



Département de Génie Mécanique

THESE DE DOCTORAT EN GENIE MECANIQUE

Option : Energétique

Thème :

**Contribution à l'Étude d'une Ferme Éolienne au
Sud- Ouest de l'Algérie**

Présentée par

YOUCEF HIMRI

Soutenu le 26/9/2021 devant le jury composé de :

Y. BENKEDDA	Professeur	USDB	Président
B. BOUCHEKIMA	Professeur	U. OUARGLA	Examineur
M. CHIKHI	MRA	UDES	Examineur
M. ROUDANE	MCA	USDB	Examineur
M. MERZOUK	Professeur	USDB	Directeur de Thèse
N. KASBADJI	D. R.	UDES	Co-directrice de Thèse

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

REMERCIEMENTS

Je remercie vivement, en premier lieu, mes encadreurs : Pr. Mustapha Merzouk et Pr. Nachida Kasbadji Merzouk, pour la confiance qu'ils m'ont accordée en me confiant un sujet de recherche ambitieux, aussi riche et intéressant. Merci pour votre suivi et pour la liberté scientifique que vous m'avez toujours accordée.

Je remercie tous les membres du jury BOUCHEKIMA Bachir, ROUDANE Mohamed, CHIKHI Mourad ainsi que BENKEDDA Younes président du jury, d'avoir accepté de juger ce travail.

Je tiens à remercier tout particulièrement le Professeur Rehman Shafiqur de l'Université de roi Fahd de Pétrole et Minéraux en Arabie Saoudite.

Je dois également beaucoup à Monsieur M. Guitouni PDG de la SONELGAZ, à Monsieur S. Guezzane et Madame R. Aissaoui du CREDEG « Direction Etudes & Développement SONELGAZ ».

Afin de n'oublier personne un grand merci collectif à toute personne qui, de près ou de loin, m'a aidé tout au long ces années de recherche.

Du fond du cœur je remercie mes parents. Aucun mot n'est assez fort pour leur exprimer la reconnaissance sincère que je leur porte.

Je terminerai par ma famille à qui je dois beaucoup et surtout à ma sœur Saliha.

RÉSUMÉS

ABSTRACT

The present research is focused on windfarm economic viability and wind power potential assessment by RETScreen and WAsP tools, respectively, for the South-West region of Algeria. This study considers the atlas development of wind characteristics analysis. Hourly mean wind data recorded during the years 2003 to 2008 by ONM “Office National de la Météorologie” (the Algerian Meteorological Office), is used for the study. The mean wind speed, energy flux, the dominant wind direction, the frequency distribution, and the Weibull distribution scale and shape factors are determined and analyzed.

Finally, RETScreen software is used to estimate the energy output and to conduct the economic feasibility of the wind farm in terms of Simple Payback Period (SPP), Internal Rate of Return, Annual Life Cycle Saving, Net Present Value, Year to Positive Cash Flow, Benefit-Cost ratio and cost of electricity production (COE). The economic analysis indicates that the project at Adrar region was economically viable with good energy production of 3146 MWh/yr and a Capacity Factor (CF) of 36%. The SPP was found to be around 3.9 years, and the COE of 3.25 US Cents/kWh was found lower than the wholesale price of electricity during the feed-in tariff period.

RESUME

La présente recherche se concentre sur la viabilité économique d’une ferme éolienne et l’évaluation du potentiel éolien par les outils RETScreen et WAsP, respectivement, pour la région du sud-ouest de l’Algérie. Une analyse des caractéristiques du vent a été considérée dans cette étude. Les données horaires moyennes de vent enregistrées au cours des années 2003 à 2008 par l’ONM «Office National de la Météorologie» sont utilisées pour cette étude. La vitesse moyenne du vent, la direction dominante du vent, la distribution de fréquence, le flux de puissance ainsi que les facteurs de Weibull sont déterminés et analysés.

Enfin, le logiciel RETScreen est utilisé pour estimer la production d’énergie et pour mener la faisabilité économique du parc éolien en termes de retour simple RS, taux de rendement interne TRI, économie annuelle sur la durée de vie –EACV, valeur actuelle nette VAN, année de flux monétaire nul, ratio avantages-coûts et coût de revient de l’énergie. L’analyse économique a montré que le projet à Adrar est faisable. L’énergie électrique produite annuellement est de 94385 MWh avec un facteur d’utilisation de 36%. Le RS est estimé à environ 3.9 ans, et le coût de revient de l’énergie est de 3.25 US Cents/kWh qui est inférieur au prix de gros de l’électricité pendant la période de Tarif d’achat garanti.

ملخص

يركز هذا البحث على الجدوى الاقتصادية لتقييم مزرعة الريحية وطاقة الرياح باستخدام أدوات RETScreen و WAsP ، على التوالي ، لمنطقة جنوب غرب الجزائر. تتناول هذه الدراسة تحليل خصائص الرياح باستخدام البيانات الساعية المسجلة لسرعة الرياح خلال الأعوام 2003 - 2008 من قبل الديوان الوطني للأرصاد الجوي (ONM). يتم تحديد وتحليل متوسط سرعة الرياح ، تدفق الطاقة ، اتجاه الرياح المهيمنة ، توزيع التردد ، و معاملي توزيع Weibull. أخيراً ، يتم استخدام برنامج RETScreen لتقدير إنتاج الطاقة ولإجراء الجدوى الاقتصادية لمزرعة الريحية من حيث فترة الاسترداد (SPP) ، معدل العائد الداخلي ، الوفر من دورة الحياة السنوية ، صافي القيمة الحالية ، التدفق النقدي الإيجابي ، نسبة التكلفة والفائدة وتكلفة إنتاج الكهرباء (COE). يشير التحليل الاقتصادي إلى أن المشروع في منطقة أدرار كان مجدياً اقتصادياً حيث يبلغ إنتاج الطاقة حوالي 3146MWh/yr وعامل قدرة (36%) ، وقدرت فترة الاسترداد تقريبا 3.9 سنوات ، وتكلفة إنتاج الكهرباء 3.25US Cents/kWh التي أقل من سعر الجملة للكهرباء خلال فترة التعريف.

LISTE DES PUBLICATIONS

- [1] Almutairi, K., Mostafaeipour, A., Jahanshahi, E., Jooyandeh, E., **Himri, Y.**, Jahangiri, M., ... & Techato, K. (2021). Ranking locations for hydrogen production using hybrid wind-solar: A Case Study. *Sustainability*, 13(8), 4524
 - [2] Rehman, S., Aliyu, K. N., Alhems, L. M., Mohandes, M. A., **Himri, Y.**, Allouhi, A., & Mahbub, A. M. (2021). A comprehensive global review of building integrated photovoltaic systems. *FME Transactions*, 49(2), 253-268.
 - [3] Rehman S., Natarajan N., Mohandes M.A., Alhems L.M., **Himri Y.**, Allouhi A. (2020). Feasibility Study of Hybrid Power Systems for Remote Dwellings in Tamil Nadu, India, *IEEE Access* 8, 143881-143890. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3014164
 - [4] **Himri, Y.**, Merzouk, M., Merzouk, N. K., & Himri, S. (2020). Potential and economic feasibility of wind energy in south West region of Algeria. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 38, 100643
 - [5] **Himri, Y.**, Rehman, S., Himri, S., Mohammadi, K., Sahin, B., & Malik, A. S. (2016). Investigation of wind resources in Timimoun region, Algeria. *Wind Engineering*, 40(3), 250-260.
 - [6] **Himri, Y.**, Rehman, S., Setiawan, A. A., & Himri, S. (2012). Wind energy for rural areas of Algeria. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(5), 2381-2385.
 - [7] **Himri, Y** Presentation national case study "Assessing Wind Energy in South West Algeria" 3rd AFRETEP Regional Workshop, Cape Town, South Africa, 20th to 24th February 2012
 - [8] McVicar, T.R., Roderick, M.L., Donohue, R.J., Li, L.T., Van Niel, T.G., Thomas, A., Grieser, J., Jhajharia, D., **Himri, Y.**, Mahowald, N.M., Mescherskaya, A.V., Kruger, A.C., Rehman, S., and Dinpashoh, Y. (2012). Global review and synthesis of trends in observed terrestrial near-surface wind speeds: Implications for evaporation. *Journal of Hydrology*, 416, 182-205.
 - [9] **Y. Himri** and S. Himri. Geological and Geothermal investigation in Algeria accepted at the International Conference on Harnessing Technology ICHT 2011: Challenge & Opportunities in GCC States, Oman on 13- 14 February 2011.
-

-
- [10] **Y. Himri** Keynote lectures: "World progress in Marine Energy" accepted at Summit of the 7th International Shipbuilding, Ports and Marine Equipment Exhibition for China- October 26-28, 2010 in Dalian, China.
- [11] **Himri, Y.**, Himri, S., & Stambouli, A. B. (2010, April). Wind speed data analysis used in installation of wind energy conversion systems in Algeria. In IEEE PES T&D 2010 (pp. 1-5). IEEE.
- [12] **Himri, Y.**, Himri, S., & Stambouli, A. B. (2010). Wind power resource in the south-western region of Algeria. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(1), 554-556.
- [13] **Himri, Y.**, Malik, A. S., Stambouli, A. B., Himri, S., & Draoui, B. (2009). Review and use of the Algerian renewable energy for sustainable development. *Renewable and sustainable energy reviews*, 13(6-7), 1584-1591.
- [14] **Himri, Y.**, Himri, S., & Stambouli, A. B. (2009). Weibull parameters for wind speed distribution at fifteen locations in Algeria. *Handbook on Solar Wind*. ISBN: 978-1-60692-572-0. Nova Science Publishers, 2009
- [15] **Himri, Y.**, Himri, S., & Stambouli, A. B. (2009). Assessing the wind energy potential projects in Algeria. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(8), 2187-2191
- [16] **Himri, Y.**, Stambouli, A. B., & Draoui, B. (2009). Prospects of wind farm development in Algeria. *Desalination*, 239(1-3), 130-138.
- [17] **Y. Himri, A. Boudghene Stambouli and S. Himri.** Investigation of Methods Wind Farm Forecasting in Southwest region of Algeria. Accepted at the 2009 IEEE PES Power Systems Conference & Exposition 15 -18 March, 2009 in Seattle, Washington USA
- [18] **Himri, Y.**, Stambouli, A. B., Draoui, B., & Himri, S. (2009). Review of wind energy use in Algeria. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(4), 910-914.
- [19] **Himri, Y.**, Malik, A. S., Himri, S., & Stambouli, A. B. (2009). Algerian renewable energy projects for clean environment. In *Nanotechnology 2009: Biofuels, Renewable Energy, Coatings, Fluidics and Compact Modeling-2009 NSTI Nanotechnology Conference and Expo, NSTI-Nanotech 2009* (pp. 98-102).
-

-
- [20] **Himri, Y.**, Stambouli, A. B., Himri, S., & Draoui, B. (2009). Wind energy assessment for Timimoun. *International Journal of Agile Systems and Management*, 4(1-2), 182-190.
- [21] **Y. Himri** and S. Himri. Review of Algeria's Renewable Energy Sources. *EnviroEnergy 2009: International Conference on Energy and Environment Taj Chandigarh, Chandigarh India; Mar. 19-21, 2009.*
- [22] **Y. Himri**, B. Draoui, S. Himri. Wind Characteristics of Algeria. *Nanotechnology Conference and Trade Show June 1-5 Boston Massachusetts U.S.A. 2008.*
- [23] **Himri, Y.**, Stambouli, A. B., Draoui, B., & Himri, S. (2008). Techno-economical study of hybrid power system for a remote village in Algeria. *Energy*, 33(7), 1128-1136.
- [24] **Y. Himri**, A. Stambouli Boudghene, B. Draoui. Prospects of Wind Farm Development in Algeria. *American Journal of Environmental Sciences*. ISSN 1553-345X, vol.4, N°6, pp. 589-594, 2008
- [25] **Himri, Y.**, Boudghene, S. A., Draoui, B., & Himri, S. (2008, August). An investigation on wind power potential in Tindouf region Algeria. In *Proceedings of world academy of science, engineering and technology (Vol. 32).*
- [26] **Himri, Y.**, Rehman, S., Draoui, B., & Himri, S. (2008). Wind power potential assessment for three locations in Algeria. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(9), 2495-2504
-

TABLE DES MATIERES

<i>INTRODUCTION GENERALE</i>	1
CHAPITRE 1: ETAT DE L'ART DU SYSTEME DE CONVERSION DE L'ÉNERGIE ÉOLIENNE	
1.1. Introduction	6
1.1.2 Etude bibliographiques	7
1.1.2.1 Atlas de l'Algérie	7
1.1.2.2 Evaluations de l'énergie éolienne	8
1.2. Menaces pour la durabilité environnementale	11
1.3 Définitions	12
1.3.1 Développement durable	12
1.3.2 Energie renouvelable	12
1.3.3 Production d'énergie électrique 0 partir de sources renouvelables	12
1.4. Principe de l'éolienne: état de l'art	13
1.4.1 Historique	13
1.4.2 Divers types d'aérogénérateurs	15
1.4.2.1 Eolienne à axe vertical	16
1.4.2.2 Eolienne à axe horizontal	18
1.5. Principales composantes d'une éolienne	18
1.5.1 Mat	19
1.5.2 Rotor	19
1.5.3 Nacelle	20
1.5.3.1 Génératrice	21
1.5.3.2 Boite de vitesse	21
1.5.3.3 Arbre de transmission	22
1.6. Principe de fonctionnement	22

1.6.1 Système a calage variable (pas variable)	23
1.6.2 Système stall (a décrochage aérodynamique)	24
1.7. Production mondiale d'énergie éolienne	24
1.7.1 Etat de la capacité installée en Europe	26
1.7.2 Etat de la capacité installée en Amérique	26
1.7.3 Etat de la capacité installée en Asie	26
1.7.4. Etat de la capacité installée en Océanie	26
1.7.5 Etat de la capacité installée en Afrique	27
1.7.6 Projets ER à réaliser en Algérie	29
1.7.6.1. Solaire thermique	30
1.7.6.2. Photovoltaïque -PV-	32
1.7.6.3. Eolien	33
1.8 Evolution du marché mondial des fabricants	34
1.9 Conclusion	34

CHAPITRE 2: ETUDE DE LA RESSOURCE EN VENT

2.1. Le vent	35
2.1.1. Définition du vent	35
2.1.2. Origines du vent	36
2.2. Mouvements atmosphériques	36
2.2.1 Vents globaux (géostrophiques)	37
2.2.2 Vents de surface	37
2.2.3 Obstacles dus au vent	37
2.2.3.1 Rugosité	37
2.2.3.2 Influence des obstacles isolés	39
2.2.3.3 Influence du relief	40
2.3 Vitesse du vent	41

2.3.1	Mesure de la vitesse du vent	41
2.3.2	Direction du vent	42
2.4	Données météorologiques	43
2.4.1	Données statistiques	43
2.4.2	Fonction de distribution des vitesses de Weibull	43
2.4.3	Coefficient de cisaillement du vent	44
2.6	Conclusion	45

CHAPITRE 3 : GISEMENT DU VENT EN ALGERIE

3.1.	Introduction	46
3.2	Répartition en Algérie	47
3.3.	Variation du vent	47
3.4.	Potentiel d'énergie éolienne en Algérie	48
3.4.1	Exploitation des mesures existantes	49
3.4.2	Stations de mesure	50
3.5	Vent en Algérie	51
3.5.1	Analyse des vents « cartes saisonnières »	51
3.5.2	Atlas des vents de l'Algérie	52
3.5.3	Etude préliminaire sur cinq années	54
3.6	Objectifs cibles de la SONELGAZ	56
3.7	Conclusion	57

CHAPITRE 4: ETUDE DE FAISABILITE ECONOMIQUE ET DE PERFORMANCE D'UNE FERME EOLIENNE DANS LA REGION D'ADRAR

4.1	Introduction	59
4.2	Stratégie de la construction d'une ferme éolienne	61

4.3 Phases d'un projet de ferme éolienne	61
4.3.1 Évaluation du gisement éolien	61
4.3.2 Localisation des éoliennes	62
4.3.3 Facteurs influençant la rentabilité d'un projet éolien	62
4.4 Propriétés des sites	63
4.4.1 Sites favorables à l'installation de la ferme éolienne	63
4.4.2 Fonction de distribution de Weibull	64
4.4.3 Energie éolienne	65
4.5 Choix de la ferme éolienne	66
4.5.1 Généralités	66
4.5.2 Caractéristiques de la ferme éolienne	66
4.5.3 Modélisation et dimensionnement de la ferme éolienne	67
4.6 Evaluation du gisement du vent au sud ouest de l'Algérie	67
4.6.1 Description du projet et données énergétiques	67
4.6.2 Données météorologiques	68
4.7 Matériels et méthodes	69
4.7.1 Étude des caractéristiques du vent via WAsP	69
4.7.2 Estimation de la production énergétique avec RETScreen	74
4.7.3 Analyse économique de la ferme éolienne	79
4.8 Tarif d'achat garanti (Feed-in Tarif)	83
4.9 Conclusion	84

TABLE DES FIGURES

CHAPITRE 1: ETAT DE L'ART DU SYSTEME DE CONVERSION DE L'ÉNERGIE ÉOLIENNE

Figure 1.1 – Moulin à vent.	13
Figure 1.2 – Moulin à vent Géant à Cleveland, Ohio de F. BRUSH.	14
Figure 1.3 – Aérogénérateur Andreaeu Enflied à grand vent (Algérie).	15
Figure 1.4 – Divers types d'éoliennes.	16
Figure 1.5 – Ancien Moulin à vent Chinois à axe vertical.	16
Figure 1.6 – Composants principaux d'une éolienne.	18
Figure 1.7 – Rotor	19
Figure 1.8 – Nacelle	20
Figure 1.9 – Génératrice	21
Figure 1.10 – Boite de vitesse (Multiplicateur).	21
Figure 1.11 – Evolution de la puissance éolienne par rapport aux énergies renouvelables	25
Figure 1.12 – La puissance éolienne installée dans le Monde de 2004 à 2014.	25
Figure 1.13 – Carte des vents en Afrique	27
Figure 1.14 – Ferme Eolienne à Sidi Daoud (Tunisie).	28
Figure 1.15 – Pompage éolien en Algérie : (a) Adrar, (b) Saida, (c) Djelfa et (d) Douar El Maa (El oued).	33

CHAPITRE 2: ETUDE DE LA RESSOURCE EN VENT

Figure 2.1 – La Circulation de Hadley.	36
Figure 2.2 – Mesure de la rugosité du sol.	38
Figure 2. 3 – Terrain plat (en haut à gauche). Terrain accidenté (en haut à droite) est généralement dans les limites des performances dans des modèles d'écoulement (linéarités). Comme le terrain devient plus raide et plus complexe les incertitudes modélistes	38
Figure 2.4 – Sillage derrière un bâtiment isolé.	39
Figure 2.5 – Plan de l'écoulement au-dessus d'un obstacle dans la couche limite atmosphère	40
Figure 2.6 –Variations relatives de la vitesse en fonction de la hauteur au-dessus du sol	45
CHAPITRE 3 : GISEMENT DU VENT EN ALGERIE	
Figure 3.1 – Répartition géographique des stations météorologiques	47
Figure 3.2 – Meilleurs gisements éoliens en Afrique.	48
Figure 3.3 –Distribution de l'énergie éolienne annuelle dans l'Afrique.	49
Figure 3.4 – L'installation de 9 stations de mesure dans différentes régions.	50
Figure 3.5 – Carte annuelle de la vitesse du vent à 10 m au dessus de sol	51
Figure 3.6 – Cartes saisonnières de la vitesse du vent "modifié"	52
Figure 3.7 – Répartition annuelle des vitesses moyennes à Tindouf.	53
Figure 3.8 – Répartition annuelle des vitesses moyennes à Timimoun.	53
Figure 3.9 – Répartition annuelle des vitesses moyennes à Adrar.	54
Figure 3.10 – Régions les plus ventées d'Algérie.	55
Figure 3.11 – Vitesse moyenne du vent des 6 sites.	55

**CHAPITRE 4: ETUDE DE FAISABILITE ECONOMIQUE ET DE PERFORMANCE
D'UNE FERME EOLIENNE DANS LA REGION D'ADRAR**

Figure 4.1 – Carte annuelle de la vitesse moyenne du vent en Algérie à 10m au dessus du sol	63
Figure 4.2 – Fonction de distribution de Weibull d'Adrar.	64
Figure 4.3 – Loi de BETZ .	66
Figure 4.4 – Situation géographique de la région d'Adrar	68
Figure 4.5– Schéma représentant les étapes de traitement des données du vent via WASP	70
Figure 4.6 – cycle quotidien moyen de la vitesse du vent à 10 du sol	71
Figure 4.7 – Variation mensuelle de la vitesse moyenne à 10m du sol	71
Figure 4.8 – Variation annuelle de la vitesse moyenne du vent à 10m du sol	72
Figure 4.9 – Diagrammes rose des vents et Distribution des fréquences des vitesses de vent	73
Figure 4.10– Organigramme des étapes d'une analyse standard avec le model RETScreen	74
Figure 4.11 – Distribution de fréquence de la vitesse du vent à 65.5 m du sol	75
Figure 4.12 – Courbe de puissance de l'éolienne DEWIND 62.	77
Figure 4.13 – Energie produite par l'éolienne de DEWIND62 à l'hauteur de 68.5m	77

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE 1: ETAT DE L'ART DU SYSTEME DE CONVERSION DE L'ÉNERGIE ÉOLIENNE	
Tableau1.1 Capacités cumulées du programme er a la SONELGAZ (en mw)	30
Tableau1.2: Perspectives de la production d'électricité renouvelable pour le marché national	30
Tableau1.3 : Evolution des capacités de production d'électricité solaire thermique	31
Tableau 1.4 : Perspectives du solaire thermique a concentration a l'horizon 2050	31
Tableau1.5: Perspectives de développement du chauffe-eau solaire pour 2050	32
Tableau 1.6 : Perspectives d'évolution du photovoltaïque	32
Tableau 1.7 : Perspectives de développement de l'électricité éolienne	33
CHAPITRE 2: ETUDE DE LA RESSOURCE EN VENT	
Tableau 2.1 – Valeurs usuelles utilisées pour la rugosité	39
Tableau 2.2 – Valeurs usuelles utilisées pour la rugosité	42
CHAPITRE 3 : GISEMENT DU VENT EN ALGERIE	
Tableau 3.1 : programme EnR sur la période 2013-2023	56
CHAPITRE 4: ETUDE DE FAISABILITE ECONOMIQUE ET DE PERFORMANCE D'UNE FERME EOLIENNE DANS LA REGION D'ADRAR	
Tableau 4.1 : Evolution de l'énergie électrique consommée en Algérie (2011-2017)	60
Tableau 4.2 : Vitesse moyenne de vent et densité de puissance moyenne	73
Tableau 4.3 : Caractéristiques de l'éolienne DEWIND 62	76
Table 4.4 : Coefficients de pertes utilisés dans les calculs de la production d'énergie	78

Tableau 4.5 : Paramètres du système obtenu à partir de RETScreen	79
Tableau 4.6 : Evaluation de l'énergie éolienne et le Facteur d'utilisation de l'éolienne de 1MW en utilisant deux approches à 68.5 m	79
Tableau 4.7 : Principaux paramètres financiers pour la répartition des coûts	80
Table 4.8 : Coût de la construction d'une ferme éolienne	80
Tableau 4.9 : Tarif d'achat garanti pour des installations éoliennes d'une capacité >5MW	84

ACRONYMES

ACRONYMES / ABREVIATIONS	
A-C	Avantages Coûts
AWEA	American Wind Energy Association
C	Coût d'investissement total dans le projet,
CDER	Centre Développement des Energies Renouvelables
EACV	Economies Annuelles sur le Cycle de Vie
EGA	Electricité et Gaz d'Algérie
ES	Encouragements et les Subventions.
ER	Energies Renouvelables
EWEA	Européen Wind Energy Association
GES	Gaz à Effet de Serre
HCR	Haut Commissariat à la Recherche
HAWT	Horizontal Axis Wind Turbine
NFMN	Année de Flux Monétaire Nul
ONE	Office National de l'Electricité
ONM	Office National de Météorologie
ONU	Organisation Nations Unies
PST	Plan Solaire Tunisien
RS	Retour Simple
RI	Retour sur Investissement
STEG	Société Tunisienne d'Electricité et de Gaz
SONELGAZ	SOciété National d'ELectricité et de GAZ
T&D	Transport et de Distribution
TRI	Taux de Rendement Interne
UMA	Union du Maghreb Arabe
VAN	Valeur Actualisée Nette
VAWT	Vertical Axis Wind Turbine

NOMENCLATURE

NOMENCLATURE		
C	Facteur d'échelle caractérise la vitesse du vent	m/s
E_c	Energie cinétique du vent	W/s
E	Energie éolienne annuelle	Kwh/m ² . an
E_i	Energie éolienne correspondante	Wh/m ² . an
F	Force de Coriolis	N
P	Force de pression	N
h	Hauteur du bâtiment	m
H	Hauteur d'une colline	m
k	Facteur de forme caractérise la répartition du vent (compris entre 1.2 et 3.5)	[-]
L	Demi-largeur de la colline	m
d	Distance	m
m	Masse d'air	Kg
P_n	Puissance nominale de l'éolienne	W
P_v	Puissance instantanée	W
S	Surface balayée par les pales	m ²
ū₀(z)	Vitesse de référence	m/s
u(z)	Vitesse du vent au sommet de l'obstacle	m/s
v_g	Vent géostrophique	m/s
v	Vitesse du vent « instantanée » (moyennée sur 10 mn)	m/s
v_n	Vitesse nominale du vent	m/s
v₁	Vitesse moyenne à la hauteur z ₁	m/s
v₂	Vitesse moyenne à la hauteur z ₂	m/s
z₀	Longueur de rugosité	m
Ω	Vitesse angulaire de rotation de la Terre	Rad/s
δ	Latitude du point considéré	deg
α	Exposant (le coefficient de cisaillement)	[-]
ρ	Masse volumique de l'air	Kg/m ³
t_i	Temps annuel	Heures

INTRODUCTION GENERALE

L'utilisation de vent comme source d'énergie n'est pas nouvelle. L'homme naviguait en mer depuis des siècles en utilisant les voiles et le premier moulin à vent fût apparu en Perse en 200 AV J.C pour moudre le grain et pomper de l'eau. Aujourd'hui les moulins à vent sont utilisés pour la production de l'électricité pour les applications connectées au réseau électrique ou hors réseau (isolé) dans le monde entier. La capacité mondiale d'énergie éolienne a augmenté rapidement du fait de :

- Développement technologique,
- Disponibilité des éoliennes ayant de plusieurs méga Watts
- Acceptabilité commerciale.
- Efficacité des éoliennes en raison de leur fonctionnement dans les zones de faible vitesse du vent

En conséquence, plusieurs nouveaux projets sont lancés et mis en service dans différentes régions du monde. En Algérie la réalisation du projet d'une ferme éolienne sur le terrain par la SONELGAZ a été concrétisée en 2014. Effectivement cette ferme éolienne d'une puissance de 10 MW a été réalisée sur 30 hectares et mis en service en 2014.

Bientôt, de nombreux projets éoliens sont prévus en Algérie pour préserver ses ressources naturelles et protéger son environnement. La région d'Adrar a été choisie comme l'un des meilleures régions en Algérie présentant un fort potentiel éolien .Dans cette région la vitesse de vent atteint 6 m/s à 10 m au dessus du sol. Une analyse détaillée est nécessaire pour identifier les sites appropriés pour l'implantation des projets éoliens.

Jusqu'à présent, l'évolution de l'énergie éolienne en Algérie reste faible, avec une seule centrale éolienne connectée au réseau électrique à Adrar.

En outre de cette ferme éolienne, six nouvelles centrales photovoltaïques connectées au réseau d'une capacité totale de 48 MW ont été implantées dans de cette région. Avec ces nouvelles capacités éoliennes et solaires installées, Adrar devient une région pionnière pour l'exploitation de l'électricité renouvelable.

La plupart des projets d'énergie renouvelable en Algérie devraient être mis en œuvre au Sahara. L'Algérie pourrait être un pays potentiel pour une transition énergétique. Il pourrait également être un exportateur d'énergie renouvelable dans le monde à l'avenir, car il s'agit du plus grand pays d'Afrique.

L'objectif principal de cette recherche est d'analyser les données de vent et de réaliser une étude de faisabilité économique du parc éolien en termes de performance financière et des indicateurs économiques. De plus, ce projet sera peut-être concrétisé dans la réalité; En effet, cette étude sera réalisée sur une véritable évaluation de l'énergie éolienne sur site pour concevoir une ferme éolienne connectée au réseau.

Donc notre plan de travail serait structuré en quatre chapitres de la manière suivante :

Chapitre 1 : Etat de l'art du système de conversion de l'énergie éolienne

Chapitre 2 : Etude de la ressource éolienne

Chapitre 3 : Gisement éolien en Algérie

Chapitre 4 : Etude de la faisabilité économique et de performance d'une ferme éolienne dans la région d'Adrar.

Conclusions et perspectives

CHAPITRE 1

On traite dans ce chapitre un bref état de l'art visant à décrire les différentes technologies et les principales caractéristiques des éoliennes proposées dans la littérature. Ensuite on va présenter brièvement description des capacités éoliennes installées des cinq continents, plus précisément la puissance installée en Afrique du Nord.

L'Algérie dispose de ressources énergétiques importantes et diversifiées. Un programme d'application pour l'énergie éolienne a été mis en œuvre en 1990 conjointement par l'Office national de météorologie (ONM) et le Haut Commissariat à la recherche (HCR).

Ce programme, dans sa première phase de réalisation, a été soutenu par l'Organisation météorologique mondiale et a conduit l'élaboration de l'atlas vent de l'Algérie (ONM / UNHCR - 1990). Il existe des opportunités pour l'énergie éolienne principalement dans les sites de montagne en Algérie et dans le sud. Des études ont été faites pour l'évaluation de cette ressource à travers l'Algérie. D'où l'intérêt du prochain chapitre, qui présente une étude de ressource éolienne d'Algérie.

CHAPITRE 2

L'homme a longtemps imaginé des moyens d'exploiter le vent, qui peut toutefois être modifié par la répartition de la terre et de la mer, la présence de montagnes et varie en fonction des saisons. Le vent étant gratuit, inépuisable et produisant de l'énergie, pour cela l'objectif de ce chapitre est de faire une étude plus ou moins détaillée sur les caractéristiques du vent et de donner quelques éléments de base sur les mécanismes qui l'engendrent et le dirigent.

Le vent est une énergie initialement exploitée, mécaniquement pour moulinier le grain ou pomper de l'eau par des moulins à vent, et indirectement dans la production d'électricité c'est-à-dire par une transformation de son énergie mécanique en énergie électrique.

Il est à noter que les vents seront organisés en deux parties: la première à haute altitude de l'équateur aux pôles (vents géostrophiques), la seconde dans la direction opposée mais au niveau du sol (vents de surface). Ces derniers de part leur capacité énergétique seront ceux exploités dans la majorité des cas.

CHAPITRE 3

Il est essentiel d'obtenir des données fiables sur le gisement éolien afin de mener une étude de faisabilité valable. La connaissance de la ressource éolienne d'un site est particulièrement importante.

En effet, l'analyse des données statistiques permet d'établir des cycles de variation de la vitesse du vent dans le temps. L'objectif de ce chapitre est de décrire l'évolution saisonnière de la vitesse du vent en Algérie et les objectifs poursuivis par SONELGAZ.

Au cours de la dernière décennie, le développement de technologies pour la production d'électricité a admis cette filière comme une alternative pour les prochaines décennies.

La production d'électricité à partir de sources d'énergie renouvelables, telles que les éoliennes, reste la principale préoccupation des producteurs d'électricité de SONELGAZ. A cet effet, l'électricité produite par une éolienne dépend de l'énergie disponible dans le vent. En effet, pour apprécier un site, une bonne connaissance du gisement éolien est nécessaire. Par conséquent, il est nécessaire de procéder à une étude de caractérisation du vent. Cette étude a fourni des informations sur la répartition géographique du vent. De cette manière, elle a rendu possible la première identification des régions dites ventées avec un potentiel éolien important qui pouvant selon les besoins, constituées des candidates à l'exploitation de cette énergie.

Ce travail fourni à l'utilisateur des informations sur l'évolution saisonnière de la vitesse moyenne du vent de l'Algérie. Celles-ci sont nécessaires à la sélection des sites pour la mise en œuvre des systèmes éoliens, sachant que les besoins en énergie varient tout au long de l'année. On peut d'ores et déjà conclure que le gisement éolien est plus important au Sud qu'au Nord particulièrement dans le Sud Ouest.

CHAPITRE 4

La variation spatiale de la vitesse du vent a montré l'existence d'un potentiel éolien important dans la région du Sud-ouest de l'Algérie. Cette étude consiste de proposer une approche permettant d'installer de manière optimale techniquement et économiquement un parc éolien sur un site choisi.

Ce chapitre vise donc à décrire les méthodes utilisées pour cette étude, dans lequel nous rapportons des bons résultats de calculs introduits dans le manuscrit, qui ont été publiés dans le Journal Sustainable Energy Technologies and Assessments (Elsevier) : Y. Himri, M. Merzouk, N. Kasbadji Merzouk, S. Himri. “Potential and economic feasibility of wind energy in south West region of Algeria” Sustainable Energy Technologies and Assessments 38 (2020) 100643. (Voir l’annexe)

En collaboration avec School of Engineering Science, Lappeenranta University of Technology, , Finland, on a traité le sujet intitulé Contribution à l’Etude d’une Ferme Eolienne au Sud Ouest de l’Algérie en proposant une démarche permettant d’implanter de manière optimale techniquement et économiquement un système éolien sur les sites de la région d’Adrar .

