

Réalisation et tests d'un système automatique pour améliorer l'énergie électrique dans les installations photovoltaïques

[Implementation and tests of an automatic system to improve electrical energy in photovoltaic installations]

Abdessamad Malaoui

Laboratoire Interdisciplinaire de Recherche en Sciences et Techniques (LIRST),
Faculté Polydisciplinaire, Université Sultan Moulay Slimane, B.P 592, Mghila, Beni Mellal, Maroc

Copyright © 2014 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the *Creative Commons Attribution License*, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ABSTRACT: This work is a contribution in the technical and instrumentation sides related to the field of photovoltaic renewable energy. It presents the details of a simple and low cost electronic realization, capable of increasing the production of photovoltaic electricity. This system is based on an electronic device developed with a microcontroller and other components available on the market. In effect, this electronic card can mechanically control the angular orientations of photovoltaic panels, with actuators connected to a power electronics developed to automatically tracking of the sun position. This system is compared with other fixed photovoltaic system, which was experimentally positioned with optimal physical and geometrical parameters. The results of tests and comparison show the energy benefits and economic and technical interest of this realization.

KEYWORDS: Renewable energy, energy optimization, automatic positioning, photovoltaic system, embedded system.

RESUME: Ce travail est une contribution dans le côté technique et instrumentation en relation avec le domaine des énergies renouvelables photovoltaïques. Il présente les détails d'une réalisation électronique et mécanique simple et de faible coût, capable d'augmenter la production de l'énergie électrique d'une installation photovoltaïque. Ce dispositif est basé sur une carte électronique que nous avons développée et réalisée à base d'un microcontrôleur et d'autres composants disponibles au marché. En effet, cette carte permet de commander mécaniquement les orientations angulaires des panneaux photovoltaïques à l'aide des actionneurs branchés à une électronique de puissance développée également, en poursuivant la position du soleil d'une manière automatique. Ce système est comparé avec une autre installation photovoltaïque fixe, qui été bien positionnée expérimentalement en cherchant ses paramètres physiques et géométriques optimaux. Les résultats du test et de comparaison montrent les avantages énergétiques et les intérêts économiques et techniques de cette réalisation.

MOTS-CLEFS: Energie renouvelable, optimisation énergétique, positionnement automatique, installation photovoltaïque, système embarqué.

1 INTRODUCTION

Parallèlement aux prévisions d'épuisement des ressources en énergie fossile dans le monde (pétrole, gaz, charbon...), la consommation mondiale d'énergie a connu une grande augmentation, elle a été multipliée par quarante au cours du siècle dernier. En parallèle, le nombre des habitants a augmenté aussi rapidement, il a passé de 2 milliards en 1950 à plus de 6 milliards en 2000, et les prévisions estiment qu'il dépassera les 10 milliards en 2050 d'où la consommation énergétique peut atteindre 30000 Mtep [1]. Les énergies renouvelables s'imposent donc, comme une solution d'avenir pour satisfaire ces

besoins énergétiques. Le soleil reste la principale source des différentes formes des énergies renouvelables, il diffuse des rayonnements d'énergie de l'ordre de 100 milliards de milliards de kilowatts heure par seconde dans toutes les directions, ce qui est équivalent à une puissance de $3,6.10^{20}$ Méga Watts.

La recherche scientifique s'intéresse à l'exploitation de cette énergie, en particulier dans le domaine photovoltaïque (PV) qui se base sur la conversion de l'énergie solaire en électricité à travers l'effet photoélectrique. Bien que le rendement des photovoltaïques est encore limité, ce domaine est largement exploité, et il manifeste des investissements importants. En effet, la puissance électrique produite par une cellule PV est relativement faible, elle est de l'ordre de 1 à 3W pour une tension inférieure à un volt [2], et le rendement de conversion des cellules PV est de l'ordre de 15% à 19% pour le silicium monocristallin, 12% à 16 % pour le silicium poly-cristallin et 7% à 9% pour le silicium amorphe [3].

Les cellules photovoltaïques doivent donc être reliées à d'autres dispositifs électroniques afin d'améliorer le rendement énergétique électrique. Plusieurs recherches ont été effectuées dans ce domaine afin d'augmenter la production électrique des installations PV [4]. Ces recherches ciblent différents niveaux de ces installations, à savoir les méthodes de positionnement des panneaux PV, le dimensionnement, le développement de l'électronique relative, les techniques de l'adaptation des charges alimentées, les méthodes d'extraction des paramètres physiques des jonctions et autres [5], [6].

Dans ce papier nous présentons une réalisation technique pour objectif d'améliorer la production de l'énergie électrique des installations PV. Il s'agit d'un système électronique et mécanique simple et de coût réduit, capable d'augmenter la puissance électrique produite par les panneaux PV en contrôlant ces positions angulaires. Ce système se base sur une carte électronique réalisée autour d'un système embarqué et des algorithmes originaux, que nous avons développés et programmés. Ce système est validé par la comparaison avec une installation PV fixe stand d'une manière rigoureuse en déterminant expérimentalement ses paramètres physiques et géométriques, tels que les angles optimaux, l'effet de la température, etc. La comparaison des deux systèmes cible 3 types de mesures : l'énergie électrique totale produite pendant une journée, les durées maximales des puissances électriques significatives générées, et les valeurs maximales des grandeurs électriques des PV.

2 FACTEURS INFLUENÇANT SUR LE RENDEMENT DU PV

Différents facteurs peuvent être responsables à la diminution du rendement énergétique d'une installation PV. Sur le côté positionnement des modules PV les facteurs les plus importants sont modélisés par les équations suivantes :

2.1 FACTEURS GEOSTATIONNAIRES

Pour un point fixe sur la surface de la terre, la trajectoire du mouvement du soleil est variable par rapport au temps. Il existe plusieurs paramètres géostationnaires qui interviennent dans la création de cette situation dynamique. L'orientation d'un panneau photovoltaïque par rapport au soleil est une étape importante pendant le dimensionnement d'une telle installation PV, la variation de la trajectoire du soleil influence sûrement sur son rendement énergétique.

Pour comprendre ce problème, on fait appel aux lois astronomiques et géométriques en faisant intervenir la latitude de lieu, la déclinaison solaire, l'heure du jour et l'orientation de la surface réceptrice de l'installation PV. Il est intéressant de définir les paramètres les plus importants qui modélisent la dynamique de la trajectoire du soleil [7]:

- L'inclinaison α (ou l'angle d'élévation) est la rotation autour de l'axe horizontal z. L'inclinaison idéale d'un panneau PV par rapport à l'axe horizontale dépend du jour de l'année, et de la latitude de la position d'installation (dans notre cas c'est la ville de Béni Mellal). L'inclinaison peut être représentée par le modèle suivant :

$$\text{Inclinaison} = \text{latitude} - \text{Arcsin} \left[0,4 * \sin \left(N * \frac{360}{365} \right) \right]$$

Avec N étant le nombre de jours entre l'équinoxe de printemps (21 mars de chaque année) et le jour considéré.

