



# Analyse technico-économique des systèmes de conversion d'énergie éolienne - région de Sétif

Boudia Sidi Mohammed<sup>#1</sup>, Adjiri Salima<sup>#2</sup>

<sup>#</sup>Centre de Développement des Energies Renouvelables, CDER, 16340, Algiers, Algeria

<sup>1</sup>m.boudia@cder.dz

<sup>2</sup>s.adjiri@cder.dz

**Résumé**— Le but de cette étude est d'évaluer le gisement éolien dans la région de Sétif en utilisant le logiciel WASP. Les données météorologiques utilisées ont été collectées entre 1981 et 1990 au niveau de la station météorologique de la région. Après une étude statistique, une carte des vents a été établie. Le travail a compris une évaluation énergétique estimée pour des aérogénérateurs éventuellement implantés dans la région la mieux ventée avec estimation du coût du kWh produit. Les résultats annuels dans la région étudiée donnent un potentiel éolien moyen avec une vitesse moyenne égale à 3.5m/s et une densité de puissance moyenne égale à 80W/m<sup>2</sup> alors que l'étude temporelle donne le printemps comme étant la plus ventée. L'évaluation de la production énergétique annuelle donne un maximum de 3.37GWh produite par l'aérogénérateur Vestas de 1.65MW, alors que l'étude économique, donne le plus faible coût de 0.0353\$/kWh pour l'aérogénérateur du Fabricant Neg Micon d'une puissance nominale de 1MW.

**Mots clefs** —énergie éolienne, étude économique, parc éolien, WASP, Sétif.

## I. INTRODUCTION

Vu l'emplacement géographique et le climat de l'Algérie, le pays dispose d'un potentiel en termes de ressources énergétiques renouvelables considérable [1-4]. Alors que le nouveau programme gouvernemental s'est engagé à produire 22GW à l'horizon 2030 de sources renouvelables [2], le pays comprend actuellement que de rares projets pilotes, comme la centrale hybride de Hassi R'mel d'une capacité de 30MW et la ferme éolienne de Adrar de 10MW qui doit être livrée dans un avenir proche. Bien que son évaluation reste faible, l'énergie éolienne n'est pas exclue du nouveau programme, allant même jusqu'à représenter le deuxième axe de développement avec une part de production d'électricité qui devrait atteindre 3% d'ici 2030[5]. Bien que la majorité des études sur le potentiel éolien dans le pays donne le sud comme le plus favorable pour l'utilisation de cette énergie [6-11], les régions du nord et des Hauts-Plateaux restent en grande partie méconnues. D'où le but du présent travail qui mène à évaluer pleinement la ressource éolienne dans la région de Sétif, située dans les Hauts-Plateaux du pays, et cela, en utilisant le logiciel WASP. L'étude statistique du potentiel éolien comprend aussi l'évaluation saisonnière de la vitesse du vent, sachant que la variation temporelle de la vitesse du vent à long terme permet

de comprendre le comportement aléatoire du vent et par la suite, gagner la confiance d'un éventuel investissement éolien dans la région [12-13]. Ainsi, une étude sur l'évaluation du gisement éolien dans la région de Sétif a été établie en utilisant des données météorologiques fournies par l'ONM, où plusieurs paramètres fondamentaux du site ont été étudiés, comme la topographie de la région, la rugosité des sites voisins, la distribution de fréquence de la direction du vent, les deux paramètres de Weibull, la vitesse moyenne et la densité de puissance moyenne. Par la suite, une carte représentative de la distribution du potentiel éolien de la région a été tracée et le site le plus adéquat pour la conversion de l'énergie éolienne a été choisi, menant à l'évaluation de l'énergie électrique pouvant être extraite par différents dispositifs éoliens. A la fin, une étude économique a été établie pour donner le coût relatif au kWh produit.

## II. METHODOLOGIE

Le but de cette étude concerne l'évaluation de la ressource éolienne. Les données du vent avec l'analyse statistique du potentiel éolien utilisé dans l'étude ainsi que l'analyse économique sont présentées dans cette section. Les logiciels WASP, Surfer et Matlab ont été utilisés.

