

ETUDE COMPARATIVE ENTRE LES TECHNIQUES D'OPTIMISATION DES SYSTEMES DE POMPAGE PHOTOVOLTAÏQUE

A. MOUSSI, A. SAADI

RESUME

L'utilisation des énergies renouvelables connaît une croissance significative dans le monde. Devant la demande croissante d'énergie électrique essentiellement pour les besoins des régions éloignées, désertes et montagneuses; les systèmes photovoltaïques, en particulier les systèmes de pompage d'eau, commencent à trouver des grandes applications. Dans ce sens, l'étude proposée concerne une comparaison entre les techniques d'optimisation de puissance délivrée. Parmi ces techniques on trouve la technique de poursuite des points de puissance maximale (MPPT) vraie et les techniques d'optimisation sans et avec compensation de température. Les deux dernières techniques sont moins performantes que la première mais plus facile à implémentée. Dans le but d'augmenter leurs performances, une amélioration a été proposée. Les résultats obtenus étaient prometteur et restent à valider pratiquement.

I. INTRODUCTION

L'énergie solaire est largement utilisée pour l'alimentation des régions isolées ou désertes (éclairage, charge des batteries, pompages, etc...). Le grand avantage est que cette source est inépuisable, elle offre une grande sécurité d'utilisation et elle est propre. Dans le but d'améliorer le rendement du générateur photovoltaïque (PV) autrement dit maximiser la puissance délivrée à la charge reliée aux bornes du générateur, plusieurs critères d'optimisation de l'efficacité du système photovoltaïque étaient appliqués [1-4], et des techniques étaient suivies pour avoir une bonne adaptation et un rendement élevé. Parmi ces techniques on trouve la technique de Poursuite du Point de Puissance Maximale ou "Maximum Power Point Tracker, MPPT" [5-8], technique de recherche des points de puissance optimale sans compensation de température et avec compensation de température [9,10]. La comparaison entre ces techniques est fixée comme objectif en première étapes, ensuite une contribution d'amélioration est proposée.

II. SYSTEME DE POMPAGE PHOTOVOLTAÏQUE

Le système de pompage considéré est constitué d'un générateur PV et un moteur sans balais BLDCM entraînant une pompe centrifuge (figure.1).

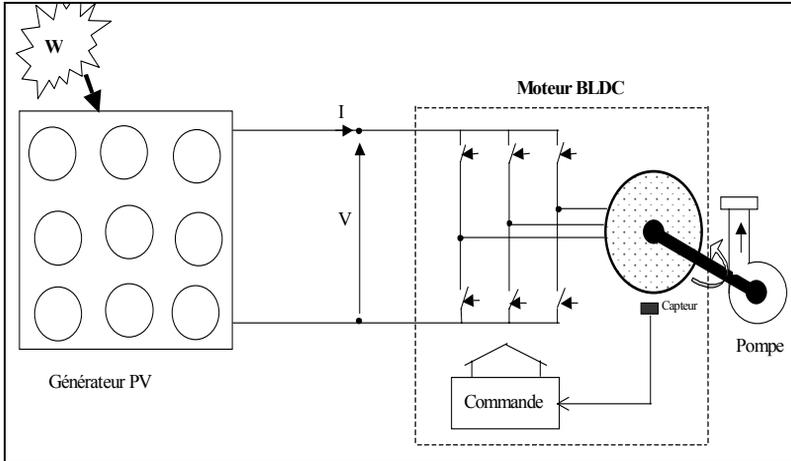


Figure 1. Schéma d'un système de pompage PV

Une approche simplifiée quantifiant l'éclairement incident a été élaborée selon [11], et qui est formulée comme suite :

$$E(h) = E_m \sin(h) \quad (1)$$

Avec :

$$t = t_{sr} + (h/15) \quad (2)$$

II.1. Générateur photovoltaïque

Un générateur photovoltaïque permet une conversion convenable d'énergie solaire en énergie électrique sous forme de tension et de courant continu, variable selon l'influence de l'éclairement et la température [12,13]. Le modèle traditionnel le plus utilisé pour simuler son fonctionnement et celui à une exponentielle [14].

