



Evaluation de l'influence de l'inclinaison des modules photovoltaïques sur la production d'énergie d'un système hybride

M.Adouane^{#1}, M.Haddadi^{*2}, N.Benamrane^{#3}, K.Touafek^{#3}, A.Khelifa^{#3}, I.Tabet^{#3}

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

¹adouanemabrouk@yahoo.fr ³khaledtouafek@uraer.dz

^{*} *Laboratoire de dispositifs de communication et de conversion photovoltaïque, Ecole Nationale Polytechnique, Avenue Hassen Badi El Harrach, Algiers, Algeria*

²mourad_haddadi@yahoo.fr

Résumé— Afin de maximiser la production d'électricité d'une installation photovoltaïque, il convient d'orienter les modules de façon optimale afin de capter un maximum du rayonnement solaire. En effet, la direction du soleil est importante. L'objectif de ce travail consiste à évaluer l'intérêt énergétique (le gain) de la correction d'angle d'inclinaison des modules photovoltaïques orienté plein sud dans un système énergétique hybride photovoltaïque/ groupe électrogène.

Keywords— Système hybride, photovoltaïque, correction d'angle, Homer

I. INTRODUCTION

Dans la plupart des régions isolées et éloignées comme le Sahara algérien, le groupe électrogène diesel est la source principale d'énergie électrique. Pour ces régions, le prix d'extension du réseau électrique est exorbitant et le prix du carburant augmente progressivement avec l'isolement.

Au cours de cette dernière décennie, le recours aux énergies renouvelables a contribué d'une manière efficace à résoudre les problèmes dus à l'approvisionnement en énergie, non seulement au regard de critères écologiques, mais aussi en raison de leur structure décentralisée.

Une des caractéristiques qui limite l'utilisation des énergies renouvelables est liée à la variabilité de leurs ressources. Les fluctuations de la charge selon les périodes journalières ou annuelles ne sont pas forcément proportionnelles avec les ressources. Pour les régions isolées, la solution à adopter est certainement le couplage entre plusieurs sources de nature différentes ; on obtient alors un système hybride (multi sources). Dans notre cas on s'intéresse au système hybride solaire / Groupe électrogène de petite puissance.

Au cours des dix dernières années, le marché du photovoltaïque a connu une croissance très remarquable grâce aux différents facteurs stimulants dont le plus important est la réduction des coûts de production et les politiques de soutien. Ces facteurs stimulants rendent le retour sur l'investissement d'une installation photovoltaïque de plus en plus intéressant.

Or, pour produire un maximum d'électricité, un module photovoltaïque doit être incliné de façon perpendiculaire aux rayons du soleil. Ceci est très généralement impossible à obtenir car la position du soleil varie en fonction de l'heure de la journée et aussi en fonction des saisons.

L'orientation optimale de l'angle d'inclinaison des modules photovoltaïques, s'avère la méthode idéale pour optimiser la production du générateur photovoltaïque.

II. LES FACTEURS DE POSITIONNEMENT QUI INFLUENT LE RENDEMENT

A. L'angle d'incidence

Cela correspond au plan formé entre le panneau photovoltaïque et les rayons lumineux, voir figure 1. Cet angle a une grande importance. L'angle d'incidence optimal correspond à un angle de 90°. Chaque fois que cet angle diminue ou augmente, la surface en (m²) du panneau solaire exposé aux rayons lumineux diminue et donc en partant de la puissance du panneau solaire, le rendement diminue aussi.

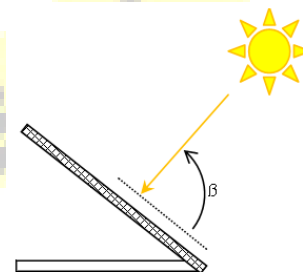


Fig 1: Angle d'incidence sur un module photovoltaïque

L'angle d'incidence joue un rôle majeur pour les rendements du panneau. Il est défini selon l'équation suivante :

$$R = 100 * \sin(\beta) \dots\dots\dots(1)$$



Le 3^{ème} Séminaire International sur les Energies Nouvelles et Renouvelables

The 3rd International Seminar on New and Renewable Energies

Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables,
Ghardaïa - Algérie 13 et 14 Octobre 2014



Avec : (R) le rendement en (%) et (B) l'angle d'incidence en (°)

La figure suivante représente le graphique représentatif du rendement en fonction de l'angle d'incidence :

