clés: Cellules solaires - Module Peltier - Système hybride (PV-TE) - Refroidissement.

1. INTRODUCTION

De nos jours, le photovoltaïque représente un enjeu important dans les énergies et plus généralement dans les énergies renouvelables. L'énergie solaire photovoltaïque est une source d'énergie propre qui permet la conversion directe du rayonnement solaire en électricité par effet photovoltaïque.

La conversion par effet photovoltaïque ne présente pas de nuisances sonores et n'a pas d'impact négatif sur l'écosystème. Cependant et sous forte irradiation solaire, notamment dans les régions sahariennes, le rendement des cellules solaires diminue à cause de la haute température de fonctionnement qui peut atteindre 70 °C [1, 2]. Des systèmes de refroidissement à base d'eau ont été conçus pour refroidir les cellules, malheureusement ces systèmes ne sont pas durables, coûtent cher et des fois ne peuvent être intégrés aux cellules solaires [3, 4].

* belkaidms@yahoo.fr

Dans ce contexte, nous proposons un système de refroidissement des cellules solaires avec un module thermoélectrique fonctionnant en mode Peltier. Le système ainsi étudié est appelé dispositif hybride photovoltaïque-thermoélectrique, combinant simultanément l'effet photovoltaïque et l'effet Peltier.

Dans le but d'étudier le dispositif hybride photovoltaïque-thermoélectrique, un modèle géométrique a été créé, simulé sous Comsol Multiphysics et implémenté sous Matlab/Simulink.

2. LES CELLULES SOLAIRES PHOTOVOLTAIQUES

L'effet photovoltaïque permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité par le biais de la production et du transport de charges électriques dans un matériau semi-conducteur.

Ce matériau semi-conducteur comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons, dites respectivement dopée de type n et dopée de type p. Lors de la mise en contact des deux semi conducteurs, on remarque que dans la région N les électrons qui sont près du plan de jonction diffusent vers le coté P ; chaque électron qui passe de N vers P donne naissance à une charge positive fixe (ion positif).

Le même phénomène se reproduit dans la région P où chaque trou qui passe de P vers N laisse une charge négative fixe (ion négatif). Il se crée donc entre elles un champ électrique qui tend à repousser les électrons dans la zone N et les trous vers la zone P.

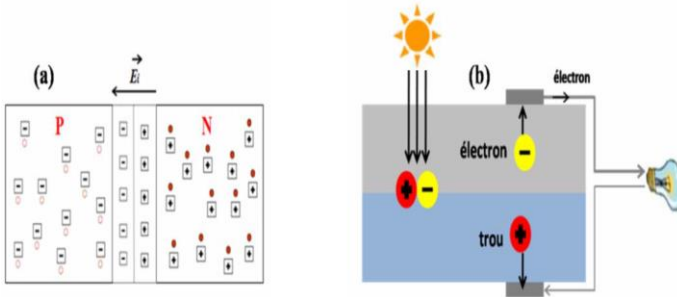


Fig. 1: (a)- Représentation schématisée d'une jonction P-N
(b)- représentation de l'effet photovoltaïque

Le courant délivré sur une charge par une cellule solaire photovoltaïque éclairée est donné par [5, 6],

$$I(V) = I_{ph} - I_{obs}(V) \quad (1)$$

avec, I_{ph} , Courant photo généré ; I_{obs} , Courant d'obscurité.

Dans une cellule solaire idéale, cette équation peut s'écrire sous la forme,

$$I(V) = I_{ph} - I_s \left(\exp \left(\frac{qV}{kT} \right) - 1 \right) \quad (2)$$

avec, I_s , Courant de saturation de la diode ; q , Charge élémentaire
 k , Constante de Boltzmann ; T , Température.

La caractéristique d'une cellule solaire à l'obscurité est la même que celle d'une diode. Sous éclairement la caractéristique est représentée sur la figure 2.