- l'Azimut solaire (a) est l'angle horizontal formé par le plan méridien (axe 'nord-sud') et le plan vertical du vecteur du point local vers le soleil. Il est calculé par le modèle suivant:

$$a = \text{Arcsin} \left[\frac{\cos(\delta) * \sin(\omega)}{\cos(h)} \right]$$

- Le paramètre (δ) est la déclinaison solaire, c'est l'angle que forme le vecteur du centre de la terre vers le soleil, et le plan équatorial de la terre. Ce paramètre peut être représenté par la formule suivante :

$$\delta = 23,45 * \sin \left(360 * \frac{(284 + m)}{365} \right)$$

Avec (m) est le numéro du jour dans l'année.

- Le paramètre (ω) est l'angle horaire du soleil, c'est l'angle formé par le plan méridien du lieu et celui qui passe par la direction du soleil, il est compris entre 0° et 360°. L'angle horaire est obtenu par l'équation suivante :

$$\omega = 180 * \left(\frac{TSV}{12 - 1} \right)$$

Ou TSV est le Temps Solaire Vrai qui dépend du jour solaire apparent, qui est la durée entre deux retours successifs du Soleil au méridien local.

- La hauteur angulaire du soleil (h), ou encore l'altitude, est l'angle formé par le plan horizontal du lieu considéré et le vecteur partant du point local vers le soleil. Cette hauteur du soleil qui intervient fortement sur la valeur de l'éclairement peut être calculée selon la formule suivante :

$$h = \text{Arcsin}[\sin(\Phi) * \sin(\delta) + \cos(\Phi) * \cos(\delta) * \cos(\omega)]$$

Avec Φ est la longitude, c'est l'angle formé par le méridien de référence (méridien de Greenwich) et le méridien du point local.

Théoriquement, nous pouvons déterminer les deux angles Azimut et déclinaison d'une installation PV si nous connaissons ses positions géographiques et temporelles, mais ces modèles restent généraux et ne donnent pas des résultats précis, d'où la nécessité d'utiliser d'autres méthodes expérimentales pour trouver des valeurs relativement exactes.

2.2 FACTEUR DE REMPLISSAGE

Le facteur de remplissage (FF) est un paramètre important souvent utilisé dans le domaine de l'étude énergétique des PV. Ce coefficient représente le rapport entre la puissance maximale P_m que peut délivrer une cellule PV et la puissance formée par le rectangle $I_{cc} * V_{co}$:

$$FF = \frac{P_m}{V_{co} * I_{cc}}$$

Les paramètres I_{cc} et V_{co} sont respectivement le courant électrique court-circuit et la tension à vide de la cellule PV. Théoriquement, si la cellule PV est idéale ce facteur égale à 1, mais généralement il prend des valeurs entre 0,6 et 0,9 [8].

2.3 RENDEMENT ENERGETIQUE

C'est un autre paramètre très important dans le choix des panneaux solaire, il est défini comme le rapport entre cette puissance maximale produite et la puissance du rayonnement solaire qui arrive sur la surface d'un module solaire photovoltaïque.

$$\eta = \frac{P_m}{E * S}$$

Avec S est la surface du module PV exprimée en (m^2), et E est l'éclairement exprimé en (W/m^2). Ce rendement est souvent mesuré dans les conditions normalisées « STC », c-à-d sous un ensoleillement égale à $1000 W/m^2$, dans une température égale à 25°C et sous un spectre AM de 1.5.

2.4 INFLUENCE DE LA TEMPERATURE

La température est un paramètre qui influence le comportement des cellules photovoltaïques en modifiant leurs caractéristiques. La figure 1 montre la variation de la caractéristique $I(V)$ d'une cellule PV en fonction de cette grandeur. L'augmentation de la température dans cette cellule provoque une augmentation du courant du court-circuit (I_{cc}), et une

diminution de la tension en circuit ouvert (V_{co}) et par conséquent une diminution de la tension maximale (V_m) et un accroissement du courant max (I_m), ce qui entraîne par la suite une baisse relative de la puissance maximale ($P_m = V_m \times I_m$).

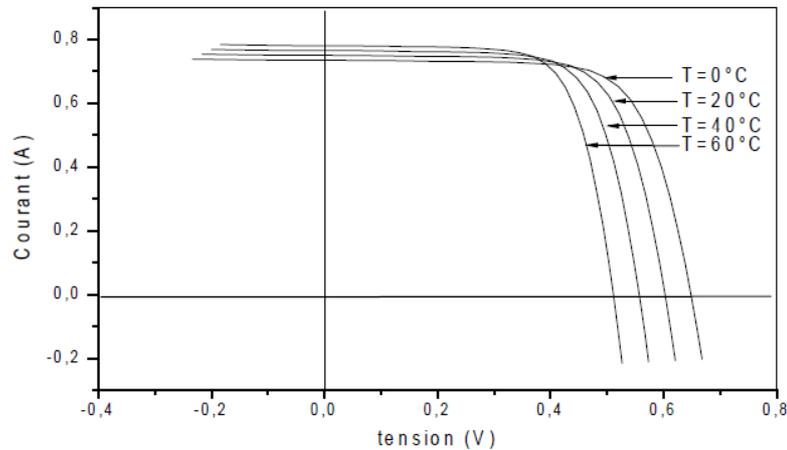


Fig. 1. Influence de la température sur la caractéristique d'une cellule PV

Plusieurs modèles mathématiques ont traité la température dans un module photovoltaïque en relation avec d'autres paramètres électriques et physiques. Le plus important de ces modèles est celui de *Jones et Underwood* qui est développé en 2002, et qui traite la production de la puissance optimale de la sortie d'un module PV [9], [10] :

$$P = FF \cdot \left(I_{cc} \cdot \frac{G}{G_0} \right) \cdot \left(V_{co} \cdot \frac{\ln(K \cdot G)}{\ln(K \cdot G_0)} \cdot \frac{T_0}{T_c} \right)$$

Où K est un coefficient constant peut être calculé par la formule suivante :

$$K = \frac{I_{cc}}{G}$$

G : L'irradiation solaire sur un plan incliné (W/m^2).