Ainsi l’étude et la réalisation de la ferme éolienne se fait en déterminant la taille, la configuration et le potentiel de production énergétique du système, le choix du système éolien en s’appuyant sur le type d’utilisation (axe horizontal) et sur le choix de la machine sélectionnée selon la vitesse du vent de site choisi, (taille de l’aérogénérateur et ses caractéristiques telles que : vitesse de démarrage , puissance nominale, vitesse nominale, etc.), car l’énergie produite sera importante suivant la vitesse du vent.

CHAPITRE 1: ETAT DE L'ART DU SYSTEME DE CONVERSION DE L'ÉNERGIE ÉOLIENNE

Depuis la conférence de Kyoto la valorisation des énergies renouvelables dans une perspective de développement durable nourrit le discours de l'état sur l'énergie. L'énergie éolienne a considérablement augmenté ces dernières années. Nous nous présenterons donc dans ce chapitre un bref état de l'art visant à décrire les différentes technologies et les principales caractéristiques des éoliennes proposées dans la littérature. Ensuite nous présentons une brève description des capacités installées des cinq continents, plus précisément la puissance installée en Afrique du Nord.

1.1. INTRODUCTION

Le développement d'une société se reflète dans la satisfaction croissante d'une série de besoins tels que l'hébergement, la nourriture, le transport, l'éducation, la qualité de l'environnement naturel, sport, etc. La plupart de ces activités nécessitent, à différents niveaux, une consommation d'énergie soit par l'utilisation directe pour certains usages ou pour permettre la production des biens et des services à leur disposition qui leur sont associés. L'approvisionnement en énergie est donc indispensable au développement économique et social. Quand on parle de consommation d'énergie, on parle généralement de la consommation la plus tangible d'énergie conventionnelle (charbon, pétrole, gaz, nucléaire, hydroélectrique, etc.).

Seulement la majorité des problèmes environnementaux sont liés à l'augmentation de la consommation d'énergie donc il faut explorer les moyens les plus efficaces de produire, distribuer et consommer de l'énergie " maîtrise d'énergie", en augmentant l'utilisation des systèmes énergétiques de manière écologique et plus particulièrement ceux des énergies renouvelables [1].

1.1.2 ETUDE BIBLIOGRAPHIQUES

Cette section présente l'essentiel des travaux effectués sur le potentiel éolien et son évaluation en Algérie. Donc le travail sera divisé en deux parties, la première partie consiste à étudier l'atlas du vent en Algérie et la deuxième va être consacrée à l'estimation d'énergie potentielle ainsi un modèle mathématiques est examiné.

1.1.2.1 ATLAS DE L'ALGERIE

En Algérie, les observations du vent ont été fournies par quelques stations météorologiques françaises réparties sur certaines régions mesurant régulièrement la vitesse instantanée et la direction du vent depuis 1918[2].

Quant aux premiers travaux concernant le potentiel d'énergie éolienne ont été publiés par H. Bensaad en 1985 [3] suivis par ceux de R. Hammouche en 1990 [4] ainsi que ceux de N. Kasbadji Merzouk en 1994 [5].

TRAVAUX DE BENSAAD

En 1985 Bensaad[3] a présenté le programme et les perspectives d'utilisation de l'énergie éolienne en Algérie. En 1988 il a publié un autre article qui traite l'étude du potentiel éolien en Algérie.

ATLAS VENT DE HAMMOUCHE

En 1990 Hamouche [4] a édité l'Atlas de vent de l'Algérie donnant les résultats de l'étude statistique de 37 stations via le logiciel WAsP utilisé pour la cartographie éolienne de l'Europe. Pour chaque site on trouve les statistiques des données brutes sous forme des tableaux contenant la distribution des mesures de vent ainsi la variation quotidienne et annuelle de la vitesse du vent durant une période donnée.

ATLAS EOLIEN DE KASBADJI-MERZOUK

La première carte du vent de l'Algérie été établie par Kasbadji-Merzouk, [5]. Cette carte a été améliorée par le même auteur en 1999, en portant le nombre de stations à 46 et en utilisant la distribution hybride de Weibull, [6].

En parallèle, le modèle Aiolos a été utilisé pour l'établissement de cartes relatives aux microclimats des régions accidentées en Algérie. Les résultats obtenus ont permis de détecter des zones ventées en Algérie[7], avec des vitesses moyennes de vent allant jusqu'à 7 m/s, telles que la côte ouest méditerranéenne et des zones isolées comme Sidi Aich, par exemple, [8].

MISE A JOUR DE L'ATLAS EOLIEN DE KASBADJI-MERZOUK

Nedjari et al. ont identifié des zones ventées propices à l'éolien en utilisant l'analyse multicritères basée sur la méthode SIG. En effet, ils ont utilisé les données d'environ de 74 nouveaux sites pour vérifier et mettre à jour l'atlas vent de l'Algérie à 10 m et 80 m au dessus du sol. Les régions sélectionnées, comme le Sahara et les hauts plateaux, pourraient être éligibles à l'implantation des fermes éoliennes [9].

Boudia et al. ont évalué la ressource potentielle éolienne en Algérie à l'aide d'une analyse statistique basée sur des données météorologiques récentes, recueillies auprès de 63 stations météorologiques réparties à travers l'Algérie et 24 autres situées près des frontières des pays voisins pour mettre à jour la cartographie de distribution de la vitesse du vent en Algérie à 10 m au-dessus du sol [10].

1.1.2.2 EVALUATION DE L'ENERGIE EOLIENNE

En Algérie, la ressource éolienne varie d'un endroit à un autre. Ceci est principalement du à la topographie et au climat variés. A travers la production de l'atlas vent de l'Algérie et du potentiel énergétique éolien disponible, huit zones ventées susceptibles recevoir des installations éoliennes ont été identifiées [11-12] :

- Deux zones sur littoral (Oran, Annaba)
- Trois zones sur les hauts plateaux (Tiaret, El Kheiter, Naama)
- Trois zones en sites sahariens

Le potentiel éolien technique de ces zones a été estimé à 172 TWh/an, dont 37 TWh/an économiquement exploitable. Les trois zones situées au sud ouest du Sahara (Tindouf, In Salah et Adrar semblent être les plus favorables à l'installation de ferme éolienne, car elles cumulent à elles seules, un potentiel économique approchant les 24 TWh/an [11-12].

En effet l'évaluation l'énergie éolienne et l'étude de dimensionnement d'une ferme éolienne en Algérie a été faite par Himri et al. en 2008[13] suivis par Djamilia Abdeslame Dehmas et al. en 2010 [14], Djamai et Kasbadji en 2011 [15] et Boukli Hacène et al. en 2012[16].

TRAVAUX DE KASBADJI-MERZOUK

Kasbadji Merzouk et Merzouk ont traité des études concernant les applications de l'énergie éolienne en Algérie à savoir la production de l'électricité et le pompage d'eau [17-22].

En effet dans la réf [19] Kasbadji Merzouk et Merzouk ont fait une étude sur l'estimation de la densité de puissance énergétique éolienne utilisable pour le pompage dans le sud Algérien.

Le rendement global du système pompe-génératrice a été estimé respectivement à 25% et 55% pour les petites machines et les grandes puissances [20].

Une étude statistique des données vent a été utilisée pour le calcul du potentiel énergétique éolien disponible sur un site donné permettant le choix des sites ventés susceptibles de recevoir des systèmes de pompage [21].

TRAVAUX DE HIMRI

En 2008 Himri et al. [13] ont présenté un article en suggérant une démarche permettant d'installer d'une manière optimale techniquement et économiquement un parc éolien au sud ouest de l'Algérie.

Dans la même année Himri et al. ont effectué une étude de faisabilité économique du système hybride éolien-diesel alimentant une communauté lointaine dans le sud Algérien tel qu'Oum El Assal, Tindouf [23].

En 2016 Himri et al. ont présenté une étude d'analyse de l'énergie éolienne dans la région de Timimoun en utilisant le modèle WAsP. Les données de vent utilisées sont relevées auprès de la CREDEG SONELGAZ durant une période de 03 ans. Les mesures sont prises à une hauteur de 17 m au dessus du sol [24].

TRAVAUX EN COLLABORATION AVEC KASBADJI-MERZOUK

Dans la réf [14] les auteurs ont mené une étude sur l'utilisation de l'énergie éolienne pour alimenter une station de dessalement par osmose inverse: une étude de cas de Ténès (Algérie).

En 2011, Djamai et Kasbadji-Merzouk [15] ont fait le choix d'une zone favorable à l'étude d'une faisabilité d'une ferme éolienne. La validation de la cartographie de la ressource éolienne a été effectuée sur la totalité de la région, à une hauteur de moyeu d'éolienne typique, soit 80 m au dessus du sol. Deux sites ont été sélectionnés à savoir Zaouiet Kounta et Kaberten. Les auteurs ont montré que Zaouiet Kounta présente une meilleure performance énergétique.

En 2012 Boukli et al. [16] ont développé un modèle mathématique de simulation permettant de déterminer le champ de vitesse du vent en trois dimensions sur un terrain complexe de la vallée de Ténès.

Louassa et al. ont évalué les ressources éoliennes disponibles dans la région de Ksar Challa en utilisant le WAsP afin d'identifier les sites les plus ventés appropriée pour installations de ferme éolienne et l'éolienne la plus productive [25].

Abdeslame et al. ont utilisé les données de vent de 10 ans sur 4 sites situés dans les hauts plateaux Algériens, à savoir Sétif, Ksar Chellala, Msila et Tiaret, pour évaluer l'énergie produite par une ferme éolienne d'une capacité installée de 8 MW sur chaque site [26].

Par la suite d'autres auteurs ont également fait des suggestions pour évaluer l'énergie produite d'origine éolienne.

Belabes et al. ont utilisé le logiciel WAsP pour déterminer le coût de l'électricité produite par trois types d'aérogénérateurs installés sur six sites localisés dans le Nord de l'Algérie [27].

Saheb Koussa et al. ont estimé le facteur d'utilisation de 4 types d'éoliennes, disponibles sur le marché, en se basant sur les caractéristiques de vent de 13 sites situés dans différentes zones climatiques Algériennes [28].

Récemment, Guerri et al. ont fait une étude sur l'analyse des performances de la ferme éolienne de Kabertene, connectée au réseau électrique national en termes de production annuelle d'énergie, facteur d'utilisation, et le nombre d'heures de fonctionnement. Ils ont évalué le coût de l'électricité produite en compte tenu de certaines hypothèses concernant les coûts d'investissement du parc éolien, à savoir le prix spécifique moyen des éoliennes, les travaux de génie civil et le coût en capital initial de l'éolienne [29].

Dans ce qui suit on va définir les notions de bases du système de conversion de l'énergie éolienne et donner les statistiques sur la production de l'énergie éolienne dans le monde.

1.2. MENACES POUR LA DURABILITE ENVIRONNEMENTALE

Les scientifiques ont déterminé que l'atmosphère terrestre changeait en raison des émissions de gaz à effet de serre qui empêchent la chaleur de s'en échapper. Le changement climatique place l'humanité dans une situation complexe et inquiétante. La réduction des émissions de gaz à effet de serre est un choix judicieux d'un point de vue écologique et économique.

Les risques de changements climatiques liés aux émissions de gaz à effet de serre ont été jugés suffisamment préoccupants pour que la communauté internationale se mobilise pour les réduire.

Après le "Sommet de la Terre" de 1992 à Rio de Janeiro, une convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques, complétée en 1997 par le protocole de Kyoto "Japon", engage les pays signataires "161 pays" à réduire en 2010 le niveau de leurs émissions de gaz à effet de serre.

Après avoir accepté les termes du protocole de Kyoto, et s'appuyant sur le livre vert déjà rédigé, la Commission européenne [30] propose en 1998 un calendrier des investissements nécessaires pour accroître la production d'électricité à partir de sources renouvelables en vue du développement durable. Il existe de nombreuses manières de générer de l'électricité en utilisant uniquement des ressources naturelles inépuisables, telles que le vent, le rayonnement solaire, etc.

1.3.DEFINITIONS

L'introduction du terme Energy "Energie" remonte à 1807 où le physicien anglais Thomas Young (1773-1829) découvrit le mécanisme d'adaptation de l'œil, les interférences et les lois de l'élasticité [31].

Mais ce mot avait toujours un sens vague. C'est en 1853 que William Rankine, ingénieur et physicien écossais qui perfectionna la machine à vapeur, parvint à moderniser la conservation de l'énergie mécanique (potentiel plus cinétique) [32].

1.3.1 DEVELOPPEMENT DURABLE

C'est un développement qui répond aux besoins de la génération actuelle sans priver les générations futures de la possibilité de satisfaire à leurs propres besoins. Le développement durable repose sur 3 facteurs fondamentaux : la protection de l'environnement, le développement social, et la croissance et le développement économique [33].

1.3.2 ÉNERGIE RENOUELABLE

C'est une source d'énergie qui est renouvelée assez rapidement pour être considérée comme inépuisable à l'échelle humaine. Les énergies renouvelables proviennent de phénomènes naturels réguliers ou constants causés par des étoiles telles que le Soleil (rayonnement), la Lune (marée) et la Terre (géothermique) [33,34].

1.3.3 PRODUCTION D'ENERGIE ELECTRIQUE A PARTIR DE SOURCES RENOUELABLES

Le développement durable implique le développement des énergies renouvelables. Il est probable que les énergies renouvelables jouent un rôle de plus en plus important à moyen et long terme dans des scénarios énergétiques respectueux de l'environnement. Parmi les énergies renouvelables, il existe trois grandes familles: l'énergie d'origine mécanique « éolien », énergie électrique « panneaux photovoltaïques » ou l'énergie sous forme de la chaleur (géothermie, solaire thermique,...). Parmi toutes les énergies renouvelables, le vent a d'abord été exploité par l'homme [34].

1.4. PRINCIPE DE L'EOLIENNE: ETAT DE L'ART

1.4.1 HISTORIQUE

L'homme utilise le vent comme source d'énergie depuis l'Antiquité. Depuis le XII^{ème} siècle, les premiers moulins à vent sont utilisés pour le meulage du grain et le pompage de l'eau (Figure 1.1) L'aile en éventail était l'une des principales améliorations apportées aux moulins à vent. Inventée en 1745, elle se trouvait automatiquement placée sous le vent.



Figure 1.1 – Moulin à vent.

Le moulin à vent en tant que moyen de production est resté inconnu de l'Antiquité. Il est très significatif que Vitruve, quand il parle de machines qui tourne par l'action du vent, écrit que « les machines à vent sont celles qui, par l'impulsion de l'air, imitent le son des instruments que l'on touche, et la voix humaine » et « produisent des effets surprenants "[35]. Les premiers moulins à vent sont apparus en Europe au XIII^e siècle avec le retour des Croisés, qui les ramèneront de leurs voyages en Orient. Ce n'est qu'en 1891 que le vent a été utilisé pour produire de l'électricité par le météorologiste Danois Paul La Cour et c'était la naissance de l'éolienne.

Les premières applications liées à l'exploitation de l'énergie éolienne pour la production d'électricité remontent à 1891, lorsque le météorologue Danois Paul La Cour (1846 - 1908) expérimenta pour la première fois, sur un système basé sur l'installation d'un générateur à courant continu actionné par un moulin à vent normal.

Plus tard, l'un de ses étudiants, Johannes Juul, fut le premier à développer une éolienne moderne capable de produire du courant alternatif [36].

Le mot « éolienne » vient du grec Αἰολος (Éole), le dieu des vents. L'éolienne fonctionne selon le même principe que le moulin à vent. En d'autres termes, une éolienne est une machine qui capte le vent et le transforme en énergie mécanique [36] ou en électrique.

L'idée d'une éolienne date de 1802, lorsque Lord Kelvin, physicien anglais, associa un générateur d'électricité à une éolienne. En 1888, Charles F. Brush construisit une petite éolienne de 12 kW pour alimenter sa maison en électricité, avec un accumulateur. Plus tard, en 1890, il expérimenta un moulin à vent géant à Cleveland, Ohio, USA. Pour produire de l'électricité (Figure 1.2).

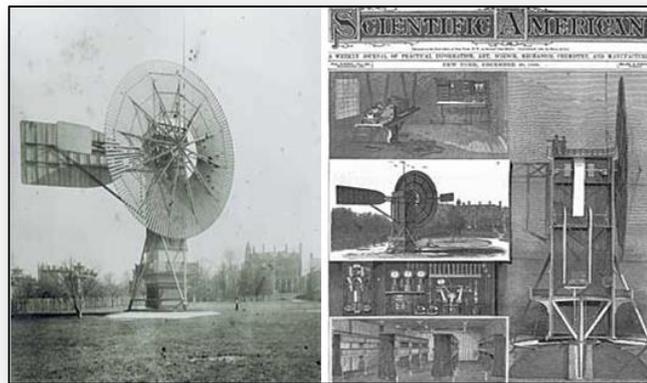


Figure 1.2 – Moulin à vent Géant à Cleveland, Ohio de F. BRUSH.

En 1891, Paul La Cour a associé une génératrice à une éolienne. Dans les années suivantes, il créa l'éolienne Lykkegard, dont il aura vendue 72 exemplaires en 1908. Et c'est en 1927 que le Français Darrieus dépose un brevet pour une éolienne équipée d'un rotor à deux axes de 20 mètres de hauteur et de puissance de 10 kW (environ 100 fois moins que les éoliennes actuelles) [37]. Un aérogénérateur Andreau Enflied de 100 kW (Figure 1.3) fut acheté par SONELGAZ (Société National Electricité et du gaz) "ex EGA (Electricité et Gaz d'Algérie)" et a fonctionné de 1955 à 1963 pour être expérimenté à grand vent (Alger) [38].

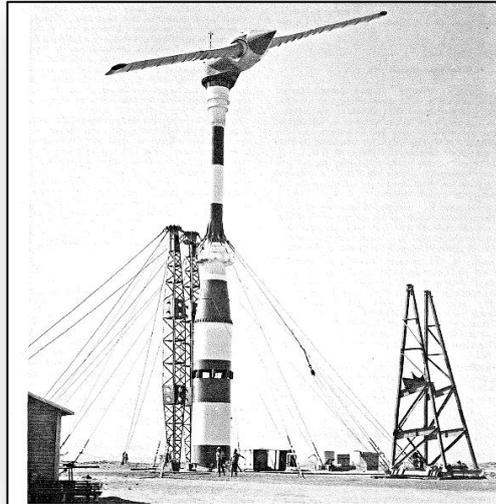


Figure 1.3 – Aérogénérateur Andreau Enflied à grand vent (Algérie).

Johannes Juul, un ingénieur en électricité à la retraite et ancien élève de La Cour, a été le premier à développer une éolienne moderne capable de produire du courant alternatif. Il conçut et construisit la désormais classique éolienne de 200 kW, la plus grande éolienne du monde, la "turbine de Gedser (1956)" fonctionnant depuis 11 ans, est devenue le modèle de référence pour les développements futurs de tous les autres aérogénérateurs (éoliennes équipées d'un générateur électrique) [36,39].

Après une récession qui a débuté à la fin des années 60, l'intérêt pour l'énergie éolienne a repris en vigueur dans les années 70. La crise pétrolière de 1973 a relancé de nouveau la recherche et les réalisations éoliennes dans le monde.

1.4.2 DIVERS TYPES D'AEROGENERATEURS

La longue maturation des technologies dans les années 70 et 80 a permis d'émerger deux grandes familles d'éoliennes pouvant être utilisées de manière interchangeable en fonction principalement des préférences visuelles, des puissances nécessaires et de la ressource éolienne et qui sont :

- Les éoliennes à axe de rotation horizontal (HAWT): multi-pale vitesse lente, tripale ou bipale rapide ;
- Les éoliennes à axe vertical (VAWT): Savonius, Darrieus, etc.

La Figure 1.4 montre les principales technologies existantes dans le monde



Figure 1.4 – Divers types d'éoliennes.

1.4.2.1 ÉOLIENNE A AXE VERTICAL

Les éoliennes à axe vertical (Figure 1.5) ont été les premières utilisées [40]. Elles fonctionnent indépendamment de la direction du vent, c'est-à-dire elles sont opérationnelles avec des vents multidirectionnels, ce qui élimine tout dispositif permettant d'orienter la machine.

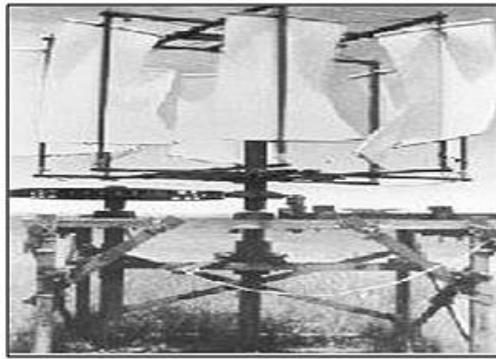


Figure 1.5 – Ancien Moulin à vent Chinois à axe vertical [40].

Elles sont plus efficaces avec des vents à basse vitesse. Deux d'entre elles sont particulièrement remarquables. On les doit aux inventeurs *Darrieus et Savonius*.

Rotors de Savonius « Traînée différentielle »

Le principe de démarrage de ce type de machine est identique à celui d'un anémomètre. L'illustration la plus courante de ce type d'éolienne est le rotor Savonius, du nom de l'ingénieur finlandais Sigurd Savonius, qui l'a breveté à la fin des années 1920. Il est principalement constitué de deux demi-cylindres dont les axes sont décalés l'un par rapport à l'autre [38]. Le fonctionnement s'est amélioré par rapport à l'anémomètre grâce à la possible circulation d'air entre les deux demi-cylindres, ce qui augmente le couple du moteur.

Dans la littérature, de nombreuses méthodes ont été proposées pour évaluer les performances des rotors de Savonius, par exemple les travaux [41-44]. Ainsi, selon l'auteur Martin [43], le rotor de Savonius à traînée différentielle, qui malgré un rendement relativement faible, présente de nombreux avantages indéniables. D'autre part, les résultats des travaux de Menet et al. [44] montrent que le rotor Savonius à deux voilures, qu'on appelle rotor contre voiles, est le plus efficace.

Rotors de Darrieus « Variation cyclique d'incidence »

Composés généralement par deux ou trois pales de profil symétrique biconvexe liées rigidement entre elles et tournant autour d'un axe vertical [38]. Leur fonctionnement repose sur le fait qu'un profil placé dans un flux d'air à différents angles est soumis à différentes forces d'intensité et de direction. Ce principe de fonctionnement a été breveté au début des années 1930 par l'Académicien français Georges Darrieus [45]. Lesdits rotors peuvent être de forme cylindrique, tronconique, parabolique et à variation cyclique

Dans la littérature, les rotors Darrieus n'ont pas connu le développement attendu. Certains travaux basés sur ce type de rotor sont [46-48], par exemple, la méthode proposée par Merad et al. [49] consiste à utiliser un système hybride constitué d'un rotor Darrieus couplé à deux rotors Savonius, de sorte que l'éolienne démarre seule sans apport extérieur de puissance afin de modéliser un aérogénérateur autonome.

1.4.2.2 ÉOLIENNE A AXE HORIZONTAL

L'éolienne à axe horizontal s'apparente davantage à un moulin à vent. Les différentes constructions des éoliennes à axe horizontal utilisent les voilures à 2 ou 3 pales (souvent utilisées) appelées éoliennes rapides et à multi-pales appelées éoliennes lentes [50]. Selon Wilson et al. [51] les éoliennes de meilleur rendement sont les éoliennes rapides à axe horizontal bi- ou tripales.

La littérature sur cet aspect est abondante et ce problème fait encore l'objet de recherches pour de nombreux auteurs. Par exemple, Nabah et al. [52] ont décrit une méthode permettant de calculer le sillage d'un rotor éolien à axe horizontal. Ce type d'éolienne a été utilisé dans diverses publications [53-58].

1.5. PRINCIPALES COMPOSANTES D'UNE EOLIENNE

Compte tenu de la prédominance des éoliennes à axe horizontal dans le monde, notre étude sera consacrée à ce type de machines. Les composants principaux d'une éolienne à axe horizontal sont le rotor, la nacelle et la tour (voir Figure 1.6).



Figure 1.6 – Composants principaux d'une éolienne [59].

1.5.1 MAT

Le Mât d'une éolienne, également appelée tour, supporte la nacelle, le rotor et ses pales. La plupart des éoliennes ont une tour conique d'une hauteur de 40 m pour les plus petites éoliennes (environ 400 kW) et à 220 m pour les plus grandes éoliennes (environ 12 MW) [60].

Trois types principaux de tour peuvent se rencontrer [61]:

- Mât tubulaire en acier: Malgré un surcoût (construction plus complexe) par rapport aux autres types de mâts, les constructeurs le préfèrent, car il permet de loger des dispositifs de contrôle ou de commande et offre une protection évidente aux personnels chargés de la maintenance ;
- Tour haubanée: facile à construire, il est principalement destiné aux machines à faible puissance, telles que les petites éoliennes;
- Mât en treillis: son avantage essentiel réside dans sa simplicité de construction, qui le rend attrayant pour les pays en en voie de développement, mais souvent mal accepté à cause des enfants qui ont tendance à y grimper.

En fait, de nombreuses études sur le mât apparaissent dans la littérature scientifique [62-64]. Par exemple, selon Leithead et al. [64] le mouvement de la tour peut introduire un pic significatif de la fréquence de résonance de la tour dans le spectre de la puissance produite.

1.5.2 ROTOR

Il est le capteur d'énergie qui convertit l'énergie éolienne en énergie mécanique. Il se compose des pales (d'un nombre variable) fixées au moyeu (Figure 1.7).



Figure 1.7 – Rotor [67].

Les pales du rotor sont en plastique composite, généralement renforcé de fibres de verre. Chaque pale peut être entraînée en rotation autour de son axe longitudinal au moyen de mécanismes d'entraînement [65-66].

Il existe 3 classes principales de moyeu:

- Le moyeu avec pales encastrées (utilisé pour l'éolienne de moyenne et grande puissance)
- Le moyeu en balancier (utilisé pour l'éolienne à deux pales) pour lequel les deux pales rigides sont reliées entre elles.
- Le moyeu articulé dont les pales ont des degrés de liberté en battement et traînée.

En effet, le rotor a fait l'objet de nombreuses recherches [52, 54, 68]. Les auteurs ont développé une méthode de calcul de code basée sur la modélisation de pales utilisant une courbe portante [52]. Leithead et al. [68] ont démontré expérimentalement que seules les composantes à basse fréquence du vent incident correspondaient au couple total produit par les pales.

1.5.3 NACELLE

La nacelle, qui est le cœur de la production d'énergie électrique, est installée sur la tour (Figure 1.8). Elle contient les composants principaux d'une éolienne, y compris le multiplicateur, la génératrice et les composants d'interactions associés. C'est une véritable salle des machines perchée dans le ciel.



Figure 1.8 – Nacelle [67].

1.5.3.1 GENERATRICE

La génératrice, située à l'intérieur de la nacelle, convertit l'énergie mécanique en énergie électrique (Figure 1.9). Enfin, à titre indicatif, il existe deux types de génératrices: les génératrices synchrones et asynchrones.

Les éoliennes les plus courantes utilisent des génératrices asynchrones (également appelées génératrices à induction)

Beaucoup d'auteurs ont mené des études sur la génératrice [68-72], parmi lesquelles on mentionne le travail de Mprales [72], qui a proposé une méthodologie permettant de déterminer la puissance nominale de la génératrice qui s'adapte le mieux à la taille du rotor de la turbine dont le but de maximiser l'énergie moyenne produite.



Figure 1.9 – Génératrice [67].

1.5.3.2 BOITE DE VITESSE

Le multiplicateur mécanique de vitesse, boîte de vitesse, joue le rôle de régulateur (Figure 1.10)

Il permet d'augmenter la vitesse de rotation du générateur par rapport à celle de la turbine [73]. Il existe 3 types de multiplicateurs qui représentent la plupart des types utilisés pour les éoliennes: les multiplicateurs à 2 ou 3 étages épicycloïdaux, les multiplicateurs à 3 étages parallèles dont 2 sont épicycloïdaux et 1 parallèle ainsi que les multiplicateurs à 3 étages, dont 2 sont épicycloïdaux et 1 parallèle.

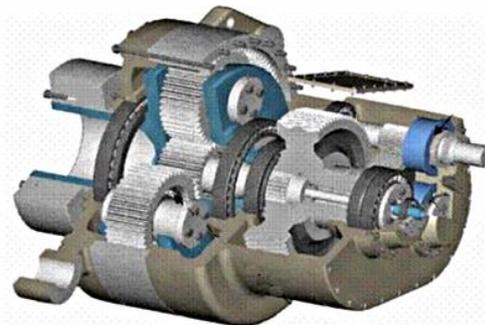


Figure 1.10 – Boite de vitesse (Multiplicateur) [67]

De nombreuses études ont montré l'intérêt du multiplicateur de vitesse [74-76]. On peut citer les travaux de Harrison et al. [74-75] où les auteurs ont présenté en détail le modèle de poids pour les 3 types de multiplicateurs en définissant des contraintes en fonction du facteur d'efficacité du multiplicateur et puissance nominale du rotor. En revanche, dans [76], l'auteur ne fait pas de distinction entre les types de multiplicateurs et introduit la formule du coût du multiplicateur qui est fonction du couple nominal du rotor et le nombre d'unités produites du composant modélisé.

1.5.3.3 ARBRE DE TRANSMISSION

Le rotor est relié au multiplicateur de vitesse par un arbre appelé l'arbre lent (à basse vitesse, ou arbre primaire). A la sortie du multiplicateur, il existe un deuxième arbre appelé (l'arbre rapide ou l'arbre secondaire).

Généralement, l'arbre primaire qui tourne à basse vitesse comprend un dispositif permettant de faire passer des conduites hydrauliques entre la nacelle (repère fixe) et le moyeu (repère tournant). L'arbre secondaire comprend généralement un frein mécanique qui immobilise le rotor pendant les opérations de maintenance et empêche la machine de s'emballer.

Selon [77], le dimensionnement de l'arbre lent peut être obtenu par différentes méthodes. Certains auteurs présentent également des modèles souples [78-79] qui prennent en compte la souplesse de l'arbre. Mais les valeurs de ces coefficients de raideur sont souvent liées à un processus réel.

1.6. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

L'éolienne utilise l'énergie du vent pour entraîner les pales d'un rotor. L'arbre lent relie le moyeu du rotor au multiplicateur de vitesse puis fait tourner l'arbre rapide à une vitesse environ 50 fois plus rapide que la sienne. L'arbre rapide tourne à environ 150 tr/min et actionne le générateur électrique de courant alternatif, synchrone ou asynchrone.

Grâce aux signaux fournis par des anémomètres et des girouettes, un asservissement optimise les mouvements de la nacelle à l'aide de moteurs électriques (ou par des unités hydrauliques).

Ce mécanisme est nécessaire pour les éoliennes dont le rotor est contre le vent « Amont » de la tour, contrairement à celles dont le rotor est sous le vent "Aval", qui est auto orientable.

- Aval (down-wind): le vent souffle sur l'arrière des pâles. La configuration aval permet l'utilisation de rotors plus flexibles. L'avantage de cette technique est que l'éolienne est automatiquement positionnée vers le vent, ce qui permet d'éviter le système d'orientation mécanique complexe et coûteux, en particulier pour les fortes puissances.
- Amont (up-wind): le vent souffle sur le devant des pâles en direction de la nacelle. La configuration amont permet l'utilisation des pâles rigides. C'est une technique simple qui donne de meilleurs résultats pour les fortes puissances. Le rotor est orienté selon la direction du vent par un dispositif spécifique.

L'objectif principal d'une éolienne est de récupérer un maximum d'énergie. Pour préserver la tenue mécanique et le bon fonctionnement de l'éolienne, il existe 2 techniques principales pour ajuster la puissance du rotor afin de contrôler la vitesse de l'éolienne par rapport à la vitesse du vent.

1.6.1 SYSTEME A CALAGE VARIABLE (PAS VARIABLE)

On dit qu'une hélice est à pas variable, variation d'incidence également appelée "pitch", lorsque l'orientation de la pale par rapport au moyeu est réglable pendant le fonctionnement pour réduire l'incidence et maintenir la puissance constante. Par conséquent, lors de forts vents, les pales peuvent être placées parallèlement à l'axe (le frein n'est pas nécessaire). Ce dispositif équipe quelques rares éoliennes petites et moyennes taille.

De nombreux auteurs ont développé des modèles pour l'étude de la commande d'éolienne [36, 80-82]. Dans [82], Rodríguez étudie la commande d'une éolienne à vitesse variable et régulation pitch. Il utilise pour cela un simulateur numérique basé sur des modèles simple validés avec des données d'une éolienne à vitesse fixe.

Camblong [36] a optimisé les algorithmes de commande de l'éolienne à vitesse variable selon 4 critères: la qualité de la puissance électrique, le rendement énergétique, la robustesse des commandes et les charges dynamiques dans le train de puissance.