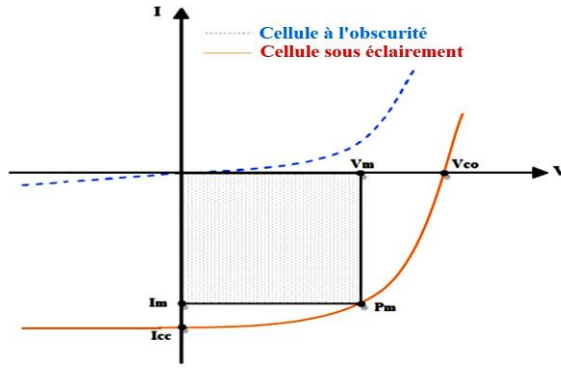


Fig. 2: Caractéristique I (V) sous obscurité et sous éclairage d'une cellule photovoltaïque

3. EFFET DE LA TEMPERATURE SUR LA CELLULE SOLAIRE

Lorsque la température augmente sous l'effet des fortes irradiances solaires et de l'encapsulation qui cause l'effet de serre, la puissance de sortie des cellules photovoltaïques diminue et par conséquent il y a perte de rendement.

Les figures 3(a) et 3(b) illustrent les caractéristiques I (V) et P (V) d'une cellule solaire sous différentes températures de fonctionnement. Les deux figures montrent que lorsque la température de fonctionnement de la cellule augmente, la puissance électrique délivrée diminue. Cette diminution de la puissance de sortie de la cellule engendre la diminution de son rendement qui est défini par l'équation (3),

$$\eta = P_m / P_i \quad (3)$$

où, P_m , représente la puissance maximale produite, elle est donnée par,

$$P_m = V_{co} \cdot I_{cc} \cdot FF$$

avec, V_{co} , Tension de circuit ouvert; I_{cc} , Courant de court circuit
FF, Facteur de forme.

P_i , Puissance du rayonnement solaire, elle est donnée par,

$$P_i = E \cdot S$$

avec, S , Surface de la cellule; E , Eclairement en W/m^2 .

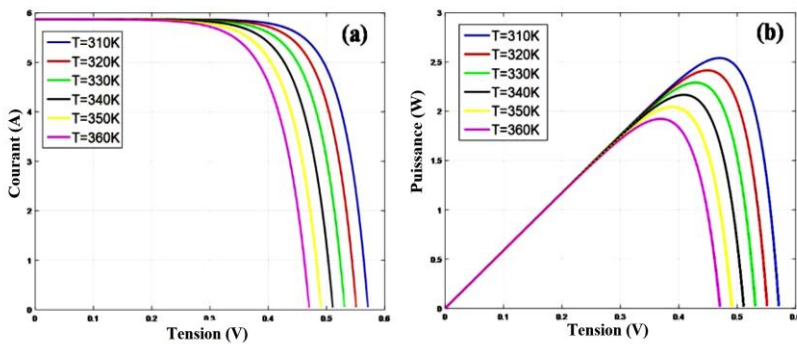


Fig. 3: (a)- Caractéristique I(V) d'une cellule pour différentes températures
(b)- Caractéristique P(V) d'une cellule pour différentes températures

Dans ce travail, un système de refroidissement des cellules solaires a été étudié. Ce système est basé sur l'incorporation d'un dispositif thermoélectrique fonctionnant en mode Peltier sur la face arrière de la cellule. Ce système hybride permet d'améliorer le rendement des cellules en contribuant à rétablir une température ambiante pour un fonctionnement normal de la cellule.

4. EFFET PELTIER

L'effet Peltier est un phénomène physique de déplacement de chaleur en présence d'un courant électrique. Le principe consiste à imposer un courant électrique I à des matériaux thermoélectriques A et B liés par deux jonctions, entraînant une libération de chaleur Q à une jonction et une absorption de celle-ci à l'autre jonction [7].

Le coefficient Peltier π_{AB} , est défini comme étant le rapport de la chaleur émise sur le courant, selon l'équation (4),

$$\pi_{AB} = dQ / dI \quad (4)$$

avec, π_{AB} , Coefficient Peltier du couple; Q , Chaleur mesurée; I , Courant électrique imposé.

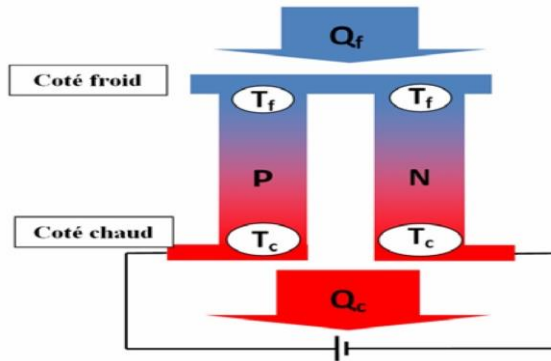


Fig. 4: Description de l'effet Peltier

5. LE MODULE HYBRIDE PHOTOVOLTAÏQUE THERMOELECTRIC (PV-TE)

La structure du dispositif hybride photovoltaïque-thermoélectrique est représentée sur la figure 5. Le module thermoélectrique est placé en dessous de la cellule PV, de façon à ce que sa face supérieure soit en contact avec la face inférieure de la cellule PV.