### A. Données utilisées

Dans cette étude, les observations à partir du site météorologique de Sétif ont été analysées, en utilisant des vitesses tri-horaires. Les données géographiques de la station ainsi que les années de mesure sont données dans le Tableau I.

TABLEAU I  
DONNEES GEOGRAPHIQUES DE LA STATION ET PERIODE DE MESURE

Station	Longitude (°)	Latitude (°)	Altitude (m)	Années de mesure	Période de mesure
Sétif	05°15' E	36°11'N	1033	10	1981-1991

Une carte numérique du terrain en fonction de l'altitude a été chargée à partir de la base de données en libre accès NASA SRTM (Shuttle Radar Topographic Mission) [14] avec un pas de 90m et arrangée par le logiciel Surfer [15] pour être utilisée sur le Logiciel WASP [16]. La carte est écriée sur



une longitude comprise entre 5.2 et 5.5° et une latitude comprise entre 36.2 et 36.24°.

La disposition des obstacles qui entourent le mât de mesure sont représentés sur la Figure 1.

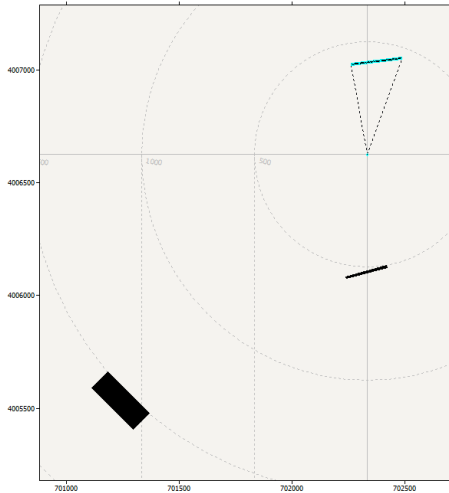


Fig. 1 Disposition des obstacles autour du mât de mesure.

### B. Analyse du vent

La fonction de Weibull est utilisée par le logiciel WAsP pour caractériser la distribution des fréquences des vitesses du vent dans le temps [16]. Elle est définie par l'équation (1).

$$f(v) = \left(\frac{k}{A}\right) \left(\frac{v}{A}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{v}{A}\right)^k\right] \quad (1)$$

Où  $f(v)$ , est la probabilité des observations de la vitesse du vent  $v$ ,  $k$  est le paramètre de forme, et  $A$  le paramètre d'échelle.

### C. Analyse économique

La faisabilité d'un parc éolien sur une durée de vie prédéfinie peut être argumenté par une analyse du coût du kWh produit. Le coût des systèmes de conversion dépend du coût d'investissement, le coût d'exploitation et d'entretien, l'état de fonctionnement et l'emplacement des éoliennes. Le calcul du coût de l'énergie éolienne est réalisée en utilisant la méthode de la Valeur Présente des Coûts (Present value cost PVC) et la méthode du Coût Unitaire de l'Energie (CPU). Dans cette analyse, la méthode PVC est utilisée pour estimer le coût de production de l'énergie éolienne.

Dans cette étude l'estimation du coût du kWh de l'énergie produite par différentes éoliennes est exprimée comme la valeur présente des coûts (PVC) de l'investissement divisé par la production d'énergie au cours de la durée de vie d'une éolienne [17].

Le calcul du coût a été fait sous les hypothèses suivantes [18-20] :

- La méthode PVC est utilisée pour déterminer les coûts.
- La machine est supposée avoir une durée de vie de  $n = 20$  ans.
- Le taux d'intérêt ( $r$ ) et le taux d'inflation ( $i$ ) sont de 8 et 9% respectivement.
- Les coûts d'exploitation, de réparation et d'entretien ( $C_{OMR}$ ) sont estimés de 25% du coût annuel de la machine (prix de la machine/durée de vie).
- La valeur de récupération  $S$  est prise à 10% de l'investissement des machines et des travaux de génie civil.
- Un investissement d'un montant  $I$  inclut le prix de la turbine ainsi que 20% pour les travaux de génie civil, les câbles de raccordement au réseau et d'autres coûts d'installation.