1.6.2 SYSTEME STALL (A DECROCHAGE AERODYNAMIQUE)

La régulation à décrochement, également appelée « stall » ou à pas fixe, est une méthode très simple. Les pales, fixées sur le moyeu, utilisent l'effet de décrochage aérodynamique pour limiter la puissance. L'angle de calage est choisi pour permettre de bloquer le flux d'air de la surface de la pale lorsque la vitesse du vent dépasse la vitesse nominale. Cela réduit la portance et augmente la force de traînage.

Certains auteurs ont présenté des travaux sur la régulation mécanique de la vitesse de l'éolienne [64, 83-87]. Leithead [64] propose, par exemple, une série de modèles simples qui en s'interconnectant définissent le comportement général d'une éolienne à vitesse fixe. Ekelund [83] utilise un modèle linéaire en tant que représentation d'état pour analyser et commander une éolienne à vitesse variable et régulation stall via l'optimisation LQ (linéaire quadratique). D'autres auteurs combinent les avantages des deux systèmes lors de la réalisation d'un contrôle Stall-actif [84-85].

1.7. PRODUCTION MONDIALE D'ENERGIE EOLIENNE

La production et l'utilisation de l'énergie éolienne contribuent activement à la lutte contre le réchauffement climatique (réduction des émissions de CO₂, développement des énergies renouvelables, etc.). Selon les études de IRENA [88], l'énergie éolienne est l'énergie renouvelable la moins chère et c'est la source d'énergie qui croît la plus rapide au monde (Figure 1.11). C'est l'un des principaux acteurs du développement de notre production d'électricité renouvelable. La Commission européenne a réaffirmé l'importance de l'énergie éolienne dans son "plan climat" après avoir défini l'objectif mondial de 20% d'énergie renouvelable dans la consommation énergétique qui était prévu en 2020 [89].

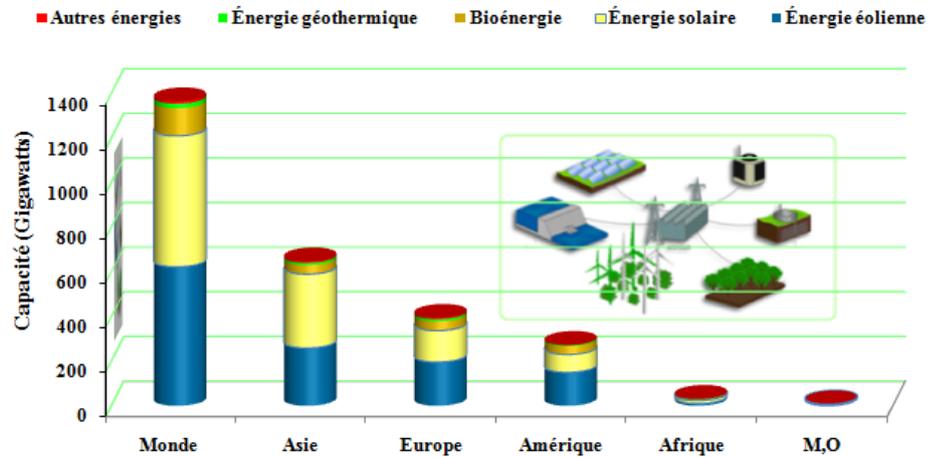


Figure 1.11 – Evolution de la puissance éolienne par rapport aux énergies renouvelables en 2016.

Selon R. Swisher, PDG de l'Association américaine de l'énergie éolienne (AWEA), "c'est la troisième année consécutive que l'énergie éolienne bat le record de croissance, ce qui en fait l'une des plus importantes source d'électricité du pays "[90].

La capacité installée dans le monde (Figure 1.12) est passée de 220 GW en 2011 à 349 GW en 2014, puis en 2015 à presque de 416 GW et en 2018 s'établit à 563.5GW pour passer à 732GW en 2020 [91-94].

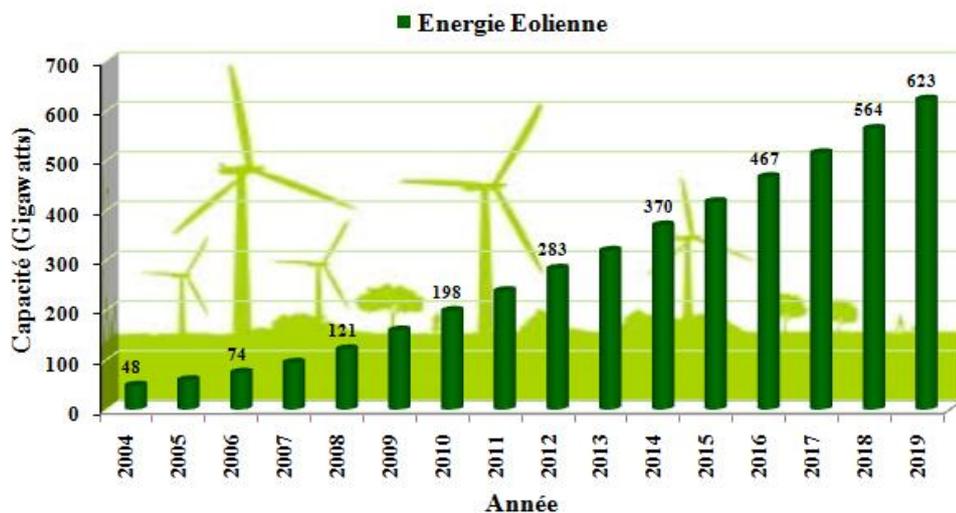


Figure 1.12 – La puissance éolienne installée dans le Monde de 2004 à 2019.

L'énergie éolienne pourrait couvrir jusqu'à 29% des besoins mondiaux en énergie électrique d'ici 2030 [95]. Il convient de noter que la majeure partie de la capacité installée est en Europe.

1.7.1 ETAT DE LA CAPACITE INSTALLEE EN EUROPE

L'Union européenne est devenue le deuxième marché de l'éolien au niveau mondial après la Chine, avec plus de 201GW de capacité éolienne installée en 2020, ce qui représente presque 27 % du total mondial. Les 5 pays pionniers en tête sont Allemagne, Espagne, Royaume-Uni, France et l'Italie [96].

L'objectif actuel de l'European Wind Energy Association est de 300 GW de capacité éolienne en Europe en 2030 [95].

1.7.2 ETAT DE LA CAPACITE INSTALLEE EN AMERIQUE

L'énergie éolienne est facilement exploitable dans les grandes plaines nord américaines contrairement au sud américain. Les Etats Unis a été leader jusqu'en 1994. En 2014, l'industrie américaine a battu tous les records annuels précédents en installant une nouvelle capacité près de 66 GW [97].

En 2020, elle atteint 118 GW. Elle est classée en deuxième place au niveau mondial, dépassant l'Allemagne et se rapprochant de la Chine.

1.7.3 ETAT DE LA CAPACITE INSTALLEE EN ASIE

La région d'Asie a été perçue comme le futur boom du marché de l'énergie éolienne, mais la crise financière de 1998 a gelé de nombreux projets [98]. Aujourd'hui, le continent asiatique est en train de devenir l'un des centres les plus dynamiques pour le développement de l'énergie éolienne.

En 2020, la capacité totale installée dans cette région a atteint presque 332 GW MW et ceci grâce à la progression record de la Chine et de l'Inde durant cette année. Ces dernières années, les marchés asiatiques ont enregistré des taux de croissance très élevés, supérieurs à ceux observés en Europe, notamment pour la Chine. Elle a actuellement une capacité installée d'environ 282 GW, l'Institut de recherche météorologique chinois estime que les ressources éoliennes terrestres exploitables représentent un potentiel de 253 GW [99-100].

1.7.4. ETAT DE LA CAPACITE INSTALLEE EN OCEANIE

Dans le monde, les régions terrestres les mieux ventées se situent dans les zones côtières des continents, en particulier dans les îles d'Océanie, d'Australie, de la Nouvelle- Zélande, etc.). Aujourd'hui l'énergie éolienne connaît une croissance constante dans cette région du monde, en particulier en Australie et en Nouvelle-Zélande.

L'Australie possède certaines des meilleures ressources éoliennes au monde. La croissance de la capacité installée du pays a presque augmenté en 2020, ce qui porte le total à 9 GW [93, 97].

WestWind est le leader Australien en matière de petit éolien et dispose de références importantes dans ce pays.

La principale mesure d'incitation à l'énergie éolienne est l'Objectif obligatoire en termes d'énergies renouvelables (Mandatory Renewable Energy Target), qui a visé visé modestement une production de 33000 GWh provenant de sources renouvelables en 2020[101].

1.7.5 ETAT DE LA CAPACITE INSTALLEE EN AFRIQUE

Il est à noter que des moulins à vent pour le pompage mécanique d'eau ont été fabriqués en Afrique du Sud depuis 1871. Il est estimé que plus de 3×10^5 éoliennes sont installées et que plus de 90% d'entre elles sont construites localement [102].

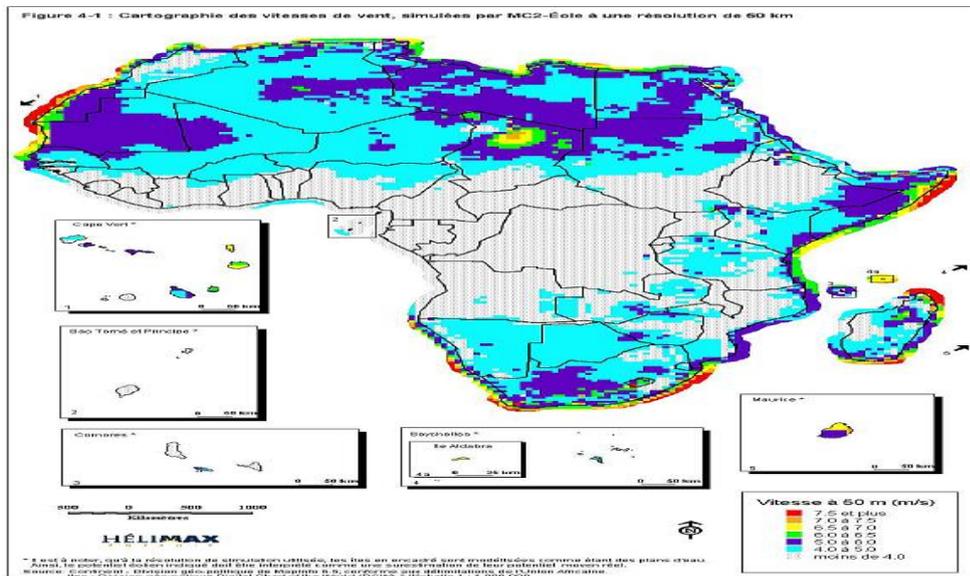


Figure 1.13 – Carte des vents en Afrique [103]

En termes de ressources éoliennes, la carte des vents ainsi obtenue montre que les meilleurs vents en Afrique se retrouvent principalement dans le nord du continent, à ses extrêmes à l'est, à l'ouest et au sud comme le montre la Figure 1.13 [103-104].

Projets de production éolienne à grande échelle visant à l'exploitation de cette ressource énergétique abondante sont en cours de développement en Maroc, Afrique du Sud, Algérie, etc. Cependant, la capacité éolienne en exploitation (7GW y compris le Moyen Orient) est encore très faible par rapport à la capacité installée mondiale (732 GW) [93].

MAROC

Le Maroc bénéficie d'un grand gisement éolien d'environ 25000 MW [105]. Les régions les plus ventées se retrouvent à l'extrémité Nord, du côté du détroit de Gibraltar, dans la région de Tanger-Tétouan, dans la région d'Essaouira, la zone Atlantique Sud de Tarfaya à Lagouira et le couloir de Taza entre les chaînes montagneuses de l'Atlas et du Rif.

En 2014, Il existait cinq parcs en exploitation: le parc expérimental de Tanger: 3,5 MW; Parc Abdelkhaleq Torres: 50,4 MW, parc Essaouira Amougdoul: 60 MW, parc Lafarge à Tanger 32,2 MW, et parc éolien de Tanger: 140 MW [106].

En effet en 2020, le Maroc comptait une capacité installée commerciale de 1.4 GW d'énergie éolienne comparée aux capacités installées au niveau de l'Afrique et le Moyen Orient (7 GW).

TUNISIE

La première ferme éolienne a été réalisée à Sidi Daoud (Figure 1.14) en 2000, par la Société Tunisienne d'Electricité et de Gaz (STEG) .Ce parc de 10.5 MW est raccordée au réseau en Tunisie [107].



Figure 1.14 – Ferme Eolienne à Sidi Daoud (Tunisie).

La STEG a, toutefois, entrepris depuis 1992 quelques études dans le cadre de la prospection de sites qui peuvent être valorisés pour la production électrique. Selon ces études, les sites les plus promoteurs se situent dans 5 régions : 2 au nord du pays, 2 au centre et 1 au sud alors le potentiel technique éolien serait de 1000 MW. Tandis que le potentiel en Tunisie est estimé à 8000 MW. La puissance éolienne installée à la fin de 2019 en Tunisie est d'environ 245 MW au Nord du pays [93, 108].

Selon l'objectif du Plan Solaire Tunisien (PST), la Tunisie a projeté d'installer de 1755 MW d'ici 2030[109].

ALGERIE

Ces dernières années, la distribution d'électricité a été gravement perturbée en raison de l'augmentation croissante de la demande intérieure. Selon le groupe SONELGAZ, la demande en électricité augmente presque de 6% par an, donc la consommation d'énergie électrique devient de plus en plus considérable, elle a atteint une puissance de 21 GW en fin 2018[110].

Le marché des Energies Renouvelables(ER) est prometteur et sa promotion est l'un des principaux objectifs de la politique énergétique et environnementale du pays. Dans le cadre de la construction d'un parc éolien de 10 MW, la région d'Adrar a été choisie comme l'une des meilleures régions en Algérie présentant un potentiel éolien élevé.

Deux sites proches des postes électriques de la SONELGAZ ont été identifiés. Mais un seul a eu l'approbation des autorités compétentes pour l'installation de la ferme, c'est le site de Kabertène. Ce site est situé à environ 73 km au nord de la ville d'Adrar, près d'un poste électrique de la SONELGAZ THT-HT. Il se trouve à une altitude d'environ 260 m.

Le parc éolien d'Adrar, le premier du genre dans le pays, d'une capacité de 10,2 MW, est implanté sur une superficie de 30 hectares. Il est composé de 12 éoliennes de type Gamesa G52 d'une puissance unitaire de 850 kW.

1.7.6 PROJETS ER A REALISER EN ALGERIE [109-110]

En 2015, la puissance totale de tous les projets achevés dans le domaine des énergies renouvelables, à l'inclusion des centrales hydroélectriques, a atteint 533 MW, soit 3% de la capacité installée pour la production d'électricité [111].

Le secteur de l'énergie a développé un programme indicatif pour le développement des énergies renouvelables, structuré autour de la production d'électricité et les usages thermiques d'origine renouvelables, dont le but d'atteindre des objectifs d'une contribution de 6% pour la satisfaction des besoins en énergie à l'horizon 2020 et 30% à l'horizon 2050.

Le tableau suivant montre les capacités cumulées du programme des ER, par type et par phase, sur la période 2015-2030.

Tableau Capacités cumulées du programme ER à la SONELGAZ (en MW) [112]

	1 ^{ère} phase 2015 -2020	2 ^{ème} phase 2021 -2030	Total
Photovoltaïque	3000	10575	13575
Eolien	1010	4000	5010
CSP	-	2000	2000
Cogénération	150	250	400
Biomasse	360	640	1000
Géothermie	05	10	15
Total	4525	17475	22000

1.7.6.1. SOLAIRE THERMIQUE

Sur la base des prévisions de production d'électricité, l'objectif de 30% de pénétration des énergies renouvelables à l'horizon 2050 dans la production nationale d'électricité se traduirait par une production d'électricité supérieure à 13000 GWh pour le même horizon.

Tableau 1.2 : Perspectives de la production d'électricité renouvelable pour le marché national [113]

Année	2007	2010	2020	2030	2040	2050
Demande nationale d'électricité (GWh)	38658	46905	79504	111662	177090	280856
Production nationale d'origine renouvelable (GWh)	7	124	4885	14041	37322	84372
Taux (%)	0	0	6	13	21	30

En outre, à l'horizon 2050, une capacité de production de 6000 MW générera une production supérieure à 19TWh. Cette production est destinée à l'exportation et principalement au marché européen.

De nombreux sites sont déjà arrêtés pour abriter ces centrales solaires thermiques. Ces quatre projets développés par la société New Eneyr Algeria « NEAL » sont situés dans le sud du pays (Hassi R'Mel, Meghaier, Naâma).

Tableau 1.3 : Evolution des capacités de production d'électricité solaire thermique [113]

Année	2007	2010	2020	2030	2040	2050
Capacité de production (MW)	0	0	0	2200	4000	6000
Production d'électricité (GWh)	0	0	0	7049	12852	19338

L'Algérie a un grand potentiel dans le domaine de l'énergie solaire thermique, les prévisions de ce mode de production d'électricité atteindront 20% de la production totale d'électricité d'ici 2050. La capacité d'installation à la fin du programme est estimée à 17500 MW, ce qui correspond à une production d'électricité de 58 TWh à l'horizon 2050.

Pour atteindre les objectifs du programme de concentration thermique, à moyen terme (2015-2025), le solaire devrait prendre une part prépondérante dans les centrales hybrides solaire/gaz, à cet effet la production d'électricité solaire devrait atteindre 80 % de la production totale de ces centrales.

Enfin, à long terme, au-delà de 2025, ces centrales seront totalement dédiées à l'énergie solaire. Le tableau suivant présente les objectifs assignés à cette filière pour l'année 2050.

Tableau 1.4 : Perspectives du solaire thermique à concentration à l'horizon 2050[113]

Année	2007	2010	2020	2030	2040	2050
Capacité cumulée à installer (MW)	0	35	1250	5500	1230	23500
Production d'électricité (GWh)	0	112	4000	17607	39454	75595

La perspective de développement de cette filière repose sur l'objectif d'installer 2×10^6 de chauffe-eau solaires d'ici 2050, soit une surface de captage de plus de $7 \times 10^6 \text{ m}^2$, ceci correspond à l'équipement des infrastructures collectives et les ménages des zones isolées.

Tableau 1.5: Perspectives de développement du chauffe-eau solaire pour l'année 2050 [113]

Année	2007	2010	2020	2030	2040	2050
Nombre cumulé de chauffe eau solaires (10^3)	0	5	85	283	776	2003

1.7.6.2. PHOTOVOLTAÏQUE -PV-

Au cours de la période 2008-2025, l'utilisation d'électricité photovoltaïque sera réservée à l'électrification de sites isolés dont le raccordement au réseau peut coûter cher. Sur la base d'un taux d'électrification de 98% du territoire national qui serait maintenu tout au long de la période de prévision, le nombre de foyers épars qui ne serait pas raccordé au réseau national d'électricité devrait passer de 170 000 actuellement à près de 220000 en 2025.

L'objectif proposé est l'électrification, à l'horizon 2025, au PV, de 100 % des foyers épars. Un développement plus important de l'énergie photovoltaïque est prévu dans la période 2026-2050, car les coûts de cette filière devraient diminuer suffisamment pour être compétitifs par rapport à l'énergie solaire thermique et à l'énergie éolienne au-delà de 2040. Les objectifs ainsi fixés pour PV consistent dans une contribution de cette filière à hauteur de 6 % dans le bilan de la production électrique, à l'horizon 2050.

Tableau 1.6 : Perspectives d'évolution du photovoltaïque [113]

Année	2007	2010	2020	2030	2040	2050
Nombre de foyers électrifiés au photovoltaïque (Cumulé)	7 000	12 454	84 984	238 079	272 513	311 928
Capacité cumulée (MW)	4	6	42	320	2 660	8 430
Part du PV dans la production nationale d'électricité (%)	0	0	0.1	0.6	3	6

1.7.6.3. EOLIEN

Le programme de développement de la production d'énergie éolienne à l'horizon 2050 représentera environ 4% de la production nationale d'électricité.

La capacité éolienne à installer à la fin du programme jusqu'en 2050 est évaluée de 5650 MW, soit une production d'environ 11300 GWh.

Tableau 1.7 : Perspectives de développement de l'électricité éolienne [113]

Année	2007	2010	2020	2030	2040	2050
Capacité cumulée à installer (MW)	0	0	400	1100	2700	5650
Production d'électricité éolienne (GWh)	0	0	800	2200	5400	11300
Part du PV dans la production nationale d'électricité (%)	0	0	1	2	3	4

Pour un site isolé et assez bien venté, l'utilisation de l'énergie éolienne pour le pompage de l'eau peut être indispensable et très compétitive par rapport aux autres sources d'énergie. Les éoliennes de pompage existaient dans les grandes régions Algériennes (Adrar, Saida, Djelfa, etc.) (Voir Figure 1.15). Ils sont utilisés pour la mobilisation des ressources en eaux souterraines (puits et forages) à des fins socio-économiques [114].



Figure 1.15 – Pompage éolien en Algérie : (a) Adrar, (b) Saida, (c) Djelfa et (d) Douar El Maa (El oued).

1.8 EVOLUTION DU MARCHE MONDIAL DES FABRICANTS

L'Europe, centre de développement de cette industrie de haute technologie, abrite les principaux fabricants mondiaux d'éoliennes. Depuis les années 1990, les Danois étaient les leaders des fabricants d'éoliennes dans le monde.

Au cours des dernières années également, les Danois ont dominé le marché mondial de la production d'éoliennes, suivis par les Espagnols, les Allemands et les Américains. Les principaux fabricants d'éoliennes mettent actuellement en service des usines de plusieurs millions de dollars dans le monde entier pour répondre aux besoins du marché industriel.

Les quatre principaux fabricants d'éoliennes dans le monde en 2016 étaient Vestas (Danemark) avec 16% de parts de marché mondial, GE Wind (États-Unis avec 12%), Goldwind (Chine ,12%), Gamesa (Espagne, 8%) et Enercon (Allemagne, 7%) [115].

1.9 CONCLUSION

L'Algérie dispose de ressources énergétiques importantes et diversifiées. Un programme d'application pour l'énergie éolienne a été mis en œuvre conjointement par l'Office national de météorologie (ONM) et le Haut Commissariat à la recherche (HCR).

Ce programme, dans sa première phase de réalisation, a été soutenu par l'Organisation météorologique mondiale et a conduit l'élaboration de l'atlas vent de l'Algérie. Il existe des opportunités pour l'énergie éolienne principalement dans les sites de littorale, les hauts plateaux, montagne et en Sahara. Des études ont été faites pour l'évaluation de cette ressource à travers l'Algérie. D'où l'intérêt du prochain chapitre, qui présente une étude de ressource éolienne d'Algérie.

CHAPITRE 2: ETUDE DE LA RESSOURCE EOLIENNE

L'homme a longtemps imaginé des moyens d'exploiter le vent, qui peut toutefois être modifié par la répartition de la terre et de la mer, la présence de montagnes et varie en fonction des saisons.

Le vent étant gratuit, inépuisable et produisant de l'énergie, pour cela l'objectif de ce chapitre est de faire une étude plus ou moins détaillée sur les caractéristiques du vent et de donner quelques éléments de base sur les mécanismes qui l'engendrent et le dirigent.

2.1. VENT

2.1.1. DEFINITION DU VENT

Le vent souffle autour de la terre grâce au soleil. Lors de la rotation de la terre, le soleil réchauffe de manière inégale les différentes parties de notre planète et crée, entre les pôles et l'équateur, des zones de températures différentes qui entraînent des différences de densité des masses d'air avec des variations de pression atmosphérique. En d'autres termes, l'air chaud et moins dense s'élève, tandis que l'air froid et plus dense vient prendre sa place. Au fil du temps, l'air chaud finit par se refroidir et redescendre, alors que l'air froid lui, s'est réchauffé au contact du sol. Le cycle est complet. Bref, tous ces mouvements entre les masses d'air chaud et d'air froid sont à l'origine du vent.

Selon Darrieus: La Terre est comme une grande machine thermique qui utilise chaque jour son fluide de travail. L'atmosphère de sa source chaude c'est l'hémisphère éclairé et de sa source froide c'est l'hémisphère obscur. Ce cycle produit une énergie mécanique qui n'est autre que l'énergie cinétique du vent.

2.1.2. ORIGINES DU VENT

En raison de la forme sphérique de la Terre, la radiation solaire totale diminue près des pôles. Il en résulte un excès d'énergie dans l'atmosphère près de l'équateur et un déficit dans les régions polaires. Pour compenser, la chaleur va se déplacer de l'équateur vers les hémisphères Sud ou Nord, en échangeant les masses d'air. Ce phénomène tire son nom des systèmes de circulation de Rossby dans les hémisphères Nord et Sud et la circulation de Hadley (Figure 2.1) dans les régions équatoriales [116].

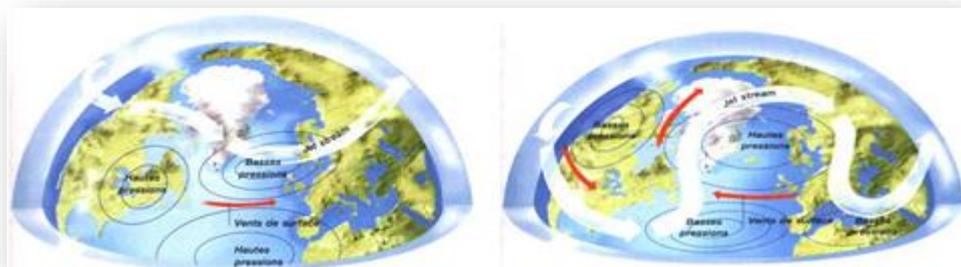


Figure 2.1 – La Circulation de Hadley.

A cause de la rotation de la Terre, les masses d'air subissent une force de déviation, appelée force de Coriolis (d'après le mathématicien français G. G. Coriolis en 1835).

D'après le météorologue néerlandais Buys-Ballot, si vous vous dirigez dans la direction du vent de façon que celui-ci vous souffle dans le dos, effectuez un huitième de tour sur votre droite (45°), vous avez alors, à gauche une zone de basse pression (dépression) et à droite une zone de haute pression (anticyclone) [117].

2.2. MOUVEMENTS ATMOSPHERIQUES

Le vent est le mouvement de l'air entre ces zones de basse et haute pression. Il est d'autant plus fort que les zones sont proches les unes des autres et que les différences de pression sont importantes.

Il convient de noter que les vents seront organisés en deux parties: la première à haute altitude de l'équateur aux pôles, la seconde dans la direction opposée mais au niveau du sol.

2.2.1 VENTS GLOBAUX (GEOSTROPHIQUES)

Lorsque la force de Coriolis équilibre la force de pression, le vent n'est soumis à aucune force et a un mouvement rectiligne uniforme. Un tel vent s'appelle géostrophique. On le trouve à des hauteurs supérieures à 1000 m au-dessus du sol [118].

Le vent géostrophique V_g fait référence aux hautes altitudes et est composé de deux forces: la force de Coriolis F et la force de pression P .

V_g se calcule à partir d'une carte d'isohypses et de la loi de Laplace:

$$\left\{ \begin{array}{l} V_g = \frac{1}{P \times F} \times \frac{dP}{dn} \\ F = 2\Omega \sin(\delta) \end{array} \right. \quad (2.1)$$

Avec

F : Paramètre de Coriolis non nul ;

Ω : Vitesse angulaire de rotation de la Terre en rad/s : 0.73×10^{-4} ;

δ : Latitude du point considéré en degré ;

n : Vecteur unitaire à l'isobare ;

$\frac{dP}{dn}$: Gradient de pression en Pa/m

2.2.2 VENTS DE SURFACE

Les vents de surface sont à environ 100 m du sol, l'influence de la surface du sol sur les vents est considérable. Ces vents soufflent dans des zones géographiques limitées, ils ont pour origine de petites différences dans le chauffage des masses d'air, par exemple les différences géographiques de terrain: vallées-sommets, champs-forets, mer-Terre, etc.

2.2.3 OBSTACLES DUS AU VENT

En surface, le vent est soumis à divers obstacles tels que la végétation, les haies, les murets de pierres sèches, les dunes fixées, rugosité du sol, etc. Jusqu'à environ 100 m de hauteur, l'influence de la surface du sol sur le vent est importante. Ces obstacles peuvent réduire considérablement la vitesse du vent, provoquant souvent des turbulences [118].

2.2.3.1 RUGOSITE

La rugosité du terrain, exprimée en mètres, est la difficulté rencontrée par le vent en glissant sur une certaine surface, elle est élevée pour les régions couvertes d'obstacles et faible pour des régions lisses la Figure 2.2 montre la nature du terrain.



Figure 2.2 – Mesure de la rugosité du sol.

La vitesse moyenne du vent augmente avec l'altitude selon un profil (profil de cisaillement) qui dépend des caractéristiques de la rugosité du sol (Figure 2.3): végétation, dénivellement, etc. [119].

Donc, les forêts, les herbes hautes, les buissons, les arbrisseaux et les grandes villes réduisent évidemment la vitesse du vent, tandis qu'une piste d'atterrissage en béton n'a que peu d'effet sur la vitesse du vent [120].



Figure 2. 3 – Terrain plat (en haut à gauche). Terrain accidenté (en haut à droite) est généralement dans les limites des performances dans des modèles d'écoulement (linéarités). Comme le terrain devient plus raide et plus complexe (en bas à gauche) les incertitudes modélises.

La rugosité de la surface est représentée par une échelle de longueur appelée rugosité annotée z_0 , divisée en 4 classes:

- Classe 0 : Plans d'eau ($z_0 = 0.0002$ m) ;
- Classe 1 : Terrain plat et dégagé ou légèrement ondulé avec très peu de brise vents ($z_0 = 0.03$ m);

- Classe2 : Terrain agricole avec de nombreuses haies et arbres isolés ; terrain plat tel que sites d'aéroports ($z_0 = 0.1$ m) ;
- Classe3 : Région forestière, une banlieue avec quelques bâtiments isolés ou terrain agricole avec de nombreux brise vents séparés entre eux de 100 m environ ($z_0 = 0.4$ m).

Le tableau 2.1 donne la correspondance entre la longueur de la rugosité et les caractéristiques du terrain.

Tableau 2.1 – Valeurs usuelles utilisées pour la rugosité [121]

z_0 [m]	Caractéristiques de la surface du Terrain
1.00	Ville
0.80	Forêt
0.20	Arbres
0.05 - 0.1	Terrain agricole
0.03	Terrain agricole avec très peu d'arbres
0.01 - 0.02	Aéroport
0.008	Herbes
0.005	Sol nu
0.001	Neige
0.0003	Sable
0.0001	Lac et Mer

2.2.3.2 INFLUENCE DES OBSTACLES ISOLES

En présence d'obstacles, le flux d'air est modifié, c'est-à-dire que l'écoulement du vent sera très perturbé. La nature de cette perturbation sera différente en fonction des obstacles rencontrés (constructions ou haie d'arbre).

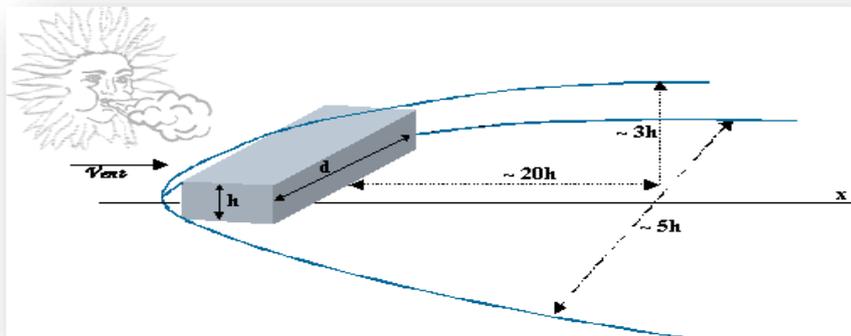


Figure 2.4 – Sillage derrière un bâtiment isolé [59]

Par exemple, dans la Figure 2.4, si h est la hauteur du bâtiment et d la dimension de la façade latérale, perpendiculairement à la direction du vent, l'écoulement génère une zone de sillage dont l'extension dans le sens de l'écoulement est de l'ordre de $20h$, latéralement d'environ 4 à 5 h (pour une distance de l'obstacle de $20h$) et verticalement de 2 à 3 h [121].

Lorsque la direction du vent n'est plus normale à la façade du bâtiment, le flux devient plus instable (tourbillonnaire), mais l'ordre de grandeur de la zone perturbée reste identique.

2.2.3.3 INFLUENCE DU RELIEF

Lorsqu'une masse d'air traverse un obstacle au relief modéré, une grande partie de l'écoulement subit une ascendance au vent suivi d'une descente sous le vent de l'obstacle. Il se crée une surpression au vent de l'obstacle et une brusque dépression au niveau du sommet.

A cette variation du champ de pression maximale près du sol de l'obstacle, correspond une variation inverse de l'énergie cinétique du fluide. Au sommet et sous le vent de l'obstacle, cet apport d'énergie cinétique est en partie dissipé sous la forme d'énergie turbulente [121].

La Figure 2.5 montre l'écoulement de l'air au-dessus d'une colline de hauteur H et de demi-largeur L , z_0 rugosité sur la colline, $\bar{u}_0(z)$ vitesse de référence [121].