$$I = I_L - I_{sat} \left[\exp\left(\frac{q(V + IR_s)}{AkT}\right) - 1 \right] \quad (3)$$

Le modèle du générateur photovoltaïque utilisé, pour un éclairement $E=1000\text{w/m}^2$ et une température de 25°C et selon les paramètres indiqués dans l'Annexe est donné par l'équation suivante :

$$I = 4.8 - 4.8779e^{-6} \left[\exp\left(\frac{V + 2.25I}{16.2277}\right) - 1 \right] \quad (4)$$

Deux principaux paramètres; l'éclairement et la température influent sur le fonctionnement du générateur. La figure.2:a-f montre la réaction du générateur selon les variations de ces deux paramètres.

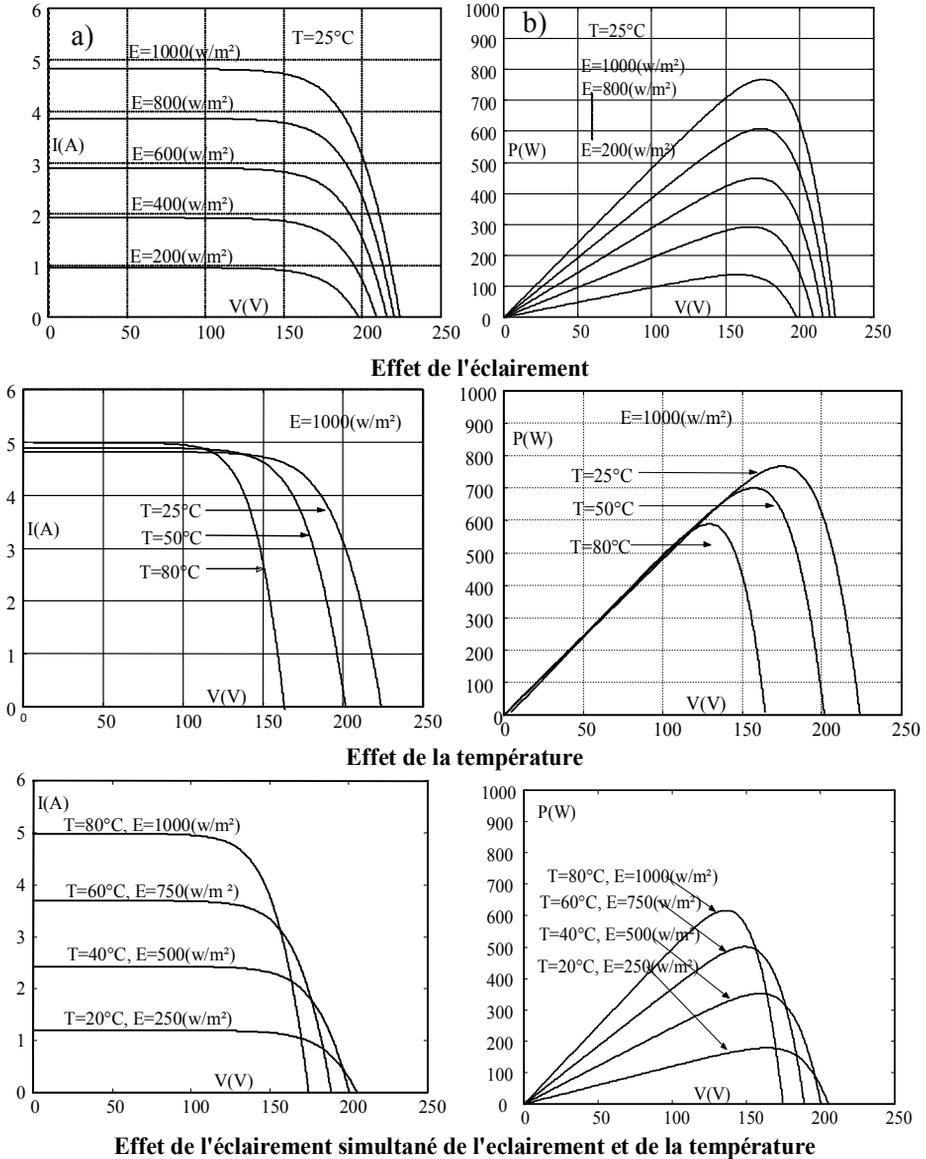


Figure 2 : L'effet de la température et de l'éclairement sur les caractéristiques I-V et P-V du générateur PV

II.2. Groupe moteur-pompe

Le rendement du moteur BLDC, qui est dans la plage de 80-84% pour une large gamme de vitesse a mené les industrielles, en particulier le domaine d'énergie solaire à l'utiliser comme un élément primordial dans les systèmes de pompage PV pour les faibles puissances. Dans l'étude proposée le modèle du BLDCM a été simplifié au modèle d'un moteur à courant continu et pour des raisons de simplicité, les pertes sont négligées [15].

L'équation de tension est approximative donnée par :

$$U_{ch} = 2RI_{ch} + 2k_e \omega \quad (5)$$

Les équations mécaniques sont :

$$C_m = C_r \quad (6)$$

$$C_m = k_e I_{ch} \quad (7)$$

$$C_r = A_c \omega^2 \quad (8)$$

La charge appliquée sur l'arbre du moteur est une pompe centrifuge construite pour répondre à des conditions précise de fonctionnement (débit Q à élever à une hauteur H). Le modèle de la pompe centrifuge utilisé est identifié par l'expression de Peleinder et Petermain [16].

$$H = C_1 \omega^2 - C_2 \omega Q - C_3 Q^2 \quad (9)$$

La caractéristique de la canalisation est donnée par l'équation suivante :

$$H = H_g + \Delta H \quad (10)$$

III. COUPLAGE DIRECT

