

## Optimisation du rendement d'un système photovoltaïque par poursuite du soleil

R. Rezoug et A. Zaatri<sup>1</sup>

Département de Mécanique, Faculté des Sciences de l'Ingénieur  
Université Mentouri, Constantine, Algérie

(reçu le 25 Avril 2009 – accepté le 25 Juin 2009)

**Résumé** - Dans cet article, nous présentons un système expérimental de poursuite du soleil permettant d'orienter un module photovoltaïque. Le dispositif expérimental comprend deux actionneurs et un circuit de commande lié au PC. Le système d'orientation est basé sur la programmation du déplacement du panneau solaire à des intervalles de temps prédéfinis conformément à la trajectoire du soleil, de manière à garder la surface active du module photovoltaïque perpendiculaire aux radiations solaires. Une comparaison expérimentale entre un panneau fixe et un système de poursuite à un axe, puis à deux axes est présentée. Les mesures ont été obtenues sur une journée pour permettre d'estimer le gain énergétique dû à l'orientation qui est d'environ 25 %, confirmant en conséquence l'importance économique de ce système.

**Abstract** - This paper presents a control system that enables an automatic orientation of a photovoltaic panel towards the sun with one and two axes. The experimental set up consists of two actuators and a control circuit connected to the PC. The orientation system is based on the programming of movement of the solar panel at predefined time intervals in accordance with the path of the sun, so as to keep the active surface of photovoltaic module perpendicular to solar radiation. An experimental comparison between a fixed panel and a system for one and then two axes is presented. Measurements have been carried out on a sunny day to estimate the energy gain due to the orientation which was about 25 %, therefore confirming the economic importance of this system.

**Mots clés:** Poursuite solaire - Système d'orientation - Energie photovoltaïque – Modules solaires.

### 1. INTRODUCTION

L'optimisation par poursuite de la trajectoire du soleil est une technique qui permet de mieux exploiter les cellules photovoltaïques. En effet, beaucoup de travaux centrent leur intérêt sur la poursuite du soleil afin de maximiser l'ensoleillement en gardant la surface active du module solaire perpendiculaire aux radiations solaires.

Différents systèmes d'orientation commerciaux sont disponibles et proposent conformément à leurs fiches de présentation des gains de l'ordre de 20-30 % selon les techniques et les technologies employées [1-4].

Les techniques sont diverses mais peuvent être principalement subdivisées en deux catégories, les unes basées sur l'asservissement, les autres sur la pré-programmation de la trajectoire.

1- La première catégorie compte sur des capteurs qui détectent en permanence la position 'surface active perpendiculaire aux radiations solaires'.

---

<sup>1</sup> reztalk@gmail.com ; azaatri@yahoo.com

Dans ce type de techniques, la poursuite s'effectue indépendamment de la zone dans laquelle le système sera situé. La poursuite est plus précise, mais il peut y avoir des pertes supplémentaires d'énergie dues à la consommation du système de commande qui est actif en permanence.

Dans cette catégorie, on peut citer un certain nombre de travaux [5, 7, 8].

2- La seconde catégorie est basée sur le fait que le soleil suit un trajet relativement périodique pour un observateur situé à un endroit donné sur la terre. La poursuite du soleil peut, dès lors s'effectuer par des techniques de pré-programmation de la trajectoire du soleil qui est gouvernée par des équations appelées 'équations du temps' [9].

Le programme fournit des commandes aux moteurs à des intervalles de temps réguliers afin d'assurer la poursuite du soleil. Les pertes d'énergie sont minimisées du fait que les commandes du panneau peuvent être impulsives.

Parmi les travaux utilisant cette technique, on peut citer les travaux suivants [3, 4].

Le travail proposé dans cet article, se situe dans le contexte du tracking par les techniques pré-programmées. Afin d'optimiser le rendement énergétique du module photovoltaïque, nous avons réalisé un système expérimental de poursuite à deux axes, l'un pour la correction de la variation due à l'alternance jour - nuit et l'autre pour corriger l'écart lié à la variation de la position du lever de soleil durant l'année.

On présentera des résultats expérimentaux sans tracking, puis avec tracking à un axe, puis à deux axes. De plus, une comparaison expérimentale sera présentée pour mettre en évidence l'utilité économique de ces systèmes.

