

## Etude et réalisation d'un dispositif de correction d'angle d'inclinaison d'un système photovoltaïque

Daoud Rezzak \*, Mabrouk Adouane †, Khaled Touafek,  
Abdelkader Si\_Tayeb et Yehya Houam

Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables, URAER  
Centre de Développement des Energies Renouvelables, CDER  
47133, Ghardaïa, Algeria

(reçu le 15 Juin 2015 - accepté le 29 Mars 2016)

**Résumé** – Le travail présenté dans cet article est relatif à l'étude et la réalisation d'un dispositif de correction automatique d'angle d'inclinaison des modules photovoltaïques, ayant comme objectif l'augmentation du gain en énergie électrique par rapport au système fixe. Un banc d'essai représentant une installation photovoltaïque a été réalisé au niveau du site de Ghardaïa. Il comprend des modules photovoltaïques de type 'IS 130S/24' qui emploie la technologie monocristalline. Le dispositif a été fixé sur une structure mécanique réalisée à base de vérin à courant continu avec un circuit de commande permettant ainsi la rotation automatique des modules photovoltaïque selon la direction verticale. L'intégration d'un système de correction d'angle a été assurée à travers l'implémentation d'algorithme de contrôle grâce à l'emploi d'un microcontrôleur 16F877A et une horloge à temps réel DS1302. Les résultats collectés sont très satisfaisants.

**Abstract** – The work presented in this article is relating to the study and the realization of a device of auto correction of angle of inclination of the photovoltaic modules. Having like objective the increase in the gain in electrical energy compared to the fixed system. A test bench representing a photovoltaic installation was carried out at the site of Ghardaia. It includes photovoltaic modules of type 'SI 130S / 24', which uses monocristalline technology. The device was attached to a mechanical structure that we have realized based in a direct current motor with a control circuit thus allowing the automatic rotation of the modules photovoltaic according to the vertical direction. The integration of an angle correction system has been ensured by means the implementation of control algorithm by use of a 16F877A microcontroller and a real-time clock DS1302. The collected results are very satisfactory.

**Mots clés:** Module photovoltaïque - Correcteur d'angle d'inclinaison - Microcontrôleur - Horloge en temps réel - Moteur à courant continu.

### 1. INTRODUCTION

Les énergies renouvelables occuperont une place de plus en plus importante dans l'avenir énergétique mondial. Tout d'abord, en raison du fait qu'il convient de diminuer fortement la consommation des combustibles fossiles pour ralentir leurs épuisements et réduire les émissions des gaz à effets de serre.

De par sa vaste superficie, sa géographie diversifiée et son climat, l'Algérie possède des ressources renouvelables importantes. Ces ressources peuvent être exploitées pour produire de l'énergie ; en particulier l'énergie solaire photovoltaïque. Le développement des énergies renouvelables en Algérie a connu des progressions considérables, accompli par la création de la société SKTM (Shariket Kahrabaoua Takat Moutadjadida) filiale de Sonelgaz [1], Un exemple des plus édifiants est la mise en service de centrales expérimentales implantées dans les hauts plateaux et les régions du sud du pays.

---

\* d-rezzak@hotmail.fr

† adouanemabrouk@yahoo.fr

## 2. LE POTENTIEL ENERGETIQUE SOLAIRE EN ALGERIE

Les diverses études entreprises jusqu'à présent sur le potentiel énergétique solaire en Algérie font apparaître un potentiel considérable pour l'utilisation et l'exploitation de cette forme d'énergie [2]. En effet, l'Algérie avec plus de deux millions de km<sup>2</sup> de superficie, reçoit l'équivalent de 300 milliards de Tep par an en énergie solaire. En termes d'insolation, l'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1m<sup>2</sup> est de l'ordre de 5 kWh sur la quasi-totalité du territoire national, la durée d'insolation quant à elle dépasse les 2000 heures annuellement et peut atteindre les 3900 heures sur les Hauts Plateaux et le Sahara [3, 4].

### 2.1 Présentation du site d'étude

Pour notre étude, la localisation géographique considérée est la ville de Ghardaïa qui est située dans le centre de la partie nord du Sahara algérien, à 600 km au sud d'Alger. Les coordonnées géographiques du site de collecte de données sont les suivantes: 32° 23' de la latitude nord, 3° 46' de longitude est et 467m d'altitude [5].