G_0 : L'irradiation solaire de référence ($1000W/m^2$).

T_c : la température de module, et peut être décrite par la relation :

$$T_c = T_a + \left[\frac{NOCT - 20}{800} \right] \cdot G$$

Avec T_a est la température ambiante en Kelvin, et $NOCT$ est la température nominale de fonctionnement du module (Nominal Operating Cell Temperature).

3 DISPOSITIF AUTOMATIQUE REALISÉ

Il est constitué d'un système mécanique qui permet de suivre la position du solaire de manière automatique, en faisant varier deux angles du support des panneaux PV ; l'azimut selon une rotation horizontale et l'inclinaison selon une rotation verticale.



Fig. 2. Schéma explicatif du mécanisme de rotation à deux directions.

Lorsque ce système fonctionne en poursuivant la position du soleil, il permet de maintenir en permanence une puissance électrique maximale délivrée par le PV. Ce système mécanique est commandé par une carte électronique développée à base de microcontrôleur à travers deux actionneurs. Le 1^{er} agit sur l'axe horizontal pour la variation d'élévation du panneau, tandis que le 2^{ème} commande l'axe vertical pour la variation d'azimut, comme le montre les images de la figure suivante.

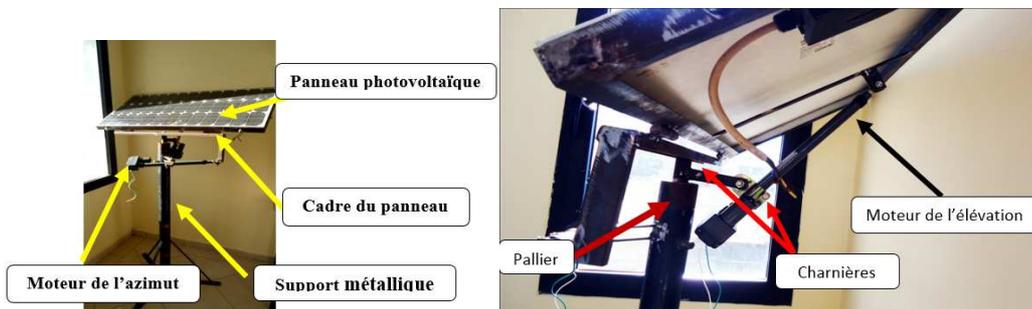


Fig. 3. Images du système mécanique commandé par les deux actionneurs.

Les actionneurs utilisés dans cette réalisation sont deux vérins électriques à base du moteur à courant continu à aimant permanent avec un réducteur. Les vérins électriques utilisés transforment le mouvement de rotation crée par un moteur électrique en mouvement de translation à l'aide d'une tige métallique. Le déplacement de cette tige varie linéairement avec la vitesse de rotation du moteur et du système de transformation de mouvement. Le choix de ce type des vérins vient grâce à sa disponibilité au marché, il est de faible coût, facile à utiliser et il ne nécessite pas d'autres articulations pendant l'utilisation. Pour commander le sens de rotation de l'un des moteurs de l'azimut ou de l'inclinaison, nous jouons sur l'inversion de la polarité de l'alimentation. La solution électronique de cette démarche, nous a conduit à utiliser des relais commandés avec des transistors de commutation sous forme du pont en H. le fonctionnement de ce mécanisme est géré par une logique binaire simple comme l'explique le tableau suivant.

Table. 1. Etats logiques de la commande du sens d'une rotation.

Commande 1	Commande 2	Etat du Moteur
0	0	Arrêt
0	1	Sens1
1	0	Sens2
1	1	Etat non réalisé

Nous avons placé des diodes aux bornes des relais pour protéger les transistors contre les surtensions produites aux bornes des bobines des relais. Pour une protection contre les échauffements et les courants excessifs, nous avons opté à une isolation galvanique de la commande entre la partie puissance et le microcontrôleur par un opto-coupleur, car la sortie logique du microcontrôleur est de l'ordre de 5V alors que les circuits de puissance sont alimentés avec des tensions élevées (> 12V).

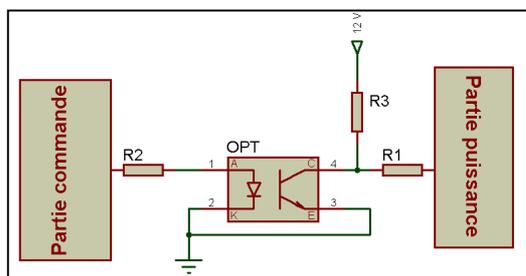


Fig. 4. Isolation des deux parties commande et puissance par opto-coupleur.

Le cœur de traitement et de contrôle dans notre carte électronique réalisée, est le microcontrôleur PIC 16f877A, il dispose de 5 ports d'E/S, de 8 entrées analogiques à 10 bits, de 3 temporisateurs « Timers », d'une mémoire EEPROM Programme de 8k lignes de mots de 14 bits, d'une mémoire EEPROM Données de 256 octets et d'une mémoire RAM de 368 octets. Cette carte est alimentée par le panneau PV à travers un régulateur de tension de 5 volts. Le panneau solaire délivre une tension (Vpv) varie entre 9V et 20V selon le moment dans la journée. Par contre, le microcontrôleur ne supporte que des

tensions entre 0V et 5V. Pour résoudre ce problème, nous avons placé un diviseur de tension de gain ajustable ($k=1/4$). Ce diviseur est monté en cascade avec un montage suiveur formé par un amplificateur opérationnel, pour adapter son impédance. La tension délivrée par l'AOP ($V_{pv}/4$) sera convertie par le microcontrôleur à travers la broche de l'entrée analogique AN0. L'affichage du numéro du programme exécuté est assuré par un afficheur numérique 7-segments branché sur le port B du PIC. Lorsque l'installation PV utilise un dispositif électronique de recherche automatique du point maximal de puissance (MPP) [11], le branchement de l'entrée de l'ampli-op sera relié à la sortie de ce dispositif et le programme chargé dans le μC , réalise les processus suivants :

- L'interruption du programme effectuée automatiquement ou par un bouton poussoir lié à la broche RB0/INT.
- La conversion d'une tension continue issue du diviseur de tension à travers la broche PA1/AN1, la valeur de la tension convertie permet de choisir automatiquement le numéro de programme à réaliser et par conséquent choisir le pas temporel entre deux mesures successives comme indiqué sur le tableau suivant :

Table. 2. Les pas d'acquisition des mesures par μC .

