

## Etude de la Complémentarité des Energies Solaires et Eoliennes pour un Système Hybride à Energies Renouvelables

*Mustapha Elyaqouti<sup>1</sup>, Omar Nait Mensour<sup>2</sup>, Lahoucine Bouhouch<sup>1</sup>, and Ahmed Ihlaï<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>ERTIAER, EST d'Agadir, Université Ibn Zohr, Agadir, Maroc

<sup>2</sup>LMER, FS d'Agadir, Université Ibn Zohr, Agadir, Maroc

Copyright © 2016 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:** In this work, we present the study of the complementarity of solar and wind energy in order to evaluate the profitability of a renewable energy system that can be installed at both sites; one located in the city center and the other in the southeast of the city of Agadir. The results show that the studied sites do not present an interesting complementarity between the two forms of energy but rather an important dominance of the solar potential relative to the wind potential.

**KEYWORDS:** Solar energy; Wind power; Complementarily; Wind power.

**RESUME:** Dans ce travail, nous présentons l'étude de la complémentarité des énergies solaire et éolienne, afin d'évaluer la rentabilité d'un système hybride à énergies renouvelables pouvant être installé au niveau de deux sites; l'un situé au centre de ville et l'autre au Sud-Est de la ville d'Agadir. Les résultats obtenus montrent que les sites étudiés ne présentent pas une complémentarité intéressante entre les deux formes d'énergie mais plutôt une importante dominance du potentiel solaire par rapport au potentiel éolien.

**MOTS-CLEFS:** Energie solaire; Energie éolienne; Complémentarité; Puissance éolienne.

### 1 INTRODUCTION

Le Maroc dispose d'un excellent potentiel en énergies renouvelables, notamment en énergie solaire et éolienne [1]. Par cette raison l'énergie renouvelable est reconnue comme une source essentielle pour l'avenir, non seulement pour le Maroc mais aussi pour le monde. Cela est dû principalement au fait que les sources d'énergie renouvelables ont certains avantages par rapport aux sources classiques à base de combustibles fossiles. Toutefois, les préoccupations environnementales et les sources d'énergie limitées rendent les technologies de l'énergie renouvelable comme un bon candidat par rapport aux sources d'énergies classiques [2]. Les plus sollicitées de ces énergies renouvelables sont le photovoltaïque et l'éolien [3]. La production d'électricité au moyen d'un système hybride combinant plusieurs sources d'énergies renouvelables est d'un grand intérêt pour les pays en développement qui possèdent de nombreuses régions, isolées et éloignées des réseaux de distribution d'électricité [4]. Ces systèmes peuvent être considérés comme une excellente solution pour l'électrification des zones rurales où l'extension du réseau est difficile et non rentable [5] et aussi pour la production et l'injection des puissances électriques excédentaires dans le réseau électrique. Donc les systèmes hybrides peuvent être un moyen approprié pour atteindre des solutions économiques vis-à-vis aux coûts d'investissement [6].

Le système hybride de production de l'énergie dans sa vue la plus générale, est celui qui combine et exploite plusieurs sources disponibles facilement mobilisables [7]. Il consiste en l'association de deux ou plusieurs technologies complémentaires de manière à accroître la fourniture d'énergie par une meilleure disponibilité.

La production de l'énergie électrique en combinant l'énergie éolienne et solaire dans un système hybride est une solution intéressante pour les sites isolés ayant des potentiels éolien et solaire importants. Cette combinaison permet de mieux répondre à la demande continue d'énergie de la part de l'utilisateur et de renforcer l'autonomie du système en énergie, ce qui entraîne un système hybride efficace et rentable [8-9]. En termes de développement écologique et économique, le couplage d'un système Photovoltaïque-Eolien (PV-E) peut être très intéressant lorsque les conditions locales sont favorables, du point de vue de la disponibilité du vent et de l'ensoleillement [10].

Les installations d'énergie solaire photovoltaïque, vue leur caractère d'autonomie, doivent être dimensionnées pour qu'elles fournissent de l'énergie continuellement durant toute l'année. Cela exige la détermination du nombre de modules nécessaires pour le mois le plus défavorable de l'année. Par conséquent, cela conduit à un surplus d'énergie pour le reste des mois et à une augmentation considérable du coût du projet [11].