Lorsqu'une partie du courant électrique généré par la cellule PV traverse le module thermoélectrique, il apparaît suite à l'effet Peltier une différence de température sur ses deux faces (supérieure et inférieure).

Selon le sens du courant, de la chaleur peut être absorbée à la jonction froide ou émise à la jonction chaude.

Dans cette étude et avec cette configuration, le module thermoélectrique va refroidir la cellule solaire et ainsi améliorer son rendement.

5.1 Simulation du module hybride photovoltaïque-thermoélectrique (PV-TE)

La première étape sous Comsol Multiphysics est la création géométrique du dispositif hybride tel que représenté sur la figure 6. La deuxième étape consiste à définir

les matériaux constituant le dispositif avec leurs propriétés telles que le coefficient Seebeck, la conductivité électrique et la conductivité thermique.

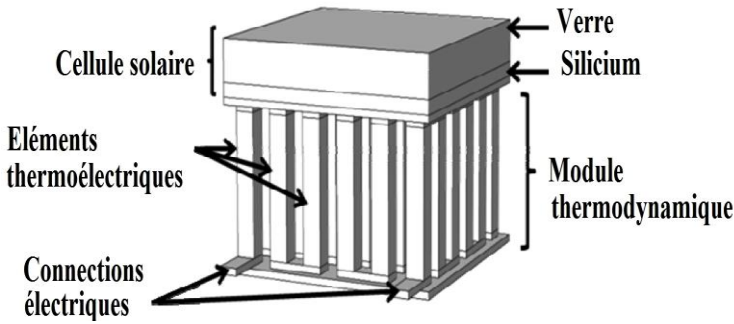


Fig. 5: Schéma de configuration d'un dispositif hybride photovoltaïque-thermoélectrique

Par la suite, nous posons les conditions initiales qui sont un courant électrique I imposé au module thermoélectrique pour fonctionner en mode Peltier. Ce courant est généré par la cellule elle-même.

Une autre condition initiale doit être posée sur la cellule solaire. Cette condition consiste en la température de fonctionnement de la cellule PV et qui est causée par les fortes irradiances solaires. Dans cette simulation, plusieurs températures ont été testées.

5.2 Résultats de la simulation et discussion

a. Représentation de la distribution de la tension générée après simulation

La figure 6 représente la distribution de la tension le long du module thermoélectrique après avoir imposé un courant I . Avec cette configuration le module thermoélectrique fonctionnera en mode Peltier en générant une différence de température sur ses deux faces.

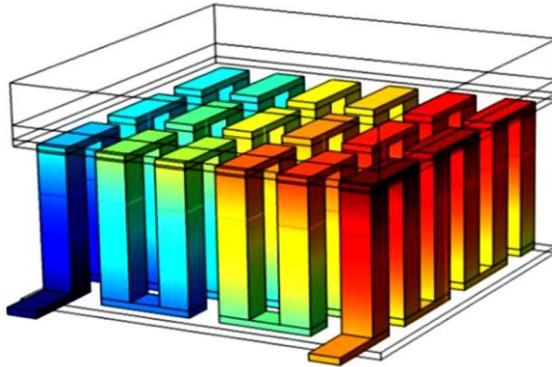


Fig. 6: Distribution de la tension le long du dispositif thermoélectrique

b. Représentation de la distribution de la température après simulation

La figure 7 représente la distribution de la température le long du dispositif hybride. Dans cette configuration, le générateur thermoélectrique peut être considéré comme une pompe qui absorbe la chaleur empêchant le fonctionnement normal de la cellule solaire.

Sur cette image, il est clair que lorsque le générateur thermoélectrique est traversé par un courant électrique, il génère une différence de température sur ses deux faces

supérieure et inférieure. La face supérieure froide est en contact direct avec la cellule PV. La face chaude est orientée vers l’environnement ambiant pour évacuer la chaleur.

Ainsi, le générateur thermoélectrique, même s’il consomme une partie du courant produit par la cellule, il permet de la refroidir pour retrouver son fonctionnement dans les conditions normales avec un rendement maximum.