Marge de la tension convertie (V)	Número du programme	Pas (temps d'arrêt du panneau en état d'attente)
[0 – 1]	1	3 minutes
[1 – 2]	2	10 minutes
[2 – 3]	3	15 minutes
[3 – 5]	5	20 minutes

Lorsque le numéro du programme de travail est choisi, le microcontrôleur est remis à zéro, afin d'éviter toute anomalie de contrôle et d'acquisition. Dans le but de protéger les entrées analogiques du microcontrôleur, nous avons ajouté une diode zener (D_{z1}) de 5,6V en parallèle avec la broche AN0 de telle façon que si la tension arrivée de l'AOP dépasse 5,5V, dans le cas d'un mauvais fonctionnement ou destruction des résistances du pont diviseur, la diode zener intervienne pour stabiliser la tension d'entrée du μC à 5,6V.

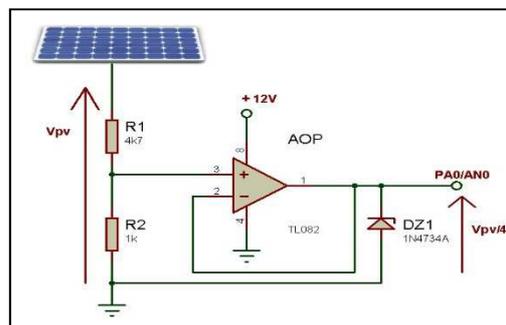


Fig. 5. Schéma du montage de référence et de protection.

Une image et le schéma électronique de la carte principale qui commande le mécanisme de rotation sont donnés sur les figures suivantes :

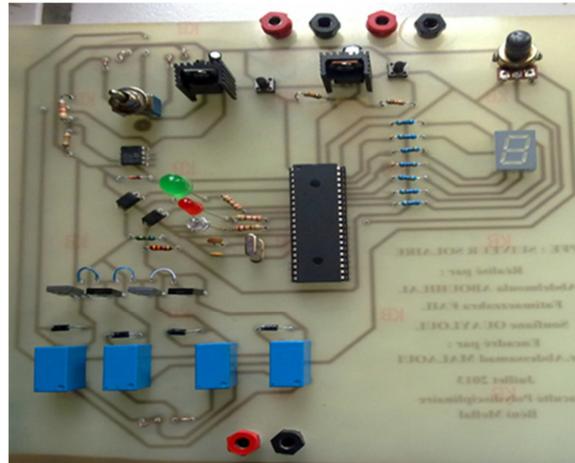


Fig.6. Circuit imprimé de la carte électronique à μC réalisée.

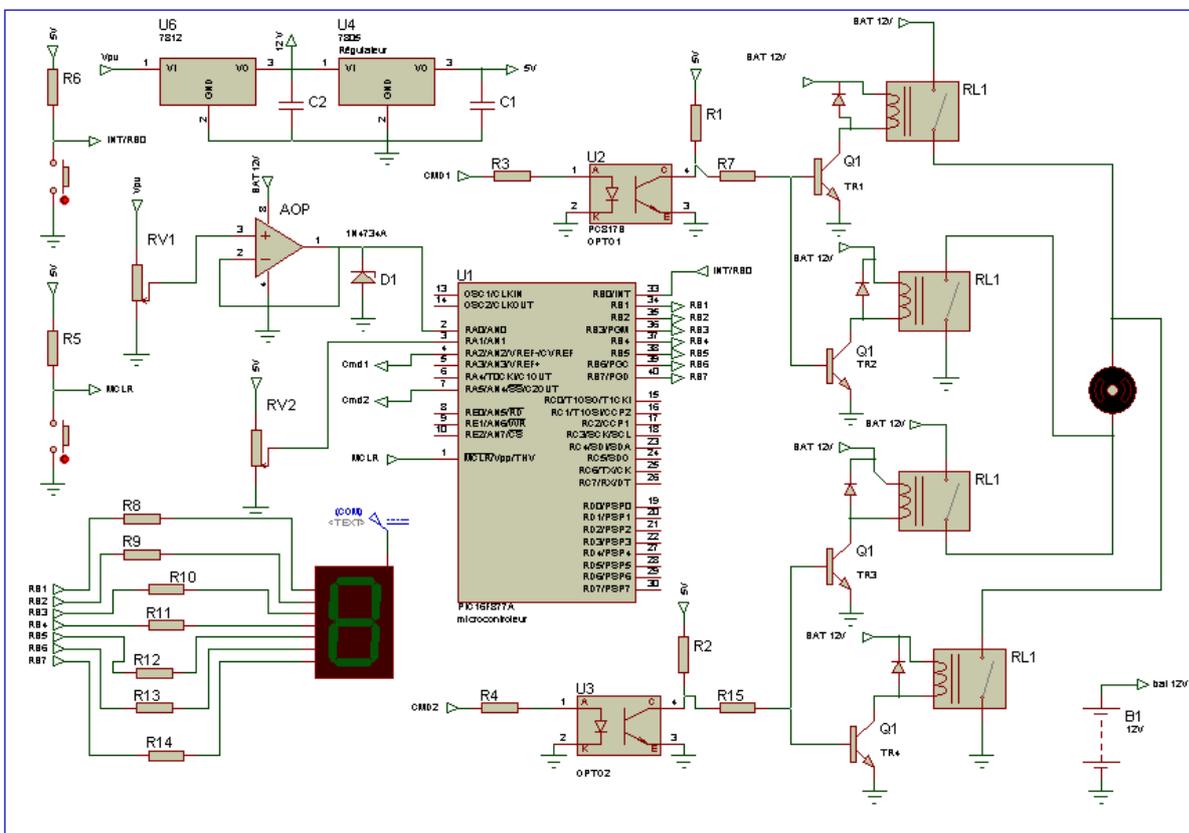


Fig. 7. Schéma électronique de la carte principale réalisée qui commande un positionneur

4 ALGORITHME D'AUTOMATISATION

4.1 METHODES SOUVENT UTILISEES

Le microcontrôleur est chargé par des sous-programmes en adoptant les méthodes de « Tracking » [12]. Les modes de l'orientation des panneaux PV les plus utilisés dans ce domaine sont les suivants :

- Mode qui utilise des capteurs optiques « photorésistance LDR par exemple ».
- Mode avec temporisation.
- Mode pré calculé à l'aide des équations du mouvement apparent du soleil.