Les périodes de l'année ayant une faible insolation correspondent à celles ayant un meilleur potentiel éolien. Il est donc évident qu'une complémentarité entre l'énergie éolienne et solaire est souhaitable, d'autant plus que le couplage de ces deux sources d'énergies est la solution la plus sûre et la moins coûteuse pour des systèmes autonomes d'électrification [12].

Dans cette optique, nous présentons dans ce papier une étude de la complémentarité des énergies solaire et éolienne pour un système hybride à énergies renouvelables au niveau de la ville d'Agadir (Maroc). Pour ce faire, nous exploitons les données relatives au gisement solaire et éolien durant l'année 2012. Ces données sont collectées par deux stations météorologiques : "Site 1" et "Site 2". Concernant le "Site 1" il correspond à la station installée dans le laboratoire de l'ERTAIER de l'EST d'Agadir. Quant au "Site 2", il correspond à la station installée environ à 10 km au Sud-Est de la ville d'Agadir.

Notre présent papier est organisé comme suit: nous commençons par une introduction, puis dans la section 2 nous présentons la description des sites concernés par les mesures météorologiques utilisées. Dans la section 3, nous étudions la complémentarité des deux formes d'énergie solaire et éolienne, au niveau des deux sites choisis. La section 4 expose les résultats obtenus ainsi que leurs discussions. Une conclusion sur ce travail et quelques perspectives sont présentées à la fin de ce document.

## 2 STATION METEOROLOGIQUE

Les données météorologiques, tels que l'éclairement solaire direct et diffus, la température ambiante, l'humidité et la vitesse du vent et sa direction, sont collectées dans le "Site 1" par l'intermédiaire de différents capteurs reliés à la centrale d'acquisition *Cambell* de type CR10X installée dans le laboratoire de l'ERTAIER de l'EST d'Agadir (Figure 1). Ces données sont collectées toutes les 10 secondes. Elles peuvent être présentées sous différents formats; moyenne, max, min, etc., selon la configuration choisie au niveau de la centrale d'acquisition.



**Fig. 1. Station météorologique équipée de la centrale d'acquisition Cambell de type CR10X**

Les coordonnées géographiques du "Site 1" sont : 9.579° W pour la longitude, 30.406° N pour la latitude et 41 m d'altitude. Pour le "Site 2", ses coordonnées sont : 9.475° W pour la longitude, 30.355° N pour la latitude et 27 m d'altitude [17].

### 3 ETUDE DE LA COMPLEMENTARITE SOLAIRE-EOLIEN

#### 3.1 CARACTÉRISTIQUES ÉNERGÉTIQUES RELATIVES AU VENT

Le traitement statistique des données relatives au vent est une étape très importante. Elle permet la détermination du potentiel éolien d'un emplacement donné et par conséquent d'estimer l'énergie éolienne qu'on peut produire à cet emplacement [13]. Ce traitement apporte des informations intéressantes aux exploiters de l'énergie éolienne telle que les fluctuations de la vitesse du vent. En effet, la vitesse moyenne annuelle du vent donne un ordre de grandeur concernant l'importance du gisement éolien du site considéré. Les vitesses moyennes et maxima mensuelles informent sur les variations saisonnière et interannuelle [8].

Concernant les caractéristiques du vent, nous pouvons citer la vitesse moyenne mensuelle du vent  $V_{moy}$ , donnée par l'expression (1). Ce n'est en effet que la moyenne arithmétique de tous les relevés effectués de la vitesse, selon un échantillonnage fréquent et régulier [8].

$$V_{moy} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N V_i \quad (1)$$

Avec  $N$  le nombre de points relevés et  $V_i$  la moyenne horaire de la vitesse du vent.