Sous les hypothèses ci-dessus, le cout de la valeur présente PVC est donné comme suit:

$$PVC = I + C_{OMR} \left(\frac{1+i}{r-i}\right) \left(1 - \left(\frac{1+i}{1+r}\right)^n\right) - S \left(\frac{1+i}{1+r}\right)^n \quad (2)$$

## III. RESULTATS ET DISCUSSIONS

Dans cette section, l'ensemble des résultats est présenté sous forme de roses des vents, d'histogrammes, de tableaux et de cartographies. Dans un premier temps nous présenterons l'étude statistique au niveau du mât de mesure. Suivra l'Atlas de la climatologie régionale. La cartographie de la région sera ensuite illustrée pour en déduire les régions les plus ventées. A la fin, la production énergétique annuelle sera présentée pour différents aérogénérateurs avec le coût du kWh équivalent.

### A. Etude statistique

Les données tri-horaires de la vitesse du vent dans la région de Sétif ont été analysées. La Fig. 2 donne la rose des vents annuelle ainsi que l'histogramme de la variation annuelle de la vitesse du vent, ajusté par la distribution de Weibull.

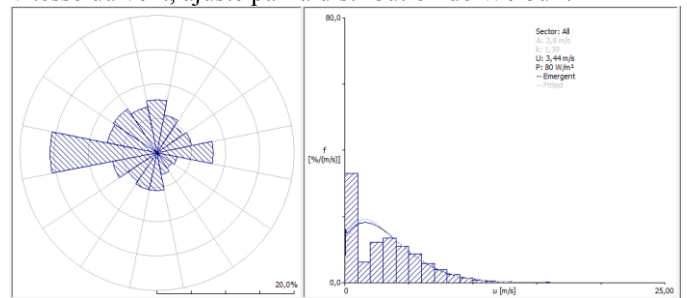


Fig. 2 Histogramme et rose des vents annuel à 10m dans la région de Sétif

De la Figure 2, nous remarquons que la direction prédominante sur le site de Sétif est l'Ouest avec une vitesse



# Le 3<sup>ème</sup> Séminaire International sur les Energies Nouvelles et Renouvelables

## The 3<sup>rd</sup> International Seminar on New and Renewable Energies

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



moyenne annuelle égale à 3.44m/s et la densité de puissance moyenne annuelle est égale à 80W/m<sup>2</sup>. Quant aux deux paramètres de Weibull, le facteur de forme est égal à 1.39 et le facteur d'échelle égal à 3.8m/s. Le taux de fréquence des vitesses nulles représente une grande partie des vents sur l'ensemble des années de mesure où elle dépasse les 35%. D'un autre côté, le vent couvre une gamme de vitesse qui atteint le 15m/s. Pour une meilleure analyse et en fonction des 16 directions de la rose des vents, le Tableau II regroupe une étude statistique englobant les deux paramètres de Weibull, la vitesse moyenne, la densité de puissance moyenne et la fréquence relative pour chaque direction.

TABLEAU III  
ETUDE STATISTIQUE ANNUELLE DU VENT POUR CHAQUE DIRECTION

Direction	Fréquence [%]	A (m/s)	k (-)	V <sub>m</sub> (m/s)	P (W/m <sup>2</sup> )
N	7.7	4.3	1.66	3.88	84
NNE	5.6	3.6	1.56	3.21	52
NE	4.6	2.6	1.27	2.45	32
ENE	5.2	2.9	1.49	2.58	29
E	8.2	3.6	2	3.23	40
ESE	3	1.2	0.82	1.37	17
SE	2.7	0.8	0.65	1.07	19
SSE	3.2	1.6	0.84	1.8	34
S	5.5	4	1.28	3.7	111
SSO	5.5	4.4	1.36	4.01	125
SO	5	3.4	1.23	3.18	75
OSO	6.6	4	1.36	3.71	99
O	15.5	4.7	1.75	4.22	101
ONO	7.4	4.2	1.37	3.81	106
NO	7.7	4.4	1.42	3.97	114
NNO	6.8	4.2	1.37	3.8	106

Avec une fréquence maximale égale à 15.5%, l'ouest représente la direction prédominante avec une vitesse moyenne maximale de 4.22m/s. D'un autre côté et avec une densité de puissance moyenne maximale de 125W/m<sup>2</sup>, le Sud Sud-Ouest représente la direction qui engendre le maximum de puissance. Quant à l'étude du paramètre de forme de Weibull, et avec une valeur maximale de 2, l'Est représente la direction où le vent est le plus stable et contant.