Ce couplage est illustré dans la figure.1, le point de fonctionnement du système est obtenu par l'intersection des caractéristiques I-V du générateur et celle du groupe moteur-pompe [17-18]. La résolution de l'égalité des équations nom linéaires précédentes est réalisée par la méthode de Newton Raphson sous logiciel Matlab. Pour une demi-journée où l'éclaircissement est variable de la valeur minimale jusqu'à la valeur maximale (1000w/m^2). Il est montré ultérieurement que quelques points de fonctionnement ne correspondent pas aux puissances optimales admissibles. Dans le but de maximiser la quantité d'énergie débitée par le générateur, il faut forcer le système à fonctionner au maximum de la caractéristique P-V du générateur. Pour cette raison des techniques d'optimisation ont été appliquées.

IV. TECHNIQUES D'OPTIMISATIONS

L'amélioration du rendement du système de pompage PV nécessite la maximisation de la puissance du générateur PV. La première technique

d'optimisation est la technique de recherche de point de puissance maximal dit la vraie MPPT. Cette dernière force le système à fonctionner à puissance maximale, autrement dit à courant et tension optimaux. Cela est obtenu en intercalant un Hacheur entre la source PV et la charge jouant le rôle d'un adaptateur d'impédance. Le contrôle rigoureux du rapport cyclique de ce dernier permettra d'achever cette tâche par un suivi continu de la puissance théoriquement fournie prise comme référence. Une autre technique d'optimisation de puissance moins complexe que la vraie MPPT, dite technique d'optimisation de puissance sans compensation de température est utilisée. Elle est basée sur un choix convenable d'une tension de référence moyenne. Dans le cas du système étudié, cette tension est choisie dans l'intervalle 140-180V. Cette tension, prédéterminée, sera utilisée comme un paramètre de contrôle pour fixer le rapport cyclique du convertisseur CC-CC [06]. Un autre cas définit une troisième technique qui, au lieu d'utiliser une tension de référence fixe, on utilise une valeur proportionnelle à la valeur de la tension de circuit ouvert d'un module de mesure. Cela permet à la valeur de référence de tenir compte des variations de la température. Généralement on adopte une proportion de l'ordre de 68-77% de la tension du circuit ouvert. Cette technique est dite technique de recherche de puissance optimale avec compensation de température.