Cette vitesse moyenne mensuelle du vent  $V_{moy}$  engendre une énergie conduisant à la puissance disponible dans ce flot de vent. Cette puissance, exprimée en Watt, peut s'obtenir par la relation (2) :

$$P_{éolienne} = \frac{1}{2} \rho s V_{moy}^3 \quad (2)$$

Où  $\rho$  est la densité de l'air ( $\rho = 1.23 \text{ Kg/m}^3$ ),  $s$  la surface balayée par les pales de l'éolienne en  $\text{m}^2$  et  $V_{moy}$  la vitesse moyenne du vent en  $\text{m/s}$ .

La densité de puissance du vent (en  $\text{W/m}^2$ ) est donnée par l'équation (3), elle exprime la puissance éolienne disponible par unité de surface.

$$P_{éolienne} = \frac{1}{2} \rho V_{moy}^3 \quad (3)$$

La densité de puissance moyenne du vent (en  $\text{W/m}^2$ ) peut éventuellement être déduite de l'équation (1), conduisant à l'expression (4) :

$$P_{éolienne, moy} = \frac{1}{2} \rho \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N V_i^3 \quad (4)$$

La densité d'énergie éolienne moyenne  $W_{éolienne, moy}$  est l'énergie disponible par unité de surface, balayée par les pales pour une durée  $\Delta t$ , peut être calculée à partir de l'équation (4), selon la relation (5) :

$$W_{éolienne, moy} = P_{éolienne, moy} \Delta t \quad (5)$$

#### 3.2 ETUDE DE LA COMPLÉMENTARITÉ DES RESSOURCES ÉOLIENNES ET SOLAIRES

L'objectif principal d'un système hybride à sources d'énergie renouvelables est d'assurer l'alimentation en énergie selon la demande de la charge. A cela s'ajoute, si possible la production du maximum d'énergie à partir des sources d'énergies renouvelables, en gardant la qualité, la continuité et la stabilité de l'énergie fournie [14,15] avec un coût minimum de l'énergie consommée par les utilisateurs. Les sources d'énergie comme le soleil et le vent ne délivrent pas une puissance constante, et leur combinaison peut permettre de parvenir à une production électrique de manière continue. Dans plusieurs régions, les journées ensoleillées sont en général caractérisées par une activité éolienne faible alors que les vents forts sont observés plutôt lors de journées nuageuses ou pendant la nuit [16].

Afin de quantifier la complémentarité entre l'énergie éolienne et l'énergie solaire pour la ville d'Agadir, nous avons choisi d'utiliser deux paramètres parmi ceux cités par certains auteurs dans la littérature scientifique [9].

Le premier paramètre est le coefficient de corrélation entre les énergies moyennes journalières éolienne et solaire de chaque mois. Ce coefficient quantifie la simultanéité temporelle des deux sources. Il est donné par la relation (6) :

$$C_c = \frac{\sum_{i=1}^{12} (W_{\text{éolienne},i} - W_{\text{éolienne},\text{moy},i}) (W_{\text{solaire},i} - W_{\text{solaire},\text{moy},i})}{\sqrt{\left(\sum_{i=1}^{12} (W_{\text{éolienne},i} - W_{\text{éolienne},\text{moy},i})^2\right) \left(\sum_{i=1}^{12} (W_{\text{solaire},i} - W_{\text{solaire},\text{moy},i})^2\right)}} \quad (6)$$

Avec  $W_{\text{éolienne},i}$  et  $W_{\text{solaire},i}$  : Valeurs des densités moyennes journalières des énergies éolienne et solaire pour le mois  $i$ , et  $W_{\text{éolienne},\text{moy},i}$  et  $W_{\text{solaire},\text{moy},i}$  : Valeurs des densités moyennes annuelles de ces énergies.

$$R = \frac{W_{\text{éolienne},\text{moy},\text{an}}}{W_{\text{solaire},\text{moy},\text{an}}} \quad (7)$$

Où  $W_{\text{éolienne},\text{moy},\text{an}}$  et  $W_{\text{solaire},\text{moy},\text{an}}$  sont les valeurs de la densité moyennes annuelles des énergies éoliennes et solaires.