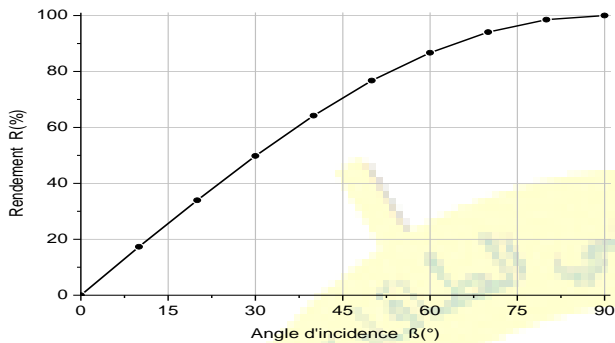


Fig 2: Rendement des modules PV en fonction de l'angle d'incidence

Ainsi, le rendement est maximal lorsque les rayons arrivent perpendiculairement (90°) au module photovoltaïque. Alors que pour un angle de 45°, le rendement n'est que de 70%.

B. L'angle d'inclinaison

L'angle d'inclinaison correspond à l'angle formé par le plan du panneau solaire par rapport à l'horizontale.

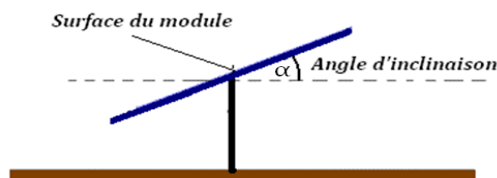


Fig 3: Angle d'inclinaison des modules photovoltaïques

L'évolution de la trajectoire du soleil variant selon les saisons, l'angle d'inclinaison (pour un panneau photovoltaïque n'étant pas muni d'un système rotatif) est plus réduite en été et plus important en hiver.

L'inclinaison d'un panneau photovoltaïque par rapport à l'horizontal est donnée par la relation suivante [1,2] :

$$\alpha = L - \sin^{-1} \left(0.4 * \sin \left(\frac{N * 360}{365} \right) \right) \dots\dots\dots(2)$$

Avec : (L) latitude du lieu, (N) nombre de jour entre l'équinoxe de printemps (21 mars de chaque année) et le jour considéré.

Cette relation permettant un rendement supérieur n'est valable que lorsque le panneau solaire en question est muni d'un système qui lui permet de s'incliner. Or on ne trouve ce système que très rarement.

III. ANGLE D'INCLINAISON OPTIMALE POUR LA REGION DE GHARDAÏA

Ghardaïa est situé au centre de la partie nord du Sahara algérien, à 600 km au sud d'Alger. Les coordonnées géographiques du site de collecte de données étaient les suivantes: 32 ° 26 'de latitude nord, 3 ° 46' de longitude est et 467m d'altitude. Le climat de Ghardaïa est semi-aride et désert avec un indice de clarté égale à 0.8, qui est un endroit idéal pour l'utilisation de l'énergie solaire.

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 (2). Nous obtenons les résultats suivants :

- Si nous changeons l'angle d'inclinaison chaque mois, le rayonnement maximale est atteint pour les angles suivants :

TABLE I
ANGLE D'INCLINAISON OPTIMALE MENSUELLE

Mois	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui
Inc (°)	55.37	49.53	40.00	27.78	17.26	10.32
Mois	Jui	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
Inc (°)	9.34	14.49	24.18	35.73	47.04	54.28

- Si nous changeons l'angle d'inclinaison quatre fois par ans, le rayonnement maximale est atteint pour les angles suivants :

TABLE III
ANGLE D'INCLINAISON OPTIMALE SAISONNIERE

Saisons	Hiver	Printemps	Été	Automne
Inc (°)	55.821	32.177	8.950	31.758

On notera que: En hiver, lorsque le soleil est bas (le soleil est au plus bas le 21 Décembre) par rapport à l'horizon, le module produira d'autant plus que son inclinaison est proche de 56°. Au contraire, en été, lorsque le soleil est haut (le soleil est au plus haut le 21 juin) par rapport à l'horizon, le module produira d'autant plus que son inclinaison est proche de 9°.



Une inclinaison autour de 32° est favorisée pour les modules au Printemps et à l'automne (équinoxe) [3-9].

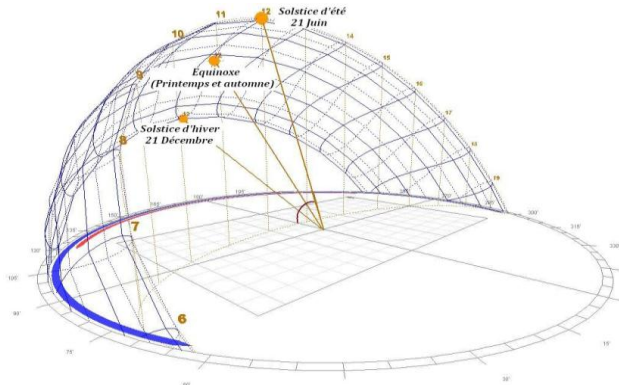


Fig 4: Diagramme de la position du Soleil

IV. SYSTÈMES PHOTOVOLTAÏQUES ORIENTABLES

Concerne l'inclinaison des panneaux par rapport à l'horizontale, l'approche se fonde sur la hauteur du soleil dans le ciel. Comme on peut le voir sur le graphique ci-dessous, la position du soleil dans le ciel est plus haute en été qu'en hiver.