V. RESULTATS DE SIMULATION

La figure 3a représente les caractéristiques I-V du générateur PV et de la charge pour le couplage direct et la vraie MPPT. Le fonctionnement du système est amélioré par l'utilisation de la technique MPPT, où le moteur BLDCM est alimenté par des tensions plus proches aux valeurs nominales. L'effet de la technique MPPT par rapport au couplage direct est très clair pour les faibles valeurs de l'éclairement. La tension d'alimentation est augmentée d'une valeur aussi faible que 60V pour le couplage direct, à une valeur de 148V par suite de l'optimisation. Cette augmentation est accompagnée d'un accroissement de la puissance générée. La figure 3b montre le grand écart entre les puissances maximisées et celles du couplage direct. La figure 4 illustre les puissances optimisées pour les techniques citées précédemment.

Toutes ces techniques d'optimisation paraissent plus au moins comparables pour des fortes valeurs d'ensoleillement. Même le couplage direct prouve la bonne adaptation entre la charge et le générateur PV pour des forts ensoleillements. Le tableau 1 résume les valeurs des puissances débitées pour ces cas. Une perte de puissance de 63% de la puissance maximale pour un ensoleillement de 300w/m^2 est atteinte par la technique d'optimisation sans compensation de température. Ces pertes d'énergie sont moins importantes pour la technique avec compensation de température, la valeur récupérée est environ de 24.04% par rapport à la technique précédente.

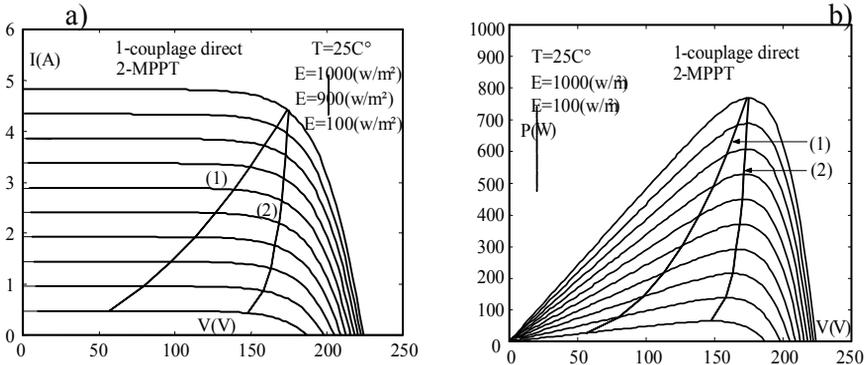


Figure 3.: Caractéristiques du système de pompage PV.
(a) Caractéristiques I-V (b) Caractéristiques P-V

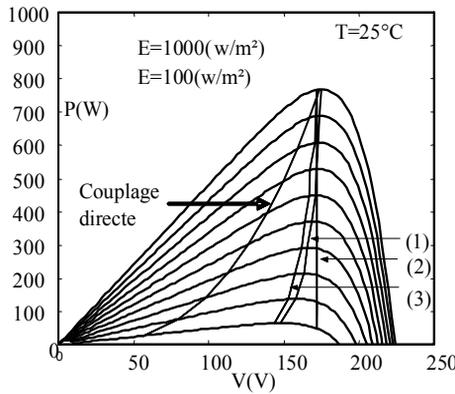


Figure 4 : Courbes des puissances du systèmes pour différentes techniques d'optimisation
(1): MPPT, (2): $V_{ref}=172V$, (3): $V_{ref}=0.76V_{co}$