La 1^{ère} méthode est la plus utilisée, elle est basée sur la comparaison de l'intensité lumineuse absorbée par deux LDR, en motorisant le système vers celle moins éclairée. Cette méthode présente une simplicité au niveau du montage électronique et de l'algorithme utilisé, mais elle nécessite un bloc électronique qui capte l'intensité lumineuse. La 2^{ème} méthode utilise un temporisateur programmé pour orienter le PV de telle façon que la durée et le pas de mouvement de l'actionneur dépendent des positions temporelle et géographique du site ou il est placé le PV. Tandis que le 3^{ème} mode est basé sur la connaissance d'avance des coordonnées de la position du soleil durant toute l'année, en tournant le système avec un programme qui comporte les équations du mouvement apparent du soleil (Azimut et inclinaison). Dans ce cas, l'orientation est basée sur des calculs et le système dirige le panneau vers le point théorique où la puissance sera maximale sans tenir compte de plusieurs facteurs de perturbations tel que le brouillard, le climat,...etc. Ce mode est difficile à utiliser à cause de la difficulté de programmation des équations analytiques sur un microcontrôleur, et que la programmation est nécessaire chaque fois que la position du système (longitude et latitude) est changée.

4.2 NOTRE NOUVELLE METHODE

Dans notre travail, nous utilisons une nouvelle méthode originale basée sur l'utilisation du panneau solaire lui-même comme capteur, et sa tension délivrée comme grandeur de référence pour mesurer le point de puissance maximal. L'avantage de cette méthode réside sur le fait que le montage électronique correspond devient simple et réduit, et que l'acquisition des signaux analogiques est faite sur les puissances électriques réelles et ne pas sur les mesures des intensités lumineuses, comme dans le cas du premier mode, ce qui évite les erreurs relatives à la linéarisation des capteurs souvent rencontrées. L'algorithme relatif à cette méthode est basé sur la comparaison en permanence de deux mesures successives de la puissance comme le montre l'organigramme suivant.

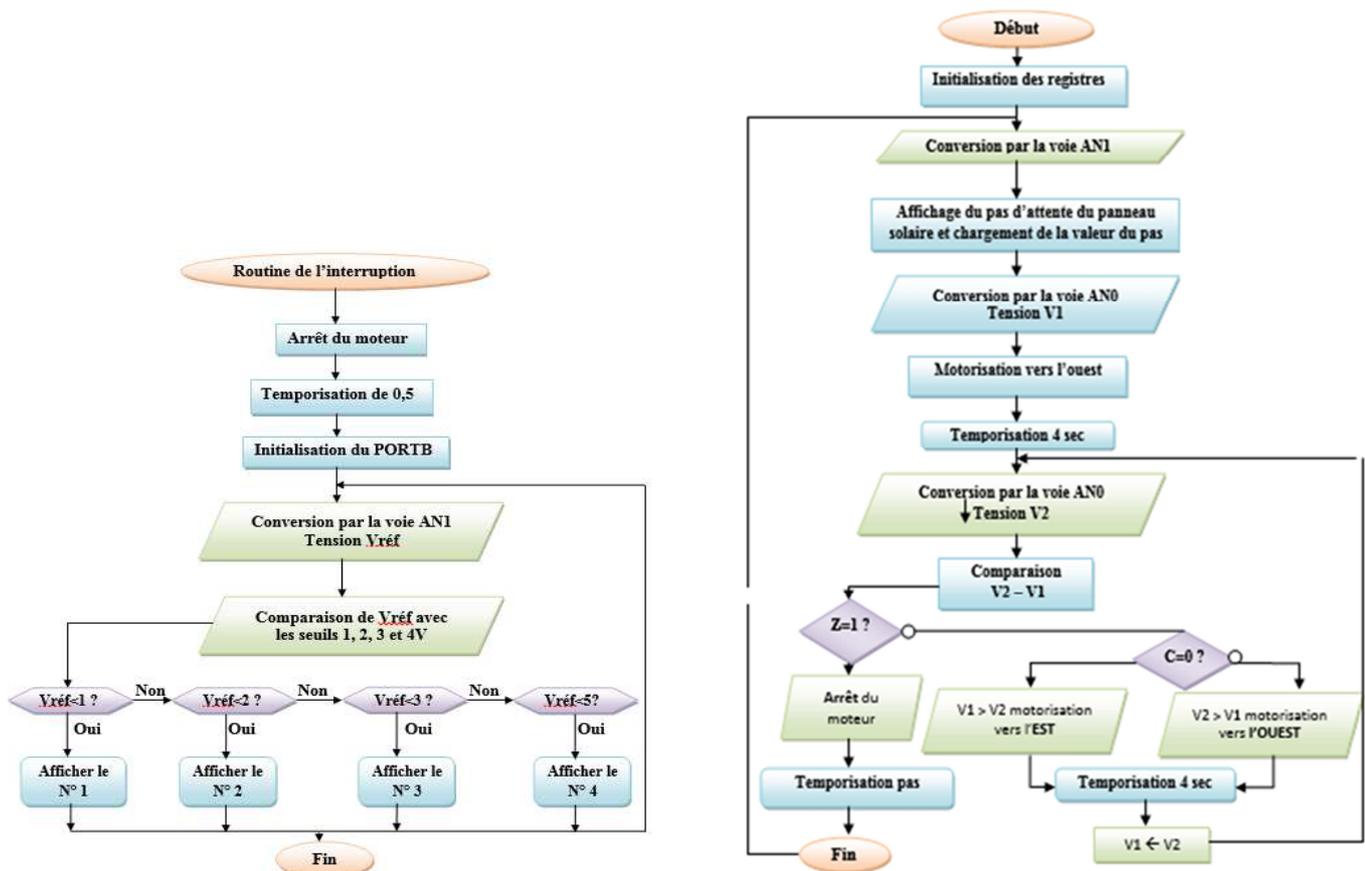


Fig. 8. Organigrammes du programme implanté dans le μC .

Afin d'améliorer le dispositif réalisé, nous avons utilisé une interruption RBO du microcontrôleur pour faire varier automatiquement le pas d'attente du mouvement du panneau PV comme le montre l'algorithme à gauche de la figure 8. Les valeurs des pas, données sur le tableau 2, sont obtenues après plusieurs tests et elles sont classées en 4 intervalles significatifs.

5 RESULTATS ET DISCUSSIONS

5.1 DETERMINATION DE L'ORIENTATION OPTIMALE DU PANNEAU PV FIXE

Pour que la comparaison entre le système automatique développé et une autre installation PV fixe soit faible, nous devons assurer que les panneaux de cette dernière sont orientés d'une façon optimale. En effet, pour qu'une quantité maximale du rayonnement solaire arrive sur la surface du panneau PV, nous devons bien choisir les positions des angles d'orientation de l'azimut et d'inclinaison de ces panneaux. Des valeurs approximatives de ces angles sont souvent données par le constructeur, ou déterminées empiriquement par des modèles mathématiques ou par des logiciels de simulation. Mais les valeurs trouvées restent souvent imprécises par rapport à la réalité, ce qui nous pousse à chercher des valeurs expérimentales nous-même relatives à la position de notre installation.