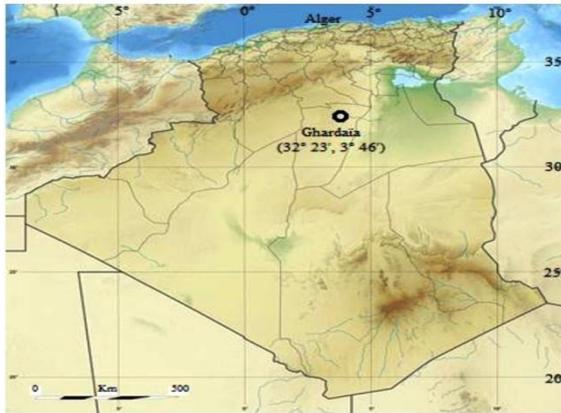


Fig. 1: Emplacement géographique du site d'étude

Le climat de Ghardaïa est semi-aride et désertique. C'est un endroit idéal pour l'emploi de l'énergie solaire. Les données de rayonnement solaire durant l'ensemble de l'année 2013 ont été relevées à l'Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables, 'URAER'. Comme le montre la figure 2.

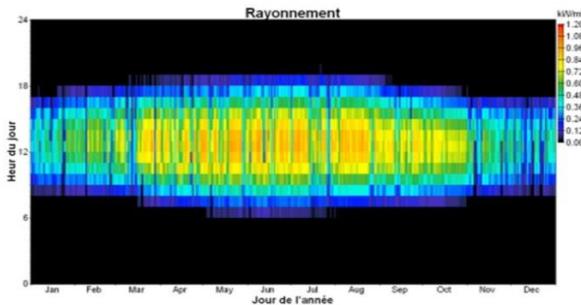


Fig. 2: Variations de l'éclairement durant l'année 2013

A travers la lecture des données de la figure 2, l'irradiation solaire moyenne journalière dans la région de Ghardaïa est estimée entre 2.35 kWh/m<sup>2</sup>/j et 6.86 kWh/m<sup>2</sup>/j avec un rayonnement solaire annuel moyen estimé à 4.98 kWh/m<sup>2</sup>/j. Ce potentiel est assez important et il est pratiquement exploitable durant toute l'année.

Pour extraire le maximum d'énergie à partir de ces irradiations solaires, les modules photovoltaïques doivent être inclinés de façon perpendiculaire aux rayons du soleil [5]. L'orientation optimale de l'angle d'inclinaison des modules photovoltaïques, s'avère donc la méthode idéale pour optimiser la production du générateur photovoltaïque.

## 2.2 Angle d'inclinaison optimale pour la région de Ghardaïa

L'inclinaison d'un module photovoltaïque correspond à l'angle formé par le plan du module solaire et l'horizontal, comme représentée par la figure 3.

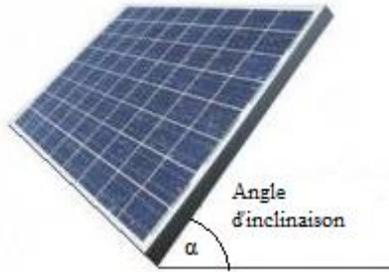


Fig. 3: Angles d'inclinaison des modules photovoltaïques

Afin de pouvoir estimer les angles optimaux d'inclinaison des modules photovoltaïques dans la région de Ghardaïa pour lesquelles le gain énergétique est amélioré, nous avons utilisé l'équation (1) [6-8].

$$\alpha = L - \sin^{-1} \left( 0.4 \times \sin \left( \frac{N \times 360}{365} \right) \right) \quad (1)$$

Avec,  $L$ , latitude du lieu,  $N$ , nombre de jours entre l'équinoxe de printemps (21 mars de chaque année) et le jour considéré [6-8].

La variation des angles optimaux d'inclinaisons des modules photovoltaïques en fonction des mois de l'année que nous avons calculés en utilisant l'équation (1) est donnée par la figure 4.

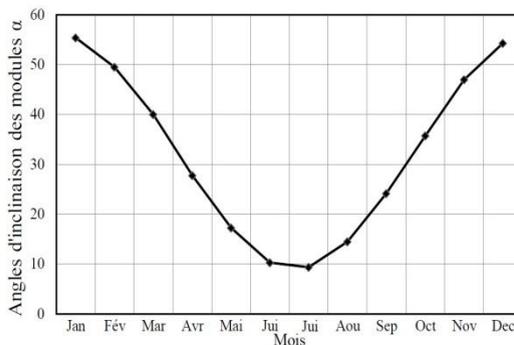


Fig. 4: Variation de l'angle d'inclinaison mensuel

Les résultats montrent que lorsque le soleil est bas aux mois d'hiver par rapport à l'horizon, l'angle d'inclinaison des modules photovoltaïques est important et il atteint son maximum de (56°) au mois de décembre, par contre lorsque le soleil est haut aux mois d'été par rapport à l'horizon, l'angle d'inclinaison des modules photovoltaïques est très petit et il atteint son minimum de (9°) au mois de Juillet. Une inclinaison autour de (32°) est favorisée pour les modules au printemps et à l'automne.