Tableau.1 : Puissances générées pour différentes techniques d'optimisations

	Eclaircement $E(w/m^2)$	100	300	500	700	900
Puissance générée	Couplage direct.	27.35	141.11	303.24	493.21	683.02
	Vraie MPPT	66.22	216.06	372.44	529.81	688.45
	MPPT sans compensation	48.09	208.99	369.24	528.77	687.48
	MPTT avec compensation	64.01	212.41	368.52	526.76	686.88

Comme le rendement calculer est défini par le rapport entre la puissance obtenue a la sortie du convertisseur CC-CC et la puissance maximale disponible. Le rendement est de 100% pour la technique MPPT vraie, par contre le couplage direct est caractérisée par un faible rendement spécialement

pour les faibles valeurs d'éclairement. A titre d'exemple pour $E=100 \text{ w/m}^2$, le rendement est de 41.30%. Mais pour de $E= 900 \text{ w/m}^2$ et plus, les valeurs du rendement seront proches. Ce rapprochement prouve la bonne adaptation entre le groupe moto-pompe et le générateur pour le couplage direct a des forts éclairements. Pour les techniques sans et avec compensation de température, les rendements sont améliorés par rapport au couplage direct, même pendant les faibles éclairement (fig.5). Cette amélioration est acceptable par rapport à l'MPPT vraie pour la technique avec compensation.

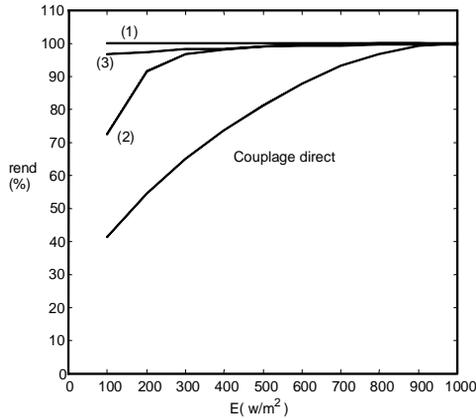


Figure 5 : Courbes des rendements du système pour différentes techniques d'optimisation

La figure.6 représente les allures des débits, en couplage direct et avec la technique d'MPPT en fonction de l'éclairement. Dans le cas du couplage direct le système ne commence à délivrer de l'eau qu'à un éclairement de 280 w/m^2 , par conséquent la maximisation de puissance force la pompe a fournir de l'eau à partir de 175 w/m^2 , où la valeur récupérée par rapport au couplage direct et de 1.29 m^3/s . La quantité d'eau gagnée pendant une demi-journée est de 8.29 m^3 .

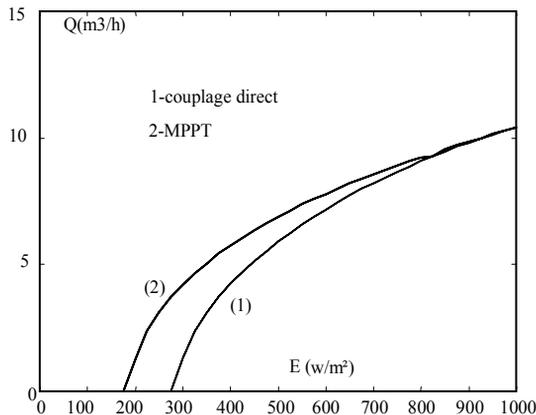


Figure 6. Courbes des quantités d'eau du système de pompage PV

VI. AMELIORATION DES TECHNIQUES D'OPTIMISATIONS

Devant les valeurs médiocres du rendement du système de pompage, spécialement pour la technique de la recherche du point de puissance optimale sans compensation de température qui est caractérisée par un rendement qui décroît jusqu'à la valeur 72%, et vue la complexité d'implémentation de la technique d'MPPT vraie alors des améliorations au niveau des techniques d'optimisation sans et avec compensation de température sont proposées.