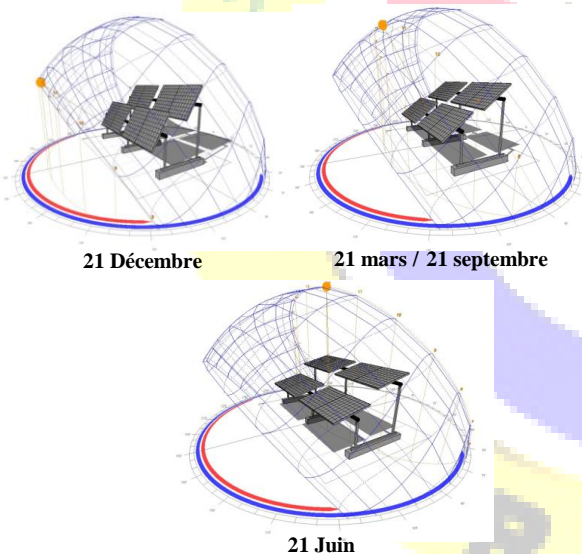


Fig 5: Inclinaison par rapport aux rayons du soleil

Avec le système photovoltaïque orientable proposé, on peut modifier l'inclinaison tous les mois, mais par facilité, on peut également choisir une inclinaison pour chaque saison. L'orientation optimale de l'angle d'inclinaison des modules photovoltaïques, s'avère la méthode idéale pour optimiser le générateur PV et dans ce cas de figure, on distingue deux méthodes:

A. Première méthode:

Le système de poursuite est commandé par une électronique. En pratique, ce genre de réalisation revient très cher pour une augmentation du rendement. Ces systèmes qui sont, en général installés en milieu saharien fonctionnent souvent sous des conditions climatiques très hostiles, des vents de sable très fréquents avec des niveaux et du gradient de température très important pouvant facilement endommager les commandes électroniques.

B. Deuxième méthode:

C'est la variation de l'angle d'inclinaison, mensuellement, en concevant et en réalisant une structure porteuse avec plusieurs positions, chaque position correspondant à une inclinaison mensuelle optimisée. C'est la méthode la moins chère et la plus pratique. A Ghardaïa, l'orientation plein sud est la meilleure orientation possible pour un module photovoltaïque. C'est avec cette orientation qu'il produira le maximum d'électricité.

V. APPLICATION: SYSTÈME HYBRIDE AUTONOME

Plusieurs études ont été menées afin d'estimer les dimensions appropriées des systèmes hybrides autonomes en Algérie. Pour montrer l'influence de l'angle d'inclinaison des modules photovoltaïques sur la production d'énergies du système hybride photovoltaïque / groupe électrogène, nous avons utilisé le logiciel Homer.

Le système hybride étudié est porté sur la figure suivante.

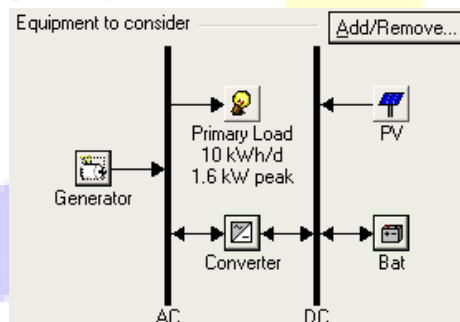


Fig 6. Le système hybride considéré pour l'optimisation.

Le logiciel Homer est un outil de conception des microcentrales, il permet de simuler et d'optimiser les systèmes de puissance autonomes ou connectés au réseau. Récemment, il est a été largement utilisé dans le domaine des énergies renouvelables telles que les études technico-économique des systèmes hybrides en Algérie [10], l'Arabie arabe [11]. Il peut être utilisé avec n'importe quelle combinaison : photovoltaïques, éoliennes, hydroélectricité, biomasse, groupe électrogène, micro turbines, batteries et le stockage par l'hydrogène, servant à la fois les charges électriques et thermiques.