Une bonne complémentarité entre les deux formes d'énergie solaire et éolienne correspond au coefficient de corrélation  $C_c$  négatif le plus proche de -1. Tandis qu'une valeur de  $C_c$  proche de +1, confirme que les potentiels des deux formes d'énergie varient dans le même sens.

#### 4 RESULTATS ET DISCUSSIONS

Afin d'estimer les ressources solaire et éolienne des deux sites étudiés, nous exploitons les données météorologiques tels que l'irradiation solaire globale et la vitesse du vent relevées par la station météo installée dans le "Site 1" ainsi que celles fournies par la station installée dans le "Site 2".

Après traitement de ces données, les figures 2 et 3 représentent respectivement, la variation de la vitesse journalière du vent et celle de la vitesse moyenne mensuelle pour les deux sites sous étude.

Ces relevés montrent qu'au niveau du "Site 1" (Fig. 3-a), au courant de l'année 2012, la vitesse mensuelle moyenne varie entre 2.35 m/s et 3.63 m/s. Ces vitesses sont observées, respectivement aux mois d'octobre et d'avril. Par conséquent, au courant de l'année 2012, ce "Site 1" présente une vitesse moyenne annuelle de 2.76 m/s.

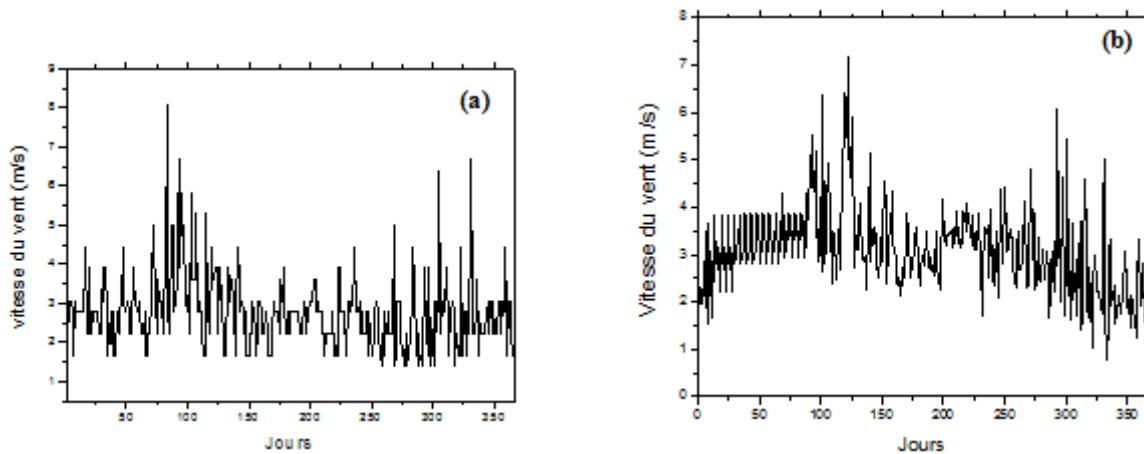
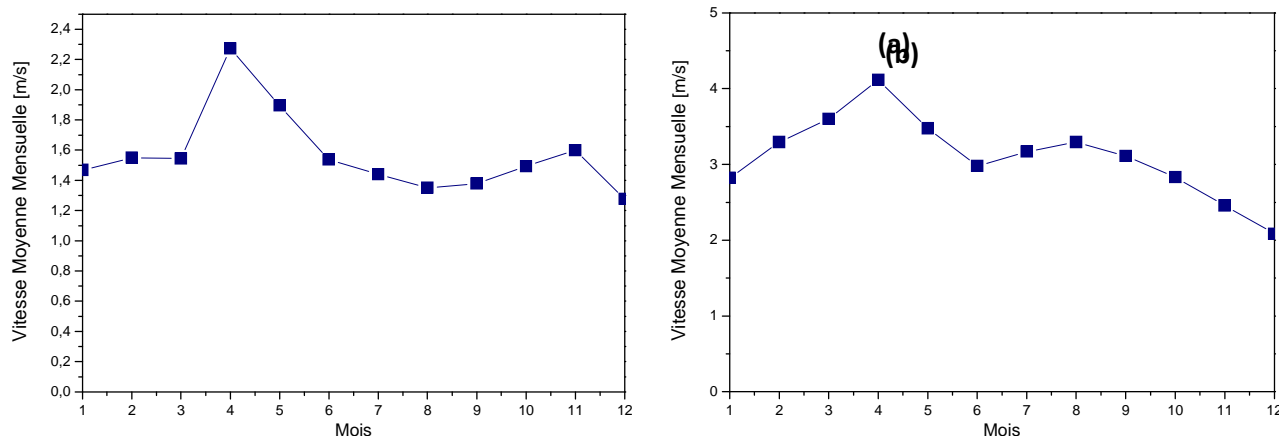