VI.1. Amélioration de la technique MPPT sans compensation

Dans ce cas, au lieu d'utiliser une référence constante, un ajustement de cette valeur est réalisé en ajoutant une valeur proportionnelle au courant débité par le générateur, le coefficient de proportionnalité peut représenter une résistance shunt aux bornes de laquelle la mesure est réalisée

$$V_{ref}^* = V_{ref} + \Delta V \quad (11)$$

$$\Delta V = k_1 I \quad (12)$$

avec : $V_{ref} = 151.83$; $k_1 = 5.76$

VI.2. 6.2 Amélioration de la technique MPPT avec compensation

De la même façon, dans le but d'optimiser les points de puissances maximales de cette technique, une correction est suggérée. Au lieu de travailler avec une proportion fixe de la tension de circuit ouvert (m), cette dernière sera ajuster selon une fonction dépendant de l'éclairement. Dans ce cas, la correction du pourcentage de la tension de circuit ouvert prend la forme suivante:

$$V_{ref} = m_1 V_{co} \quad (13)$$

$$m_1 = a_0 + a_1 E \quad (14)$$

avec : $a_0 = 0,7718$; $a_1 = 1e-6$

Une meilleure amélioration aurait pu être obtenue par une correction selon une fonction d'ordre plus grand mais il est montré que l'apport de cette dernière est moindre par rapport à la complexité ajoutée en cas d'implémentation pratique. Pour mieux comparer les résultats obtenus par les différentes techniques, un indice des pertes d'énergie a été calculé pour chaque valeur de puissance. Cet indice est définie par l'équation.

$$\gamma = \frac{P_{max} - P_{max}^{améliorer}}{P_{max}} \% \quad (17)$$

D'après les courbes de puissance (fig.7 et 8) ainsi que les tableaux 2 et 3 en remarque en premier lieu l'amélioration globale du système et la diminution de l'indice des pertes d'énergie. De plus, il est évident que l'amélioration est plus importante pour la technique sans compensation de température que celle

avec compensation. Ces améliorations nécessitent l'information du courant du generateur pour la première techniques, qui peut être acquis directement à travers une résistance série. Par contre, la deuxième technique nécessite l'information de l'éclairement qui est plus difficile à mesurer. Pratiquement on recourt à la mesure du courant de court circuit d'un module de mesure qui s'avère approximativement proportionnel à l'éclairement. Dans ce cas; un compromis est nécessaire entre la fiabilité souhaitée et la complexité attendue.

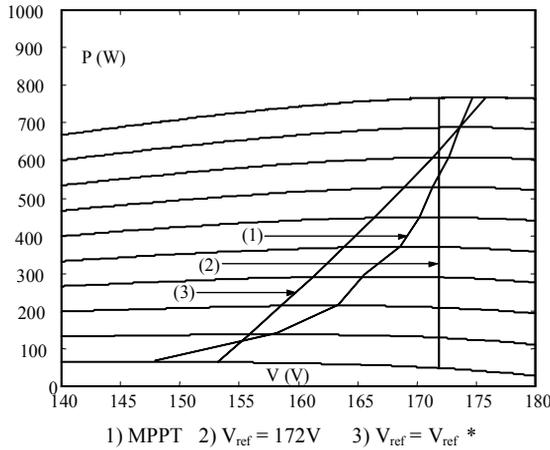


Figure.7.: Courbes des puissances optimales sans compensation de température améliorée

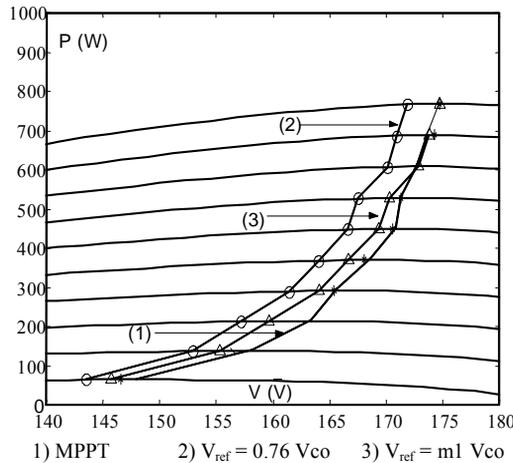


Fig.8 : Courbes des puissances optimales avec compensation de température améliorée