## **2. MODELISATION MATHÉMATIQUE DE LA TRAJECTOIRE DU SOLEIL**

Toute application solaire nécessite la connaissance du mouvement apparent du soleil pour un point donné de la surface terrestre, caractérisé par sa latitude, sa longitude et la distance du soleil par rapport à ce point.

La correction de l'erreur relative au changement de la position et de la distance du soleil par rapport au module photovoltaïque permettant de garder ce dernier toujours perpendiculaire aux radiations solaires, nécessite un système de correction à deux axes, le premier concerne la variation jour nuit, le deuxième concerne la variation des saisons (le point de lever du soleil par rapport au zénith).

Pour obtenir une correction relativement précise concernant la position du panneau photovoltaïque par rapport au soleil, il faut tenir compte du fait que la rotation de la terre autour de son axe. Elle décrit une trajectoire elliptique correspondant au cycle jour - nuit.

La durée de la journée est variable tout au long de l'année et doit être connue pour en déterminer les limites de la correction quotidienne (lever et coucher de soleil) [9].

La déclinaison est l'angle que fait le soleil au maximum de sa course (midi solaire) par rapport au plan équatorial et varie entre  $-23,45^\circ$  le 21 décembre et  $+23,45^\circ$  le 21 juin, [11]. Pour cela, il est important d'établir une équation reliant la position du soleil par rapport à la perpendiculaire au plan du module photovoltaïque. La figure 1 présente les grandeurs (angles) intervenant pour repérer le plan du module solaire par rapport à la position du soleil.

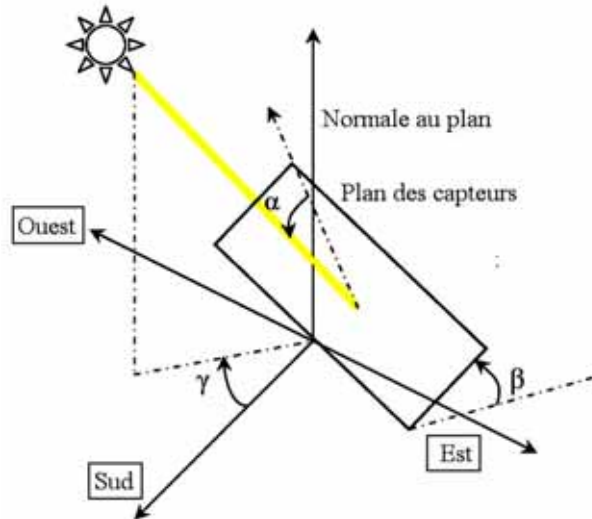


Fig. 1: Les angles sur un plan incliné

En considérant la déclinaison  $D$  comme constante sur une journée  $j$ , l'équation de Kopernic fournit la relation qui relie ces deux grandeurs [6]:

$$D = 23.45 \times \sin\left(2\pi \frac{284 + j}{365}\right) \quad (1)$$

Nous exposons ci-dessous les calculs nécessaires à la détermination de la position du soleil en un lieu terrestre, pour un jour et un instant donnés  $c$  de  $L$  (dépendant du lieu), la déclinaison  $D$  (dépendant du jour  $D \in [1, 356]$ ) et l'angle horaire  $Ah$  (dépendant de l'instant  $t$ ).

$$\sin D = 0.398 \times \sin(\omega(j - a)) \quad (2)$$

avec:  $a = 81 - 2 \sin(\omega(j - 2))$

$$\sin D \approx 0.4 \times \sin(\omega(j - 81)) \quad (3)$$

pour une erreur absolue  $< 1^\circ$ .

où  $\omega$  représente la vitesse angulaire de la Terre, soit  $\omega = (2\pi/365.25)$  rad/jour

L'instant  $t$  exprimé en temps solaire vrai définit l'angle horaire  $Ah$  suivant les conventions :

$$\begin{cases} Ah = 0 & \text{à midi solaire vrai (soleil est dans le plan méridien du lieu)} \\ Ah \pm 15^\circ/\text{heure} & \text{autour de midi} \\ Ah \geq 0 & \text{vers l'Ouest et } Ah \leq 0 \text{ vers l'Est} \end{cases}$$