Les résultats de l'étude statistique saisonnière sont présentés dans le Tableau IIII.

TABLEAU IIIII  
ETUDE STATISTIQUE SAISONNIERE DE LA REGION DE SETIF

	A (m/s)	k (-)	V <sub>m</sub> (m/s)	P (W/m <sup>2</sup> )
Automne	3.5	1.29	3.12	70
Hiver	4.0	1.28	3.55	108
Printemps	4.1	1.54	3.69	80
Eté	3.7	1.54	3.30	60

Du Tableau III, il est à noter que le Printemps représente la saison où la vitesse du vent atteint son maximum avec

3.69m/s, alors que l'Hiver représente la saison avec la plus grande densité de puissance moyenne égale à 108W/m<sup>2</sup>. L'étude des deux paramètres de Weibull permet de déterminer entre autres, la stabilité et la constance du vent. De ce fait, nous remarquons que le vent durant les saisons chaudes, à savoir le printemps et l'été, est bien plus stable et contant, tournant autour de sa vitesse moyenne qu'en hiver et en automne.

Le tableau IV représente l'Atlas vent des données de mesure du vent dans la région de Sétif, il comprend, indépendamment du site, la climatologie du vent généralisé en fonction des coordonnées de la station météo. L'Atlas vent établi pour la région de Sétif contient les résultats obtenus par l'analyse de WASP, en vitesse de vent, de densité de puissance et des paramètres de Weibull ( $k, A$ ), cela pour cinq longueurs de rugosité de références, à savoir 0.000 m, 0.030 m, 0.100 m, 0.400 m, 1.500 m et cinq hauteurs de référence à savoir (10 m, 25 m, 50 m, 100 m et 200 m), suivant les 16 secteurs de directions du vent définis.

TABLEAU IVV  
ATLAS DE LA CLIMATOLOGIE REGIONALE DE SETIF

Hauteur	Parametres	0.00 m	0.03 m	0.10 m	0.40 m	1.50 m
10m	A (m/s)	6.3	4.5	3.9	3.1	2.1
	k (-)	1.47	1.34	1.34	1.35	1.36
	V <sub>m</sub> (m/s)	5.68	4.11	3.58	2.81	1.88
	P (W/m <sup>2</sup> )	313	139	92	44	13
25m	A (m/s)	6.9	5.4	4.8	4.0	3.1
	k (-)	1.50	1.41	1.40	1.40	1.41
	V <sub>m</sub> (m/s)	6.20	4.88	4.38	3.68	2.83
	P (W/m <sup>2</sup> )	396	213	155	92	42
50m	A (m/s)	7.4	6.2	5.6	4.9	4.0
	k (-)	1.54	1.52	1.50	1.49	1.49
	V <sub>m</sub> (m/s)	6.64	5.58	5.09	4.41	3.61
	P (W/m <sup>2</sup> )	468	283	219	145	79
100m	A (m/s)	7.9	7.2	6.7	5.9	5.0
	k (-)	1.52	1.63	1.64	1.64	1.62
	V <sub>m</sub> (m/s)	7.15	6.48	5.97	5.28	4.49
	P (W/m <sup>2</sup> )	597	402	312	216	135
200m	A (m/s)	8.6	8.6	8.0	7.1	6.2
	k (-)	1.47	1.60	1.61	1.62	1.64
	V <sub>m</sub> (m/s)	7.78	7.74	7.14	6.37	5.53
	P (W/m <sup>2</sup> )	804	705	550	387	249



### B. Cartographie

Après avoir délimité les zones rugueuses, il a été procédé à la projection UTM. La Fig. 3 représente les 16 zones délimitées pour chacune d'entre elles, une valeur de rugosité à l'intérieure et à l'extérieure. Le résultat est illustré avec l'emplacement de la station de mesure qui a été marqué après projection UTM.