Tableau.2 : Indice de correction pour la technique sans compensation

Eclairement $E(w/m^2)$		100	300	500	700	900
Indice de correction	Sans correction $V_r=172(v)$	27.37	3.27	0.83	0.20	0.14
	Avec correction linéaire	3.54	1.43	1.09	0.39	0.04

Tableau.3 : Indice de correction pour la technique avec compensation

Eclairement $E(w/m^2)$		100	300	500	700	900
Indices de correction	Sans correction $V_r=0.76.V_{co}$	3.34	1.67	1.05	0.56	0.23
	Avec correction linéaire	2.99	1.27	0.72	0.26	0.04
	Avec fonction de correction de 2 ^{ème} ordre	2.91	1.15	0.65	0.20	0.04

VII. CONCLUSION

Le couplage direct est la connexion la plus simple, le moins chère devant toutes les techniques étudiées. La technique d'MPPT vraie représente un cas de fonctionnement idéal du système PV, devant la complexité du système de recherche des points maximaux, autres techniques comme la technique sans et avec compensation de température sont exploitées. L'implantation de ces deux techniques est assez simple par rapport à l'MPPT vraie mais leurs performances n'atteint pas celle de cette dernière, et certaine quantité d'énergie sera perdue. Pour remédier a se problème, l'amélioration de ces deux dernières techniques présentent un nouveau chemin pour les techniques d'optimisation. Les améliorations proposées dans ce travail restent toujours simple, facile pour la réalisation pratique, et donnent des puissances proche aux puissances idéales. Les résultats de simulation montrent que cette proposition mérite d'être vue plus profondément et concrétiser par une implémentation pratique.

RÉFÉRENCES

- Ilan Glasner “ Advantage Of Boost Vs.Buck Topology For Maximum Power Point Tracker In Photovoltaic Systems”. Tel-Aviv University, Faculty of Engi, Dept.of Electrical Eng. Israel, IEEE.1996, pp:355-358.
- H.D.Maheshappa ,and al. “An Improved Maximum Power Point Tracker Using Step-Up Converter With Current Locked Loop”. Renewable energy, vol.13, N°22,1998, pp:195-201.
- S.J. Chiang, and al. “ Residential Photovoltaic Energy Storage System”. IEEE Trans. on I. E, Vol 45, N°3, June 1998, pp:385-394.
- E. Mujadi. “ANN Based Peak Power Tracking for PV Supplied DC Motors”. Solar Energy, Vol. 69, N°.4, 2000, , pp:343-354.