Dans ce contexte, une réalisation d'un prototype de correction automatique d'angle d'inclinaison des systèmes photovoltaïques est accomplie.

### 3. DESCRIPTION DU PROTOTYPE DE CORRECTION D'ANGLE

Parmi l'ensemble des technologies des suiveurs solaires mobilisables, plusieurs solutions s'affrontent, et on peut citer parmi elles [9-12]:

- Les suiveurs aveugles (nécessitant des calculs de prévision de la trajectoire solaire);
- Les suiveurs à capteurs (nécessitant la détection en temps réel de la position solaire).

Notre travail s'est focalisé sur la réalisation d'un prototype de correction d'angle d'inclinaison automatique utilisant la technique préprogrammée, ce dernier se compose de trois parties essentielles à savoir:

#### 3.1 Partie mécanique

La partie mécanique est composée de deux parties (fixe et mobile). Une partie fixe constituée de quatre modules photovoltaïques de 0.52 kW, orientés en plein sud avec un angle d'inclinaison de  $32^\circ$ , et une partie mobile constituée de quatre modules photovoltaïques de 0.52 kW orientés en plein sud avec un angle d'inclinaison variable par un vérin à courant continu, alimenté par une tension de 24V extraite des modules photovoltaïques et contrôlés par une carte électronique pour assurer une inclinaison optimal de ces dernier.



Fig. 5: Les deux séries de modules photovoltaïques avec et sans correction d'angle

#### 3.2 Partie électronique

Pour vérifier notre système nous avons eu recours à la simulation des différentes parties du système (figure 6). Pour cela on a utilisé le logiciel ISIS qui est un très bon logiciel de simulation en électronique.

Le circuit ainsi développé est constitué d'un microcontrôleur 16F877A pour l'acquisition des signaux de mesures et la génération des signaux de contrôles, d'une horloge de type DS1302 qui permet la génération de la date et l'heure en temps réel indépendamment de l'horloge du PIC et trois boutons poussoirs pour le réglage.

La partie capteur est composée d'un potentiomètre intégré à la structure des modules photovoltaïques, permet de capter l'angle d'inclinaison de ces derniers, l'information récupéré est introduite au microcontrôleur PIC16F877A via l'entrée analogique RA1. Pour commander le vérin à courant continu on a utilisé deux relais qui s'excitent par les sorties RC6 et RC7 du microcontrôleur.

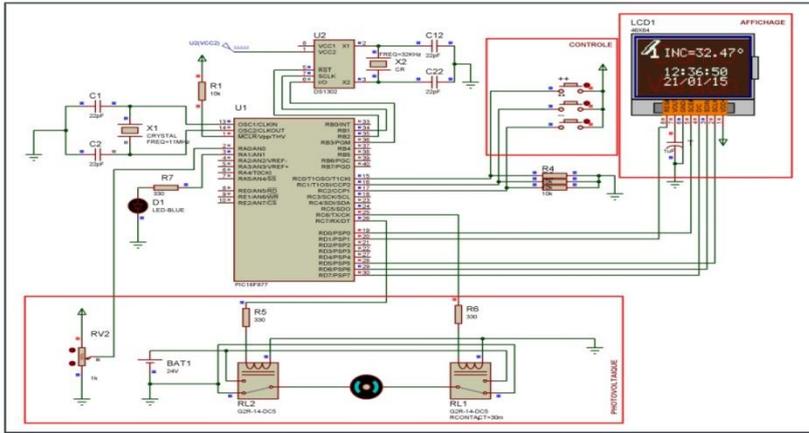


Fig. 6: Simulation du correcteur d'angle sous ISIS 7 professionnel

La partie capteur est composée d'un potentiomètre intégré à la structure des modules photovoltaïques, permet de capter l'angle d'inclinaison de ces derniers, l'information récupéré est introduite au microcontrôleur PIC16F877A via l'entrée analogique RA1. Pour commander le vérin à courant continu on a utilisé deux relais qui s'excitent par les sorties RC6 et RC7 du microcontrôleur.