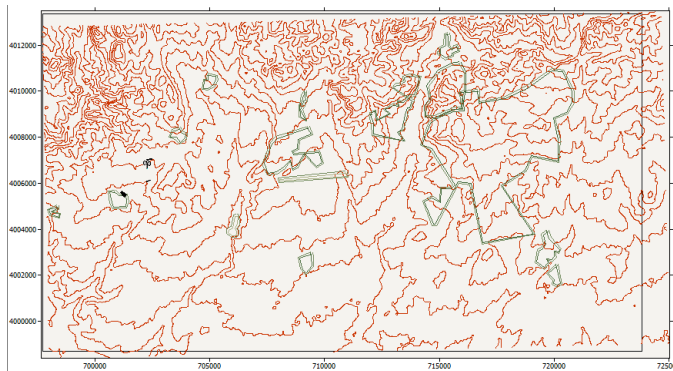


Fig. 3 Carte vectorielle numérisée avec contour des zones à rugosité

Une fois les données statistiques du vent, la topographie, la rugosité et les données relatives aux obstacles qui entourent le mât de mesure introduites, il a été établi par le logiciel WAsP la carte des vents sur la région délimitée de Sétif à 10m de hauteur. Cette dernière est illustrée dans la Figure 4.

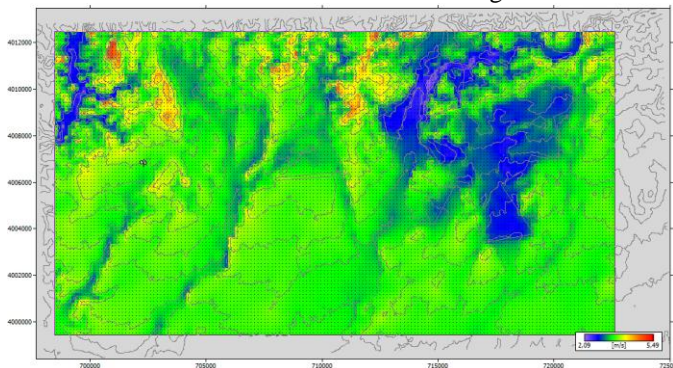


Fig. 4 Carte des vents sur la région étudiée de Sétif à 10m

Nous remarquons qu'à 10m de hauteur, la vitesse du vent varie de 2.1 à 5.5m/s. une grande partie de la région est balayée par une vitesse comprise entre 3 et 4m/s, la région Est qui englobe la grande ville de Sétif beigne dans une surface où la vitesse du vent ne dépasse pas 3m/s. Nous remarquons d'un autre côté une région assez distinguée par une grande vitesse du vent qui avoisine les 5.5m/s, dans le Nord-Ouest de la région étudiée. Le site en question se trouve à 4km au Nord-Ouest du village de Bouhira.

Après avoir raffiné le calcul et l'analyse avec le logiciel WAsP sur le site en question, nous présentons la cartographie

de la vitesse du vent de l'endroit sur la Figure 5 avec l'emplacement éventuel d'une éolienne.