La déclinaison et l'angle horaire étant été calculés, l'azimut  $A$  et la hauteur  $H$  du soleil sont donnés par les relations suivantes:

$$\sin H = (\sin L \times \sin D) + (\cos L \times \cos D \times \cos Ah) \quad (4)$$

$$\sin A = \frac{\cos D \times \sin Ah}{\cos H} \quad (5)$$

et

$$\cos A = \frac{(\sin L \times \cos D \times \cos Ah) - (\cos L \times \sin D)}{\cos H} \quad (6)$$

Ces relations permettent d'établir la hauteur du soleil à midi ( Ah nul):

$$\cos Ah_{\text{midi}} = 1$$

D'où:

$$\sin H_{\text{midi}} = (\sin L \times \sin D) + (\cos L \times \cos D) = \cos(L - D) \quad (7)$$

Soit:

$$H_{\text{midi}} = (\pi/2) - L + D \quad (8)$$

Et l'angle horaire correspondant aux heures de lever et coucher ( H nulle ).

$$\sin H_{\text{lever}} = 0$$

D'où:

$$\cos Ah_{\text{lever}} = -\frac{\sin L \times \sin D}{\cos L \times \cos D} = -\tan L \times \tan D \quad (9)$$

On en déduit l'azimut du soleil au lever

$$\cos A_{\text{lever}} = \frac{(\sin L \times \cos Ah_{\text{lever}}) - (\cos L \times \sin D)}{\cos H_{\text{lever}}} \quad (10)$$

Soit:

$$\cos A_{\text{lever}} = -(\sin L \times \cos D \times \tan L \times \tan D) - (\cos L \times \sin D) \quad (11)$$

$$\cos A_{\text{lever}} = -\frac{\sin D}{\cos L} \quad (12)$$

L'équation (1) de Kopernic permet d'assurer la poursuite correspondant au deuxième axe.

Pour la correction jour nuit qui est la plus importante; il faut connaître les bornes de la journée et donc l'angle horaire donné par les équations (7) et (8), la durée de la journée sera partagée en intervalles ON et OFF modifiables, selon la journée sous forme de programme qui représente la trajectoire que va suivre le panneau photovoltaïque.

### 3. DESCRIPTION DU SYSTEME DE POURSUITE

Notre système de poursuite contrôle le mouvement d'un module photovoltaïque au moyen d'un programme informatique. Le module est orienté à l'aide de deux axes pour suivre automatiquement le soleil sur une trajectoire bien définie grâce à l'équation du

temps' traduite en programme sur PC, avec la coopération d'un PIC. Notre système de commande est schématisé par la figure 2.

Il est constitué de deux parties: la partie commande et la partie opérative.

La partie opérative comporte deux articulations actionnées par deux vérins, l'un corrige l'écart quotidien, l'autre suit la variation du point du lever du soleil par rapport au zénith, borné entre  $+23,45^\circ$  et  $-23,45^\circ$ .

La partie commande comporte une carte électronique liée au PC à travers le port série. Elle constitue l'interface de commande entre le PC et la partie de puissance qui alimente les vérins au moyen d'une batterie de 12 V.

Notre carte de commande est constituée essentiellement par un microcontrôleur: le PIC 16f877 [8, 10] qui nécessite pour être lié au PC un adaptateur constitué d'un circuit intégré de type MAX232 et de quatre condensateurs identiques de l'ordre de  $1\ \mu\text{f}$ .

L'échange d'informations entre les pins 2 et 3 (TXD et RXD) du PC et les pins RC6 et RC7 du microcontrôleur se fait à travers le MAX232.

Les informations concernant la trajectoire à suivre seront traitées par le microcontrôleur et envoyées sous forme d'impulsions pour être exécutées par un circuit de puissance L293D.

Les entrées de ce dernier suivent selon une table logique les impulsions livrées par les sorties du microcontrôleur lui permettant de diriger les deux vérins afin de repositionner le panneau face au rayonnement solaire.