On a muni notre système de correction automatique d'angle d'inclinaison avec un afficheur graphique d'une résolution de 48×84 pixels, qui permet d'avoir en temps réel la date et l'angle d'inclinaison mesuré, pour un suivie optimale.

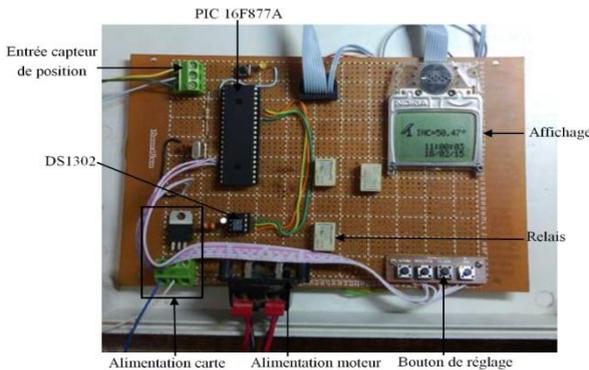


Fig. 7: Carte électronique du correcteur d'inclinaison d'angle réalisée

Le circuit électronique est réalisé en se basant sur le schéma de simulation du correcteur d'angle, tel que proposé à la figure 7.

Le module peut être installé dans son boîtier après une dernière vérification minutieuse des soudures.

### 3.3 Partie programmation

Le schéma fonctionnel de l'algorithme de commande utilisé dans notre travail est schématisé dans la figure 8.

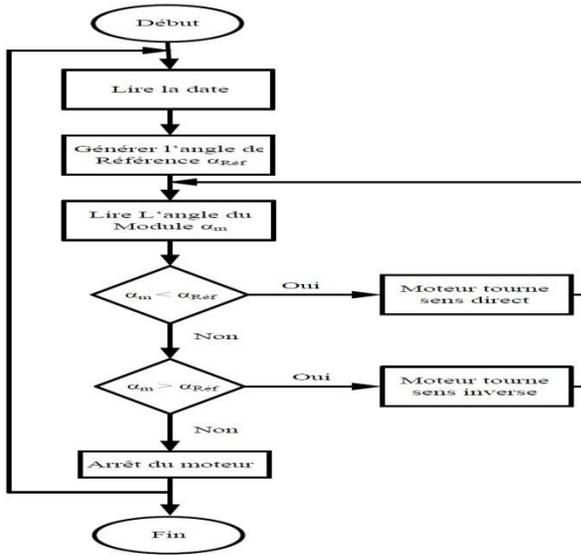


Fig. 8: Organigramme principal du système de correction d’angle d’inclinaison mensuel

Le choix de la méthode de contrôle par une comparaison permanente du signal issu de la résistance variable (converti en angle d’inclinaison) et l’angle de référence généré en fonction des mois de l’année, va permettre de générer la commande des relais du vérin qui peut être dans trois états différents suivant:

- Si  $\alpha_{ref} < \alpha_m$ , la sortie RC6 est à 1 et la sortie RC7 est à 0, le vérin tourne dans le sens direct.
- Si  $\alpha_{ref} > \alpha_m$ , la sortie RC6 est à 0 et la sortie RC7 est à 1, le vérin tourne dans le sens inverse.
- Si  $\alpha_{ref} = \alpha_m$ , la sortie RC6 est à 0 et la sortie RC7 est à 0, le vérin est à l’arrêt.

#### 4. RESULTATS EXPERIMENTAUX ET DISCUSSIONS

Pour mettre en évidence l’efficacité de notre système, on a effectué une comparaison des résultats obtenus sur des modules fixes (orientés vers le sud et inclinés de 32° par rapport à l’horizontale d’une puissance de 0.52 kW), par rapport à celle des modules mobiles d’une même puissance.

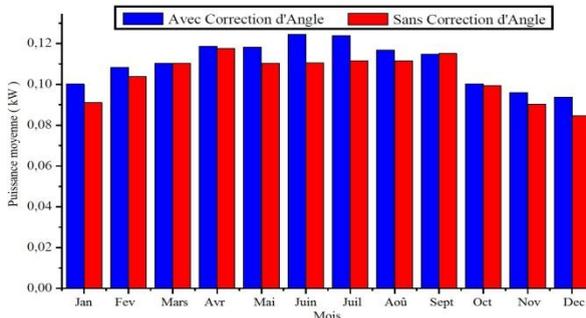


Fig. 9: Puissance mensuelle moyenne produite

Les mesures de la puissance moyenne mensuelle nous ont permises d'obtenir les résultats de la figure 9.