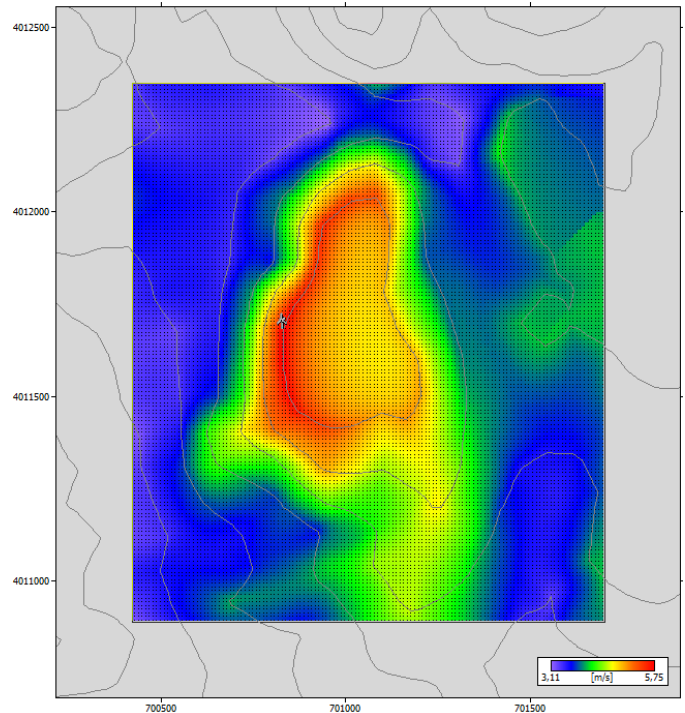


Fig. 5 Carte des vents du site choisi pour l'emplacement d'une éolienne

Le site en question fait 700mètres de longueur sur 200mètres de largeur avec une répartition de la vitesse du vent qui peut atteindre 5.75m/s à 10m de hauteur.

Les caractéristiques de l'emplacement éventuel d'une éolienne sur ce site sont données dans le Tableau V.

TABLEAU V  
CARACTERISTIQUES DE L'EMPLACEMENT DE L'EOLENNIE

Long (°)	Lati (°)	Altitude (m)	$V_m$ (m/s)	$P$ (W/m <sup>2</sup> )	$A$ (m/s)	$k$ (-)	$\Delta Rix$ (%)
36.22	5.23	1099	5.69	375	6.2	1.32	0.9

### C. Production énergétique et analyse financière

Pour l'évaluation de la production énergétique annuelle, nous avons choisis trois éoliennes avec une puissance nominale de 800, 1000 et 1650kW. Les caractéristiques des aérogénérateurs sont présentées dans le Tableau VI.

Le Tableau VII regroupe quant à lui, les résultats relatifs à la vitesse moyenne du vent à l'entrée de chaque voilure ainsi que l'Energie Produite Annuellement (AEP) en GWh et le Coût Par Unité (CPU) respectif en \$/kWh.



# Le 3<sup>ème</sup> Séminaire International sur les Energies Nouvelles et Renouvelables

## The 3<sup>rd</sup> International Seminar on New and Renewable Energies

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



TABLEAU VI

CARACTERISTIQUES DES EOLIENNES CHOISIS POUR LA PRODUCTION ENERGETIQUE

	Nordex N50	Neg Micon 1000/60	Vestas V66
Puissance nominale (kW)	800	1000	1650
Diameter du rotor (m)	50	60	66
Hauteur du hub (m)	50	70	67
Vitesse de démarrage (m/s)	4	4	4
Vitesse nominale (m/s)	15	14	16
Vitesse d'arrêt (m/s)	25	20	25
Surface de la voileure (m <sup>2</sup> )	1962.5	2826	3419.46
Prix (\$)	970,000	1,315,000	2,000,000

Du Tableau VII, nous remarquons que l'énergie produite annuellement AEP augmente avec la puissance nominale de l'éolienne, où elle atteint 3.37GWh/année pour l'éolienne de 2MW, alors qu'elle est de 1.71GWh/année pour l'aérogénérateur de 800kW. D'un autre côté, l'étude financière donne le plus faible coût du kWh, estimé pour l'éolienne Neg Micon de 1MW où le coût est égal à 0.0353\$/kWh.

TABLEAU VII

CARACTERISTIQUES DES EOLIENNES CHOISIS POUR LA PRODUCTION ENERGETIQUE

	$V_m$ (m/s)	AEP (GWh)	CPU (\$/kWh)
Nordex N50	6.22	1.71	0.0370
Neg Micon 1000/60	6.47	2.48	<b>0.0353</b>
Vestas V66	6.44	3.37	0.0395

#### IV. CONCLUSIONS

À travers cette étude, le logiciel WAsP a été utilisé pour faire l'analyse sectorielle du gisement éolien dans la région de Sétif, dans les Hauts-Plateaux Algériens et par la suite, l'estimation de la production annuelle et une étude financière de trois éoliennes d'une puissance nominale allant de 800 à 1650kW. La carte de la rugosité avec le relief a été établie, la détermination des paramètres de Weibull et la densité de puissance moyenne ainsi que la rose des vents ont été tracés, pour arriver à la détermination de l'Energie Annuelle Produite extraite par d'éventuelles éoliennes placées dans un site choisi pour l'importance du potentiel qui y est présent. Les résultats donnent la région de Sétif avec une vitesse moyenne annuelle égale à 3,44m/s, une densité de puissance moyenne annuelle égale à 80W/m<sup>2</sup> avec le secteur Ouest comme ayant le plus venté. Après interpolation horizontale par le logiciel WAsP, l'emplacement d'aérogénérateurs a donné une production énergétique annuelle qui varie de 1.71 à 3.37GWh/année. Quant à l'étude financière, elle a donné le plus faible coût du kWh, estimé pour l'éolienne Neg Micon de 1MW où le coût est égal à 0.0353\$/kWh.