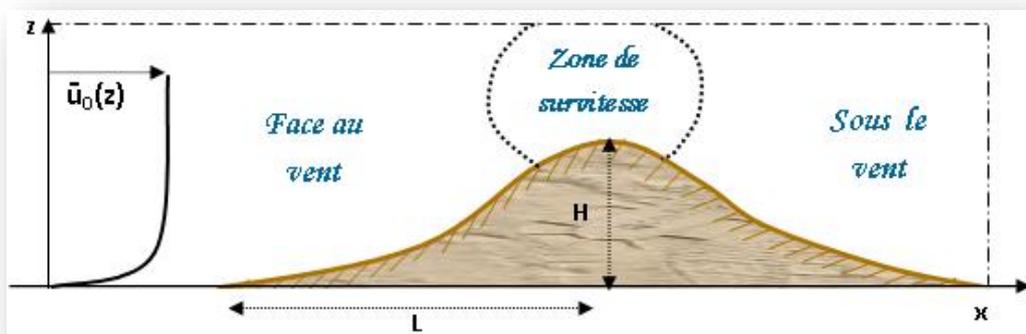


Figure 2.5 – Plan de l'écoulement au-dessus d'un obstacle dans la couche limite atmosphère[59].

La vitesse du vent au sommet de l'obstacle est égale à la vitesse de l'écoulement non perturbé au vent de la colline et à la même hauteur au-dessus du sol $\bar{u}_0(z)$, multipliée par un coefficient de survitesse $S(z)$ [121].

$$U(z) = \bar{u}_0(z) \cdot S(z) \quad (2.2)$$

$$S(z) \approx 1 + \frac{\alpha(z) \times H}{L} \quad (2.3)$$

$$\alpha(z) \approx \left[3.8 - 0.13 \times \log \left(\frac{L}{z_0} \right) \right] \times \exp \left(\frac{-3z}{L} \right) \quad (2.4)$$

Cette formulation n'est applicable que pour des collines à faible pente dont la hauteur est faible par rapport à l'épaisseur de la couche limite atmosphérique, mais importante par rapport aux éléments de la rugosité du sol:

$$\begin{cases} -10^2 z_0 \leq H \leq \frac{L}{4} \leq 4 \cdot 10^2 \\ 10^3 \leq \frac{L}{z_0} \leq 10^5 \end{cases} \quad (2.5)$$

2.3 VITESSE DU VENT

2.3.1 MESURE DE LA VITESSE DU VENT

La vitesse du vent est exprimée en mètres par seconde (m/s), en kilomètres par heure (km/h) ou en nœuds (kt). 1 m/s équivaut à 3.6 km/h et à environ 2 nœuds (une vitesse de 1 nœud correspond à une distance de 1 mille nautique parcourue en 1 heure, soit 1.852 km/h). Il existe des modalités d'évaluation de la vitesse du vent, on utilise pour cela des échelles.

Une des échelles les plus utilisées est celle de Beaufort (Tableau 2.2), « échelle graduée de 0 à 12 », qui calcule la vitesse du vent en fonction de ses effets sur l'environnement [40].

Tableau 2.2 Valeurs usuelles utilisées pour la rugosité (Échelle en degrés Beaufort) [40]

Échelle en degrés Beaufort	Nature du vent	Effets physiques	Vitesse du vent (moyenne) (m/s)
1	Vent insensible et très faible	La fumée monte verticalement (les feuilles semblent immobiles)	1
2	Brise infime	Imperceptible frémissement des feuilles, la fumée est légèrement déviée	2
	Brise légère (les moulins démarrent)	Les feuilles s'agitent doucement, la fumée est nettement déviée	3
3	Vent modéré (frais)	Les petits rameaux remuent un peu	4
4	Vent léger	Les branchettes plient légèrement	6
	Brise moyenne (bon frais)	Les branchettes plient nettement	7
5	Forte brise	Les branches oscillent et se balancent	8
	Grand frais	Les branches plient	9
6	Très forte brise	Les peupliers plient	10
	Vent fort	Les feuilles sont arrachées	12
7	Vent très fort	Les petites branches cassent	15
8	Vent impétueux	Les branches moyennes se brisent	20
9	Fort coup de vent	Début de dégâts sur les toitures	22
10	Tempête violente	Les fortes branches cassent	24
11	Tempête violente	Ravages étendus	30
12	Ouragan	Les toitures sont très endommagées	36
	Grand ouragan	Gros arbres et toitures sont arrachés effets catastrophiques	46

2.3.2 DIRECTION DU VENT

La connaissance de la direction du vent est un élément important de la prévision, car elle détermine à quel type de masse d'air on a affaire et de situer sans trop d'erreur, la position de l'anticyclone et de la dépression. La direction du vent est toujours donnée par la direction d'origine. Par exemple, on parlera d'un vent du nord lorsque le vent souffle du nord au sud. La direction du vent peut être déterminée à l'aide d'une girouette qui précise son origine.

2.4 DONNEES METEOROLOGIQUES

2.4.1 DONNEES STATISTIQUES

Les conditions climatiques jouent un rôle important dans la gestion des risques de catastrophe et dans la détermination des variations saisonnières ou interannuelles des vents qui nécessitent la disponibilité d'un grand nombre de données météorologiques. Les données de base ne sont plus la vitesse maximale annuelle, mais la vitesse moyenne (sur 10 min) mesurée dans chaque station météorologique avec une période de 3 heures [40,121]. Selon les applications impliquées, il est possible d'établir des statistiques de vitesse moyenne de tri-horaire, en fonction de la direction du vent, du mois et de l'heure [122].

2.4.2 FONCTION DE DISTRIBUTION DES VITESSES DE WEIBULL

Il est connu que les distributions de fréquence de la vitesse moyenne du vent peuvent être modélisées de manière satisfaisante en utilisant la distribution de Weibull à deux paramètres, elle s'écrit :

$$f(v) = \left(\frac{k}{c}\right) \times \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right] \quad (2.6)$$

Où

k : Facteur de forme [-] caractérise la forme de la distribution de fréquence (compris entre 1.2 et 3.5);

c : Facteur d'échelle (m/s) détermine la qualité du vent (plus c est élevé plus l'énergie se trouve dans les hautes vitesses);

v : vitesse du vent donnée (m/s)

Des études empiriques ont démontré que la distribution des vitesses du vent à la surface, sur terre ou en mer, peut être représentée par la fonction de densité de probabilité de Weibull à deux paramètres [123-124]: on peut estimer la vitesse moyenne du vent \bar{v} et l'écart type de la vitesse du vent σ à partir de la distribution statistique.

Pour le cas du paramètre d'échelle c

$$c = \frac{\bar{v}}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)} \quad (2.7)$$

La fonction gamma est une fonction continue qui est définie comme suit :

$$\Gamma(x) = \int_0^{\infty} e^{-v} v^{x-1} dv \quad (2.8)$$

Cette fonction satisfait l'expression suivante :

$$\Gamma(x+1) = x\Gamma(x) \quad (2.9)$$

Pour le cas du paramètre de forme k

$$k = \left(\frac{\sigma}{\bar{v}} \right)^{1.086} \quad 1 \leq k \leq 10 \quad (2.10)$$

Où :

$$\bar{v} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i \quad (2.11)$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (v_i - \bar{v})^2 \quad (2.12)$$

σ : La déviation standard de la vitesse du vent

2.4.3 COEFFICIENT DE CISAILLEMENT DU VENT

La vitesse du vent augmente au fur et à mesure que l'on s'éloigne du sol. Plus la rugosité est faible et plus le coefficient est faible, tandis qu'un coefficient élevé représente généralement un terrain avec des obstacles importants. Le profil de la vitesse moyenne calculé sur une période comprise entre 10 à 60 min, en fonction de la hauteur décrite par la loi de puissance est comme suit [125]:

$$\frac{v_2}{v_1} = \left(\frac{z_2}{z_1} \right)^{\alpha} \quad (2.13)$$

Où v_1 et v_2 sont les vitesses moyennes aux hauteurs z_1 et z_2 respectivement et α exposant qui est une fonction du paramètre de rugosité z_0 .

$$\alpha = 0.096 \times \log(z_0) + 0.016 \times (\log z_0)^2 + 0.24 \quad (2.14)$$

L'auteur Dyer [126] a montré graphiquement que pour des vitesses de vent très élevés, l'exposant n tend vers la valeur $1/7$. La relation devient:

$$v_2 = v_1 \left(\frac{z_2}{z_1} \right)^{1/7} \quad (2.15)$$

En général, pour la plus part des stations les mesures les mesures du vent en Algérie se font à 10 m au-dessus du sol (Figure 2.6) donc l'équation (1.14) devient:

$$\frac{v_2}{v_1} = \left(\frac{z_2}{10} \right)^\alpha \quad 0.08 \leq \alpha \leq 0.4 \quad (2.16)$$

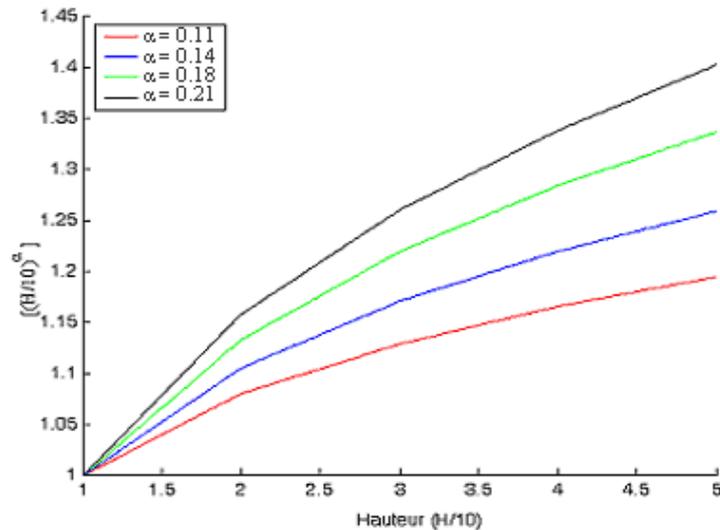


Figure 2.6 – Variations relatives de la vitesse en fonction de la hauteur au-dessus du sol.

2.6 CONCLUSION

Le vent est une énergie initialement exploitée mécaniquement pour moulin le grain ou pomper de l'eau par des moulins à vent et aujourd'hui indirectement dans la production d'électricité c'est-à-dire par une transformation de son énergie mécanique en énergie électrique.

Il est à noter que les vents seront organisés en deux parties: la première à haute altitude de l'équateur aux pôles (vents géostrophiques), la seconde dans la direction opposée mais au niveau du sol (vents de surface). Ces derniers de part leur capacité énergétique seront ceux exploités dans la majorité des cas.

CHAPITRE 3 : GISEMENT ÉOLIEN EN ALGERIE

Il est essentiel d'obtenir des données fiables sur le gisement éolien afin de mener une étude de faisabilité valable. La connaissance de la ressource éolienne d'un site est particulièrement importante.

En effet, l'analyse des données statistiques permet d'établir des cycles de variation de la vitesse du vent dans le temps.

L'objectif de ce chapitre est de décrire l'évolution saisonnière de la vitesse du vent en Algérie et les objectifs poursuivis par SONELGAZ.

3.1. INTRODUCTION

La société SONELGAZ utilise l'énergie solaire et photovoltaïque depuis plusieurs années pour fournir de l'électricité à des villages isolés du sud de l'Algérie [127]. Actuellement, elle cherche à maîtriser tous les types d'énergies renouvelables (conformément aux textes des Nations Unies), y compris l'énergie éolienne.

Pour mieux comprendre les dispositions nécessaires à l'installation d'une éolienne ou d'un site d'implantation de fermes éoliennes, il faut présenter les mécanismes qui génèrent et dirigent le vent.

3.2 REPARTITION EN ALGERIE

En Algérie, les paramètres du vent sont généralement mesurés à une hauteur standard de 10 m du sol, par l'office national de météorologie, à l'aide d'un réseau de 75 stations de mesure réparties dans tout le pays (Figure 3.1) et installées fondamentalement au niveau des ports et des aéroports.

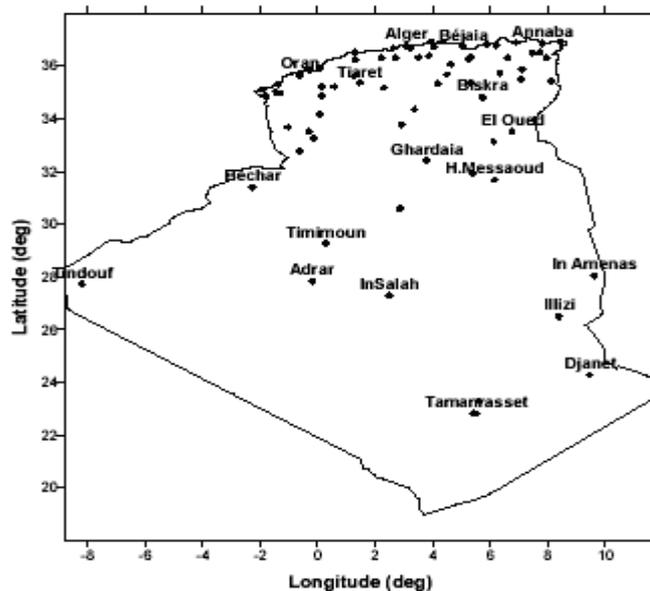


Figure 3.1 – Répartition géographique des stations météorologiques [5]

3.3. VARIATION DU VENT

Une étude de vent permettra d'évaluer le potentiel éolien pour la sélection des sites de parcs éoliens. Par conséquent, il est nécessaire de mener des études plus détaillées, telles que la détermination des évolutions journalières, mensuelles, saisonnières et/ou annuelles.

VARIATION JOURNALIERE

Les vents sont influencés par les variations journalières dues aux effets de la convection. Dans la plupart des cas, le vent est plus fort le jour que la nuit. Alors, les données climatiques permettent, pour une région donnée, de définir le régime de vent prédominant et ses vitesses "moyennes journalières".

VARIATION MENSUELLE

Pour quantifier la ressource éolienne et étudier son évolution mensuelle, un tracé des cartes de la vitesse moyenne mensuelle du vent est essentiel.

Ces cartes permettent de classer les mois de l'année en fonction de l'importance de la vitesse du vent.

VARIATION SAISONNIERE (PRINTEMPS-ÉTE-AUTOMNE-HIVER)

De plus, le régime des vents varie avec les saisons. En règle générale, la vitesse du vent augmente à partir du printemps, ce qui est un facteur favorable pour la consommation d'énergie en hiver.

VARIATION ANNUELLES

En raison du mouvement des zones de haute et basse pression sur la surface de la terre, la vitesse et la direction du vent varient généralement au cours de l'année. La production d'électricité par éoliennes dépend de la répartition annuelle par classes de vent, ce qui implique qu'une mesure du vent sur le site est toujours nécessaire pour évaluer la rentabilité d'un projet.

3.4. POTENTIEL D'ENERGIE EOLIENNE EN ALGERIE

L'Algérie fait partie des 15 pays dotés des meilleurs gisements éoliens d'Afrique (Figure 3.2) et qui sont Afrique du Sud, Cap Vert, Djibouti, Égypte, Érythrée, Lesotho, Madagascar, Maroc, Maurice, Mauritanie, Seychelles, Somalie, Tchad, Tunisie [104].



Figure 3.2 – Meilleurs gisements éoliens en Afrique [59].

L'Afrique du Nord possède le meilleur potentiel éolien de la région. Des projets de production éolienne à grande échelle sont en cours de développement pour exploiter cette ressource énergétique abondante (voir Figure 3.3).

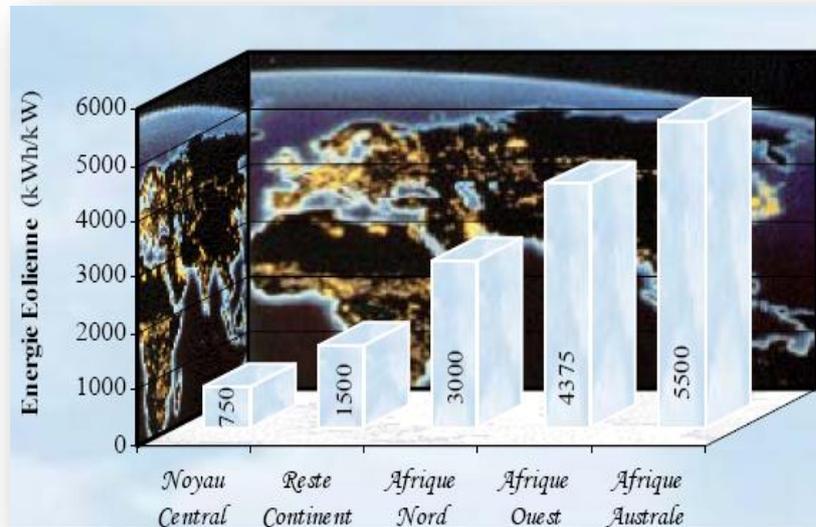


Figure 3.3 –Distribution de l'énergie éolienne annuelle dans l'Afrique [59].

Cependant, il a l'avantage de pouvoir soustraire l'éolienne à des conditions météorologiques extrêmes. Pour cela l'évaluation globale du gisement éolien est réalisée dans un premier temps à l'aide des données des stations météorologiques. En Algérie, les paramètres du vent sont généralement mesurés à une hauteur normalisée de 10 m du sol, par l'office national de météorologie.

3.4.1 EXPLOITATION DES MESURES EXISTANTES

Avant de considérer le bon fonctionnement de la machine, il est nécessaire de définir la source d'énergie de l'éolien qui est le vent. En fait, la modélisation du vent est indispensable pour aider à l'installation d'éoliennes et pour évaluer le potentiel d'énergie utilisable.

Cependant, des mesures précises de la vitesse du vent, et donc de l'énergie éolienne, sont importantes pour la réalisation d'un projet éolien. Les informations disponibles sur les vitesses moyennes du vent proviennent principalement de mesures météorologiques effectuées à 10 m de hauteur. En utilisant ces différentes mesures, il est possible d'établir de véritables atlas éoliens très détaillés pour des régions.

3.4.2 STATIONS DE MESURE

Depuis juillet 2001 il a été procédé à l'installation de 9 stations de mesure dans différentes régions (voir Figure 3.4). Ces stations ont été installées dans les sites suivants [59]:

- Marsa Ben M'Hidi,
- Bnoud,
- Idles,
- In Mguel,
- Ghazaouet,
- Silet,
- Tamanrasset,
- Timimoun,
- Tindouf.

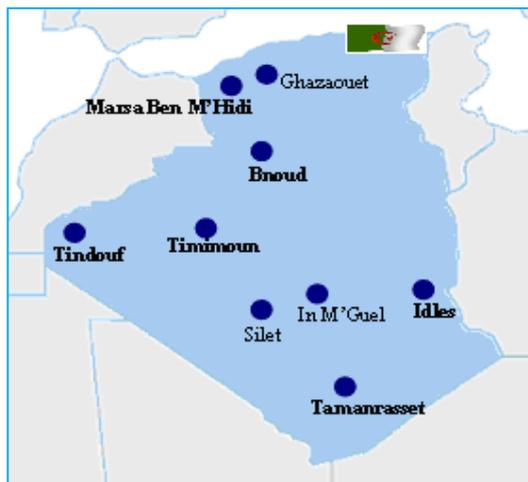


Figure 3.4 – L'installation de 9 stations de mesure dans différentes régions [59].

Ce sont les stations modèles de THIES (Allemagne) et mesurent les grandeurs suivantes: La température de l'air, l'éclairement solaire, la vitesse du vent, la direction du vent, l'humidité relative. Les capteurs de vitesse et de direction du vent sont installés pour la plupart, à une hauteur de 17 m sur des supports largement utilisés par SONEGASZ et moyennant quelques modifications permettant une intervention sur l'appareillage.

3.5 VENT EN ALGERIE

Le gisement éolien, est déterminé sur la base de données des stations météorologiques. Ces mesures sont effectuées pendant une période suffisamment importante pour prendre en compte les différents phénomènes météorologiques pouvant se produire.

3.5.1 ANALYSE DES VENTS « CARTES SAISONNIERES »

L'analyse des vents en Algérie, nous amène à étudier le lieu d'implantation et le rendement d'une éolienne qui sera très sensible à la distribution locale des vitesses du vent, ceci nous place dans les meilleures conditions de rentabilité globale pour le site favorable [128].

Dans l'Atlas vent de l'Algérie qui a été établie par Hammouche [4], on trouve pour chaque site les statistiques des données brutes contenant la distribution des mesures du vent et la variation journalière et annuelle de la vitesse du vent au cours d'une période donnée.

L'étude de la rentabilité des systèmes éoliens est étroitement liée à la source elle-même, à savoir le vent, qui est l'un des éléments les plus caractéristiques du climat [2,129]. La Figure ci-dessous [5] montre la vitesse du vent annuelle à 10 m au-dessus du sol en Algérie, basé sur le calcul ou l'étude statistique.

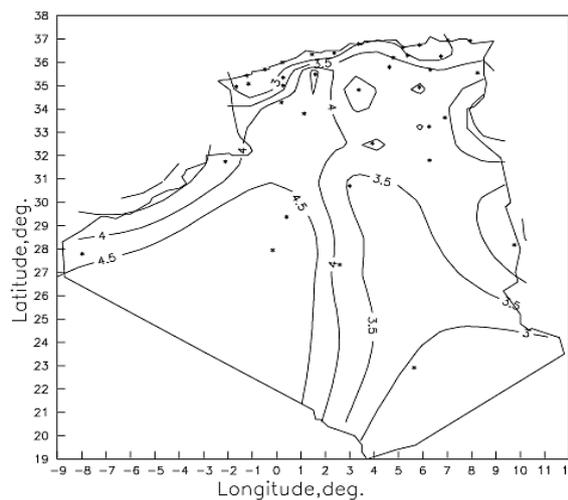


Figure 3.5 – Carte annuelle de la vitesse du vent à 10 m au dessus de sol [5]

La Figure 3.6 montre les cartes saisonnières de la vitesse du vent en Algérie, mesurée sur des moyennes mensuelles de la vitesse du vent fournies par l'ONM.

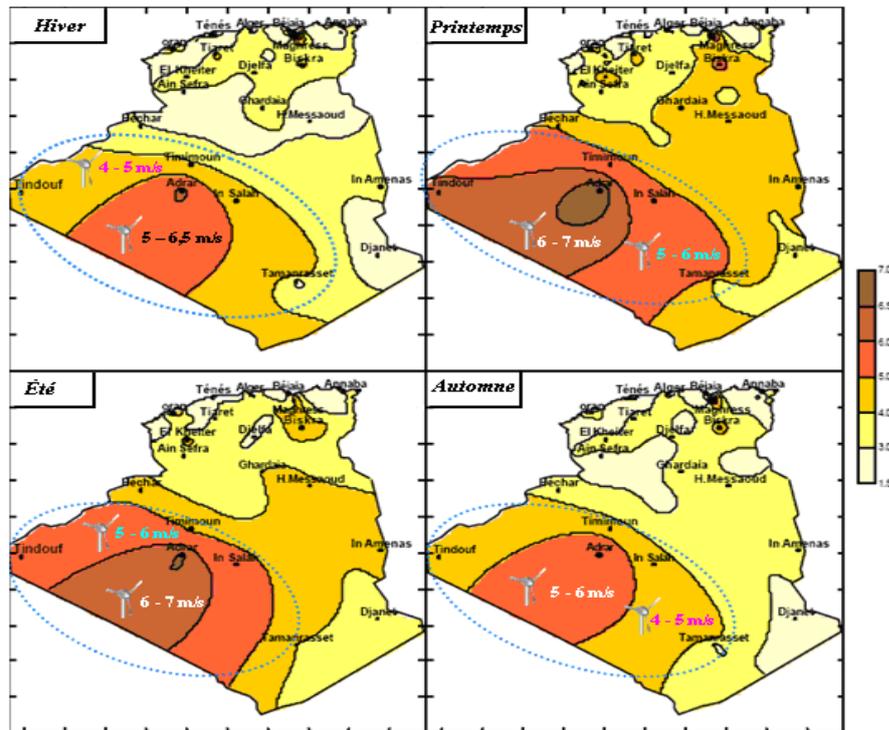


Figure 3.6 – Cartes saisonnières de la vitesse du vent "modifié" [59].

Des études [59,130] ont été réalisées pour l'évaluation de cette ressource "éolienne" à travers l'Algérie. Les résultats sont présentés sous forme de cartes saisonnières, qui constituent un excellent guide pour les développeurs et les promoteurs de projets éoliens. En fait, les cartes saisonnières (Figure 3.6) montrent l'évolution des vitesses du vent pendant l'année. On note que:

- Les régions les plus ventées se situent au Sud Ouest,
- Vents faibles en hiver et l'automne, généralement à des vitesses moyennes inférieures à 6.5 m/s

Certaines zones du Sud Ouest, avec un potentiel éolien à 7 m/s sur la carte, pourraient donc être des lieux favorables à la mise en place d'éoliennes.

3.5.2 ATLAS DES VENTS DE L'ALGERIE

En 1990, Hammouche [4] a publié l'Atlas du vent de l'Algérie, qui fournit les résultats de l'étude statistique de 37 stations via le logiciel WASP utilisé pour la cartographie éolienne de l'Europe.

Pour chaque site, on trouve les statistiques des données brutes sous la forme des tableaux contenant la distribution des mesures de vent et la variation journalière et annuelle de la vitesse du vent au cours d'une période donnée.

Les figures 3.7, 3.8 et 3.9 montrent la répartition annuelle des vitesses moyennes à Tindouf, Timimoun et Adrar sur une période de près de 10 ans.

• **Tindouf**

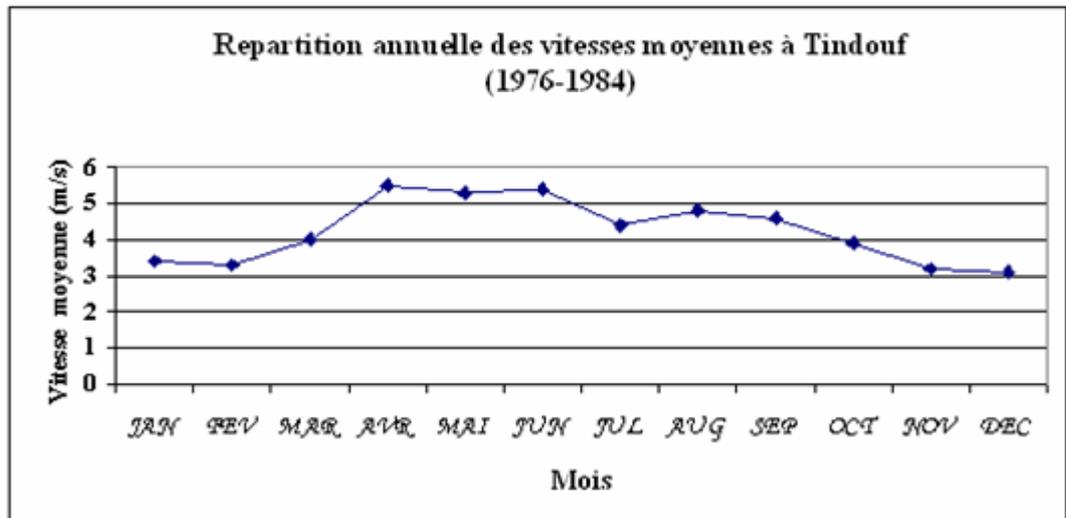


Figure 3.7 – Répartition annuelle des vitesses moyennes à Tindouf.

• **Timimoun**

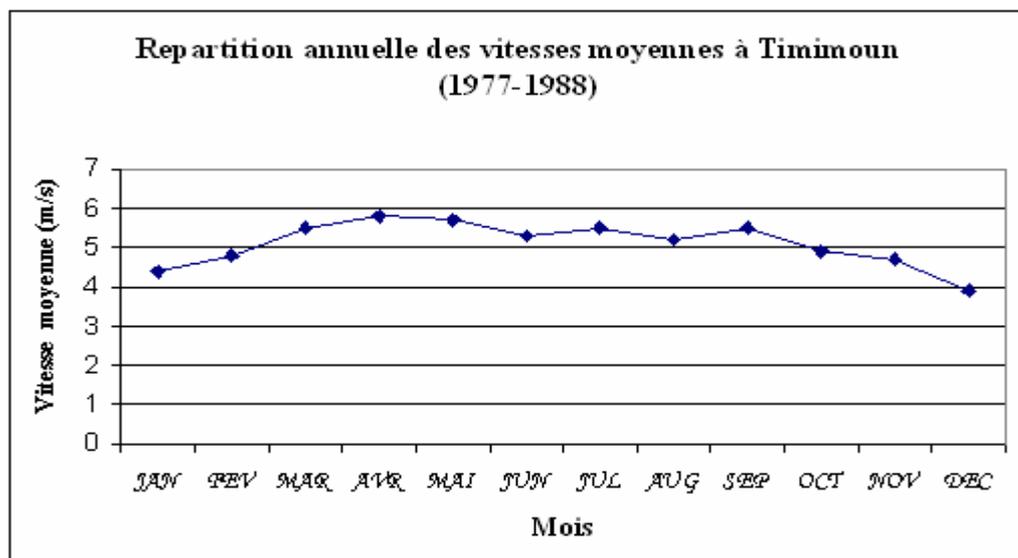


Figure 3.8 – Répartition annuelle des vitesses moyennes à Timimoun.

• Adrar

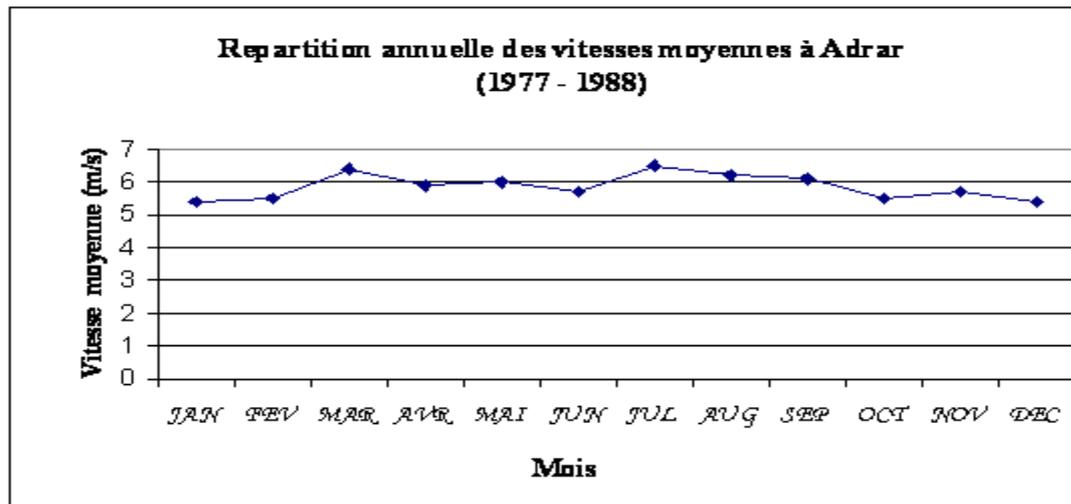


Figure 3.9 – Répartition annuelle des vitesses moyennes à Adrar.

Cette analyse des vents en Algérie, nous amène à étudier les lieux d'implantation et le rendement d'une éolienne qui sera très sensible à la répartition locale des vitesses du vent, ceci nous place dans les meilleures conditions de rentabilité globale pour le site favorable.

3.5.3 ETUDE PRELIMINAIRE SUR CINQ ANNEES

La première étape consiste à répondre aux besoins, c'est-à-dire à déterminer les régions ayant les plus grandes contraintes d'exploitation de l'électricité, ces problèmes concernent en particulier le sud de l'Algérie.

Par conséquent, ce dernier a été choisi pour faire l'objet d'évaluation des ressources éoliennes. Les données exploitées sont des mesures enregistrées par l'Office National de Météorologie (ONM).

Des calculs statistiques ont porté sur six sites (Figure 3.10) qui sont :

- Adrar,
- Béchar,
- Bordj Badji Mokhtar,
- Djanet,
- Tamanrasset,
- Tindouf.

Les cinq sites (Bechar, Bordj Badji Mokhtar, Djanet, Tamanrasset, Tindouf) sont proches de la centrale diesel et le sixième site Adrar, a été choisi bien qu'il soit alimenté par une centrale à gaz, car c'est l'une des régions les plus ventées d'Algérie.

Les mesures sont effectuées à une hauteur de 10 m et les données utilisées sont enregistrées toutes les 3 heures sur une période de 5 ans, ce qui a permis de déterminer la vitesse moyenne et la distribution des fréquences de la vitesse moyenne du vent dans ces sites.

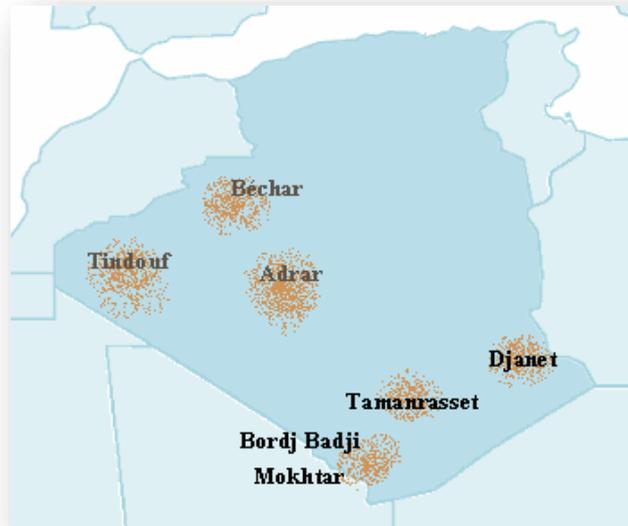


Figure 3.10 – Régions les plus ventées d’Algérie.