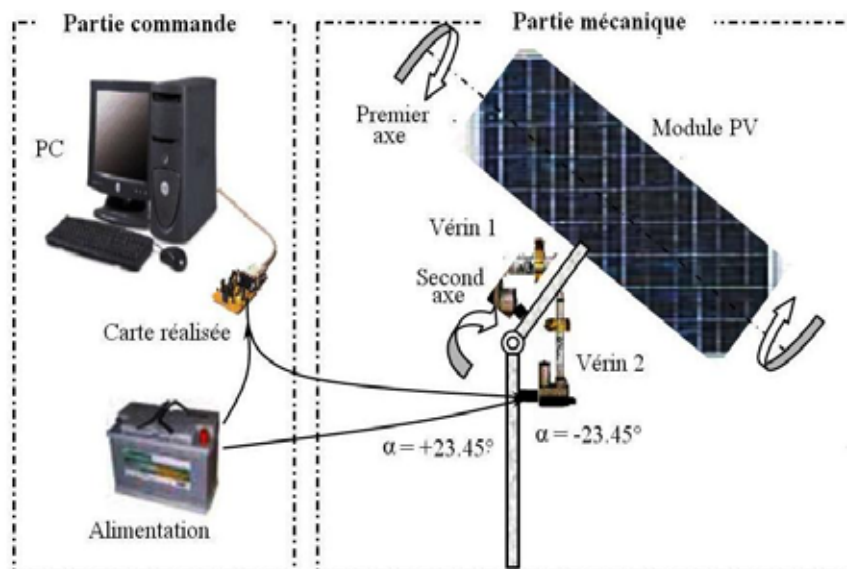


Fig. 2: Schéma global du système réalisé

#### 4. ESSAIS EXPERIMENTAUX

Pour mettre en évidence l'efficacité de notre système et l'influence de la variation quotidienne et de la variation azimutale sur le rendement du capteur solaire, on a effectué dans un premier temps une comparaison des résultats obtenus sur un module fixe, par rapport à celle d'un module orienté avec un seul axe, corrigeant la variation

quotidienne.

Dans un second temps, on a effectué une comparaison entre le système orienté par un seul axe par rapport à celui orienté par deux axes corrigeant la ainsi la variation liée à l'azimut et cela dans les mêmes conditions de fonctionnement. Ces expériences ont été effectuées en une journée (05/02/2008) où l'éclairement était relativement bon, et cela au niveau d'un endroit défini par son altitude, N35° 50' 0" et sa longitude, E 7° 5' 0", la température étant de 21 °C.

Pour la correction quotidienne, nous avons corrigé l'erreur du déplacement solaire avec un écart qui correspond à 3°. La commande s'effectue au moyen d'un signal périodique, passant d'un état haut (on) de 3 secondes à un état bas (off) de 12 minutes.

Nous avons additionné dans un deuxième temps, une seconde correction qui porte sur l'azimut dans laquelle nous avons fait intervenir l'équation de Kopernic, qui nous donne la variation du trajet que suit le soleil tout au long de l'année et donc la variation du lever de soleil situé entre +23,45° et -23,45° [6].

La correction de ce second paramètre s'effectue sous forme d'impulsions quotidiennes pour diriger le deuxième axe de manière à initialiser la position du panneau au début de la journée.

Dans la journée où les mesures ont été prises (mesures de courant et de tension faites à des intervalles de temps égaux), l'équation de Kopernic nous donne une déclinaison initiale du module à -16,40°. Plus on s'approche des deux valeurs limites que donne l'équation de Kopernic, plus le gain énergétique devient plus intéressant.

Nos mesures de tension et de courant en fonction de temps pour une charge fixe pendant cette journée nous ont permis de déterminer les courbes expérimentales de puissance dans les trois situations: module fixe, système à un axe et système à deux axes. Les résultats sont reportés sur la figure 3.

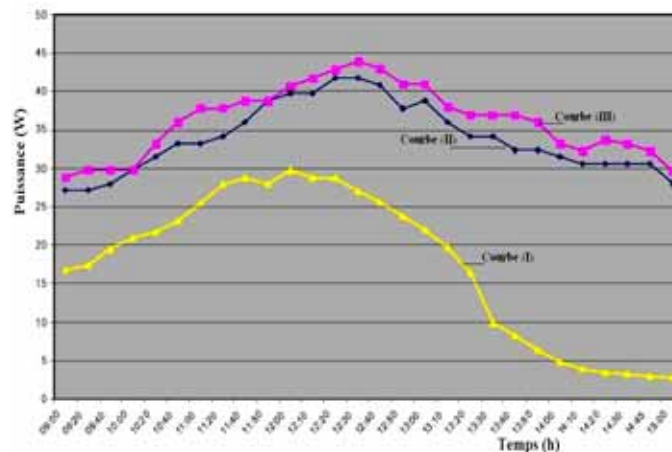


Fig. 3: Courbes puissance-temps pour un module fixe et un module orienté à un et à deux axes