Fig. 2. Variation de la vitesse journalière du vent pour l'année 2012 (a) Site 1, (b) et "Site 2"



**Fig. 3. Variation de la vitesse moyenne mensuelle du vent pour l'année 2012 (a) "Site 1", (b) "Site 2"**

De même, pour le "Site 2" au courant de la même année 2012 (Fig. 3-b), la vitesse mensuelle moyenne varie entre 2.09 m/s et 3.97 m/s. Ces vitesses sont observées, respectivement aux mois de décembre et d'avril. Par conséquent, ce "Site 2" présente une vitesse moyenne annuelle égale à 2.98 m/s.

Ces données montrent que les sites étudiés ont un potentiel éolien relativement faible du fait que le vent souffle à une vitesse faible inférieure à 4 m/s.

La quantification analytique de la complémentarité entre les énergies solaire et éolienne, est effectuée en utilisant le coefficient de corrélation  $C_c$  et le rapport  $R$ . Le résultat des calculs est résumé dans le tableau 1.

**Tableau 1. Valeurs du paramètres  $C_c$  et  $R$**

Site	$C_c$	$R$
"Site 1"	0.53	0.03
"Site 2"	0.61	0.12

Après le calcul de ces deux paramètres  $C_c$  et  $R$  pour les deux sites "Site 1" et "Site 2", nous remarquons que :

- les densités d'énergie solaire sont beaucoup plus importantes que celles de l'énergie éolienne, autrement un faible potentiel éolien caractérise les sites étudiés. Cela se traduit par les faibles valeurs calculées du rapport  $R$  (0.03 et 0.12), ce qui est aussi en harmonie avec les mesures présentées dans la figure 4.
- les densités d'énergie solaire et éolienne varient dans le même sens, ce qui est affirmé par les valeurs positives des coefficients de corrélations calculées  $C_c$  (0.53 et 0.61). Cela montre qu'il n'y a pas une bonne complémentarité entre ces deux formes d'énergie pour les deux sites étudiés. Cela est aussi conforme aux relevés qui sont présentés dans la figure 4.