Afin de mieux comprendre la variation annuelle de la vitesse du vent, sur la base de moyennes saisonnières, la vitesse moyenne du vent des six sites est illustrée dans la Figure ci-dessous (Figure 3.11).

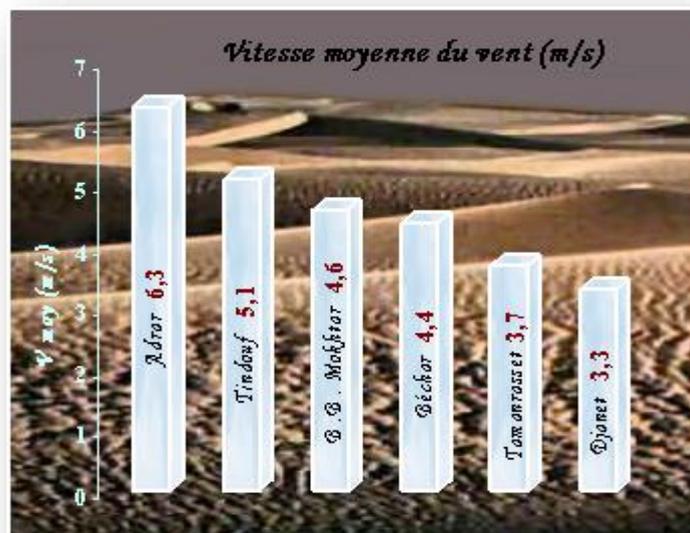


Figure 3.11 – Vitesse moyenne du vent des 6 sites [59].

Le gisement éolien déterminé à partir des données des stations météorologiques montre que certaines zones avec un potentiel éolien supérieur à 5 m/s peuvent être favorables, comme le montre la Figure 3.11.

3.6 OBJECTIFS CIBLES DE LA SONELGAZ

La recherche sur les ressources éoliennes reste la principale préoccupation des producteurs d'énergie éolienne.

La SONELGAZ, comme d'autres compagnies d'électricité du monde entier et par le biais de la direction de recherche développement, a jugé nécessaire de s'impliquer dans cette technologie, qui peut déjà au stade actuel de son développement présenter une solution technico-économique au problème d'alimentation des zones isolées [131-132].

Par conséquent, l'objectif principal est de pouvoir résoudre ou au moins atténuer les contraintes d'exploitation des microcentrales diesel alimentant des régions difficilement accessibles et loin du réseau interconnecté.

Leurs études actuelles portent sur:

- Les ressources éoliennes déterminées par les mesures existantes sur plusieurs années, ainsi que par les mesures effectuées à des endroits spécifiques de nos stations météorologiques.
- La viabilité d'un système hybride éolien-solaire-diesel.

En 2013, la SONELGAZ a prévu d'établir un programme de production d'origine renouvelable sur la période 2013 – 2023. Il convient de rappeler que les réseaux Algériens seront dotés d'une capacité totale de 5539 MW, dont 2075 MW en photovoltaïque, 639 MW en éolienne et 2825 MW en CSP. La répartition par année et par type d'énergie est présentée dans le tableau ci-dessous [133].

Tableau 3.1 : programme EnR sur la période 2013-2023[133].

	Puissance à installer (MW)											
	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2013-2023
PV	15	400	95	166	200	200	200	200	200	200	200	2075
CSP	-	-	60	120	120	200	325	500	500	500	500	2825
Eolien	10	20	20	20	50	50	50	50	123	123	123	639
ER	25	420	175	306	370	450	575	750	823	823	823	5539

3.7 CONCLUSION

Au cours de la dernière décennie, le développement de technologies pour la production d'électricité a admis cette filière comme une alternative pour les prochaines décennies.

La production d'électricité à partir de sources d'énergie renouvelables, telles que les éoliennes, reste la principale préoccupation des producteurs d'électricité de SONELGAZ. A cet effet, l'électricité produite par une éolienne dépend de l'énergie disponible dans le vent. En effet, pour apprécier un site, une bonne connaissance du gisement éolien est nécessaire. Par conséquent, il est nécessaire de procéder à une étude de caractérisation du vent. Cette étude a fourni des informations sur la répartition géographique du vent. De cette manière, elle a rendu possible la première identification des régions dites ventées avec un potentiel éolien important qui pouvant selon les besoins, constituées des candidates à l'exploitation de cette énergie.

Ce travail fourni à l'utilisateur des informations sur l'évolution saisonnière de la vitesse moyenne du vent de l'Algérie. Celles-ci sont nécessaires à la sélection des sites pour la mise en œuvre des systèmes éoliens, sachant que les besoins en énergie varient tout au long de l'année. On peut d'ores et déjà conclure que le gisement éolien est plus important au Sud qu'au Nord particulièrement dans le Sud Ouest.

CHAPITRE 4: ETUDE DE FAISABILITE ECONOMIQUE ET DE PERFORMANCE D'UNE FERME EOLIENNE DANS LA REGION D'ADRAR

La variation spatiale de la vitesse du vent a montré l'existence d'un potentiel éolien important dans la région du Sud-ouest de l'Algérie.

Cette étude consiste de proposer une approche permettant d'installer de manière optimale techniquement et économiquement un parc éolien sur un site choisi.

Ce chapitre vise donc à décrire la méthode et le modèle utilisé pour cette étude, dans lequel nous rapportons des résultats de calculs.

4.1 INTRODUCTION

Le développement d'une société se traduit par la satisfaction croissante d'un certain nombre de besoins tel que logement, alimentation, facilités de déplacement, éducation, qualité de l'environnement naturel, sport, etc.

La plupart de ces activités nécessitent, à des degrés divers, une consommation d'énergie, soit par utilisation directe pour certains usages, soit pour permettre la production des biens et des services qui leur sont associés. La disposition de l'énergie est donc indispensable au développement économique et social. Quand on parle de consommation d'énergie, on évoque habituellement les consommations les plus tangibles d'énergie conventionnelle (charbon, pétrole, gaz, nucléaire, hydraulique, etc.).

L'objectif de cette recherche est d'étudier en détails la viabilité économique d'une ferme éolienne et l'évaluation du potentiel éolien par les outils RETScreen et WASP, respectivement, pour la région du sud-ouest de l'Algérie (Région d'Adrar)

POLITIQUE ENERGETIQUE ALGERIENNE

Le mode de vie matérialiste aujourd'hui est énergivore et dépend de l'énergie, dès du début de la journée jusqu'à sa fin et au-delà. En effet, les coupures de courant (black out) dans une ville ou une maison sont devenues insupportables et intolérables.

Au cours de cette dernière décennie, le mode de vie et le confort ont entraîné des consommations excessives d'énergie 1/4 de la population mondiale des pays riches et industrialisés consomment près de 3/4 de réserve d'énergie mondiale [134].

En ce qui concerne l'Algérie, le nombre d'abonnés d'électricité est passé de 7057246 en 2011 à 9 184962 en 2017. La croissance énergétique a atteint 75675 GWh en 2017 contre 48871 GWh en 2011. L'augmentation de cette demande énergétique peut être attribuée à la croissance rapide des secteurs commercial et résidentiel en Algérie.

Tableau 4.1 : Evolution de l'énergie électrique consommée en Algérie (2011-2017) [135].

Paramètre	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Energie consommée (GWh)	48871	54087	59516	64050	68766	70748	75675
Nombre d'abonnés	7057246	7381864	7699835	8031502	8450000	8810312	9184962

Le gouvernement Algérien a encouragé l'utilisation et le développement des énergies renouvelables telles que la biomasse, l'énergie solaire, l'énergie éolienne, etc. l'objectif de cette étude est de proposer une démarche permettant d'implanter de manière optimale techniquement et économiquement un système éolien sur les sites Algériens en déterminant la taille, la configuration et le potentiel de production énergétique.

Le choix du système éolien s'appuie sur le type d'éolienne à axe horizontal ou vertical et selon la vitesse du vent du site choisi. Les données de vent obtenues durant une période de 5 à 10 ans sont utilisées pour évaluer les ressources éoliennes dans la région sud ouest de l'Algérie. Cette étude va nous permettre d'estimer la production d'énergie, la viabilité financière et les réductions d'émissions de gaz à effet de serre (GES).

4.2 STRATEGIE DE LA CONSTRUCTION D'UNE FERME EOLIENNE

La production énergétique d'une ferme éolienne est étroitement liée à sa localisation et aussi varie en fonction des variations de la vitesse du vent, traditionnellement calculées à partir d'une série chronologique, sur un site donné.

Une bonne analyse de l'impact du changement climatique, à long terme d'au moins une année de données précises de vitesse de vent, est essentielle pour la conception et la gestion d'un futur parc éolien. Cette étude doit suivre les étapes suivantes:

- Disposer une base de données sur les ressources éoliennes de certains sites.
- Sélectionner les sites présentant un potentiel éolien attrayant.
- Caractériser les sites identifiés et déterminer la configuration des fermes éoliennes qui s'y prêtent.
- Evaluer l'énergie pouvant être produite et étudier les impacts énergétiques et environnementaux.

4.3 PHASES D'UN PROJET DE FERME EOLIENNE

Pour mener à bien un projet de ferme éolienne, plusieurs phases essentielles sont nécessaires. Parmi ces phases on cite :

4.3.1 ÉVALUATION DU GISEMENT EOLIEN

L'évaluation du gisement éolien est un point essentiel pour tout projet de ferme éolienne afin de mener une étude de faisabilité valide. Un programme de mesures du vent d'une durée d'un an est recommandé.

D'autres paramètres que la vitesse moyenne annuelle du vent peuvent présenter un intérêt pour la conception d'une ferme éolienne par exemple : la distribution de fréquence de la vitesse du vent, la température, le givrage et le verglas, la variabilité saisonnière, la direction des vents dominants, etc.

4.3.2 LOCALISATION DES EOLIENNES

La localisation des éoliennes est le principal enjeu de l'éolien. En effet l'efficacité de l'énergie éolienne dépend beaucoup de la localisation puisque une ferme éolienne située dans les zones ouvertes et présentant une bonne exposition au vent est éligible.

Pour avoir une localisation géographique adéquate, l'emplacement de la ferme éolienne doit être :

- En dehors des espaces aériens contrôlés,
- En dehors des zones d'évolution des appareils militaires tels que Radars,
- Eloigné des centres résidentiels (accidents, pollution sonore, l'impact visuel sur le paysage, etc.)

4.3.3 FACTEURS INFLUENÇANT LA RENTABILITE D'UN PROJET EOLIEN

L'évaluation de la rentabilité d'un projet d'une ferme éolienne dépend de plusieurs facteurs, parmi lesquels on en cite:

- La disponibilité de la ressource énergétique sur le site (carburant, eau, vent, soleil, etc.) est essentielle et indispensable, elle doit être bien étudiée. Dans notre cas, ce sera la vitesse moyenne annuelle des vents.
- La performance (rendement) des équipements est un facteur important qui s'applique à tous les projets, y compris les mesures d'efficacité énergétique. Dans le cas des éoliennes, ce sera la courbe de puissance qui fournit la variation de puissance disponible en fonction de la vitesse du vent.
- Le coût d'investissement d'un projet éolien qui dépend des caractéristiques et de la taille du parc éolien et qui comprend tous les frais liés au projet (installation, maintenance, assurances, taxes, crédits, etc.) doit être modéré.
- Assurer des coûts évités en énergie suffisants pour garantir la rentabilité du projet (un bon projet vise donc à minimiser les coûts d'investissement tout en garantissant d'avoir des coûts évités en énergie suffisants).

4.4 PROPRIETES DES SITES

Pour connaître les propriétés d'un site, il est nécessaire de mesurer la vitesse et la direction du vent sur une longue période. En effet les données de vent obtenues sur une période de 5 à 10 ans sont utilisées pour l'évaluation des ressources éoliennes en Algérie. La connaissance de la ressource éolienne d'un site est particulièrement importante.

L'étude a montré que la zone présentant le potentiel éolien le plus élevé se situe dans le Sud Ouest de l'Algérie. Cette analyse des vents en Algérie, nous amène à étudier les lieux d'implantation et le rendement d'une éolienne qui sera très sensible à la distribution locale des vitesses du vent, ceci nous place dans les meilleures conditions de rentabilité globale pour le site favorable [136].

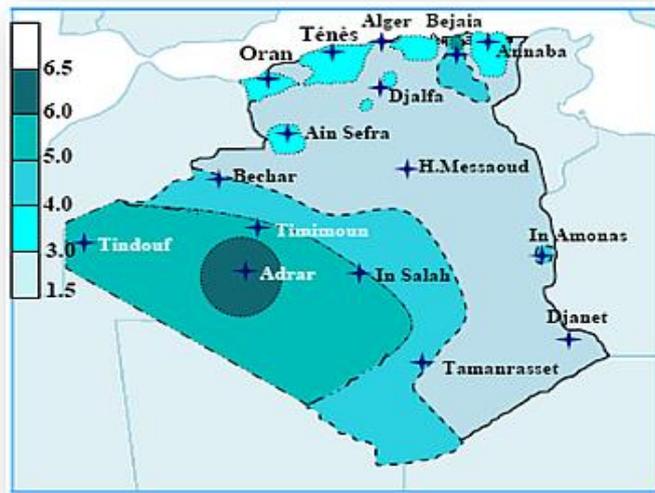


Figure 4.1 – Carte annuelle de la vitesse moyenne du vent en Algérie à 10 m au dessus du sol [13].

Les différentes études réalisées par Centre Développement des Energies Renouvelables (CDER), Atlas du vent de l'Algérie et SONELGAZ (Figure 4.1), montrent un résultat identique, d'une existence d'un gisement éolien important dans la région Sud Ouest [4,13,137,138].

4.4.1 SITES FAVORABLES A L'INSTALLATION DE LA FERME EOLIENNE

La région Sud Ouest de l'Algérie, présente toutes les caractéristiques de sites candidats à l'exploitation de l'énergie éolienne [126]. En fait, un site avec une vitesse de vent moyenne de 8 m/s sera environ 8 fois plus productif qu'un autre site avec une vitesse de vent moyenne de 4 m/s [139,140]. L'étude d'un gisement éolien passe par l'étude de la distribution en fréquence et direction.

La distribution en fréquence peut être représentée par la loi de distribution de Weibull [141].

4.4.2 FONCTION DE DISTRIBUTION DE WEIBULL

L'étude des distributions de vent peut être réalisée soit à partir de mesures de vitesses de vent effectuées sur le site, ou par un modèle de variation de la vitesse du vent obtenu par des méthodes statistiques appropriées. La distribution de Weibull est un modèle couramment utilisé [142].

La loi de Weibull et la loi de puissance décrivent la distribution de fréquence des vents à hauteur du moyeu de la turbine. Ces deux fonctions permettront le calcul de la moyenne annuelle de la vitesse du vent sur le site.

La probabilité pour que la vitesse du vent soit égale à v est :

$$P(v) = \left(\frac{k}{C}\right) \times \left(\frac{v}{C}\right)^{k-1} \times \exp\left[-\left(\frac{v}{C}\right)^k\right] \quad (4.1)$$

Où :

k : Facteur de forme [-] (compris entre 1.2 et 3.5) ;

c : Facteur d'échelle (m/s) ;

v : Vitesse donnée m/s.

Distribution de Weibull appliquée au site d'Adrar :

Les variations du vent sur le site d'Adrar sont généralement décrites à l'aide de la distribution de Weibull illustrée à la Figure 4.2. On remarque que 6 m/s est la médiane de la distribution.

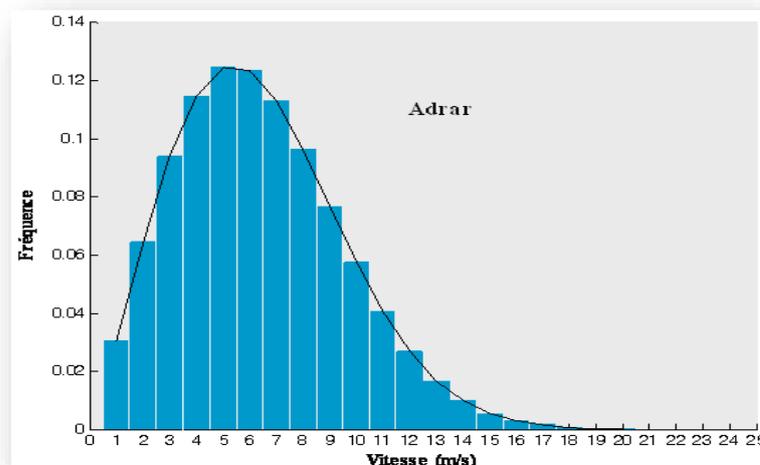


Figure 4.2 – Fonction de distribution de Weibull d'Adrar [136].

En outre, l'utilisation de la distribution de Weibull nous permet de reconstituer facilement la distribution de fréquence des vitesses moyennes de n'importe quel point d'un site donné.

4.4.3 ENERGIE EOLIENNE

L'énergie éolienne provient de l'énergie cinétique du vent. En effet, si on considère qu'une masse d'air m se déplace avec la vitesse v , l'énergie cinétique de cette masse est [38,40,143]:

$$E_c = \frac{1}{2} mV^2 \quad (4.2)$$

Si pendant l'unité de temps, cette énergie pouvait être complètement récupérée au moyen d'une hélice balayant une surface S , située perpendiculairement à la direction de la vitesse du vent, la puissance instantanée fournie serait donc:

$$P_v = \frac{1}{2} \rho S V^3 \quad (4.3)$$

Où ρ est la masse volumique de l'air.

La puissance maximale P_{\max} d'une éolienne est donnée par la formule de Betz [144]:

$$P_{\max} = \frac{16}{27} P_v \approx 0.6 P_v \quad (4.4)$$

Il est possible de récupérer seulement 60% de l'énergie cinétique totale $\left(\frac{1}{2}\right)\rho S V^3$

Donc la puissance maximum disponible dans le vent est :

$$P_{\max} = \frac{16}{27} \frac{1}{2} \rho S V^3 \quad (4.5)$$

Pour une unité de surface $S=1 \text{ m}^2$ P_{\max} devienne on a :

$$P_{\max} = \frac{16}{27} \frac{1}{2} (1.225) V^3 \approx 0.37 V^3 \quad (4.6)$$

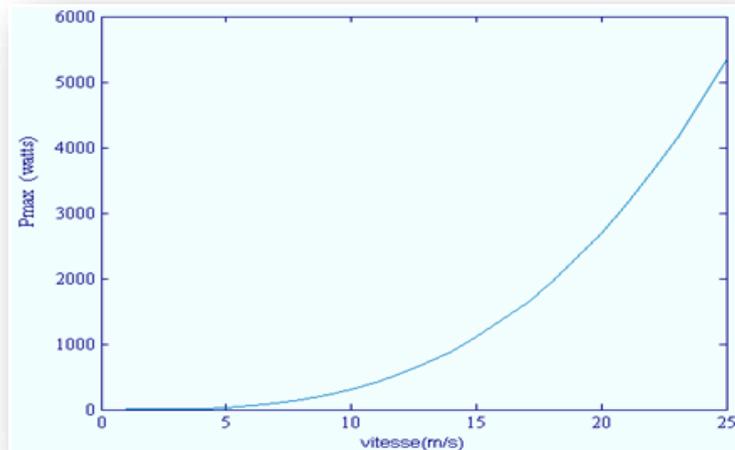


Figure 4.3 – Loi de BETZ [59].

4.5 CHOIX DE LA FERME EOLIENNE

4.5.1 GENERALITES

Comme déjà mentionné, la sélection d'un site pour la mise en place d'une ferme éolienne nécessite l'évaluation et la mesure de la ressource éolienne, l'étude des conditions de raccordement au réseau électrique, l'infrastructure, les conditions d'accès routier, etc. Le choix optimal d'un système éolien destiné à couvrir en totalité ou partiellement les besoins énergétiques d'un site, doit être basé sur la connaissance des caractéristiques du vent de la région où ce système va être implanté. Ces caractéristiques interviennent en effet sur le type d'utilisation et sur le choix des machines (puissance nominale, vitesses caractéristiques).

Dans cette étude on propose une démarche permettant d'implanter de manière optimale techniquement et économiquement une ferme éolienne sur un site choisi. Dans notre cas d'étude cette démarche sera appliquée directement à la région d'Adrar.

4.5.2 CARACTERISTIQUES DE LA FERME EOLIENNE

L'optimisation de l'éolienne fait référence à la taille (dimension) de la machine, les caractéristiques et la complexité des composants utilisés, et implique la connaissance de son environnement c'est-à-dire l'accessibilité au site et les propriétés géographiques et météorologiques du site et sur les paramètres économiques du projet, sans oublier son raccordement au réseau et l'investissement nécessaire.

En général, les caractéristiques des éoliennes sont énumérées ci-dessous :

- Puissance nominale par éolienne,
- Caractéristique de performance (rendement) indiquée par le fabricant,
- Hauteur du moyeu,
- Diamètre du rotor,
- Surface balayée, etc.

4.5.3 MODELISATION ET DIMENSIONNEMENT DE LA FERME EOLIENNE

Il est nécessaire de disposer une description plus détaillée et plus complète du fonctionnement réel de l'éolienne afin d'avoir une modélisation plus précise du fonctionnement de la ferme éolienne et de son interaction avec le vent. La modélisation dépend de l'existence de cartes topographiques numérisées et de données antérieures ou récentes relatives à la vitesse du vent spécifiques au site ou à la région étudiée.

L'évolution des outils informatiques, tel que RETScreen nous permet d'envisager très sérieusement la modélisation d'un système.

4.6 EVALUATION DU GISEMENT EOLIEN AU SUD OUEST DE L'ALGERIE

Les sites éoliens des régions Sahariennes présentent des défis additionnels en raison des conditions climatiques extrêmes (problèmes de sable), de températures élevées pendant de longues périodes, de la disponibilité des équipements et des contraintes de logistique.

4.6.1 DESCRIPTION DU PROJET ET DONNEES ENERGETIQUES

Adrar est la 2^{ème} région la plus importante de l'Algérie, après Tamanrasset, avec une superficie de 439700 km² [145] soit près deux fois la superficie totale de la Biélorussie (Figure. 4.4).

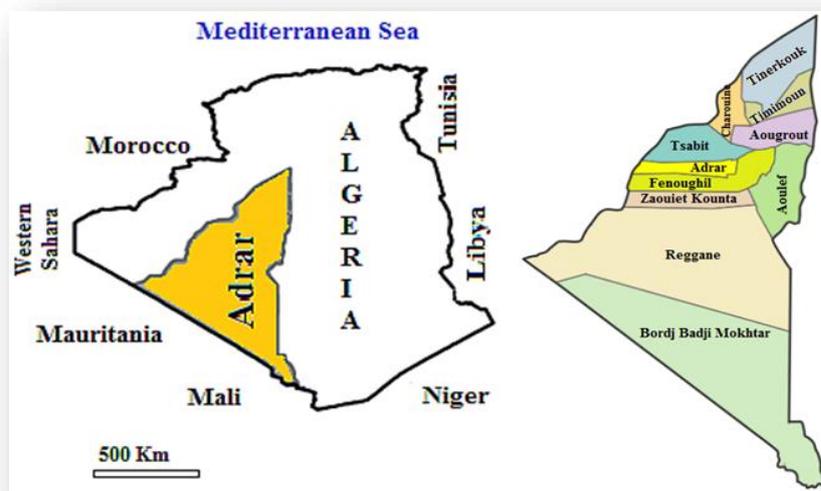


Figure 4.4 – Situation géographique de la région d'Adrar [146]

En 2015, la population totale de cette région dépassait 441 800 d'habitants [147]. Elle comprend 11 districts, 28 municipalités et 299 Ksars. Les villes les plus importantes sont Timimoun, Reggane, Adrar, Tsabit, Zaouiet Kounta, Aougrou, Tamentit, Aoulef, Fenoughil, Charouin et Bordj Badji Mokhtar.

Dans la région d'Adrar, le projet de gisement gazier de Timimoun, est classé comme un réservoir compact gréseux. Cette région peut être considérée comme une base industrielle de gaz.

De plus, les trois zones, à savoir In Salah, Adrar et Timimoun, sont interconnectées entre elles via un réseau électrique et constituent un pôle (PIAT). Bientôt, le PIAT sera connecté au réseau national via une ligne électrique de 400 kV. Ce système électrique va donc couvrir tout le territoire Algérien.

4.6.2 DONNEES METEOROLOGIQUES

Adrar est situé dans la partie sud-ouest de l'Algérie (Lat 27° 49'N et Long 00° 17' E) à une altitude de 263 m au-dessus du niveau moyen de la mer. La région est caractérisée par sa topographie relativement plate, avec une faible rugosité, ainsi que par une géomorphologie désertique. Adrar et ses alentours sont caractérisés par un fort potentiel de vent venant du Nord Est.

Il n'y avait aucun obstacle ni barrière à proximité de site choisie. Il était situé non loin du point de raccordement au réseau.

Pour la mise en œuvre économique et efficace de projets éoliens en tout lieu, il est essentiel de connaître la disponibilité et la variabilité de la vitesse du vent sur une base annuelle, mensuelle et quotidienne.

À Adrar, les mesures de vent ont été effectuées à 10 m du sol et enregistrées à des moyennes tri-horaires. Ces données sont celles de l'Atlas de vent. Elles correspondent à une durée de collecte de 11 années complètes successives (1977-1988). La vitesse moyenne annuelle du vent, la température ambiante et la pression barométrique dans cette région étaient respectivement de 5.9 m/s, 24.1 ° C et 98 kPa.

4.7 MATERIELS ET METHODES

Cette partie traite en détails les caractéristiques de la vitesse du vent via WASP et les résultats de l'énergie électrique d'origine éolienne obtenues à partir de deux approches différentes, à savoir la courbe de puissance et le modèle RETScreen.

4.7.1 ÉTUDE DES CARACTERISTIQUES DU VENT VIA WASP

Les caractéristiques du vent ont été analysées à l'aide du logiciel Wind Atlas Analysis and Application Program "WASP" afin d'examiner et déterminer la direction et la vitesse moyen du vent ainsi la densité de puissance moyenne.

Le WASP est composé de 5 blocs essentiels :

- Analyse des données des vents brutes
- Génération d'atlas de vent
- Evaluation des conditions du vent
- Evaluation de la production de l'énergie éolienne
- Calcul de la production énergétique d'une ferme éolienne

Ceci est représenté schématiquement sur la figure 4.5.

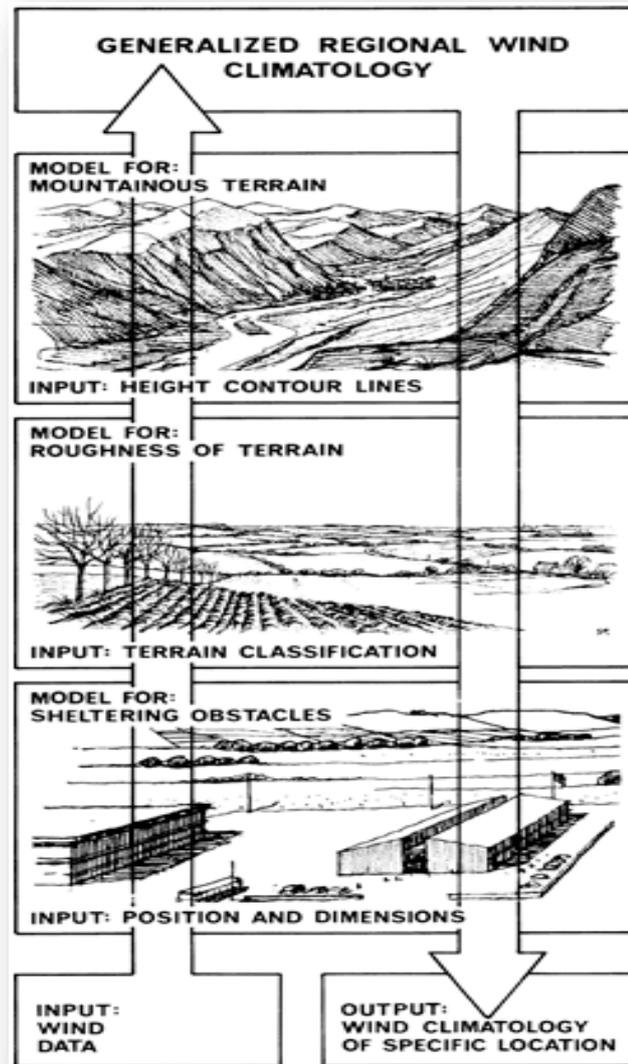


Figure 4.5 – Schéma représentant les étapes de traitement des données du vent via WAsP [148-149]

a) ANALYSE DE LA VITESSE DU VENT

L'étude est faite à partir des données de la vitesse moyenne horaire du vent recueillies à Adrar par l'ONM sur une période de 06 ans 2003-2008, à 10 m au-dessus du sol. Dans cette étude, le modèle WAsP a été utilisé pour évaluer les vitesses moyennes et les directions du vent, les ressources énergétiques éoliennes disponibles et les facteurs de Weibull k , c . Le cycle quotidien moyen de la vitesse du vent à Adrar est indiqué sur la Figure 4.6.

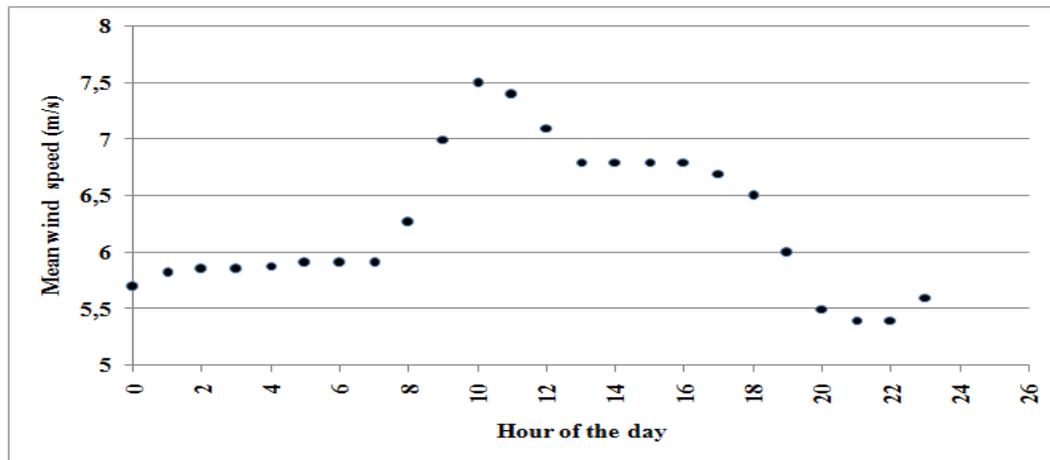


Figure 4.6 – Cycle quotidien moyen de la vitesse du vent à 10 du sol [146]

Une variation journalière de la vitesse du vent fut marquée par des oscillations : un maximum se produit vers 11h00 et un minimum vers 21h00.

En général, la vitesse du vent est supérieure à 6 m/s de 8 h à 19 h et dépasse 7 m/s de 9 h à 12 h, tandis que pendant la nuit elle varie entre 4 et 6 m/s.

Cela montre qu'une quantité d'énergie éolienne relativement plus importante pourrait être produite entre 08 h00 et 19 h00 ce qui coïncide également avec la demande en période de pointe. Il ressort également de la Figure 4.6 que la vitesse moyenne du vent demeure toujours supérieure à 5 m/s durant toute la journée.

La variation mensuelle de la vitesse du vent a un impact sur la disponibilité de l'énergie éolienne au cours des différents mois de l'année. Ces informations servent à planifier le fonctionnement de la centrale électrique existante en coordination avec la ferme éolienne.

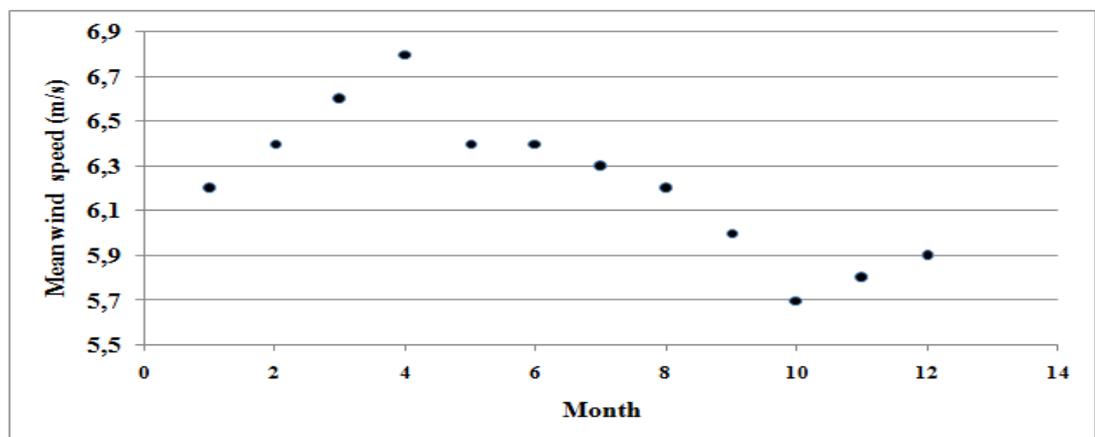


Figure 4.7 – Variation mensuelle de la vitesse moyenne à 10m du sol[146]

Comme on peut le voir sur la Figure 4.7, les vitesses de vent les plus élevées ont été enregistrées en mai tandis que les plus faibles en octobre.