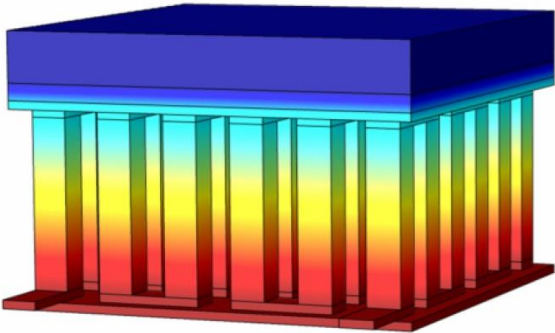


Fig. 7: Représentation 3D de la répartition de la température le long du dispositif hybride (refroidissement de la cellule PV)

**6. CARACTERISTIQUES DE SORTIE
SOUS MATLAB/SIMULINK APRES REFROIDISSEMENT**

La figure 8 représente le schéma synoptique du dispositif hybride photovoltaïque-thermoélectrique construit et simulé sous Matlab/Simulink.

La cellule PV génère un courant I sous un rayonnement G , une partie de ce courant nommé I_t sera utilisé pour alimenter le module thermoélectrique afin de fonctionner en mode Peltier et refroidir la cellule, par conséquent elle va fonctionner à la température T_F .

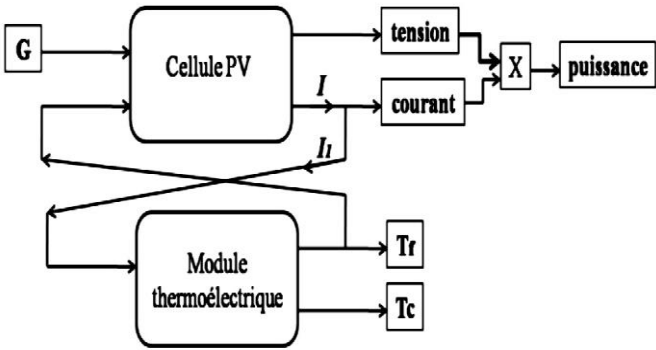


Fig. 8: Schéma synoptique du dispositif hybride PV-TE sous Matlab/Simulink

**7. EFFET DU REFROIDISSEMENT SUR LA
PUISSANCE DE SORTIE DE LA CELLULE SOLAIRE**

Les graphiques de la figure 9 représentent la puissance de sortie de la cellule solaire pour différentes températures de fonctionnement, et les puissances de sortie lorsque la cellule a subi un refroidissement par effet Peltier.

A la température de fonctionnement de $T = 310 \text{ K}$, la puissance maximale de sortie de la cellule est de $P_{\max} = 2.54 \text{ W}$. Lorsque le module thermoélectrique est alimenté avec un courant I , cette température s'abaisse à $T = 305 \text{ K}$ et par conséquent la puissance de sortie est améliorée pour atteindre $P_{\max} = 2.6 \text{ W}$.

De même aux températures de fonctionnement de, $T = 315 \text{ K}$, $T = 320 \text{ K}$, $T = 325 \text{ K}$, $T = 330 \text{ K}$ et $T = 335 \text{ K}$, la puissance de sortie de la cellule est de $P_{\max} = 2.47 \text{ W}$, $P_{\max} = 2.41 \text{ W}$, $P_{\max} = 2.35 \text{ W}$, $P_{\max} = 2.29 \text{ W}$, $P_{\max} = 2.23 \text{ W}$, respectivement.

Ces puissances ont été améliorées en refroidissant la cellule à la température de $T = 305 \text{ K}$ avec l'effet Peltier. Avec ce système de refroidissement, la température ambiante a été obtenue et par conséquent une puissance maximale de sortie de $P_{\max} = 2.6 \text{ W}$ a été rétablie.