Le 3^{ème} Séminaire International sur les Energies Nouvelles et Renouvelables

The 3rd International Seminar on New and Renewable Energies

Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables,
Ghardaïa - Algérie 13 et 14 Octobre 2014



A. Rayonnement solaire

Les données météorologiques (rayonnement solaire) dans l'ensemble de l'année 2012 a été mesurée à l'Unité de recherche appliquée en énergies renouvelables (URAER) qui se trouve à Ghardaïa ville. Ceci est illustré sur la figure 1.

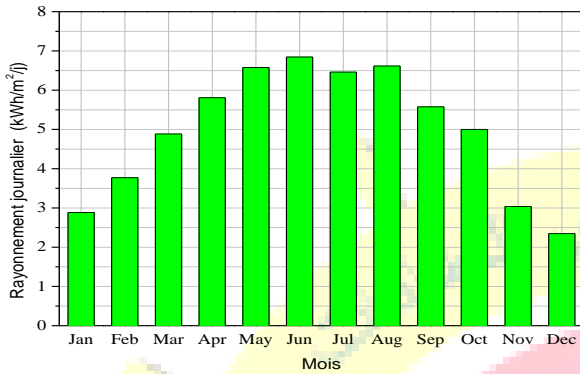


Fig 7 . Rayonnement solaire mensuel moyen quotidien sur plan horizontal pour le site de Ghardaïa

Les données de rayonnement solaire pour la zone distante sélectionnée ont été estimées entre 2.35kWh/m2/jour et 6.86kWh/m2/jour avec un rayonnement solaire annuel moyen estimé à 4.98kWh/m2/jour. On peut noter que le rayonnement solaire est au maximum qu'à partir du mois de mai jusqu'à Août, alors qu'il est au minimum de Novembre à Février.

B. Profil de charge

Dans cette étude, un modèle de la maison hypothétique d'une famille composée de sept (07) membres est considéré. Les ménages dans les zones rurales de Ghardaïa sont simples et ne nécessitent pas de grandes quantités d'énergie électrique pour l'éclairage et les appareils électriques. Le profil de consommation est représenté sur la Figure 10.

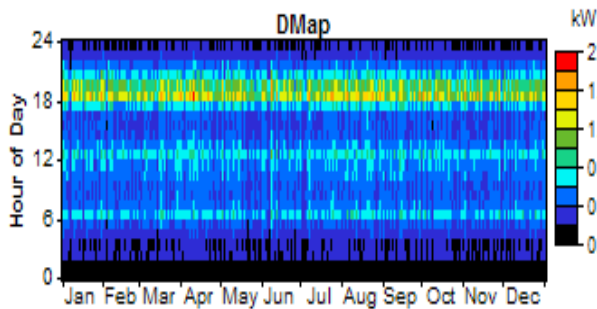


Fig 8 : Le profil de charge considérée.

On note qu'une demande de puissance relativement constante sur toute l'année, ainsi que la consommation est importante dans le soir que la journée. Il culmine à trois points: au petit matin, à midi et au début de la nuit, où tous les membres de la famille sont réunie.

VI. RESULTATS ET DISCUSSIONS

Une fois les spécifications décrites antérieures ont été mis dans Homer, On effectue des simulations pour déterminer la meilleure combinaison techniquement et économiquement répond aux exigences.

A. Sans correction d'angle

Sensitivity variables
Diesel Price (\$/L) 0.2

Double click on a system below for simulation results.

	PV (kW)	Gen (kW)	Bat (kW)	Conv. (kW)	Disp. Strgy	Initial Capital	Operating Cost (\$/yr)	Total NPC	COE (\$/kWh)	Ren. Frac.	Capacity Shortage	Diesel (L)	Gen (hrs)
	1.04	3.5	6	2.5	CC	\$ 8,880	858	\$ 18,043	0.463	0.26	0.00	1,366	852
		3.5	6	2.5	CC	\$ 3,880	1,386	\$ 18,679	0.479	0.00	0.00	2,538	1,595
	1.04	3.5		1.0	CC	\$ 6,900	4,626	\$ 56,278	1.444	0.00	0.00	7,552	7,378
		3.5			CC	\$ 1,300	5,449	\$ 59,472	1.526	0.00	0.00	8,962	8,760

B. Avec correction d'angle

Sensitivity variables
Diesel Price (\$/L) 0.2

Double click on a system below for simulation results.