Les variations saisonnières de la vitesse moyenne du vent ont été comparativement supérieures ou égales à 6 m/s durant les mois de février – septembre (de Printemps – Automne), et elles varient entre 5.5 - 6m/s pour les autres mois (Hivers).

La variation annuelle de la vitesse moyenne du vent permet de comprendre la tendance à long terme et, par conséquent, garantir aux investisseurs la certitude sur la disponibilité de l'énergie éolienne dans les années à venir. La Figure 4.8 montre que la vitesse annuelle du vent varie de 6 m/s en 2003 à 7 m/s en 2008.

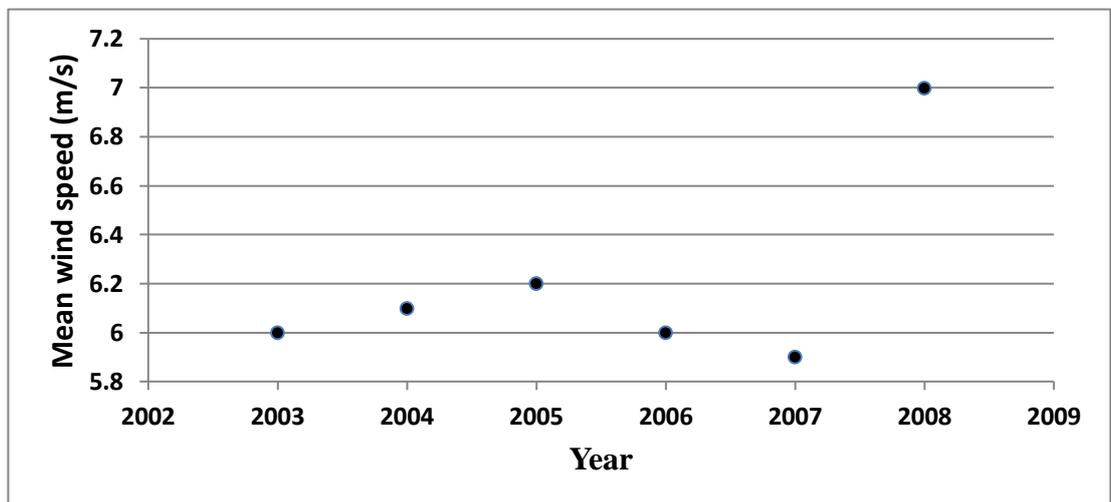


Figure 4.8 – Variation annuelle de la vitesse moyenne du vent à 10m du sol[146]

La vitesse du vent la plus élevée a été enregistrée en 2008 avec une valeur moyenne de 7 m/s cependant la plus faible est obtenue en 2007 avec 5.8 m/s [146].

b) DIRECTION DU VENT ET FLUX DE PUISSANCE MOYEN

Les statistiques de direction du vent jouent un rôle essentiel dans le placement optimal d'une ferme éolienne dans un espace donné.

Les données de la vitesse du vent à Adrar ont été divisées en 12 secteurs de 30 degrés chacun : Nord-Nord-Ouest (NNO), Nord (N), Nord-Nord- Est (NNE)... et Ouest-Nord-Ouest (ONO) [146].

Les représentations graphiques de la rose des vents et le pourcentage du temps pendant lequel le vent reste dans intervalle de vitesse spécifique sont fournies à la Figure 4.9.

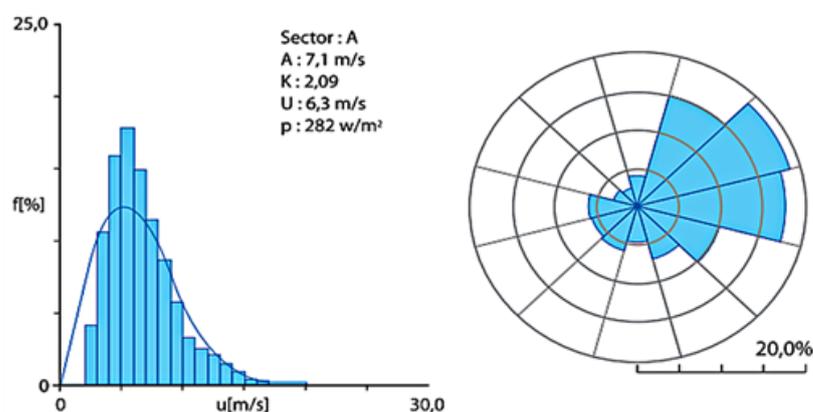


Figure 4.9 – Diagrammes rose des vents et Distribution des fréquences des vitesses de vent[146]

Il est évident d'après la Figure 4.9 que les vents dominants (> 15% du temps) proviennent de la direction du Nord-Est.

La densité de l'énergie éolienne ou le flux de puissance (W/m^2) indique la quantité d'énergie disponible sur le site qui peut être convertit par un aérogénérateur. Il est important d'évaluer les ressources éoliennes exploitables pour la production d'électricité sur le site.

Les valeurs de la vitesse moyenne de vent et la densité de puissance moyenne mesurées ainsi celles calculées au cours des années 2003-2008, dans cette région, sont résumées dans le tableau 4.2.

Tableau 4.2 : Vitesse moyenne de vent et densité de puissance moyenne (Période 2003– 2008) [146]

	Mesurée	Calculée	Erreur (%)
Vitesse moyenne du vent (m/s)	6.62	6.31	4.62
Densité de puissance moyenne (W/m^2)	279.31	282.20	1.03

L'erreur entre la vitesse moyenne annuelle du vent mesurée et la vitesse moyenne annuelle du vent calculée est de 4.62%.

Au cours de la même période, La valeur de la densité de puissance moyenne annuelle mesurée et celle calculée sont respectivement de 279.31 W/m² et 282.20 W/m², cependant, l'erreur correspondante est de 1.03%. Ces résultats montrent que les valeurs moyennes estimées et mesurées sont en concordance, et par conséquent, les valeurs estimées peuvent être utilisées avec plus ou moins de certitude pour l'évaluation de la ressource éolienne.

4.7.2 ESTIMATION DE LA PRODUCTION ENERGETIQUE AVEC RETSCREEN

Le RETScreen est utilisé pour calculer la production énergétique et mener une étude de faisabilité économique de projets de ferme éolienne raccordés à un réseau électrique dans des sites sélectionnés.

La Figure ci dessous présente l'organigramme des cinq étapes d'une analyse RETScreen standard [150].



Figure 4.10 – Organigramme des étapes d'une analyse standard avec le model RETScreen[150]

L'hypothétique ferme éolienne est composée de 30 éoliennes DEWIND62, développant chacune 1 MW, pour une puissance nominale totale de 30 MW.

Le choix de cette éolienne spécifique est justifié en termes d'adéquation particulière à la région selon certaines études de recherche publiées par Himri et al dans Réfs [13,24,146,151,152].

a) STATISTIQUES DU VENT

L'analyse de la disponibilité de vent est effectuée en termes de fréquence (pourcentage de temps) pendant laquelle le vent restant dans une classe de vitesse de vent spécifié. La Figure 4.11 présente la fréquence d'occurrence du vent pour différents intervalles de vitesse à 68.5 m de hauteur.

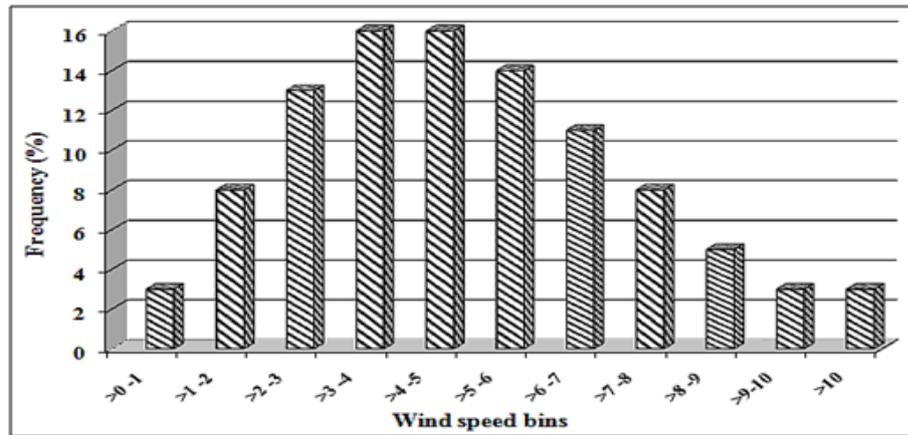


Figure 4.11 – Distribution de fréquence de la vitesse du vent à 65.5 m du sol[146]

Les vitesses du vent à l' hauteur de du moyeu (68.5 m) sont calculées en utilisant la loi de puissance, telle que définie ci-dessous

$$v_2 = v_1 \left(\frac{h_2}{10} \right)^\alpha \quad (4.7)$$

v_2 : vitesse du vent à la hauteur du moyeu h_2

v_1 : vitesse du vent à 10 m

α : Coefficient de cisaillement du vent

Pour un terrain lisse comme le sable, ce coefficient est égale 0.14. En outre, la valeur de 0.14 est une excellente première approximation lorsque les caractéristiques du site restent à déterminer.

On remarque à 68.5 m de hauteur que 76 % des vitesses du vent sont supérieures à 3 m/s, ce qui signifie que 76 % du temps l'éolienne DEWIND62 fournira de l'énergie électrique avec une grande disponibilité

b) CALCULS DE PRODUCTION D'ENERGIE

Comme mentionné précédemment, la production annuelle d'énergie a été estimée par deux méthodes différentes, à savoir :

- La courbe de la puissance de l'éolienne spécifiée et la distribution de la vitesse du vent
- Le modèle RETScreen.

Afin d'estimer la production annuelle d'énergie d'une ferme éolienne, le modèle tient compte de la courbe d'énergie, la vitesse moyenne annuelle du vent mesurée au site ou à proximité, la pression atmosphérique moyenne, la température moyenne annuelle, la hauteur du moyeu, la surface balayée par les pales, etc. Les spécifications techniques de l'éolienne sont résumées dans le tableau 4.3.

Tableau 4.3 : Caractéristiques de l'éolienne DEWIND 62 [146]

Article	Valeur	Unité
Modèle d'éoliennes	DEWIND 62	
Puissance nominale par éolienne	1	MW
Diamètre du rotor	62	m
Hauteur du moyeu	68.5	m
Surface balayée	3019	m ²
Vitesse du vent de démarrage	3	m/s
Vitesse nominale du vent	11.5	m/s
Vitesse du vent d'arrêt	23	m/s
Vitesse du rotor	12.1 – 25.2	tour/mn
Type du mat	Tubulaire	

L'éolienne est dimensionnée pour développer sur son arbre une puissance appelée puissance nominale $P_n = 1$ MW. La puissance P_n est obtenue à partir d'une vitesse du vent $V_n = 11.5$ m/s, (vitesse nominale).

Lorsque la vitesse du vent est supérieure à la vitesse nominale (11.5 m/s), l'éolienne doit modifier ses paramètres afin d'éviter la destruction mécanique, de sorte que sa vitesse de rotation reste pratiquement constante.

La Figure 4.12 montre que : Pour la 1^{ère} phase où la vitesse V est comprise entre 3 -11.5 m/s, la puissance est proportionnelle au cube de la vitesse : $P = \beta V^3$

Pour la 2^{ème} phase où la vitesse du vent est supérieure à la vitesse nominale 11.5m/s on a : $P = P_{nom} = 1MW$

La dernière phase où la vitesse est supérieure à 16m/s la puissance décroît pour s'annuler (vitesse d'arrêt, $V_{max} = 23$ m/s).

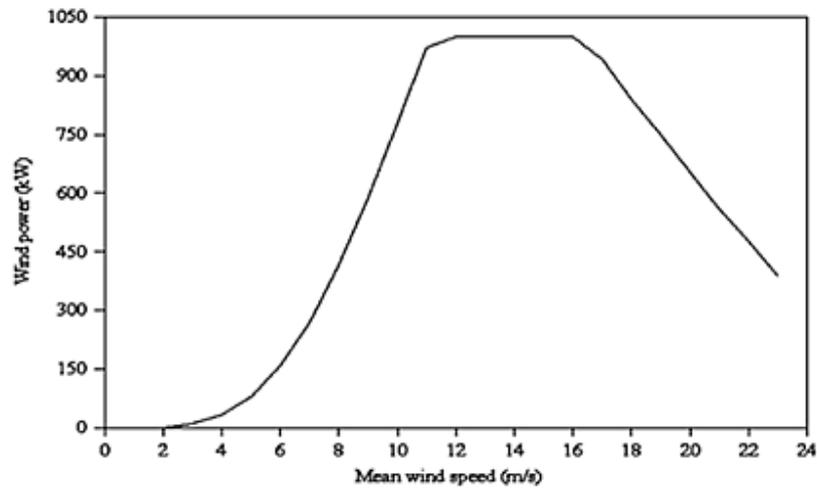


Figure 4.12 – Courbe de puissance de l'éolienne DEWIND 62 [153].

La Figure 4.13 représente l'énergie qui peut être produite par l'éolienne choisie de 1MW (DEWIND) à l'hauteur de 68.5 m.

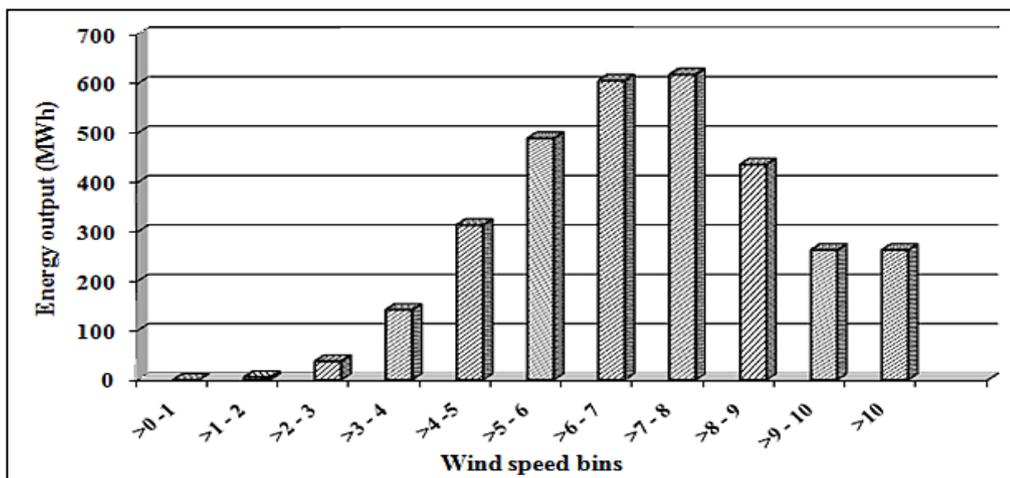


Figure 4.13 – Energie produite par l'éolienne de DEWIND62 (1MW) à l'hauteur de 68.5m[146]

On constate que l'énergie annuelle totale estimée produite est d'environ 3172.4 MWh et le facteur d'utilisation est de 36%.

Le tableau 4.4 résume les différents types de pertes et les coefficients de correction barométrique et thermique qui ont également été pris en considération pour l'évaluation de la production énergétique.

Tableau 4.4 : Coefficients de pertes utilisés dans les calculs de la production d'énergie [13,24].

Pertes	Causes	Valeur sélectionnée
Pertes par effet de sillage, (%)	“interaction entre les éoliennes au sein d'une même ferme par l'intermédiaire leurs sillages.”	3
Perte par l'encrassement des pales, (%)	“encrassement des pales par les insectes et l'accumulation de la poussière, particule de sable”	2
Autres pertes et causes d'arrêts, (%)	“entretien régulier, défaillances d'éoliennes, pannes au poste de raccordement ”	2
Pertes diverses, (%)	“pertes qui réduisent la production d'énergie: démarrages et arrêts, vents violents et arrêts d'urgence sous l'effet de rafales ”	2
Coefficient de correction barométrique		0.97
Coefficient de correction thermique		0.97
Coefficient de cisaillement		0.14
Pertes T&D électrique (%)		12

Un coefficient de cisaillement de 0.14 a été utilisé pour calculer la vitesse moyenne du vent à la hauteur du moyeu de l'éolienne.

Dans cette étude, les pertes de transport et de distribution (T&D) électrique sont supposées être de 12%, et le point de raccordement au réseau le plus proche est considéré à environ 8.5 km de l'éventuelle ferme éolienne.

Les paramètres du système permettant d'évaluer la production énergétique annuelle de l'éolienne et la production annuelle d'énergie qui tient compte des coefficients de corrections thermiques et barométriques ainsi que des pertes diverses sont donnés dans le tableau 4.5.

Tableau 4.5 : Paramètres du système obtenu à partir de RETScreen [146]

Paramètres du système	Adrar
Vitesse annuelle moyenne du vent (m/s)	5.9
Production énergétique brute (MWh/an)	3446
Energie éolienne fournie (MWh/an)	3146
Facteur d'utilisation, (%)	36
Gaz à effet de serre- GES (Tonnes/an)	1421

D'après ce tableau on constate que :

- La production énergétique brute est égale à 3446 MWh/an
- L'énergie éolienne fournie est égale à 3146 MWh/an.
- Le facteur d'utilisation de la ferme éolienne est égal à 36 %
- Le gaz à effet de serre-GES évité est égal à 1421 tonnes/an

Enfin, les énergies éoliennes estimées à partir de la courbe de puissance de l'éolienne choisie et le modèle RETScreen sont en étroite concordance comme le montre le tableau 4.6.

Tableau 4.6 : Evaluation de l'énergie éolienne et le Facteur d'utilisation de l'éolienne de 1MW en utilisant deux approches à 68.5 m[146]

Résultat	Courbe de puissance de l'éolienne	RETScreen	Écart (%)
Energie éolienne (MWh/an)	3172	3146	1
Facteur d'utilisation (%)	36	36	0

4.7.3 ANALYSE ECONOMIQUE DE LA FERME EOLIENNE

Le modèle RETScreen permettant d'établir une analyse économique détaillée de la production d'énergie éolienne en utilisant des paramètres financiers tels que le taux d'actualisation et d'inflation, coûts initiaux, crédit pour réduction d'émissions de GES, durée de vie du projet, etc.

Les paramètres financiers adoptés dans cette étude sont présentés dans le tableau 4.7.

Tableau 4.7 : Principaux paramètres financiers pour la répartition des coûts [146]

Paramètres	Montant	Unité
Coût évité en énergie	0.0950	\$/kWh
Crédit pour ER fournie	0.025	\$/kWh
Durée du crédit pour ER fournie	10	an
Taux d'indexation du crédit pour ER	2.5	%
Crédit pour réduction d'émissions de GES	5.0	\$/tco2
Durée du crédit pour réduction de GES	21	an
Taux d'indexation du crédit pour GES	0.0	%
Taux d'indexation de l'énergie	5.0	%
Taux d'inflation	2.5	%
Taux d'actualisation	12.0	%
Durée de vie du projet	25	an
Frais annuel d'exploitation et d'entretien	770000	\$/an

Les détails du coût des diverses éléments tels que Etude de faisabilité, Développement, Ingénierie, Equipement énergétique, Infrastructures connexes, Divers, impliqués dans la construction d'une ferme éolienne sont indiqués dans le tableau 4.8.

Tableau 4.8 : Coût de la construction d'une ferme éolienne [146]

Paramètre	Montant (\$)	% du coût total du projet
Etude de faisabilité	245200	0.6
Développement	835500	2.0
Ingénierie	610500	1.4
Equipement énergétique	31890000	74.7
Infrastructures connexes	5868000	13.8
Divers	3215110	7.5
Coûts initiaux	42664310	100.0

Le coût de l'équipement énergétique représente presque 75% du coût total de la ferme éolienne tandis que celui de l'infrastructure connexe est de 14%.

L'étude de faisabilité économique est réalisée en considérant les indicateurs financiers tels que taux de rendement interne, afin de déterminer si le projet est viable et si l'implantation de la ferme éolienne est recommandable.

Taux de rendement interne (TRI)

Le TRI est calculé en identifiant le taux d'actualisation réduisant la VAN du projet à 0. Il est calculé en résolvant l'équation pour le TRI :

$$0 = \sum_{n=0}^N \frac{F_n}{(1+TRI)^n} \quad (4.8)$$

N : Durée de vie du projet en années

F_n : Flux monétaire de l'année n

F_0 : Capitaux propres investis dans le projet moins les encouragements et les subventions (le flux monétaire de l'année zéro).

Si le taux de rendement interne est supérieur au taux d'actualisation, le projet sera financièrement acceptable. Dans le cas présent, le TRI s'est révélé être de 58%, ce qui est supérieur à 12% (taux d'actualisation). Par conséquent, le projet est considéré comme financièrement acceptable[146].

Valeur actualisée nette (VAN)

La VAN d'un projet correspond à la valeur de tous les flux monétaires futurs, actualisés à l'aide du taux d'actualisation, en monnaie courante. Elle est calculée en actualisant tous les flux monétaires tel qu'exprimé dans l'équation suivante :

$$VAN = \sum_{n=0}^N \frac{\tilde{F}_n}{(1+r)^n} \quad (4.9)$$

r : Taux d'actualisation

Une VAN positive montre que le projet est réalisable. La VAN calculée a été estimée à 70915465 \$ US, et comme elle est positive, le projet est viable[146].

Retour simple

Le retour simple est le nombre d'années nécessaire pour que le flux monétaire (excluant le paiement de la dette) soit égal à l'investissement total (qui correspond à la somme de la dette et des capitaux propres investis) :

$$RS = \frac{C-ES}{(R_{\text{ener}}+R_{\text{puis}}+R_{\text{EP}}+R_{\text{GES}})-(C_{\text{E\&E}}+C_{\text{comb}})} \quad (4.10)$$

C : Coût d'investissement total dans le projet,

ES : Encouragements et les subventions.

R_{ener} : Revenu annuel en énergie,

R_{puis} : Revenu annuel de la puissance garantie

R_{EP} : Revenu du crédit pour énergie propre fournie

R_{GES} : Revenu du crédit pour réduction d'émissions de GES

$C_{\text{E\&E}}$: Coût annuel d'exploitation et d'entretien associé au projet d'énergies propres

C_{comb} : Coût annuel en combustible ou en électricité

Une période de retour plus courte signifie un investissement souhaitable. Cette période a été estimée à environ 3.9 ans, ce qui est un indicateur d'un projet d'énergie éolienne économiquement réalisable [146].

Ratio Avantages-Coûts A-C

Le ratio A-C représente la rentabilité relative du projet. Il est calculé comme la valeur actuelle des revenus (ou économies) annuels moins les coûts annuels, divisé par les capitaux propres investis. Il s'exprime comme suit:

$$A - C = \frac{VAN+(1-f_d)C}{(1-f_d)C} \quad (4.11)$$

f_d : Ratio d'endettement

Des ratios supérieures à un sont représentatifs de projet rentable. Dans notre cas la valeur de ratio A-C est positive ($6.54 > 1$), ce qui indique que le projet est rentable[146].

Année de flux monétaire nul N_{FMN}

La N_{FMN} est la première année pour laquelle les flux monétaires cumulatifs sont positifs. Elle est calculée en résolvant l'équation suivante:

$$0 = \sum_{n=0}^{N_{\text{FMN}}} \tilde{F}_n \quad (4.12)$$

\tilde{F}_n : Flux monétaire après impôt de l'année n

Elle représente le temps qu'il faudra au propriétaire du projet pour récupérer son investissement initial à même les recettes générées par le projet. Dans le cas proposé l'année de flux monétaire nul était égale à 1.9 ans [146].

Économies annuelles sur la durée de vie

Les économies annuelles sur le cycle de vie EACV correspondent à la valeur équivalente d'économies annuelles constantes qui, sur une période égale à celle du projet, donneraient la même valeur actualisée nette. L'EACV est calculée à l'aide de l'équation suivante :

$$EACV = \frac{VAN}{\frac{1}{r} \left(1 - \frac{1}{(1+r)^N} \right)} \quad (4.13)$$

L'économie annuelle sur le cycle de vie s'est avérée positive d'environ 9041720 \$ US[146].

Coût de revient

Le coût de revient de l'énergie est le coût de l'énergie évité qui donne une valeur actualisée nette égale à 0. Le coût de revient de l'énergie, est obtenu en résolvant l'équation suivante :

$$0 = \sum_{n=0}^N \frac{\tilde{F}_n}{(1+r)^n} \quad (4.14)$$

Le coût de revient de l'énergie électrique était de 3.25 US Cents / kWh. Selon les résultats des analyses financières (indicateurs économiques) détaillées, le projet éolien d'une capacité de 30 MW dans la région d'Adrar est économiquement viable[146].

4.8 TARIF D'ACHAT GARANTI (FEED-IN TARIF)

Le tarif d'achat garanti est un mécanisme de soutien qui garantie aux producteurs d'énergie éolienne de bénéficier de tarifs leur octroyant une rentabilité raisonnable de leur investissement sur une durée d'éligibilité de 20 ans.

Le tarif d'achat garanti pour des installations supérieures à cinq 5 MW fixé à 10.48DA/kWh, pour la première phase des cinq 05 premières années.

Tandis pour le reste de la période, le paiement du tarif dépend de la production d'électricité moyenne annuelle, et il peut varier entre 7.64 et 13.33 DA/ kWh (7.13–12.44 US Cents /kWh), comme indiqué dans le tableau 4.9.

Tableau 4.9 : Tarif d'achat garanti pour des installations éoliennes d'une capacité de >5MW [146]

Ajustement réglementaire	Période (année)	Durée de fonctionnement annuelle (heures)	Prix de vente DA/kWh
-15%	01-05	1900	10.48
+15%	06-20	1900	7.64–13.33

Le coût de revient de l'électricité de 3.48 DA/kWh (3.25 US Cents/kWh) était inférieur au prix d'achat au cours des cinq premières années (10.48 DA/kWh) et le reste de la période (7.64–13.33 DA/kWh) [146].

4.9 CONCLUSION

Une analyse des données du vent a été effectuée pour la région d'Adrar, afin d'étudier le potentiel de l'énergie éolienne et les caractéristiques du vent. La principale conclusion qui peut être tirée de cette étude [146] est :

- Les plus grandes vitesses ont été observées entre 08h00 et 19h00, pour le reste de la journée elles sont plus petites. Cela montre qu'une énergie éolienne importante pourrait être produite de 08h00 à 19h00, ce qui coïncide également avec la demande en période de pointe.
- La vitesse moyenne mensuelle du vent est supérieure ou égale à 6 m/s entre Février - Septembre et elle varie entre 5.5 - 6 m/s pour les autres mois
- La valeur moyenne annuelle de la vitesse du vent varie de 6m/s en 2003 à 7 m/s en 2008. La direction du vent la plus dominante est Nord- Est.

- Les valeurs de la densité de puissance moyenne annuelle du vent mesurée et calculée sont de 279.31 W/m^2 et 282.20 W/m^2 (un écart de 1.03%).
- Les énergies éoliennes estimées à partir de la courbe de puissance de l'éolienne choisie et le modèle RETScreen sont en étroite concordance.
- L'analyse économique a montré que le projet à Adrar est faisable. L'énergie électrique produite annuellement est de 94385 MWh avec un facteur d'utilisation de 36%.
- Un développement de tel parc éolien peut éviter une quantité de pollution de 35525 tons/an de CO₂.
- Des études plus détaillées sont nécessaires pour
 - 1) Identifier les sites appropriés dans la région d'Adrar
 - 2) Evaluer leur potentiel énergétique
 - 3) Réaliser d'autres projets.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

L'Algérie encourage l'utilisation de l'énergie renouvelable au moyen d'une série de lois et de programmes officiels. En fait l'Algérie serait un pays intéressant pour les investissements car elle bénéficie d'un potentiel économique considérable. En outre de grands appels d'offres pour les énergies renouvelables viennent d'être lancés, en principe, le pays pourrait disposer d'une capacité d'auto financement afin de prendre en charge les plans d'action des projets énergétiques.

Objectif de cette recherche est de proposer des méthodes de conception et de modélisation d'une ferme éolienne afin de calculer la production énergétique et mener une étude de faisabilité économique de projets d'une ferme éolienne raccordés à un réseau électrique dans la région sud ouest de l'Algérie.

L'évaluation du potentiel éolien a été effectuée par WAsP. Quant à la production annuelle d'énergie, elle a été évaluée ou calculé par deux méthodes distinctes à savoir :

- La courbe de la puissance de l'éolienne spécifiée et la distribution de la vitesse du vent.
- Le modèle RETScreen.

La viabilité économique a été également effectuée à l'aide du modèle RETScreen, elle révèle que le projet du parc éolien est d'une rentabilité considérable à ne pas négliger.

Au fait la conception consiste à étudier et à réaliser une ferme éolienne, en déterminant la taille, la configuration et le potentiel de production énergétique du système, le choix du système éolien en s'appuyant sur le type d'utilisation (axe horizontal) et sur le choix de la machine sélectionnée selon la vitesse du vent de site choisi, (taille de l'aérogénérateur et ses caractéristiques telles que la puissance nominale, la vitesse nominale, etc.), grâce à l'utilisation du modèle RETScreen. Cette étude et recherche ont donné fruit à quelques publications internationales, traitant l'évaluation d'énergie éolienne en Algérie, dont on a mis l'accent sur l'installation de 9 stations de mesures dans différentes régions grâce à l'effort déployé par le GREDEG et SONELGAZ.

On s'est basé sur une technique praticable et une faisabilité d'étude économique. Les résultats obtenus sont basés sur l'analyse de la compilation du modèle RETScreen, conçu par le laboratoire de ressources naturelles du Canada, qui a permis de conclure que la région choisie possède un énorme potentiel éolien.

Néanmoins la technique choisie déduisant des conditions climatiques rigoureuses, nous a permis de sélectionner la solution optimale et adéquate pour cette région.

En effet on a calculé, les divers indicateurs sur la viabilité financière du projet d'installation d'une ferme éolienne d'une capacité de 30 MW pour la région considérée Adrar, à l'aide du logiciel RETScreen, où on a déduit que l'installation d'une ferme éolienne d'une capacité de 30 MW peut produire annuellement une énergie électrique considérable et peut éviter une grande quantité de pollution de CO₂.

Au fait dans le domaine des énergies renouvelables jusqu'à présent la part du lion est réservée à l'énergie solaire malgré que l'énergie éolienne ne date pas d'hier et présente des rendements nettement meilleurs par rapport aux énergies solaires. Le domaine ne comporte pas des masses de recherches d'où la difficulté de trouver des travaux récents.

Enfin ce travail a dégagé de nouveaux axes et le résultat suivant :

- Il est fort utile et rentable de combiner les deux sortes d'énergies renouvelables à savoir l'énergie éolienne et l'énergie solaire car la région du sud ouest de l'Algérie est caractérisée pendant presque toute l'année par un très fort vent et une très forte énergie.
- Le dessalement des eaux saumâtres par les sources d'énergies renouvelables (l'énergie éolienne et l'énergie solaire, etc.) est une solution plus adéquate et sereine pour s'alimenter en eau douce dans le bassin méditerranéen. Cette solution de vient de plus en plus compétitive surtout dans les zones isolées, les communautés lointaines et les zones rurales d'où la méthode la plus économe en énergie et la mieux adaptée à l'énergie éolienne est le dessalement par l'osmose inverse et l'électrodialyse.
- L'essor économique qu'a connu l'Algérie cette dernière décennie a permis d'envisager de structurer plusieurs secteurs dont celui du tourisme car ce dernier permet également de résorber le chômage. L'enveloppe destinée à réhabiliter les Ksours du sud ouest de l'Algérie est une preuve de bonne volonté de bien vouloir relancer ce secteur, la solution est de les transformer en infrastructures touristiques entre autres des salles d'expositions, des salles pour congrès, des maisons d'hôtes etc. Il serait plus judicieux d'intégrer les énergies renouvelables.

REFERENCES

- [1] Union du Maghreb Arabe "Programme d'Action Sous-Régional de Lutte contre la Désertification au Maghreb ", Août 1999.
- [2] P. Seltzer, " Le Climat de l'Algérie : le Vent ", Edition Française p 83-95-96-101,1946.
- [3] H. Bensaad. Perspectives d'utilisation de l'énergie éolienne en Algérie. Révolution Africaine, N° 1089, pp 32- 34, 1985.
- [4] R. Hammouche, " Atlas Vent de l'Algérie ", Publication de l'ONM (Office National de Météorologie), Alger 1990.
- [5] N. Kasbadji Merzouk, "An Evaluation Of Wind Energy Potential In Algeria", Centre de Developpement des Energies Renouvelables, Algeria, EWEC'94, The IASSANOKI, Grèce, 1994.
- [6] Kasbadji Merzouk N., « Atlas vent de l'Algérie, Résultats Préliminaires ». Revue des Energies Renouvelables, numéro spéciale JNVER99, pp 209-214, 1999.
- [7] Kasbadji Merzouk N. et N. Messen. « Contribution à l'Etude du Vent en Rapport avec l'Erosion Eolienne dans les Zones Arides » Revue Energies Renouvelables, numéro Spéciale Zones Arides, 2002.
- [8] Nedjari Daaou, H., S. Haddouche et N. Kasbadji Merzouk, « Amélioration de la carte des vents à partir des données interpolées » Revue Energies Renouvelables, numéro Spécial, Energies Photovoltaïque et éolienne, pp 119-124., 2003.
- [9] Nedjari Daaou H, Haddouche S, Balehouane A, Guerri O. Optimal windy sites in Algeria: potential and perspectives. Energy 2018; 147:1240–55. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.12.046>.
- [10] Boudia S, Benmansour A, Tabet Hellal M. Wind resource assessment in Algeria. Sustain Cities Soc 2016; 22:171–83. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2016.02.010>.