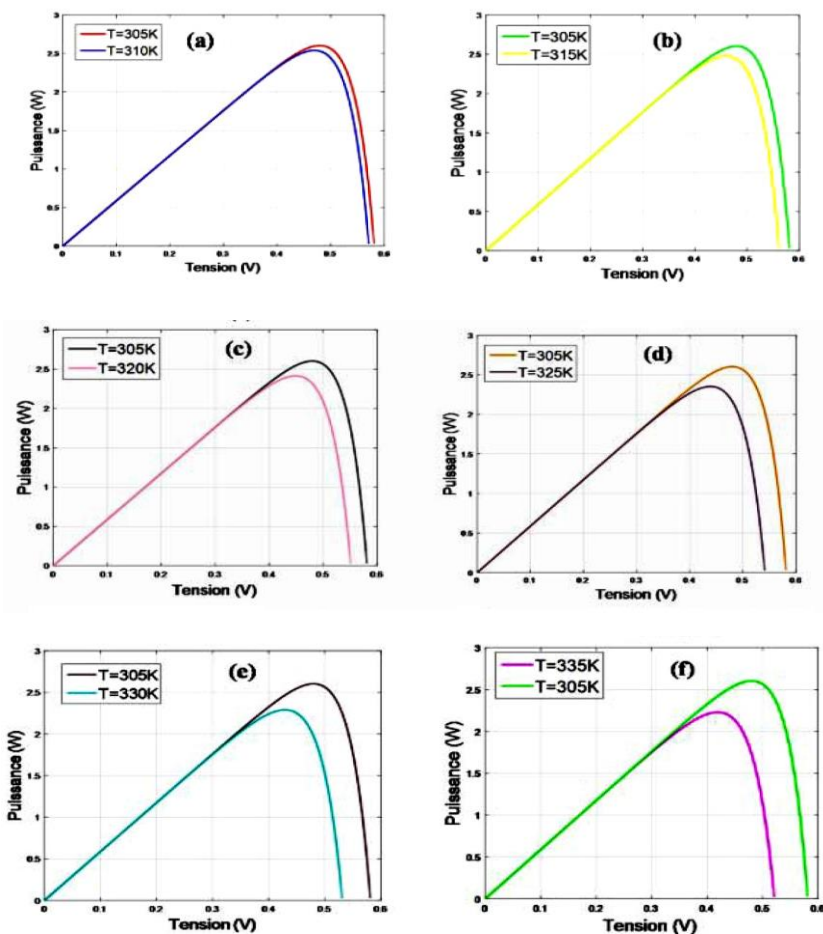


Fig. 9: Représentation de la caractéristique $P(V)$ de la cellule photovoltaïque pour différente température de fonctionnement et la caractéristique $P(V)$ à température ambiante

8. CONCLUSION

Dans ce travail, nous avons étudié et mis au point un système qui va permettre de refroidir les cellules solaires dans un dispositif hybride photovoltaïque-thermoélectrique (PV-TE). Ce système combine simultanément l'effet photovoltaïque et l'effet Peltier.

Ce dispositif contribue d'une part à refroidir la cellule solaire avec l'effet Peltier et d'autre part permet de rétablir la puissance maximale de la cellule PV.

Ce module hybride présente l'avantage d'être silencieux, écologique et ne nécessite pas de maintenance, par conséquent possède une longue durée de vie.

REFERENCES

- [1] M. Debbarma, P. Rawat, S. Mehrotra, S. Lata, and K. Sudhakar, '*Energy and exergy analysis of solar photovoltaic/thermal hybrid air collector system*', In Proceedings of the International Conference on Energy Technology, Power Engineering & Environment Sustainability, JNU New Delhi, Vol. 1, pp. 208 - 213, 2014.
- [2] W.G.J.H.M. van Sark, '*Feasibility of photovoltaic - thermoelectric hybrid modules*', Applied Energy, Vol. 88, N°8, pp. 2785 - 2790, 2011.
- [3] R. Kiflemariam, H. Fekrmandi, and C.X. Lin, '*Embedded Microfluidic - Thermoelectric Generation System for Self-Cooling of Electronic Devices*', Excerpt from the Proceedings of the Comsol Conference in Boston, USA, 2014.
- [4] W.G.J. van Helden, R.J.Ch. van Zolingen and H.A. Zondag, '*PV thermal systems-PV panels supplying renewable electricity and heat*', Progress In Photovoltaics: Research and Applications, Vol. 12, N°6, pp. 415 - 426, 2014. Doi: 10.1002/pip.559.
- [5] W. De Soto, S.A. Klein and W.A. Beckman, '*Improvement and Validation of a Model for Photovoltaic Array Performance*', Solar Energy, Vol. 80, N°1, pp. 78 - 88, 2006.
- [6] V. Badescu, '*Single Optimization Procedure for Silicon-Based Solar Cell Interconnection in a Series-Parallel PV Module*', Energy Conversion and Management, Vol. 47, N°9-10, pp. 1146 - 1158, 2006.
- [7] Arati Kane and Dr. Vishal Verma, '*Performance enhancement of building integrated photovoltaic module using thermoelectric - cooling*', International Journal of Renewable Energy Research, Vol. 3, N°2, pp. 320 - 324, 2013.