	PV (kW)	Gen (kW)	Bat (kW)	Conv. (kW)	Disp. Strgy	Initial Capital	Operating Cost (\$/yr)	Total NPC	COE (\$/kWh)	Ren. Frac.	Capacity Shortage	Diesel (L)	Gen (hrs)
	1.04	3.5	6	2.5	CC	\$ 8,880	833	\$ 17,770	0.456	0.29	0.00	1,304	817
		3.5	6	2.5	CC	\$ 3,880	1,386	\$ 18,679	0.479	0.00	0.00	2,538	1,595
	1.04	3.5		1.0	CC	\$ 6,900	4,525	\$ 55,202	1.417	0.00	0.00	7,388	7,218
		3.5			CC	\$ 1,300	5,449	\$ 59,472	1.526	0.00	0.00	8,962	8,760

Fig 9 : Résultats de simulation sur Homer

Les résultats sont montrés dans la Figure9 où les systèmes optimaux sont classés en fonction de leur faisabilité technique et économique.

Il convient de noter que le premier système composé de modules photovoltaïques combinée avec un groupe électrogène diesel associé à des batteries, est plus favorisé pour les sites isolés, car le coût total du système est le plus bas.

Ce résultat est très important car il attire l'attention que la correction d'angle des modules photovoltaïques dans un système énergétique hybride a un impact direct sur la durée de fonctionnement du groupe électrogène, on la réduisant considérablement, ce qui réduit la quantité de carburant consommé d'environ 50 Litres/ans, ainsi que la maintenance du système.

VII. CONCLUSIONS

Grâce à cette étude, une contribution à l'évaluation de l'impact de l'angle d'inclinaison des modules photovoltaïques sur la production et l'économie d'énergie d'un système énergétique hybride dans la région de Ghardaïa a été réalisée. On a constaté qu'une économie considérable de carburant peut être réalisée dans les installations photovoltaïques munies d'un dispositif de correction d'angle d'inclinaison. Pour ces régions où le prix du carburant augmente progressivement avec l'isolement, une économie de carburant est capitale.



Le 3^{ème} Séminaire International sur les Energies Nouvelles et Renouvelables

The 3rd International Seminar on New and Renewable Energies

Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables,
Ghardaïa - Algérie 13 et 14 Octobre 2014



REFERENCES

- [1] 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.
- [2] <http://www.tpepanneauxsolaires.fr/rentabilite>
- [3] S. Silvestre, 'Review of System Design and Sizing Tools', in *Practical Handbook of Photovoltaics*, Amsterdam: Elsevier Science, pp. 543 - 561, 2003.
- [4] I. Reda and A. Andreas, 'Solar Position Algorithm for Solar Radiation Applications', *Solar Energy*, Vol. 76, N°5, pp. 577 - 589, 2004.
- [5] R. Perez, P. Ineichen, R. Seals, J. Michalsky and R. Stewart, 'Modeling Daylight Availability and Irradiance Components from Direct and Global Irradiance', *Solar Energy*, Vol. 44, N°5, pp. 271 - 289, 1990.
- [6] M. Capderou, 'Atlas Solaire de l'Algérie', Modèles Théoriques et Expérimentaux, Vol. 1, T1, Office des Publications Universitaires, EPAU, Algérie, 375 p., 1987.
- [7] A. Mefti, M.Y. Bouroubi et A. Khellaf, 'Analyse Critique du Modèle de l'Atlas Solaire de l'Algérie', *Revue des Energies Renouvelables*, Vol. 2, N°2, pp. 69 - 85, 1999.
- [8] A. Labouret, 'Energie Solaire Photovoltaïque', Ed. Dunod, France, 302 p., 2003.
- [9] Friedr Vieweg, Sohn Verlagsgesellschaft mbH, 'Ses éléments des projets de construction', Dunod, Paris, 1996, pour la 7^e édition française.
- [10] Himri Y, Boudghene Stamboulib A, Draouic B, Himrid S. Techno-economical study of hybrid power system for a remote village in Algeria. *Energy* 2008;33:1128-36.
- [11] Rehman S. Prospects of wind farm development in Saudi Arabia. *Renewable Energy* 2004;30:447-63.
- [12] A. Khedim, 'L'Energie Solaire, Utilisation Thermique et Photovoltaïque', ANEP, 359 p., 2005.
- [13] H.R. Ghosh, N.C. Bhowmik and M. Hussain, 'Determining Seasonal Optimum Tilt Angles, Solar Radiations on Various Oriented, Single and Double Axis Tracking Surfaces at Dhaka', *Renewable Energy*, Vol. 35, N°6, pp. 1292 - 1297, 2010.
- [14] <http://tpe-panneaux-solaires-e-monsite.com/pages/ii-le-rendement-d-un-panneau-solaire-photovoltaïque.html>
- [15] A. M'Raoui, S. Mouhous, A. Malek et B. Benyoucef, 'Etude statistique du rayonnement solaire à Alger', *Revue des Energies Renouvelables* Vol. 14 N°4 (2011) 637 - 648.