- [11] Kasbadji Merzouk N. Quel avenir pour l'énergie éolienne en Algérie. Recherche et développement .La division Energie Eolienne Centre de Développement des énergies Renouvelables. Décembre 2008.
- [12] Boutarfa, N. Renewable Energy Prospects case of Algeria, in: Intercontinental Wind Power Congress Istanbul. CEO, Istanbul, 2015. p.27
- [13] Y. Himri, S. Rehman, B. Draoui, S. Himri, Wind power potential assessment for three locations in Algeria Renewable and Sustainable Energy Reviews 12 (2008) 2495–2504.
- [14] Dehmas D, Kherba N, Hacene F, Merzouk N, Merzouk M, Mahmoudi MH, Goosen M.F.A. On the use of wind energy to power reverse osmosis desalination plant: a case study from Ténès (Algeria). Renew Sustain Energy Rev 2011; 15(2):956–63. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.11.004>.
- [15] Djamai M, Merzouk N. Wind farm feasibility study and site selection in Adrar, Algeria. Energy Procedia 2011; 6:136–42. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2011.05.016>.
- [16] Boukli Hacène F, et al. Development of a simulation model for a three-dimensional wind velocity field using Ténès Algeria as a case study. Renew Sustain Energy Rev (2011), doi:10.1016/j.rser.2011.07.133.
- [17] Kasbadji Merzouk N. et M. Merzouk, « An Evaluation of Useful Power Density of the Wind Machine», Wind Power 2002, La défense Paris, 2002.
- [18] Kasbadji Merzouk N. et M. Merzouk, «Useful Wind Powers Machine Estimation, Application to Water Pumping Systems in South of Algeria», 9 International Congress on Mechanization and Energy in Agriculture, 27th International Conference of CIGR IV (The efficient use of electricity and Renewable Energy Sources), Izmir, Turquie, 2005.
- [19] Kasbadji Merzouk N et M. Merzouk, «Useful Power Density of a Wind Machine in Algeria ». Proceeding of International Mechanical Engineering Conference, Koweit, 2004.

- [20] Kasbadji Merzouk N. et M. Merzouk. Estimation du potentiel énergétique éolien utilisable application au pompage dans les hauts Plateaux. *Revue des énergies Renouvelables* vol. 9 N°3 2006.
- [21] Kasbadji Merzouk N. et M. Merzouk, « Perspectives du pompage éolien en Algérie », Colloque International sur les ressources en eau souterraines dans le Sahara, Ouargla, Algérie, 2005.
- [22] Kasbadji Merzouk N. et M. Merzouk, Perspectives Du Pompage Eolien En Algérie, Centre de Développement des Energies Renouvelables, Laboratoire Energie Eolienne, 2006.
- [23] Y. Himri, A.Boudghene Stambouli, B. Draoui, S. Himri .Techno-economical study of hybrid power system for a remote village in Algeria. *Energy* Volume 33, Issue 7, July 2008, Pages 1128-1136.
- [24] Himri Y, Rehman S, Himri S, Mohammadi K, Sahin B, Malik A. Investigation of wind resources in Timimoun region, Algeria. *Wind Eng* 2016; 40(3):250–60.
- [25] Louassa S, Guerri O, Kasbadji Merzouk N, Merzouk M. Wind resources estimation and performance evaluation of two wind farms in an Algerian arid zone. In: 2016 International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC). Marrakech, Morocco: IEEE; 2016:pp. 444–449.
- [26] Abdeslame D, Kasbadji Merzouk N, Mekhtoub S, Abbas M, Dehmas M. Estimation of power generation capacities of a wind farms installed in windy sites in Algerian high plateaus. *Renew Energy* 2017; 103:630–40.
- [27] Belabes B, Youcefi A, Guerri O, Djamai M, Kaabeche A. Evaluation of wind energy potential and estimation of cost using wind energy turbines for electricity generation in north of Algeria. *Renew Sustain Energy Rev* 2015; 51:1245–55. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.043>.
- [28] Saheb Koussa D, Koussa M, Hadji S. Assessment of various WTG (wind turbine generators) production in different Algerian's

climatic zones. Energy 2016;96(1):449–60.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.12.072>.

- [29] Guerri O, Boudia S, Dali A, Kaabeche A, Yassaa N. Performance Evaluation of the First Wind Farm in Algerian Sahara. In: Technologies And Materials For Renewable Energy, Environment And Sustainability, TMREES18. Athens, Greece: Energy Procedia; 2018:11.
- [30] European Commission, "Energy for the future - renewable sources of energy: white paper," Réf. Com (97) 599 final, 1997.
- [31] Shamey R. (2020) Young, Thomas 1773–1829. In: Pioneers of Color Science. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-30811-1_31.
- [32] J.L Bobin, E. Huffer et H. Nifenecker, "L'Énergie de Demain", Groupe Energie de la Société Française de Physique Techniques Environnement Économie, ISBN 2-86883-771-9, EDP Sciences, 2005.
- [33] ADEME, "Le Développement Durable: Rapport Brundtland, 1987", square La Fayette BP 90406 - 49004 ANGERS cedex 01, 2007.
- [34] M. Lopez, "Contribution à l'Optimisation d'un Système de Conversion Eolien pour une Unité de Production Isolée", Ecole Doctorale « Sciences et Technologies de l'Information des Télécommunications et des Systèmes » Université Paris, 2007.
- [35] Hodge, A. Trevor, "A Roman Factory", Scientific American, nov. 1990, p. 106-111.
- [36] H. Camblong, "Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs à vitesse variable", thèse de doctorat, ENSAM Bordeaux, décembre 2003.
- [37] A. Argand, "L'énergie électrique d'origine éolienne", RGE janv. 82, pp.43-50.
- [38] D. Le Gourières, "Energie Eolienne: Théorie, Conception et Calcul Pratique des Installations ", Edition Eyrolle 1982.

- [39] P. Bruyere, « Accident technique et panne sociale : le cas des aérogénérateurs d'Électricité de France des années 1950-1960 », *Artefact*, 11 | 2019, 143-162.
- [40] J. Martin, " Technique de l'Ingénieur Energies Eoliennes", Document 1999.
- [41] R.E. Sheldahl, B.F. Blackwell, L.V. Feltz, "Wind Tunnel performance data for two- and three-bucket Savonius rotor", *Journal of Energy* 160-164, 1978.
- [42] I. Ushiyama, H. Nagai, "Optimum design configurations and performances of Savonius rotors", *Wind Eng.* 12-1, 59-75, 1988.
- [43] J. Martin, "Technique de l'Ingénieur Energies Eoliennes", *Traité Énergétique B* 8 pp. 585, 22, France, 1997.
- [44] J-L Menet, N. Bourabaa, "Prévision des performances aérodynamiques d'un nouveau type d'éolienne à axe vertical : le rotor à contre voiles ", 18ème Congrès Français de Mécanique Grenoble, août 2007.
- [45] G.J.M. Darrieus, "Turbine having its rotating shaft transverse to the flow of the current", US Patent No. 1,835,018, 1931.
- [46] E. Robert Sheldahl, "Comparison of Field and Wind Tunnel Darrieus Wind Turbine Data", Sandia National Laboratories, operated for the United States Department of Energy, January 1981.
- [47] D. Thomas Ashwill, M. Timothy Leonard, "Developments in Blade Shape Design for a Darrieus Vertical Axis Wind Turbine", Sandia National Laboratories Albuquerque, New Mexico 87185 and Livermore, California 94550 for the United Statea Department of Energy, September 1986.
- [48] Kamissoko F., De Vilde R.D.L., Hirsch Ch., Theoretical and experimental study of VAWT straight bladed Darrieus rotor, European Union Community Wind Energy Conference, Lubeck-Travemunde, Germany, pp.725-727, 1993.
- [49] L. Merad, M. Benekrouf, N. Benmeddah and B. Benyoucef, "Contrôle de la puissance d'extraction d'un aérogénérateur", *Laboratoire de Matériaux et des Energies Renouvelables*, 2003.

- [50] B. Multon et al., "Aérogénérateurs électriques", Techniques de l'Ingénieur, 2004.
- [51] R.E Wilson, P.B.S. Lissaman, "Applied Aerodynamics of wind power machines", Research Appl. to Nat. GI-41840, Oregon State University, 1974.
- [52] F. Nabah, A. Ettaouil et N. Guennoun, "Calculation of Wake of an Horizontal axis wind rotor", Tétouan – Maroc, FIER' 2002.
- [53] N. Kichkie « comportement dynamique en lacet d'une éolienne a axe horizontal » thèse soutenue le 12 juin 1987.
- [54] F. Massouh, I. Dobrev, F. Dejean, A. Laborie, "Etude du sillage d'une éolienne à axe horizontal ", 16ème Congrès Français de Mécanique Nice, septembre 2003.
- [55] G.R. Collicutt, R. G. J. Flay, "The economic optimisation of horizontal axis wind turbine design", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, vol. 61, pp 87-97, 1996.
- [56] R. Harrison, G. Jenkins, R .J. Taylor., "Cost modelling of horizontal axis wind turbines results and conclusions", Wind Eng, Vol. 13 (6), pp. 315-323, 1989.
- [57] T. Diveux, P. Sébastien, D. Bernard, J.R. Puiggali, J.Y. Grandidier, "Horizontal Axis Wind Turbine Systems: Optimization Using Genetic Algorithms", WindEnerg., Vol. 4, 151-171, 2001.
- [58] L. Deyuan, Y. Zhiquan, C. Yan et B. Nengsheng, "Load spectrum and fatigue life analysis of the blade of horizontal axis wind turbine", Wind Eng 2003; 27(6):495–506.
- [59] Y. Himri, " Optimisation de certains paramètres d'un aérogénérateur situe dans le sud ouest de l'Algérie", Mémoire de magister, Université de Béchar Mai 2005.
- [60] H. Horsin Molinaro, B. Multon. Énergie électrique : génération éolienne. Culture Sciences de l'Ingénieur.2020
- [61] B. Multon, X. Roboam, B. Dakyo et C. Nichita, O. Gergaud, H. Ben Ahmed " Les aérogénérateurs électriques", rapport, 2004.

- [62] J.E. Braun, S.A. Klien, J.W. Mitchell "Effectiveness models for cooling towers and cooling coils", *Ashrae Transactions* vol 92 part 2, 164-174, 1989.
- [63] A.Reuter, A. Bormann, "New concepts and optimal design of steel towers for large wind turbines", *European Union Wind Energy Conference*, Göterborg, Sweden, pp. 231-234, 1996.
- [64] W.E. Leithead, J.Wilkie , C. Anderson, "Modelling of Wind Turbines by Simple Models", *Wind Enginneering*, vol. 14, 1990.
- [65] H. Hofmann, S.R. Sanders, "High speed synchronous reluctance machine with minized rotor losses", *IEEE trans. on industry appl.*, vol 36, pp119-125, 2000.
- [66] Torbjorn Thiringer, Jan Linders, "Control by Variable Rotor Speed of a Fixed-Pitch Wind Turbiner Operating in a Wide Speed Range", *IEEE Trans. on Energy Conversion*, Vol.8, n°. 3, pp.520-526, Sept. 1993.
- [67] [Http://www.vindselskab.dk/fr/kids/other/index.htm](http://www.vindselskab.dk/fr/kids/other/index.htm)
- [68] W.E Leithead, S Salle, D Reardon, "Role and objectives of control for Wind Turbines"; *IEE proceedings*, vol 138,1991.
- [69] A. Hodder, J.-J. Simond, and A. Schwery, "Unbalanced DC-link voltage regulation in a back-to-back 3-level PWM converter for a doubly-fed induction Motor/Generator", *IEE-Electric Power Applications*, N 6 Nov 2005.
- [70] R. Pena, J. Clare, and G.M. Asher, "A doubly fed induction generator using backto- back PWM converters supplying an isolated load from a variable speed wind turbine", *IEEE proc. Electr. Power Appl*, vol. :143, pp. 380-387, Septembre 1996.
- [71] Y. Amirat, M.E.H. Benbouzid, H. Mangel, "Etude Comparative de Génératrices pour Systèmes de Conversion d'Energie Eolienne", *Colloque National de la Recherche dans les IUT Brest*, 1-2 juin 2006.
- [72] D. Mprales « Optimalité des éléments d'un système décentralisé de production d'énergie électrique – 162 pages – R : 378.242 - Thèse préparée et soutenue à Supélec, Gif, Energie en Juillet 2006.

- [73] M. Khaterchi, K. Hamrouni. Détection des défauts de l'axe rapide du multiplicateur de vitesse d'une éolienne. Conférence : le 4ème Colloque de Recherche Appliquée et de Transfert de Technologie CRATT2012. 2012.
- [74] Harrison R., Jenkins G., "Parametric cost modelling of wing energy conversion systems", 9th BWEA Conf., Edinburgh, pp. 259-264, 1987.
- [75] R. Harrison, G. Jenkins, "Cost modelling of horizontal axis wind turbines" (phase 2), ETSU W/34/00170/REP, University of Sunderland, 1994.
- [76] J. Montgomerie, "A simple parametric cost estimate method for horizontal axis wind turbines", ECN, C-96-031, Netherlands, 1996.
- [77] Drouin G., Gou M., Thiry P., Vinet R., "Eléments de machines", éditions de l'Ecole Polytechnique de Montréal, Canada, 1986.
- [78] H.O. Rostoen, T.M. Undeland, T. Gjengedal, Doubly fed induction Générateur in wind turbine, Workshop on wind power, Oslo, 2002.
- [79] P. Ledesma, J.L. Rodriguez, "Transient stability of fixed speed wind farm", renewable energy, vol 28, pp 1341-13 55, 2003.
- [80] E. Muljadi, C.P. Butterfield, "Pitch-Controlled Variable-Speed Wind Turbine Generation", IEEE Trans on industry appl., Vol 37, n°1, 2001, pp.240-246.
- [81] D.N. Sorensen, J.N. Sorensen, "Numerical optimization of a pitch controlled wind turbine", European Union Wind Energy, Sweden, pp. 863-866, 1996.
- [82] J.L Rodriguez, "Análisis Dinámico y Diseño del sistema de Control de Aeroturbinas de Velocidad Variable con Generador Asíncrono de Doble Alimentación, thèse de Doctorat, Université Carlos III de Madrid, 2000.
- [83] T. Ekelund, "Modeling and Linear Quadratic Optimal Control of Wind Turbines, these de Doctorat, Chalmers University of Technology, 1997.

- [84] T. Ackermann, L. Soder, "an Overview of Wind Energy Status 2002", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2002, vol 6, pp, 67-128.
- [85] E.A. Bossanyi, "The Design of Closed Loop Controllers for Wind Turbines", *Wind Energy*, vol 3, pp. 149-163, 2000.
- [86] E. Muljadi, K. Pierce, P. Migliore, "Soft-stall control for variable speed stall regulated wind turbines. *Journal of Wind Eng. and Industrial Aerodynamics*, vol 85, pp.277-291, 2000.
- [87] P. Fuglsang, H.A. Madsen, "A design study of a 1 MW stall regulated rotor", Riso-R- 799(EN), Riso National Laboratory Denmark, 1995.
- [88] N. Bockstaller. Le coût des énergies renouvelables s'avère de plus en plus compétitif face au charbon. International Renewable Energy Agency (IRENA) 2020.
- [89] B. Seveno, "Journée européenne de l'énergie éolienne", Dossier de presse de la Journée européenne de l'énergie éolienne 2008 Syndicat des énergies renouvelables – France Energie Eolienne – ADEME, juin 2008.
- [90] P. Sithivong, "Les Etats-Unis augmentent de 45% leur capacité éolienne", rapport annuel AWEA, 2008.
- [91] A. Whiteman, S. Rueda, D. Akande, N. Elhassan, G. Escamilla, I. Arkhipova. *Renewable Energy Statistics 2020*. International Renewable Energy Agency (IRENA), Abu Dhabi. 2020.
- [92] BP (2021) *BP statistical review of world energy 2021: 70th edition*. London: BP.
- [93] A. Lebedys, D. Akande, N. Elhassan, G. Escamilla, A. Whiteman, I. Arkhipova. *Renewable Energy Statistics 2021*. International Renewable Energy Agency (IRENA), Abu Dhabi. 2021
- [94] International Energy Agency. *Global Energy Review 2021: Assessing the effects of economic recoveries on global energy demand and CO₂ emissions in 2021*. IEA, Paris. 2021.

- [95] J.L. Bal et B. Chabot, "Les énergies renouvelables. État de l'art et perspectives de développement", Paris, Sciences de la Terre et des planètes Earth and Planetary Sciences 333 (2001) 827–834, 2001.
- [96] Eurostat. Energy data. Statistical Books. Edition 2020.
- [97] Opening up new markets for business. Global wind report annual market update 2015.
- [98] NUCES. Résumé de l'étude sur la situation économique et sociale de l'Asie et du Pacifique 2010. Nations Unies Conseil Economique et Social. 2010.
- [99] B. Multon. L'énergie sur la terre: analyse des ressources et de la consommation. La place de l'énergie électrique. La Revue 3 E. I, Société de l'électricité, de l'électronique et des technologies de l'information et de la communication, 1998, pp.29-38
- [100] World Energy Council (WEC), WEC survey of energy resources 2010, 2010, p. 518-519.
- [101] Parliament of Australia: Renewable Energy (Electricity) Amendment Bill 2015.
- [102] Renewable energy world publishers James & James, 8-12 Camden High Street, London NW 10JH, UK January 1999.
- [103] E. Ogunniyi, C. Pienaar. Paradox of Africa's Renewable Energy Potentials and Quest towards Powering Africa. 2019 IEEE PES/IAS Power Africa. 2019.
- [104] Helimax Energie INC. Étude stratégique de déploiement de l'énergie éolienne en Afrique 2004.
- [105] J. Coulombe. Cession de 84.5% du capital de la compagnie éolienne du Detroit qui exploite un parc éolien au Maroc. Septembre 2007.
- [106] Chambre Française de Commerce et d'Industrie du Maroc. L'énergie éolienne au Maroc. Fiche Marche 2015.
- [107] MED 2010: Large scale integration of solar and wind power in Mediterranean countries, project result documents. OME. 2002.

- [108] R. Missaoui, Samous. Financing the development of renewable energy in the Mediterranean region Tunisia. May 2003.
- [109] Tractebel. Projets d'énergie renouvelable en Tunisie : Guide détaillé Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH, Mai 2019.
- [110] Ministère de l'Énergie. Bilan des réalisations du secteur de l'énergie année 2018. Edition 2019.
- [111] International Renewable Energy Agency (IRENA). Renewable Energy in the Arab Region Overview of Developments, IRENA, Abu Dhabi.2016.
- [112] GRTE Gestionnaire du Réseau de Transport de l'Électricité, 2016. Grte.dz. URL <http://www.grte.dz/>
- [113] MATE : Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement, "Seconde Communication Nationale de l'Algérie sur les changements Climatiques à la CCNUCC", Projet GEF/PNUD 00039149 Alger 2010.
- [114] D. Bensid, "Le phare de l'Ouest", Bulletin d'information de SONELGAZ distribution Ouest, novembre 2007.
- [115] REN21 (2017) Renewables 2017 Global Status Report ISBN 978-3-9818107-6-9.
- [116] R. Gasch, J. Twele "Wind Power Plants Fundamentals, Design, Construction and Operation", Berlin 2000.
- [117] Scaife Adam A. Météorologie en 30 secondes. Éditions Hurtubise Inc. 2016, pp 160
- [118] M. Ablain. Le climat à découvert. CNRS Éditions.2017 .pp 285
- [119] Direction Énergie Environnement. Application des Eurocodes au domaine du solaire thermique. Cahier de prescription technique. 2018.
- [120] H. Liebherr. Les influences du vent sur l'utilisation des grues. LIEBHERR 4e édition 2017.

- [121] C. Sacre, "Climatologie : La Couche Limite Atmosphérique", Edition française, 1982.
- [122] J. Biétry. Distribution statistique du vent en France. 1982.
- [123] C. G. Justus, W. R. Hargraves et A. Yalcin. Nationwide assessment of potential output from wind powered generators. *Journal of Applied Meteorology*, vol. 15, pp. 673–678, 1976
- [124] J. P. Hennessey. Some aspects of wind power statistics. *Journal of Applied Meteorology*, vol. 16, pp. 119–128, 1977.
- [125] C. Justus and A. Mikhail, 'Height Variation of Wind Speed and Wind Distributions Statistics', *Geophysical Research Letters*, Vol. 3, N°5, pp. 261 - 264, 1976.
- [126] A. Dyer. Review of flux profile relationships. *Boundary Layer Meteorology*, 1974.
- [127] SONELGAZ, "Energies Renouvelables OME Task Force on RE Marrakech", Communication, Septembre 2002.
- [128] C. Sicard, " Les énergies solaire et éolienne en Algérie ", tome III – OCS 81 DZ 232–JYL Février 1981.
- [129] N. Ghellai, H. Tabet and A. Mohamed, " Le gisement éolien à Beni Saf région côtière de l'ouest Algérien", Tlemcen 2003.
- [130] N. Kasbadji Merzouk. Evaluation du Gisement Energétique Eolien : Contribution à la détermination du Profil Vertical de la Vitesse du Vent en Algérie. Thèse de Doctorat faculté des sciences, Département de physique de l'Université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen, Unité de Recherche Matériaux et Energies Renouvelable, p.181, 2006.
- [131] S. Guezzane, " Electrification à l'énergie solaire de 20 villages isolés au sud de l'Algérie", 2èmes Journée Nationales sur les applications et la valorisation des énergies solaires 1997.
- [132] EPIC SONELGAZ (Direction - Recherche - Développement DRD), "Situation et perspectives de l'énergie éolienne", Communication – Tunisie, Mai 2002.

- [133] Direction des Relations avec les Médias. Newsletter presse N°22 Synthèse des plans de développement des sociétés du Groupe SONELGAZ 2013-2023. Edition électronique – Juin 2013.
- [134] Dunderdale J. Energy and the environment. Cambridge: Royal Society of Chemistry; 1990.
- [135] Ait Mekideche M, Consolidés Synthèse Des Bilans D'Activités Et Comptes Sociaux. Des sociétés du groupe SONELGAZ. Newsl Presse 2018.
- [136] Y. Himri, B. Draoui, S. Himri. Wind characteristics of Algeria. Nanotechnology Conference and Trade Show June 1-5 Boston Massachusetts U.S.A. 2008.
- [137] [] N. Kasbadji Merzouk, "Wind Energy Potential of Algeria", Inter. Journal of Renewable Energy, N°21, pp 553-562, 2000.
- [138] Kasbadji Merzouk N. Atlas vent, limites des méthodes d'interpolation, Application au Nord-Est de l'Algérie. Al-Sig, Bordj El Bahri, ENITA, Novembre 1999.
- [139] GPI, Gestion de projets industriels. Etude Technico - Economique des Eoliennes. 2007.
- [140] S. Krohn. Visite guidée dans l'univers de l'énergie éolienne. Windpower, Mars 2001.
- [141] C. G. Justus. Vent et Performances des Eoliennes. Ed SCM n° ISBN 2-901133-16-9, 1980.
- [142] O. Gaudoin, M. Krit, E. Remy. Tests d'adéquation à la loi de Weibull : données complètes et censurées. 19ème Colloque National de Maîtrise des Risques et Sûreté de Fonctionnement, Octobre 2014, Dijon, France.
- [143] B. Multon, O . Gergaud, H. Ben Ahmed, X. Roboam, S. Astier, B. Dakyo. C. Nichita. État de l'art dans les aérogénérateurs électriques. Mai 2002.
- [144] A. Betz. Wind Energie und ihre Ausnutzung durch Windmuehlen. Vandenhoeck et Ruprecht, Gottingen 1926.

- [145] Ministère des Travaux Publics et des Transports. Wilaya d'Adrar. Mtpgovdz 2012.
- [146] Himri, Y., Merzouk, M., Merzouk, N. K., & Himri, S. (2020). Potential and economic feasibility of wind energy in south West region of Algeria. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 38, 100643. ISO 690.
- [147] Direction du Commerce de la Wilaya d'Adrar. Monographie d'Adrar. DCW; 2016.
- [148] Troen, I. and E.L. Petersen (1989). *European Wind Atlas*. Risø National Laboratory, Roskilde. 656 pp. ISBN 87-550-1482-8.
- [149] Mortensen, N. G. (2016). Wind resource assessment using the WAsP software (DTU Wind Energy E-0135). Technical University of Denmark. DTU Wind Energy E No. 0135.
- [150] RETScreen : Energie Eolienne (2001-2006). Analyse de projets d'énergies propres. 2006.
- [151] Himri, Y., Malik, A. S., Stambouli, A. B., Himri, S., & Draoui, B. (2009). Review and use of the Algerian renewable energy for sustainable development. *Renewable and sustainable energy reviews*, 13(6-7), 1584-1591.
- [152] Y. Himri, S. Rehman, A.A Setiawan, S. Himri, (2012). Wind Energy for Rural Areas of Algeria. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(5),2381-2385.
- [153] L. Bauer. Dewind D6 62/1000 – 100 MW – Wind Turbine. Enwind-Turbine-Modelscom; 2019.



Potential and economic feasibility of wind energy in south West region of Algeria

Y. Himri^{a,b,d,*}, M. Merzouk^b, N. Kasbadji Merzouk^c, S. Himri^d

^a School of Engineering Science, Lappeenranta University of Technology, P.O. Box 20, 53851 Lappeenranta, Finland

^b FUNDamental and Apply Physics Laboratory (FUNDAPL) Université Saad Dahlab Blida, Algeria

^c Unité de Développement des Équipements Solaires/UEDES, Centre de Développement des Energies Renouvelables/CDER, 42004 W. Tipaza, Algeria

^d Faculté des Sciences Exactes, Université Tahri Mohamed Béchar, Algeria

ARTICLE INFO

Keywords:

Feasibility study
RETScreen
WAsP
Wind energy potential
Windfarm economic viability

ABSTRACT

The present research is focused on windfarm economic viability and wind power potential assessment by RETScreen and WAsP tools, respectively, for the South-West region of Algeria. This study considers the atlas development of wind characteristics analysis. Hourly mean wind data recorded during the years 2003 to 2008 by ONM “Office National de la Météorologie” (the Algerian Meteorological Office), is used for the study. The mean wind speed, energy flux, the dominant wind direction, the frequency distribution, and the Weibull distribution scale and shape factors are determined and analyzed. Finally, RETScreen software is used to estimate the energy output and to conduct the economic feasibility of the wind farm in terms of Simple Payback Period (SPP), Internal Rate of Return, Annual Life Cycle Saving, Net Present Value, Year to Positive Cash Flow, Benefit-Cost ratio and cost of electricity production (COE). The economic analysis indicates that the project at Adrar region was economically viable with good energy production of 3146 MWh/yr and a Capacity Factor (CF) of 36%. The SPP was found to be around 3.9 years, and the COE of 3.25 US Cents/kWh was found lower than the wholesale price of electricity during the feed-in tariff period.

Introduction

Energy is essential for the prosperity and industrial growth of a nation. Today's materialistic lifestyles are energy-intensive and energy-dependent, right from starting the day and going back to the bed and beyond. Indeed, an interruption in electricity supply in a city or home has become intolerable. Furthermore, the industrialized economies, which contain $\frac{1}{4}$ of the global population, consume almost $\frac{3}{4}$ of global energy needs [1], which creates an imbalance in the society. With regards to Algeria, in 2011, there were 7,057,246 electricity consumers and increased to 9,184,962 in 2017, as seen in Table 1 [2].

The energy growth reached 75,675 GWh in 2017 from 48,871 GWh in 2011. The above-increased energy demands can be attributed to fast growth in commercial and residential sectors in Algeria.

The use of wind as a source of power generation isn't new. Humans have been sailing the seas for centuries using wind, and the first known windmills were built in Persia in 200BC. Windmills were used for grinding grains in the earlier times and now are being used for electricity generation for grid-connected and off-grid applications globally. However, with the passage of time, the design, sizes, technology, and

use of wind machines have changed considerably [3], where actually, a 1800 kW turbine can produce enough power for approximately 500 homes [4]. The global wind installed capacity is increasing fast due to technological development, availability of multimega Watt and efficient wind turbines, and commercial acceptability. As a result, several new projects are being initiated and commissioned in different parts of the world. China is the market leader with 35% of the total installed capacity of global wind energy (486,749 MW), while the USA is in third place with a 17% share of total world production after Europe. Growth in African and Middle Eastern markets increased significantly at the end of 2016, with 418 MW of new installed capacity, making a total of 3906 MW [5].

In Algeria, the first wind measurement campaign was initiated in the 1900s at 42 stations. However, the wind measurements were taken as the average of 3 readings every day at 07 am 01 pm and 06 pm. These three values were used to obtain the daily mean values of wind speed [6]. The first wind atlas was developed through the production of statistical results of the wind speed frequencies measured at 37 meteorological stations [7]. These results were exploited and completed by Kasbadji-Merzouk in 2000 [8] to establish the first map of the winds of Algeria.

* Corresponding author.

E-mail address: y_himri@yahoo.com (Y. Himri).

Table 1
Energy growth vs. number of consumers for Algeria [2].

Parameter	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Energy growth (GWh)	48,871	54,087	59,516	64,050	68,766	70,748	75,675
Number of consumers	7,057,246	7,381,864	7,699,835	8,031,502	8,450,000	8,810,312	9,184,962

Boudia et al. have assessed the wind potential resource in Algeria using statistical analysis based on recent meteorological data, gathered from 63 meteorological stations distributed throughout Algeria and 24 in neighboring countries close boundaries to update the distribution cartography of wind speed in Algeria at 10 m AGL [9].

Nedjari et al. have identified new potential windy sites using a multi-criteria analysis based on the GIS method. Indeed they have used data from about 74 new sites to verify and update the Algerian wind atlas at 10 m and 80 m AGL. The selected regions, such as in Sahara and high plateau, may be eligible to receive the windfarm projects soon [10].

In ref [11], the authors have used wind energy resources to power reverse osmosis desalination plant in Ténés (Algeria) via Wasp.

Belabes et al. have used the WAsP software to determine the cost of electricity generation using three commercial wind turbines (WTs) at six sites of the north of Algeria [12].

Loussa et al. have estimated wind resources available in the Ksar Chellala region using WAsP to identify windy sites suitable for windfarm installations and the most productive wind turbine [13].

Abdeslame et al. have used the wind data for ten years in 4 sites located in the Algerian high plateaus, namely Setif, Ksar Chellala, Msila, and Tiaret to evaluate the annual electrical output production for 8 MW installed capacity windfarm at each site in Algeria [14].

SahebKoussa et al. have estimated the Capacity Factor (CF) of 4 wind turbine generators available on the market based on the wind characteristics of 13 sites located in different Algerian climatic zones [15].

Some studies have been conducted in the southwest of Algeria, assessing and implementing renewable energy projects [8,16–18].

Based on the Algerian wind atlas, which indicated that the Adrar region was favorable to the installation of windfarms [19], estimated the electricity production of a 10 MW wind farm at Adrar(Kabertene), located in the southwest region of Algeria.

Recently, Guerri et al. have investigated the analysis of the performance of the first windfarm in Kabertene connected to the network in Algeria concerning the annual energy output, CF, and number of operating hours. They have evaluated the cost of electricity generated based on some assumptions about the investment costs of the windfarm, i.e. the average specific price of wind turbines, the civil work, and initial capital cost of the wind turbine [20].

Shortly, many wind power projects are being planned in Algeria to conserve their natural resources and protect its environment [21]. The best-known wind power potential is in the south-west region, i.e., Adrar, where wind speed is above 6 m/s. Further detailed investigations are needed to identify suitable sites for wind power project deployments.

Till now, the wind power evolution within Algeria remains at the start, with only a single wind energy plant connected to the electrical grid. Further to the wind farm in Adrar region, six new PV grid-connected power plants with a total capacity of 48 MW were additionally implanted inside this region. With these new wind and solar installed capacities, it is becoming a pioneer region for the exploitation of renewable electricity.

It is useful and expected to be profitable to combine the wind and solar energy sources to meet the power requirements. In this region, a strong wind of around 6 m/s prevails at 10 m AGL and receives 2650 kWh/m² of solar radiation with an annual sunshine duration of 3500 h [22,23]. Most of the projects of renewable energy in Algeria are

planned to be implemented in the Sahara. Algeria might be a potential country for an energy transition. It may also be an exporter of renewable energy in the world in the future since it is the largest country in Africa.

The main objective of this paper is to analyze wind data and conduct the economic feasibility analysis of the wind farm in terms of financial performance and economic indicators. Furthermore, this project maybe will be concretized in reality; indeed, this study will be made real on-site wind power assessment to design a grid-connected windfarm at the site.

Project description and energy data

Adrar is the 2nd most significant region in Algeria, with an area of 439,700 km² after Tamanrasset [24]. It is two times the total area of Belarus (Fig. 1).

In 2014, the total population of this region exceeded 441,800 [25]. It has 11 districts, 28 municipalities, and 299 Ksars (palaces). The most important cities are Timimoun, Reggane, Adrar, Tsabit, ZaouietKounta, Aougrountamentit, Aoulef, Fenoughil, Charouin, and BordjBadji Mokhtar.

In Adrar region, Timimoun natural gas field project, which is classified as a tight gas reservoir. This region can be considered as a gas industrial base. Furthermore, the three areas, namely Insalah, Adrar, and Timimoun, are interconnected between them via a power grid and constitute a pole (PIAT). By 2020 the PIAT will be connected to the national network through a 400 kV line. So the electrical system is going to cover the entire territory of Algeria.