5.1.1 L'ANGLE AZIMUT

Pour déterminer cet angle expérimentalement, nous avons fixé la position du panneau dans un angle référentiel ($0^\circ E$), et nous avons mesuré le courant $I(A)$ et la tension $U(V)$ aux bornes du panneau PV en faisant varier l'angle ψ de 0° à 90° [13]. Sur la figure suivante, nous représentons la puissance électrique délivrée par le panneau PV en fonction de cet angle ($P=f(\psi)$).

L'angle azimut qui correspond à une puissance maximale est $\psi=15^\circ$. Au-delà de cette valeur, la puissance fournie par le panneau PV diminue presque linéairement. Cette valeur est relativement différente à celle donnée par le constructeur.

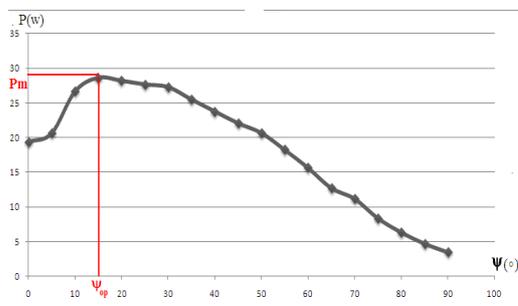


Fig. 9. Détermination de l'angle azimut optimal du panneau PV.

5.1.2 L'ANGLE DE L'INCLINAISON

Afin de déterminer l'angle (α) de l'inclinaison du panneau, nous avons procédé de la même manière que pour l'angle azimut. En effet, nous avons mesuré la puissance électrique délivrée en faisant varier cet angle α entre 0° et 90° , et nous avons mesuré les valeurs de U et I correspondantes [13]. La courbe de la figure suivante représente la caractéristique expérimentale $P=f(\alpha)$.

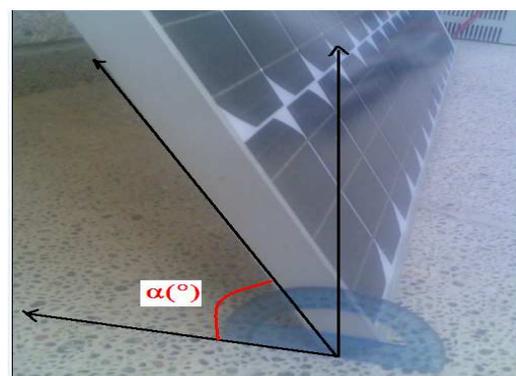
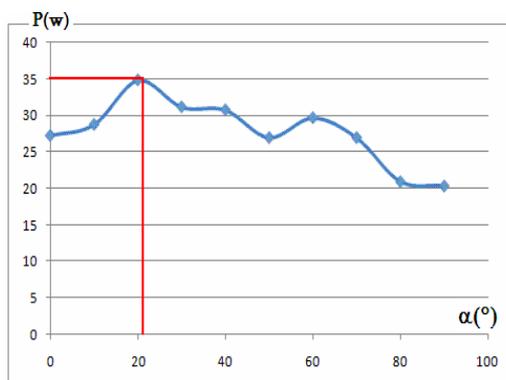


Fig. 10. Caractéristique expérimentale $P=f(\alpha)$ et réglage de l'angle d'inclinaison

Cette courbe nous permet de déterminer expérimentalement l'angle d'inclinaison optimale (correspond à une puissance maximale) qui est de l'ordre de 21° ($20,63^\circ$). Par contre, la valeur théorique de l'angle d'inclinaison est de l'ordre de $31,81^\circ$.

L'orientation du panneau PV selon ces deux angles trouvés expérimentalement assure le positionnement optimal de cette installation fixe afin que toute comparaison avec le système mobile développé soit fiable.

5.2 L'EFFET DE LA TEMPERATURE SUR LE PANNEAU PV

Un autre facteur qui influence sur les caractéristiques électriques d'une cellule Photovoltaïque et par conséquent sur son rendement énergétique, est la température souvent ignorée par les installateurs. Afin de déterminer le comportement électrique réel du panneau PV en fonction de cette grandeur (condition hors laboratoire), nous avons réalisé un dispositif expérimental qui mesure la puissance électrique du panneau PV produite pour des différentes températures, en fixant des thermomètres sur différents endroits de la face arrière du panneau PV [14].

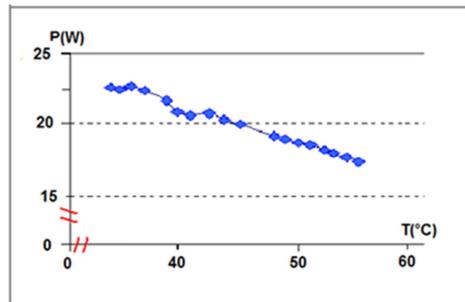


Fig. 11. Caractéristique expérimentale $P = f(T)$ du panneau PV

Il est remarqué à partir de cette courbe que la puissance fournie décroît d'une manière approximativement linéaire lorsque la température augmente, et par conséquent les performances du panneau diminuent. En effet, pour une augmentation de température de 30°C, la puissance électrique chute d'environ de 5W ce qui est équivalent à une dégradation de puissance de 20%. Pour remédier à ce problème, on peut faire appel à un système de refroidissement à air ou la recommandation de choisir un endroit d'installation protégé contre l'échauffement. Il est donc, nécessaire pour toute comparaison avec un système PV fixe de tenir compte de la température en effectuant les mesures dans les mêmes conditions.

5.3 MESURES EFFECTUEES PAR LES DEUX SYSTEMES DE POSITIONNEMENT

D'autres mesures électriques ont été effectuées à l'aide d'un autre panneau PV, en utilisant le système automatique développé, et les résultats sont comparés avec ceux trouvés avec un système fixe. En effet, nous avons prélevé des courants et des tensions en assurant le point maximal de la puissance fournie par le choix de la résistance convenable de la charge électrique branchée au module PV. Pendant les mesures effectuées sur l'installation fixe, nous avons adopté les paramètres angulaires trouvés précédemment afin de rendre cette installation optimale. Les courbes suivantes montrent les variations de ces grandeurs électriques (I_{cc} et V_{co}) en fonction du temps au cours d'une journée.