- E. Mujadi. "PV Water Pumping With A Peck-Power Tracker Using A Simple Six Step Square-Wave Inverter". IEEE trans. on I. A. Vol.33, N°.3, may /june 1997, pp:714-721.
- M.S.Taha , K.Suresh. "Maximum Power Tracking Inverter For Photovoltaic Source Pumping Applications", Kirloskar Electric Co.Ltd., Unit IV, INDIA, pp:883-886.
- P. T.Kein and al." Dynamic Maximum Power Point Tracker For Photovoltaic Applications". University of Illinois department of Electrical and Computer Engi. Urbana, Illinois 61801, IEEE 1996, pp:1710-1716.
- B.k. Bose " Microcomputer Control Of A Residential Photovoltaic Power Conditioning System". IEEE Trans. I.A., Vol. IA-21, N°5, Sept./Oct. , 1985, pp:1182-1191 .
- C.Hua "Implementation Of A DSP- Controlled Photovoltaic System With Peak Power Tracking". IEEE trans. on I.E, vol.45, N°1, 1998, pp:99-107.
- I.H.Altas, and al. "A Novel On Line MPP Search Algorithm For PV Arrays ". IEEE, trans. on E.C, vol.11, N°4, December 1996, pp:748-754.
- K and L Khozam. " Optimum Matching Of Direct – Coupled Electromechanical Loads To A Photovoltaic Generator". IEEE trans. On E.C, vol.8 N°3 , September 1993, pp:343-349.
- F. zerhouni, and al."Approche Dans La Modélisation D'un Générateur Photovoltaïque", ICEL, november 13-15, U.S.T.Oran, Algeria, 2000, pp: 364-368.
- Z.M.Salaeh and al. "Optimum Switching Points For Array Reconfiguration Controler", Department of electrical Engi university of lowell, lowell MA 01854. IEEE,1990, pp:971-976.
- C. Hua and al. "Control Of DC/DC Converter For Solar Energy System With Maximum Power Tracking". National yulin university of science & technology, taiwan, pp:827-832.
- B.Azoui, M.Chabane."Expérimentation D'un Moteur A Aimants Permanents Sans Balais Collecteur Dans Un Système De Pompage Photovoltaïque", ICEL'2000, U.S.T.Oran, Algeria, pp:378-383.
- D.Weiner et A.Levinson. " An Optimal Operation Design Of A Photovoltaic D.C Motor Coupled Water Pumping System". Electric machines and power systems, 1996, pp:277-288..
- J. Applebaum " The Quality Of Load Matching In A Direct Coupling Photovoltaic System", IEEE trans. on E.C, vol. EC-2, N° 4 Decembre 1987,pp:534-541.
- Steady –State. " Performance Of DC Motors Supplied From Photovoltaic Generators With Step-Up Converter". IEEE trans. on E.C, vol 7, N°2 1992

NOMENCLATURE

A :	Coefficient d'idéalité du module	
A_c :	Constante de couple résistant	$w/(rd/s)^3$
C_m :	Couple moteur.	(N.m)
C_r :	Couple résistant.	(N.m)
E:	Eclairement	(w/m^2)
E_m :	Eclairement maximal	(w/m^2)
H:	Hauteur manométrique	(m)

H_g :	Hauteur géométrique	(m)
I :	Courant du générateur photovoltaïque	(A)
I_L :	Photo courant	(A)
I_{sat} :	Courant de saturation d'une cellule	(A)
I_{sc} :	Courant de court circuit du GPV	(A)
k :	Coefficient de boltzman	(J/°k)
k_e :	Constante de la f.c.e.m	(v/(rd/s))
Q :	Quantité d'eau	(m ³ /s)
R :	Résistance par phase	(Ω)
R_s :	Résistance série de générateur solaire	(Ω)
V_{ref} :	tension de reference	(V)
ω :	Vitesse de rotation	(rd/s)
h :	Angle horaire	
t_{sr} :	temps correspondant au levé du soleil	(heure).

ANNEXE

Tableau A1 : Caractéristiques du module photovoltaïque
température $T=25^{\circ}C$ et Eclairément $E=1000W/m^2$.)

Paramètres	Valeurs
Courant de court circuit $I_l(A)$	4.81
Tension de circuit ouvert $V_{co}(V)$	224
Résistance série(Ω)	2.25
Coeff. De variation du courant en fonction de la température $\alpha.t$ (%/°C)	0.006
Coeff. De variation de la tension en fonction de la température $\beta.t$ (%/°C)	0.04

Tableau A 2 : Caractéristiques du moteur BLDCM

Paramètres	Valeurs
Puissance (W)	690
Vitesse nominale (tr/min)	3000
Tension d'alimentation (V)	200-220
Courant nominal (A)	4.8
Résistance par phase (Ω)	1
Inductance par phase (mH)	5
Nombre de paires de pôles	3
Constante de la fem (V/rd/s)	0.47

Tableau A 3 : Caractéristiques de la pompe centrifuge

Paramètres	Valeurs
Hauteur minimale (m)	11
Débit max. Q_m (l/mn)	175
Vitesse d'entraînement nominale (tr/mn)	2840