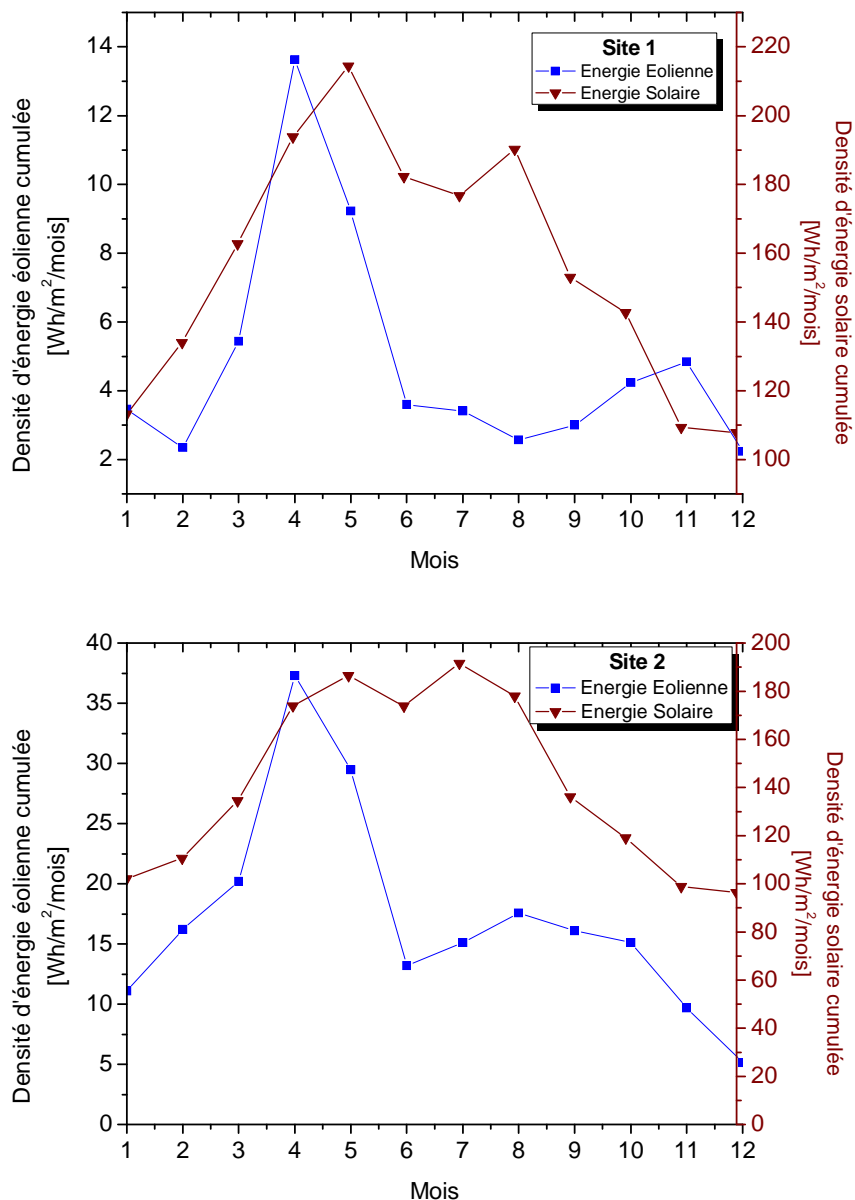


Fig. 4. Variation des densités des énergies solaires et éoliennes moyennes cumulée pour l'année 2012

Pour les sites étudiés l'hybridation solaire/éolien n'est pas d'un grand intérêt du point de vue économique, étant donné que les densités d'énergies des deux sources varient dans le même sens. A cela s'ajoute le potentiel éolien faible caractérisant les sites étudiés puisque la vitesse moyenne mensuelle maximale du vent ne dépasse pas les 4 m/s et qui reste presque égale ou inférieure à la vitesse de démarrage de la majorité des aérogénérateurs industriels.

Enfin, l'étude que nous avons menée nous laisse penser à l'exploitation d'une seule forme d'énergie. Bien sûr, le choix entre l'installation de l'une ou l'autre des deux sources d'énergie solaire et éolienne exige une étude technico-économique afin de sélectionner la solution la plus rentable.

### 5 CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Dans cet article nous avons présenté l'étude de la complémentarité des énergies solaire et éolienne pour deux sites de la ville d'Agadir ("Site 1" situé presque au centre de la ville et le "Site 2" situé à 10 km au Sud-Est de la ville) afin de juger la rentabilité d'un système hybride éolien/solaire installé dans cette ville. Les résultats obtenus montrent que, d'une part les deux sites étudiés ne disposent pas d'un potentiel éolien important et d'autre part la complémentarité entre les deux sources

d'énergies solaire et éolienne n'est pas assez bonne que nous l'espérons. Ceci nous conduit à prédire, pour les futures installations hybrides, qu'il sera judicieux de n'utiliser qu'une seule des deux sources d'énergie renouvelables traitées dans ce papier.

Les perspectives de notre travail visent à effectuer cette étude sur plusieurs années afin d'avoir des indications plus fiables et de faire une étude techno-économique dont le but est de déterminer la technologie la plus adaptée pour les sites étudiés.