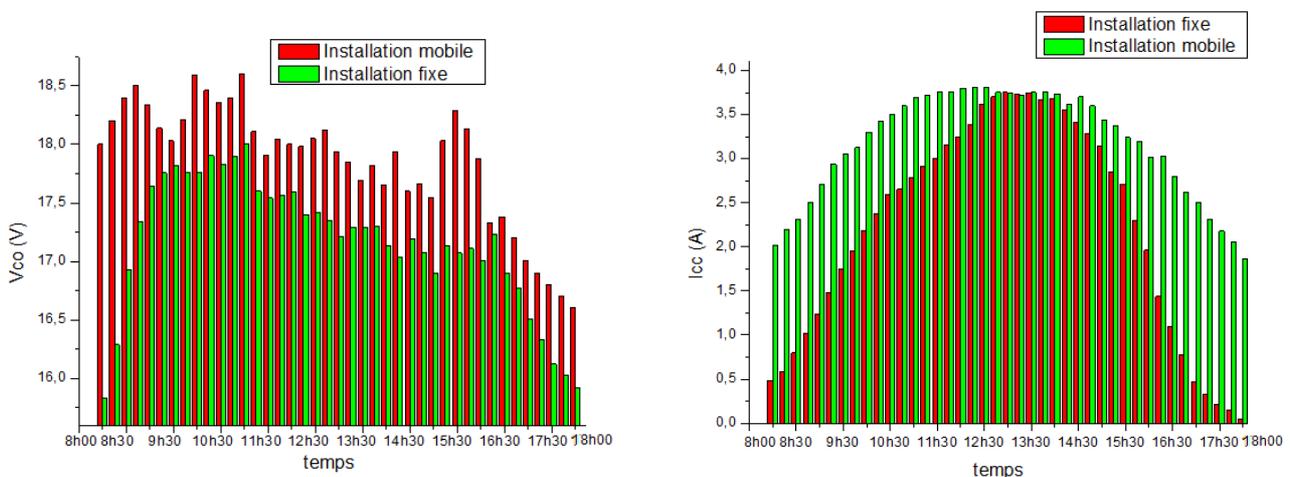


Fig. 12. Grandeurs électriques mesurées avec les deux types d'installation PV.

On se basant sur ces mesures, plusieurs informations peuvent être extraites à savoir l'ordre des courants et des tensions délivrés par les deux types d'installation PV, la marge de puissance produite, la manière de sa variation, ...etc. Ces informations nous aident également à effectuer un bon dimensionnement d'une telle installation qui utilise les panneaux PV sans stockage, comme dans le cas de l'irrigation ou le choix des pompes convenables nécessitent la connaissance avec précision les seuils des courants et des tensions d'alimentation. Ces données nous permettent aussi de prévoir le nombre et le mode de branchement des modules PV pour l'installation (parallèle, série ou combinaison), et par conséquent l'estimation correcte des coûts relatifs et l'assurance d'une installation optimale. Ces mesures peuvent être considérées comme une base de données photovoltaïque relative à la région de travail (Tadla-Azilal) et les régions qui ont des caractéristiques similaires [13].

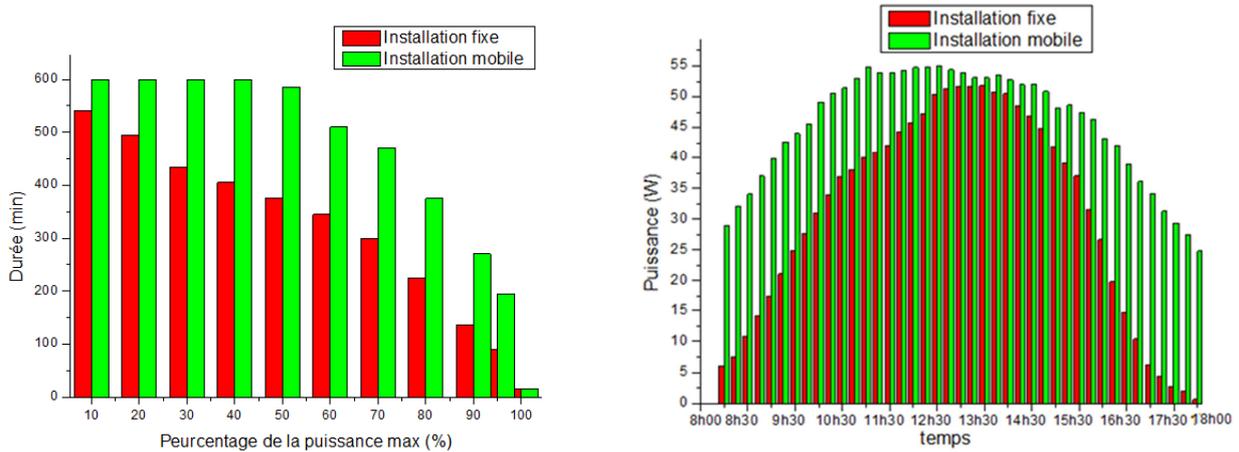


Fig. 13. Histogrammes de la puissance électrique fournie par les 2 systèmes.

Afin de mieux détecter l'apport de l'installation automatique mobile que nous avons développé et réaliser, nous présentons une comparaison des puissances électriques fournies avec le mécanisme fixe durant toute une journée en prélevant des mesures chaque 15min. Les résultats de cette comparaison sont présentés dans les diagrammes de la figure 13. Ces diagrammes présentent plusieurs informations statistiques qui peuvent être modélisées par la loi de Gauss.

$$y = y_o + Ae^{-2.\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2}$$

Avec μ est l'espérance, σ est l'écart type, y_o est la moyenne et A est le maximum de l'amplitude.

Le tableau suivant résume les principaux résultats de cette comparaison ainsi que l'apport du système automatique réalisé par rapport au système PV fixe.

Table. 3. Comparaison des paramètres du modèle des deux mécanismes.

Paramètres du modèle	Installation PV fixe	Installation PV mobile	Variation relative %
Pmax (W)	51,83	55,05	6,21
μ (min)	289.10	280.82	2,94
σ (min)	302	646	60
Energie électrique produite (Wh) (de 8h00 à 18h00)	316	460	45,5

Il est clair que le système automatique réalisé apporte des gains sur plusieurs niveaux. En effet, un gain de l'énergie électrique fournie par le PV mobile est de l'ordre de 144Wh de 08h00 au 18h00 ce qui est équivalent à un gain de 45,5% et la puissance maximale produite est augmentée de 6,21%. En revanche, le système développé permet de déterminer avec précision le moment exact dans la journée où cette puissance sera maximale, c'est à 12h41min au lieu de 14h49min, et cela fait une différence de 8 minutes ; qui correspond à une erreur d'un pas de mesure avec le sous-programme 2 indiqué dans la table 2. Cette erreur provoque un décalage de tout le spectre électrique mesuré durant la journée, ce qui produit une diminution de la l'énergie électrique d'environ 5%.