D'après ces résultats, concernant les modules fixes, on constate que la puissance moyenne mensuelle générée est maximale aux mois d'avril et septembre, pour la raison que l'angle d'incidence des rayons solaires est perpendiculaire à la surface des modules photovoltaïques, donc ces derniers absorbent le maximum de puissance des rayons solaires. Pour les modules inclinables, on aperçoit que la puissance moyenne mensuelle générée est maximale aux mois de juin et juillet due à la correction automatique de l'angle d'inclinaison.

La comparaison entre les deux résultats montre qu'une correction d'angle d'inclinaison nous permis d'augmenter la puissance moyenne mensuelle produite par les modules photovoltaïques surtout pour les mois de juin et juillet où les gains en puissance moyenne mensuelle sont importants et ainsi de même pour les mois de décembre et de janvier. Par ailleurs on relève une grande similitude entre les puissances moyennes produites par les modules photovoltaïques fixe et mobile pour les mois d'automnes et de printemps.

## 5. CONCLUSION

Dans ce travail, nous avons étudié et réalisé une structure pour modules photovoltaïques d'une puissance de 1 kW muni d'un système de correction d'angle d'inclinaison mensuelle géré par un microcontrôleur PIC 16F877A.

Grâce à l'étude effectuée, une contribution à l'évaluation de l'impact de l'angle d'inclinaison des modules photovoltaïques sur la production d'énergie d'un système photovoltaïque dans la région de Ghardaïa a été réalisée.

Les résultats expérimentaux montrent l'intérêt de l'utilisation d'un correcteur d'angle d'inclinaison automatique, qui permet de bénéficier d'un gain supplémentaire d'énergie par rapport à un système fixe.

## REFERENCES

- [1] <http://www.sktm.dz/>.
- [2] WB, 'Renewable Energy Rural Development', Washington DC: *The World Bank Group*; 20433, 2004.
- [3] <http://www.mem-algeria.org/fr/enr/pot.htm>.
- [4] A. Chaïb, D. Acheli and M. Kesraoui, '*Orientation System of Solar Panels Based on a Robot Manipulator*', (ICREPQ'11), Las Palmas de Gran Canaria (Spain), 13<sup>th</sup> to 15<sup>th</sup> April, 2010.
- [5] M. Adouane, '*Etude de la Fiabilité des Systèmes Solaires Hybrides dans le Sahara*', Thèse de Doctorat, ENP 2014, Alger, Algérie.
- [6] J.D. Mondol, Y.G. Yohanis and B. Norton, '*Solar Radiation Modelling for the Simulation of Photovoltaic System*', *Renewable Energy*, Vol. 33, N°5, pp. 1109 - 1120 2008.
- [7] M. Adouane, M. Haddadi, N. Benamrane, K. Touafek, A. Khelifa and I. Tabet, '*Evaluation de l'influence de l'Inclinaison des Modules Photovoltaïques sur la Production d'Énergie d'un Système Hybride*', (SEINR'14), Ghardaïa – Algérie 13 et 14 Octobre 2014.
- [8] Quanhua Liu, Qinxian Miao, Jue J. Liu, Wenli Yang, '*Solar and Wind Energy Resources and Prediction*', *Journal of Renewable Sustainable Energy*, Vol. 1, 043105, 2009.

- [9] T. Bendib, B. Barkat, F. Djeflal, N. Hamia et A. Nidhal, '*Commande Automatique d'un Système de Poursuite Solaire à Deux Axes à Base d'un Microcontrôleur PIC16F84A*', Revue des Energies Renouvelables, Vol. 11, N°4, pp. 523 – 532, 2008.
- [10] M.D. Draou et B. Draoui, '*Etude, Conception et Expérimentation d'un Système de Contrôle pour Système Suiveur de Soleil*', Revue des Energies Renouvelables, Vol. 11, N°2, pp. 229 – 238, 2008.
- [11] R. Rezoug et A. Zaatri, '*Optimisation du Rendement d'un Système Photovoltaïque par Poursuite du Soleil*', Revue des Energies Renouvelables, Vol. 12, N°2, pp. 299 – 306, 2009.
- [12] F.R. Rubio, M.G. Ortega, F. Gordillo and M. Lopez-Martinez, '*Application of New Control Strategy for Sun Tracking*', Energy Conversion and Management, Vol. 48, pp. 2174 – 2184, 2007.