#### REFERENCES

- [1] Boudghene Stambouli A. Algerian renewable energy assessment: The challenge of sustainability. *Energy Policy* 2011 ; 39 :4507-4519.
- [2] Boudghene Stambouli A. Khiaï Z. Flazi S. Kitamura Y. A review on the renewable energy development in Algeria: Current perspective. energy scenario and sustainability issues. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2012; 16: 4445-4460.
- [3] Boudghene Stambouli A. Koinuma H. A primary study on a long-term vision and strategy for the realisation and the development of the Sahara Solar Breeder project in Algeria. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2012; 16:591-598.
- [4] Boudghene Stambouli A. Promotion of renewable energies in Algeria: Strategies and perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2011; 15:1169-1181
- [5] Renewable Energy and Energy Efficiency Program. MEM. < [http://www.mem-algeria.org/francais/uploads/enr/Programme\\_ENR\\_et\\_efficacite\\_energetique\\_en.pdf](http://www.mem-algeria.org/francais/uploads/enr/Programme_ENR_et_efficacite_energetique_en.pdf) > March 2011.
- [6] Kasbadji Merzouk N. Wind energy potential of Algeria. *Renewable Energy* 2000; 21:553-562.
- [7] Chellali F. Khellaf A. Belouchrani A. Recioui A. A contribution in the actualization of wind map of Algeria. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2011;15:993-1002.
- [8] Kasbadji Merzouk N. Evaluation du gisement énergétique éolien. Contribution à la détermination du profil vertical de la vitesse du vent en Algérie. Thèse de doctorat. University of Tlemcen. Tlemcen. (2006).
- [9] Boudia S.M. Optimisation de l'Évaluation Temporelle du Gisement Éolien par Simulation Numérique et Contribution à la Réactualisation de l'Atlas des Vents en Algérie. Thèse de doctorat. University of Tlemcen. Tlemcen. (2013).
- [10] Himri Y. Himri S. Boudghene Stambouli A. Assessing the wind energy potential projects in Algeria. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2009 ; 13 :2187-2191.
- [11] Diaf S. Notton G. Technical and economic analysis of large-scale wind energy conversion systems in Algeria. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2013; 19: 37-51.
- [12] Aynuar U. Figen B. A seasonal analysis of wind turbine characteristics and wind power potential in Manisa. Turkey. *International Journal of Green Energy* 2008; 5 :466-479.
- [13] Ayodele T.R. Jimoh A.A. Munda J.L. Agee J.T. A Statistical Analysis of Wind Distribution and Wind Power Potential in the Coastal Region of South Africa. *International Journal of Green Energy* 2013; 10 :814-834.
- [14] Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), NASA, 1987. <http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>
- [15] Golden Software, Inc., 2002. Surfer 8: Contouring and 3D Surface Mapping for Scientists and Engineers User's Guide. Golden Software Inc., Golden, Colorado.
- [16] Wind Atlas Analysis and Application Program (WAsP), Risø National Laboratory; 1987. <http://www.wasp.dk/>
- [17] Ahmed AS. Wind energy as a potential generation source at Ras Benas. Egypt. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2010;14:2167-2173.
- [18] K.M. Dalalah D. Assessment of wind energy potential for selected areas in Jordan. *Renewable Energy* 2013 ;59 : 75-81.
- [19] Diaf S. Notton G. Technical and economic analysis of large-scale wind energy conversion systems in Algeria. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2013; 19: 37-51.
- [20] Ahmed Shata A.S. Hanitsch R. Evaluation of wind energy potential and electricity generation on the coast of Mediterranean Sea in Egypt. *Renewable Energy* 2006;31:1183-202.