## RÉFÉRENCES

- [1] Sara Atouk, "*Les énergies renouvelables et les populations rurales pauvres : Le cas du Maroc*", Essai présenté au Centre universitaire de formation en environnement en vue de l'obtention du grade de maître en environnement, Université de Sherbrooke, 2013.
- [2] Taha Ahmed Tawfik Hussein, "*Estimation of Hourly Global Solar Radiation in Egypt Using Mathematical Model*", International Journal of Latest Trends in Agriculture & Food Sciences, Vol. 2, No 2, 2012, pp. 74-82.
- [3] Yamina Hasni, Maher Chaabene, "*Réseau électrique hybride autonome :Supervision et gestion des sources*", International Renewable Energy Congress, November 5-7,2010, Sousse, Tunisia, pp. 125-132.
- [4] A. Ould Mohamed Yahya, A. Ould Mahmoud, I. Youm, "*Modélisation d'un système de stockage intégré dans un système hybride (PV/Eolien/Diesel)*", Revue des Energies Renouvelables, Vol. 10, N°2, 2007, pp. 205-214.
- [5] S. Ashok, "*Optimized model for community-based hybrid energy system*", Renewable Energy, Vol. 32, issue 7, 2007, pp. 1155-1164.
- [6] F. Fattahi, A.M. Hashimov, N.M. Tabatabaei, S. Guliyeva, "*Simulation and improvement of operation of DG systems connected to power system*", International Journal on Technical and Physical Problems of Engineering (IJTPE), Vol. 4, No 1, Issue 10, 2012, pp. 91-96.
- [7] D. Saheb-Koussa, M. Belhamel, "*Production d'électricité sans interruption moyennant un système hybride (Eolien - Photovoltaïque - Diesel)*", Revue des Energies Renouvelables, ICRES-07. Tlemcen, 2007, pp. 121-128.
- [8] Hassan Nfaoui, "*Caractéristique du gisement éolien Marocain et optimisation d'un système aérogénérateur/Groupe électrogène pour l'électrification des villages isolés*", Thèse de Doctorat d'Etat, Université Mohammed V, Agdal Rabat, 2004.
- [9] Ludmil Stoyanov, "*Etude de différentes structures de systèmes hybrides à sources d'énergie renouvelables*", Thèse d'Université de Corse Pasquale Paoli, en cotutelle avec l'Université Technique de Sofia, 2011.
- [10] A.D. Bagul, Z.M. Salameh, B. Borowy, "*Sizing of a Stand-Alone Hybrid Wind-Photovoltaic System Using a Three-Event Probability Density Approximation*", Solar Energy, Vol. 56, Issue 4, 1996, pp. 323-335.
- [11] T. Markvart, "*Sizing of Hybrid Photovoltaic-Wind Energy Systems*", Solar Energy, Vol.57, No 4, 1996, pp. 277-281.
- [12] H. Gabler and J. Luther, "*Wind-Solar Hybrid Electrical Supply Systems, Results from a Simulation Modal and Optimization with Respect to Energy Pay Back Time*", Solar & Wind Technology, Vol. 5, No 3, 1988, pp. 239-247.
- [13] Mohammed Benchrif, "*Modélisation de systèmes énergétiques photovoltaïques et éoliens intégration dans un système hybride basse tension*", Thèse de Doctorat, Université Abou-Bekr Belkaid, Tlemcem, 2014, <http://dspace.univ-tlemcen.dz/handle/112/4178>.
- [14] Fatima Zahra Kadda, Smail Zouggar, Mohamed Larbi Elhafyani, "*Optimal energy management of an autonomous hybrid system by using the linear programming method*", IRSEC, 2013.
- [15] Ionel Vechiu, "*Modélisation et Analyse de l'intégration des énergies renouvelables dans un réseau autonome*", Thèse de Doctorat, Université du Havre, 2005.
- [16] D. Rekioua, Z. Roumila, T. Rekioua, "*Etude d'une centrale hybride Photovoltaïque - Eolien - Diesel*", Revue des Energies Renouvelables, Vol. 11, No 4, 2008, pp. 623-633.
- [17] [http://www.toutimages.com/google\\_gps/maps\\_altitude.htm](http://www.toutimages.com/google_gps/maps_altitude.htm)