Ce système apporte aussi un autre gain indiqué par l'écart-type du modèle de Gauss, qui nous informe sur l'intervalle du temps à partir duquel la puissance électrique fournie devienne significative ($P\sigma$). Cette marge de temps est améliorée de 5h à 8h dans une journée, c-à-d d'une augmentation de 60%, et cela nous garantit une puissance électrique supérieure à ($P\sigma$) durant l'intervalle (σ). De même, par le système réalisé nous avons assuré une durée de 585 min avec une puissance électrique supérieure à 50% de la puissance maximale, ce qui représente un gain de 210min. Aussi, nous avons obtenu des gains respectivement de 170 min et 150 min avec des puissances électriques supérieures à 70% et 80% de la puissance maximale, comme le montre le diagramme gauche de la figure 15. Ces améliorations sont très importantes dans plusieurs applications industrielles telle que l'irrigation avec le photovoltaïque qui fonctionnent uniquement dans la journée. Ces applications utilisent des pompes électriques qui nécessitent certains seuils des courants, des tensions et des puissances pour le démarrage et le fonctionnement. Ces gains sont trop bénéfiques au niveau du coût, la facilité de montage, et l'augmentation du rendement énergétique, surtout pour les grandes installations qui utilisent plusieurs modules PV et travaillent avec des puissances électriques très élevées.

6 CONCLUSION

Dans ce travail, nous avons ciblé l'optimisation de l'énergie électrique générée par des panneaux PV au niveau de ses positionnements. Bien sûr, il existe d'autres niveaux d'optimisation qui ne sont pas traités dans ce travail et qu'il existe dans le marché d'autres systèmes qui automatisent le positionnement des PV en suivant le soleil, mais notre système réalisé présente 3 points essentiels :

- Son coût est relativement très faible, et il utilise des éléments disponibles dans le marché.
- La simplicité de ce système qui le rende réalisé localement par les chercheurs, les industriels et les agricultures intéressés.
- C'est un système bi-axial qui utilise 2 actionneurs qui permettent de varier deux angles à la fois, ce mécanisme le rend utilisable à n'importe qu'il endroit en évitant les difficultés souvent rencontrées pendant le montage, comme dans le cas des installations fixes qui exigent la détermination avec précision des paramètres géographiques de l'endroit de l'installation.

En conclusion, le système réalisé apporte plusieurs gains ; en particulier, il améliore l'énergie électrique générée par un module PV de plus de 45%, et il assure des durées élevées de fonctionnement qui dépassent les 8 heures dans une journée, ce qui représente une amélioration de 60%. Il permet aussi de gagner 5% de l'énergie électrique grâce à la détection automatique du pic de la puissance mesuré. Il faut noter, que ces valeurs sont relatives à un seul panneau PV, ces gains vont augmenter sûrement si les installations utilisent plusieurs modules photovoltaïques, telles que les grandes fermes agricoles irriguées et les usines industriels, etc.

REFERENCE'S

- [1] Marwan Masri, « *L'énergie dans le monde : Le passé et les avenir possibles* », Canadian Energy Research Institute, Colloque annuel 2008, Association nucléaire canadienne, Ottawa, 2007.
- [2] A. Zerga, F. Benyarou et B. Benyoucef, « *Optimisation du rendement d'une cellule solaire NP au silicium monocristallin* », Rev .Energ. Ren : physique Energétique, pp.95-100, 1998.
- [3] G. Hahn, A. Schonecker, "New crystalline silicon ribbon materials for photovoltaics", J. Phys. Condens. Matter 16 R1615R1648, 2004.
- [4] S. Yadir, S. Assal, A. El Rhassouli, M. Sidki, M. Benhmida, O. Aomari, A. Malaoui. « *Optimisation du rendement d'une cellule solaire à base de silicium par utilisation du logiciel de simulation PC-1D* ». Congrès International sur les Energies Renouvelables et l'Efficacité Energétique, Fès-Maroc, 20-21 Avril, 2011.
- [5] A. Malaoui, A. Elmansouri. « *Deux nouvelles méthodes complémentaires pour l'extraction optimale des paramètres électriques des jonctions* ». Revue des Energies Renouvelables CDER, N°2, 2010.
- [6] S. Yadir, S. Assal, M. khaidar, M. Sidki, M. Benhmida, A. Malaoui. "Extraction of Solar Cell Physical Parameters Model with Double Exponential from Illuminated I-V Experimental Curve". Global Journal of Physical Chemistry, pp 236-240, 2011.
- [7] R. Bernard, G. Menguy, M. Schwartz, « *Le rayonnement solaire, conversion thermique et application* ». Technique et Documentation, Paris, 1979.
- [8] N. Benaouda, R. Aiouaz et M. Abersi, « *Réponses spectrales et des caractéristiques I - V des cellules solaires au silicium* ». Revue des Energies Renouvelables Tlemcen, ICRES-07, pp.145-150, 2007.
- [9] Fung Yu Yan, "Energy performance of semi-transparent PV modules for application in buildings". PhD Thesis, The Hong Kong Polytechnic University, 2006.

- [10] Lulin, « *Inverstigation on Characteristics and Application of Hybrid Solar/Wind Power Generation Systems* ». Ph.D. The Hong Kong Polytechnic University, 2004.
- [11] R. Faranda, S. Leva, V. Maugeri, « *Comparative study of ten Maximum Power Point Tracking algorithms for Photovoltaic System* », *U.P.B. Scientific Bulletin, Series C*, Vol. 69, No. 4, pp. 271-278, 2007.
- [12] J. Hui, « *An Adaptive Control Algorithm for Maximum Power Point Tracking for Wind Energy Conversion Systems* ». MSc thesis, Queen's University Kingston, Ontario, Canada, 2008.
- [13] A. Malaoui, « *Contribution de l'énergie photovoltaïque dans le développement de la région : Présentation d'une étude scientifique dans le secteur d'irrigation* », Premier Forum International sur les énergies renouvelables et l'efficacité énergétique, Béni Mellal 15-16 mai, 2013.
- [14] A. Malaoui, « *Dimensionnement expérimental d'un capteur solaire Photovoltaïque pour l'irrigation dans la région de Béni Mellal* ». 1ère édition des Journées Scientifiques et Culturelles Universitaires, Béni Mellal, 2012.