La courbe (I) de la figure 3 est celle du module photovoltaïque fixe, la courbe (II) représente le système de poursuite à un axe, tandis que la courbe (III) est relative au système de poursuite à deux axes. La surface délimitée par chaque courbe expérimentale et par l'axe du temps représente le rendement énergétique du système considéré.

La différence de surface entre les deux courbes (I) et (II) est d'environ 20 %. Elle représente le gain obtenu, grâce à la correction quotidienne et montre l'importance de ce paramètre sur le rendement d'un module photovoltaïque. La correction portant sur l'azimut nous permet de bénéficier d'un gain supplémentaire de 4.3 % correspondant à la différence de surface entre les courbes (II) et (III).

En somme, le système de tracking à deux axes est parvenu à offrir un gain énergétique d'environ de 25 % par rapport au module fixe.

## 5. CONCLUSION

Le travail proposé concerne l'optimisation des systèmes photovoltaïques obtenue par la conception et la réalisation d'un système très économique de tracking du soleil pour un panneau photovoltaïque.

Le tracking est assuré par un programme qui transmet des impulsions à deux actionneurs qui orientent le panneau de façon à ce que l'angle d'incidence reste constant.

Cela permet d'exploiter l'énergie solaire de façon efficace non seulement durant les heures d'ensoleillement, mais également la lumière diffusée tout au long de l'année. Ce système a permis d'améliorer le rendement énergétique de l'ordre de 25 %.

Les résultats expérimentaux confirment que le bénéfice du tracking à deux axes est très avantageux et est sans commune mesure en comparaison avec l'insignifiance des investissements engagés.

Comme perspectives, nous projetons d'intégrer les autres facteurs qui peuvent influencer le rendement énergétique (la température, la vitesse du vent,...), ainsi que la combinaison des avantages des deux techniques de tracking: l'asservissement et la pré-programmation.

## REFERENCES

- [1] Document, '*Contrôle des Systèmes DEGERtraker*', DEGERenergie GmbH, 72160 Horb/Germany. <http://www.degereenergie.de>
- [2] European office: Solenergy Europe St. Petersburg, Russia, Universal solar tracker Sunflower St.
- [3] Document, '*Export Bureau International*' Manufacture Export Directory, Solar-Azimuth Trackers.
- [4] Report, '*Array Technologies*', Inc: Wattsun Solar Trackers.
- [5] A. Vial, '*Lignes de Déclinaison d'un Cadran Solaire Plan d'Orientation Quelconque*', Université de Technologie de Troyes, Pôle Physique, Matériaux et Nanotechnologies, N°981 - 998, Octobre 2007.
- [6] Document, '*RETScreen® International Centre d'aide à la décision sur les énergies propres*', N°catalogue: M39-99/2003, Ministère de Ressources Naturelles, Canada 2001 - 2004.
- [7] M. Haddadi, '*Elaboration d'une Commande pour Héliostat*', Revue des Energies Renouvelables, Numéro Spécial, pp. 153 – 157, 2003.
- [8] S. Chin, J. Gadson and K. Nordstrom, '*Nerd Girls, Maximum Power Point Tracker*', Nerd Girls Solar/MPPT Group May 12, 2003.

- [9] Document in International Competition (1993/94) '*First Step to Nobel Prize in Physics*' and published in the competition proceedings (Acta Phys. Pol. A 88 Supplement, S-49 (1995)).
- [10] Bigonoff, '*La Programmation des Pics*', Seconde Partie – Révision 7, La Gamme Mid-Range par l'Etude des 16f87x (16F876-16F877), 19/04/2003.
- [11] Document, '*Analyse de Projets d'Energies Propres*', Manuel d'Ingénierie et d'Etudes de Cas RETScreen, 3<sup>ième</sup> Edition, Ministre de Ressources Naturelles, Canada, Janvier 2006.