Meteorological data

Adrar is situated in the south-western part of Algeria (Lat 27°49' N and Long 00°17' E). It is 263 m amsl. The site was characterized by its relatively flat topography with low roughness. There were no obstacles or barriers in the vicinity of this site. It was located no far away from the grid connection point.

For the economical and successful implementation of wind power projects at any location, it is essential to know the availability and variability of wind speed on an annual, monthly, and daily basis. At Adrar, the wind measurements were performed at height 10 m and were registered at as 3 hourly averages.

The wind measurements were carried out by the Office National de Météorologie [7]. The data were gathered during a period of 11 years, from 1977 to 1988. The yearly average wind speed, the ambient temperature, the barometric pressure in this region were 5.9 m/s at the height of 10 m, 24.1 °C, and 98 kPa, respectively.

Materials and methods

This part gives in detail about the wind speed characteristics via WAsP; energy output, CF, and compares CF and energy output calculated using two different approaches, i.e., Wind Power Curve (WPC) and RETScreen software.

Investigation of wind characteristics using WAsP

The wind characteristics were analyzed by using WAsP. The mean wind speed, wind direction, and mean power flux, are determined and examined.

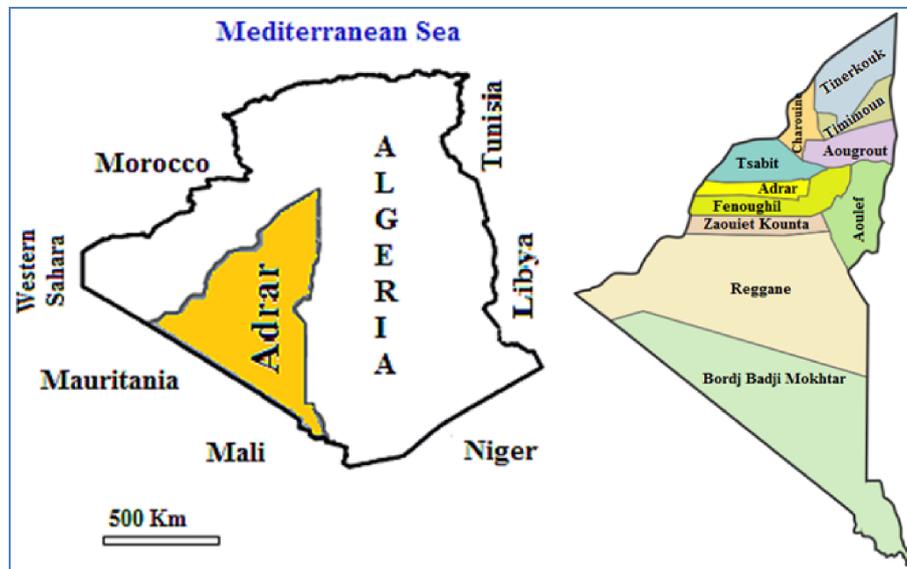


Fig. 1. Geographical location of Adrar region.

Wind speed analysis

To further, study the current wind data set of mean hourly wind speeds were collected from the ONM for a duration of 6 years (2003–2008), at Adrar region. The wind measurements were taken at 10 m. In this study, the WASP software was used to calculate the means of wind speed, wind directions, available wind resources, and Weibull factors. The average daily cycle of wind speed at Adrar station is shown in Fig. 2.

Diurnal variations of wind speed had a maximum oscillation at 11 h00 and a minimum at 21 h00.

Overall, the speed is higher than 6 m/s from 8 h to 19 h and exceeds 7 m/s from 9 h to 12 h, while the wind speeds at night vary between 4 and 6 m / s. This shows that relatively more electric power could be generated throughout 08 h00–19 h00, which also coincides with the peak power demand. It is also noticeable from Fig. 2 that the mean wind speed always remained > 5 m/s during the whole daytime.

The monthly variation of wind speed gives knowledge “confidence” on the availability of wind energy in different months of the year. Such information helps to plan the operation of the actual power plant in coordination with the windfarm. As can be seen from Fig. 3, the highest wind speeds were found in May while the lowest in October.

The seasonal variations in mean wind speeds were found to be comparatively higher or equal than 6 m/s during February–September, and they vary between 5.5 and 6 m/s for the other months. The yearly variation in the average long-term wind speed allows understanding the

long-term pattern of wind speed and, therefore, gives investors confidence in the availability of wind energy in the coming years.

Fig. 4 shows that the yearly value of the wind speed varies from 6 m/s in 2003 to 7 m/s in 2008.

The highest wind speed was recorded in 2008, with an overall average value of 7 m/s. However, the lowest wind speed of 5.8 m/s was recorded in 2007.

Wind direction and mean power flux

The direction statistics play an essential role in the optimal placement of a windfarm in a given space. The wind speed data of the Adrar site were divided into 12 directional sectors: North-North West (NNW), North (N), North-North East (NNE)... and West-North West (WNW). In this way, each sector spreads over 30°. The following wind rose charts and probability of the time when the wind remains in a specific wind speed interval are presented in Fig. 5.

It is evident from Fig. 5 that the most prominent wind in Adrar is from the North-East direction, which is > 15% of all the time.

Wind energy density or power flux indicates the amount of energy available at the site for conversion by an aerogenerator. It is crucial to determine the wind resources feasible for power generation at the location. The measured and estimated annual average power flux and wind speed during the years 2003–2008 in this region are summarized in Table 2.

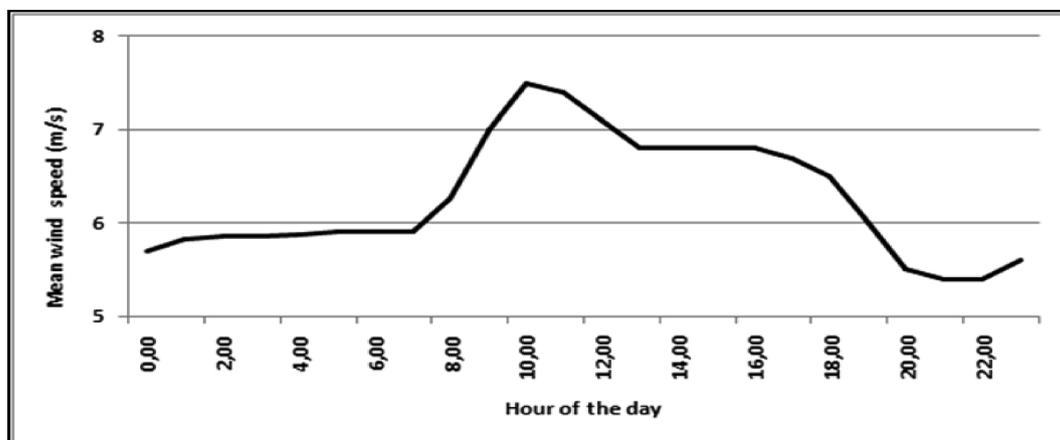


Fig. 2. Diurnal variation of mean wind speed at Adrar region.

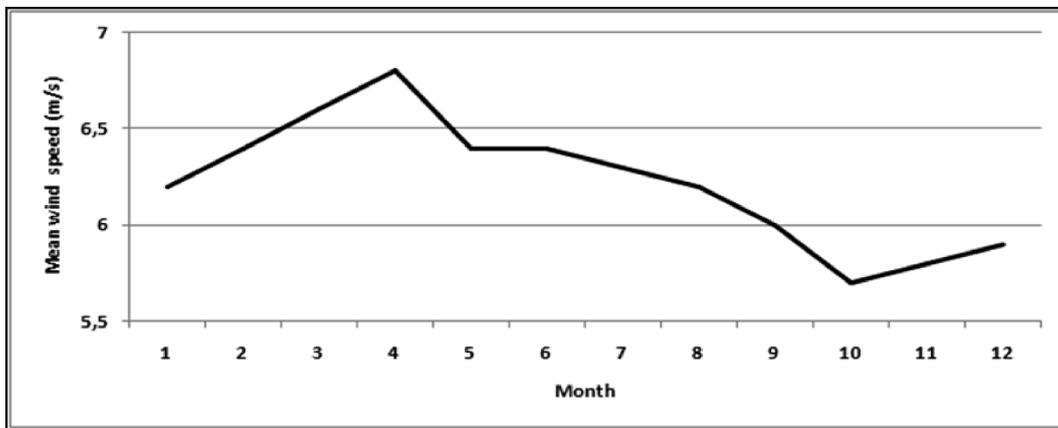


Fig. 3. Monthly variation of average speed at Adrar region.

The annual mean wind speed error between the measured and estimated values was 4.62%. Over the same period, the measured and calculated annual mean wind power densities were 279.31 W/m² and 282.20 W/m², respectively. However, the corresponding error was 1.03%. These results show that the estimated average wind speeds are in good accordance with the measured values, and therefore, the estimates can be utilized with reasonable confidence for the evaluation of the wind resource.

Estimation of energy output with RETScreen

The RETScreen is used to calculate the energy output and to conduct an economic feasibility study of windfarm projects connected with the electric grid in selected sites. The Hypothetical windfarm consisting of 30 WTs of 1 MW rated power. The choice of this specific WT (DEWIND 62) was justified in terms of particular suitability to the region according to some studies research published by Himri et al. in Refs. [18,26].

Wind statistics

The analysis of wind availability is performed in terms of the frequency (percentage time) during which the wind remained in a specified wind-speed interval. Fig. 6 presents the wind frequency of occurrence for different wind bins (range) at height 68.5 m for Adrar.

The wind speeds at a tower height of 68.5m were computed applying the power law, as defined below [27]:

$$v_2 = v_1 \left(\frac{h_2}{h_1} \right)^\alpha \tag{1}$$

where v_1 and v_2 are the wind speeds at heights h_1 and h_2 respectively, and α is the power-law coefficient.

For a smooth terrain such as sand, the power-law coefficient ranges from 0.10 to 0.14. Besides, the value of 0.14 is an excellent first approximation when the site characteristics are yet to be determined [28,29].

The frequencies at hub height indicate that the wind remained above 3 m/s for 76% of the time, which means that wind power can be generated 76% of the time at Adrar.

Energy production calculations

The annual energy production was estimated by two different methods, namely WPC of a wind machine and frequency distribution, and the RETScreen model, as mentioned earlier. The software requires a wind power curve, the yearly mean wind speed, the swept turbine blade area, the average atmospheric pressure, the annual average temperature, tower height, etc. The wind machine technical specifications and parameters are resumed in Table 3.

Fig. 7 shows the energy output that can be produced using the chosen wind turbine of 1000 kW and wind speed value at 68.5 m.

It is observed that at 68.5 m, the estimated total annual energy is approximately 3172.4 MWh (Fig. 7). The CF at 68.5 m is found to be 36%.

The various types of losses and the pressure and temperature adjustment coefficients were also taken into consideration for the evaluation of energy production and are listed in Table 4.

A value of 0.14 of the power-law coefficient was applied to evaluate the wind speed at the turbine tower height. In this study, the transmission and distribution (T&D) losses are assumed to be 12%, and the

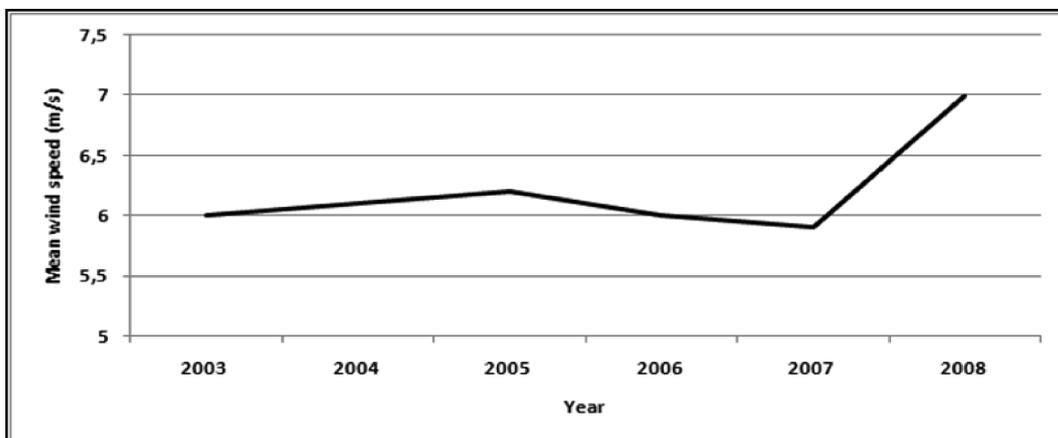


Fig. 4. Yearly mean speed for Adrar at 10 m AGL.

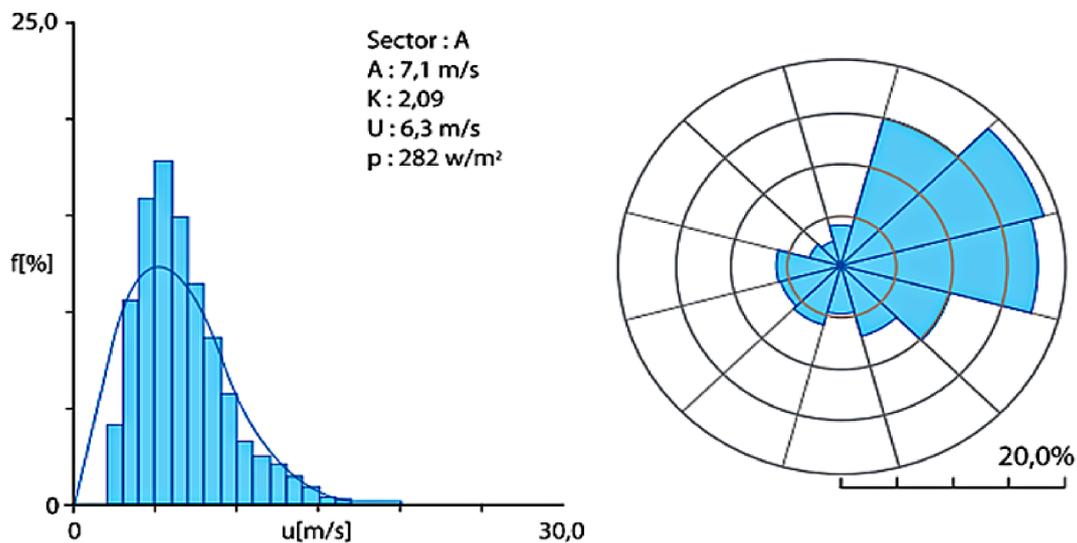


Fig. 5. Wind rose charts and wind speed distributions at Adrar from 2003 to 2008.

Table 2
Annual variations of average speed and power flux at 10 m AGL.

	Measured	Calculated	Error (%)
Annual average speed (m/s)	6.62	6.31	4.62
Annual average power flux (W/m ²)	279.31	282.20	1.03

closest grid connection point is considered to be about 8.5 km away from the hypothetical wind farm [32].

The annual energy productions and other output from the Energy Model are listed in Table 5.

The gross energy production was 3446 MWh/yr, and the wind energy delivered was 3146 MWh/yr (Table 5). The CF was 36% at this site. Besides, the usage of wind energy at this site will avoid 1421 tons/year of CO₂equivalents GHG from entering into the local atmosphere and about 35,525 of tons of GHG over the life time of the windfarm.

Lastly, the wind energy estimated from the power curve and RETScreen are in close agreement with each other for the chosen wind turbine, as seen in Table 6.

Table 3
Technical specification of DEWIND [30].

Item	Value	Unit
Wind turbine manufacturer	DeWind	
Rated power,	1	MW
Wind turbine rotor	62	m
Mast	68.5	m
Number of blades	3	
Cut-in speed	3	m/s
Rated wind speed,	11.5	m/s
Cut-off speed	23	m/s
Rotational speed	12.1–25.2	rpm

Economics analysis of wind energy

An economic analysis of the energy production using financial parameters such as discount rate and inflation avoided the cost of electricity, energy cost escalation rate, etc. is carried out using RETScreen model. The cost parameters adopted in this study are presented in Table 7 [18].

The details of a breakdown in total costs for windfarm projects are taken from Ref. [18].

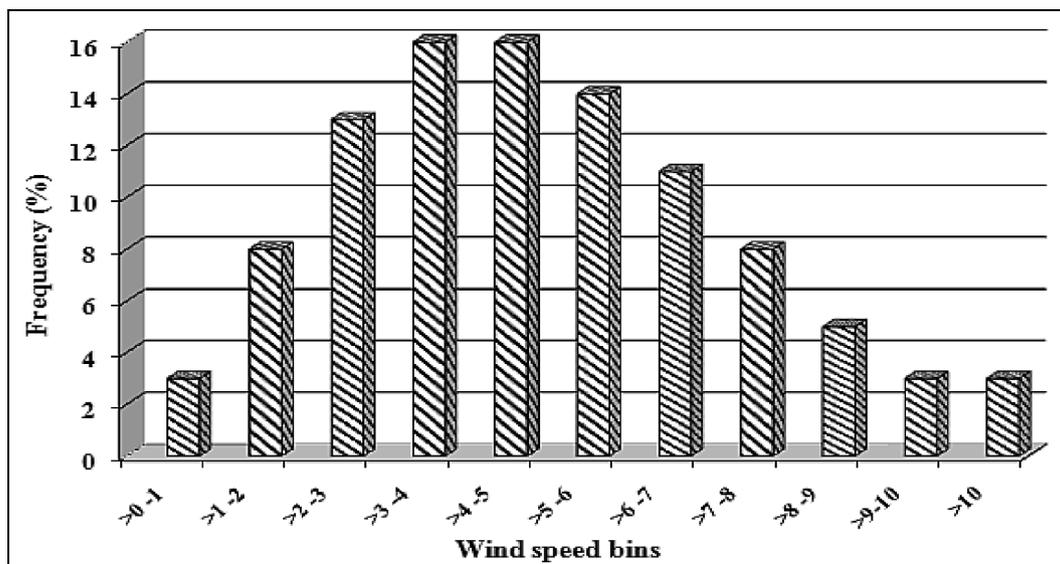


Fig. 6. Frequency distribution of the wind speed at 68.5 m

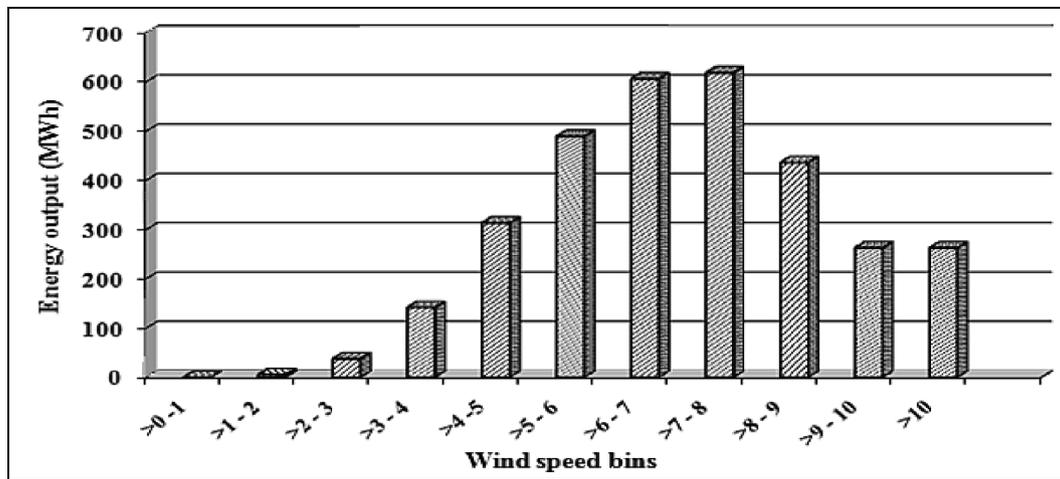


Fig. 7. Energy output generated by a wind turbine of 1000 kW at 68.5 m

Table 4
Losses coefficient in energy production calculations [18,31].

Losses	Causes	Selected value
Array (Wake effects), (%)	“Interaction of the wind turbines with each other through their wakes.”	3
Airfoil soiling, (%)	“Soiling of the blade from such things as insects, dust, and sand particle build-up.”	2
Downtime, (%)	“Scheduled maintenance, wind turbine failure, station outage, and utility outage”	2
Miscellaneous, (%)	“Losses of energy production due to starts and stops, off-yaw operation, high wind, and cut-outs from wind gusts.”	2
Pressure adjustment coefficient		0.97
Temperature adjustment coefficient		0.97
Power law coefficient		0.14
T&D losses (%)		12

Table 5
Energy production and other output from RETScreen.

Item	Adrar
Annual average wind speed, (m/s)	5.9
Annual gross energy production (MWh)	3446
Annual renewable energy delivered (MWh)	3146
CF, (%)	36
Net GHG reduction, (tons/yr)	1421

Table 6
Evaluation of wind energy and plant factor from 1 MW wind turbine using 2 approaches at 68.5 m.

Output	WPC	RETScreen Model	Difference (%)
Wind energy (MWh/yr)	3172	3146	1
CF (%)	36	36	0

Table 7
Main financial parameters for cost breakdown [18].

Parameters	Amount	Unit
Avoided cost of energy	0.0950	\$/kWh
RE production credit	0.025	\$/kWh
RE production credit duration	10	year
RE credit escalation rate	2.5	%
GHG emission reduction credit	5.0	\$/tco2
GHG reduction in credit duration	21	year
GHG credit escalation rate	0.0	%
Energy cost escalation rate	5.0	%
Inflation	2.5	%
Discount rate	12.0	%
Project life	25	year
Annual operation and maintenance cost	770,000	\$/year

The total cost of a wind farm includes various expenditures, including feasibility study, development, engineering, energy equipment, the balance of plant and miscellaneous.

As shown in Table 8, the highcost of US\$ 31,890,000 corresponds to energy equipment, which is about 77.1% of the total windfarm initial costs. The second considerable share of the cost of 14% represents the balance of the plants.

The economic feasibility study is carried out by considering the internal rate of return, net present value, simple payback period, benefit-cost ratio, year to positive cash flow, annual life cycle saving, and cost of electricity production. These are the critical evaluation methods used to choose the suitable sites.

- Internal rate of return-IRR

It is the discount rate at which the NPV of the project is equal to 0. It is determined by the solution of the following equation [33,34]:

$$\sum_{n=0}^N \frac{C_n}{(1 + IRR)^n} \tag{2}$$

where:

Table 8
Feasibility study on renewable energy equipment [18].

Initial costs	Amount (\$)	Share (%)
Feasibility study	245,200	0.6
Development	835,500	2.0
Engineering	610,500	1.4
Energy equipment	31,890,000	74.7
Balance of plant	5,868,000	13.8
Miscellaneous	3,215,110	7.5
Initial costs-total	42,664,310	100.0

N : Life of project in years
 C_n : Cash flow for the N number of years.

If the IRR is higher than the discount rate, then the project will be financially acceptable. In the present case, the IRR was found to be 58%, which is higher than 12% (discount rate). Therefore, the project is considered financially acceptable.

- Net present value-NPV

The NPV of a project is the difference between the sum of discounted cash inflows and outflow. It is computed by discounting all cash flows, as indicated in the following equation [33]:

$$NPV = \sum_{n=0}^N \frac{\hat{C}_n}{(1+r)^n} \tag{3}$$

r : Discount rate for the project
 \hat{C}_n : After-tax cash flow in n number of years.

Positive NPVs show that the project is feasible. The computed NPV was found to be the US \$70,915,465, and since it is positive, the project is viable.

- Simple paybackperiod-SPP

The SPP is the period that necessary for the cash flow to be equal to the total investment:

$$SP = \frac{C - IG}{(C_{ener} + C_{capa} + C_{RE} + C_{GHG}) - (C_{O\&M} + C_{fuel})} \tag{4}$$

C : "Total initial cost of the project."
 IG : "Incentives and grants."
 C_{ener} : "Annual energy savings."
 C_{capa} : "Annual capacity savings."
 C_{RE} : "Annual renewable energy (RE) production credit income."
 C_{GHG} : "Greenhouse gases reduction income."
 $C_{O\&M}$: "Annual operation and maintenance cost."
 C_{fuel} : "Annual cost of fuel or electricity."

A shorter SPP signifies a desirable investment. This period was found to be around 3.9 years, which is an indicator of an economically feasible wind power project at Adrar.

- Benefit-cost ratio-BCR

The BCR provides a measure of the economic desirability of the project. It is expressed as the ratio of the net benefits to the costs of the project:

$$BCR = \frac{NPV + (1 - f_d)C}{(1 - f_d)C} \tag{5}$$

f_d : Debt ratio

Ratios above one are considered as attractive projects. In the present case, the BCR value is found to be positive (6.54) > 1, which indicates that the project is profitable.

- Year to positive cash flow-YPCF

The YPCF is the first year in which the accumulated cash flows for the project are positive.

It represents the period that it needs for the investor of such a plan to recover its initial investment out of the project cash flows generated

[35]. It is determined as:

$$0 = \sum_{n=0}^{N_{PCF}} C_n \tag{6}$$

where:

C_n : After-tax cash flow over a period of n years.

The YPCF was equal to 1.9 years in the proposed case.

- Annual life cycle saving-ALCS

The ALCS is the Levelized nominal yearly savings, which have absolutely the same life and NPV as the project [36]. It is computed by using the following expression:

$$ALCS = \frac{NPV}{\frac{1}{r} \left(1 - \frac{1}{(1+r)^N} \right)} \tag{7}$$

The ALCS was found to be positive of about US\$ 9041720.

- Cost of electricity production-COE

The COE is often given in terms of US\$/kWh or US Cents/kWh. It is the avoided cost of electricity that takes the NPV to 0. It involves the initial capital, discount rate, fuel cost, and operation and maintenance costs. The COE was found to be 3.25 US Center/kWh. According to the results of the financial analyses (economic indicators), the 30 MW capacity wind power project at Adrar is economically viable.

Feed-in Tariff-FIT

It is a support mechanism that provides technology-specific remuneration per unit of renewable energy payable to the producers [37].

The period for this support generally varies from 10 to 20 years. In 2004, Algeria was the only country in Africa that has introduced a FIT-scheme which was implemented in 2014. The tariff payment is guaranteed for 20 years in Algeria. During the first five years, all producers receive a fixed tariff of 10.48 DA/kWh (9.78 US Center/kWh). During the rest of the operational period, the tariff payment depends on the annually-averaged electricity generation, and it can vary between 7.64 and 13.33 DA/kWh (7.13–12.44 US Center/kWh), as shown in Table 9.

The COE of 3.48 DA/kWh (3.25 US Center/kWh) was lower than the wholesale price of electricity during the first five years (10.48 DA/kWh) and the rest of the period (7.64–13.33 DA/kWh). This shows that the COE is more affordable than the sale price.

Conclusions

Wind data analysis was conducted for Adrar region (southwest Algeria) to investigate the potential of wind energy and wind characteristics. The Following main conclusion can be drawn from this study:

- The maximum speed was during the day at around 08 h00 and 19 h00 (i.e., daytime), whereas the minimum during the night. This shows that relatively more electric power could be generated

Table 9
 Guaranteed prices for wind energy (with scale > 5 MW) in Algeria.

Regulatory adjustment	Period year	Annual operating time (hours)	Sale price DA/kWh
-15%	01-05	1900	10.48
+15%	06-20	1900	7.64-13.33

throughout 08 h–19 h, which also coincides with the peak power demand.

- The seasonal variations in mean wind speeds were found to be comparatively higher or equal than 6 m/s during February–September, and they vary between 5.5 and 6 m/s for the other months.
- The yearly averaged value of the mean wind speed varied from almost 6 m/s in 2003 to 7 m/s in 2008.
- The measured and calculated annual mean power densities were 279.31 W/m² and 282.20 W/m², respectively (a deviation of 1.03%). The most prominent wind in Adrar is from the North-East direction.
- The wind energy estimated from the power curve and RETScreen are in close agreement with each other for the chosen wind turbine.
- The economic analysis showed that the project at Adrar was found to be feasible with good annual energy production of 3146 MWh and a plant factor of 36%.
- The use of renewable energy at this site will prevent 35,525 tons of GHG emissions during the lifetime of the windfarm of 25 years in Adrar.
- It is estimated that by the year 2020, the wind power installed capacity in Algeria will reach up to 1010 MW.
- More detailed studies are needed to identify suitable sites in the region of Adrar, to assess their energy potential, and to realize other projects.

CRedit authorship contribution statement

Y. Himri: Conceptualization, Methodology, Software. **M. Merzouk:** Supervision. **N. Kasbadji Merzouk:** Writing - review & editing. **S. Himri:** Data curation, Writing - original draft.

Declaration of Competing Interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Acknowledgements

The authors would like to thank the Editor and the reviewers for their valuable time and efforts put in providing the valuable comments and suggestions on the above submitted manuscript. Further Thanks are due respectively to Professor S. Rehman at King Fahd University of Petroleum and Minerals, Saudi Arabia for his help and support and Director S. Guezane and Mrs R. Aissaoui at CREDEG / Direction Etudes & Développement SONELGAZ for their cooperation.

References

- [1] Dunderdale J. *Energy and the environment*. Cambridge: Royal Society of Chemistry; 1990.
- [2] Ait Mekideche M, *Consolidés Synthèse Des Bilans D'Activités Et Comptes Sociaux. Des sociétés du groupe sonelgaz*. News Presse 2013;2014:31.
- [3] Cuppernell E. *The Power of Wind: The potential for a residential wind turbine in Union Springs, New York*. 2004.
- [4] Fisher A. *Science newsfront*. Popular Sci 1978.
- [5] Fried L. *Global wind statistics 2017*. GWEC Global Wind Energy Council; 2018.
- [6] Seltzer P. *Le Climat De L'algerie*. La Typo-litho& J. Carbone; 1946:219.
- [7] Hammouche R. *Atlas Vent De L'algerie*. Alger, Algérie: ONM; 1990:152.
- [8] Merzouk N. Wind energy potential of Algeria. *Renew Energy* 2000;21(3–4):553–62. [https://doi.org/10.1016/S0960-1481\(00\)00090-2](https://doi.org/10.1016/S0960-1481(00)00090-2).
- [9] Boudia S, Benmansour A, TabetHellal M. Wind resource assessment in Algeria. *Sustain Cities Soc* 2016;22:171–83. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2016.02.010>.
- [10] DaouNedjari H, Haddouche S, Balehouane A, Guerri O. Optimal windy sites in Algeria: potential and perspectives. *Energy* 2018;147:1240–55. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.12.046>.
- [11] Dehmas D, Kherba N, Hacene F, et al. On the use of wind energy to power reverse osmosis desalination plant: a case study from Ténès (Algeria). *Renew Sustain Energy Rev* 2011;15(2):956–63. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.11.004>.
- [12] Belabes B, Youcefi A, Guerri O, Djamaï M, Kaabeche A. Evaluation of wind energy potential and estimation of cost using wind energy turbines for electricity generation in north of Algeria. *Renew Sustain Energy Rev* 2015;51:1245–55. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.043>.
- [13] Louassa S, Guerri O, KasbadjiMerzouk N, Merzouk M. Wind resources estimation and performance evaluation of two wind farms in an Algerian arid zone. In: 2016 International Renewable And Sustainable Energy Conference (IRSEC). Marrakech, Morocco: IEEE; 2016;pp. 444–449.
- [14] Abdeslame D, KasbadjiMerzouk N, Mekhtoub S, Abbas M, Dehmas M. Estimation of power generation capacities of a wind farms installed in windy sites in Algerian high plateaus. *Renew Energy* 2017;103:630–40. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.10.075>.
- [15] SahebKoussa D, Koussa M, Hadji S. Assessment of various WTG (wind turbine generators) production in different Algerian's climatic zones. *Energy* 2016;96(1):449–60. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.12.072>.
- [16] Merzouk N, Merzouk M. Efficiency of three wind turbines installed on high plains region of algeria. *Procedia Eng* 2012;33:450–7. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.01.1224>.
- [17] Himri Y, BoudgheneStambouli A, Draoui B, Himri S. Review of wind energy use in Algeria. *Renew Sustain Energy Rev* 2009;13(4):910–4. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2008.02.006>.
- [18] Himri Y, BoudgheneStambouli A, Draoui B. Prospects of wind farm development in Algeria. *Desalination* 2009;239:130–8.
- [19] Djamaï M, Merzouk N. Wind farm feasibility study and site selection in Adrar, Algeria. *Energy Procedia* 2011;6:136–42. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2011.05.016>.
- [20] Guerri O, Boudia S, Dali A, Kaabeche A, Yassaa N. Performance Evaluation of the First Wind Farm in Algerian Sahara. In: *Technologies And Materials For Renewable Energy, Environment And Sustainability, TMREES18*. Athens, Greece: Energy Procedia; 2018:11.
- [21] Himri Y. *Optimisation de certains paramètres d'un aérogénérateur situe dans le sud ouest de l'Algérie. Béchar, Algérie: Mémoire de Magister. Université Tahri Mohamed; 2005*.
- [22] Marini A, Talbi M. *desertification and risk analysis using high and medium resolution satellite data*. 1st ed. Dordrecht: Springer, Netherlands; 2009.
- [23] *Direction des Énergies Nouvelles et Renouvelables. Guide Des Energies Renouvelables*. Ministère de l'Énergie et des Mines; 2007:89.
- [24] *Ministère des Travaux Publics et des Transports. Wilayad'Adrar. Mtpgovdz* 2012.
- [25] *Direction du Commerce de la Wilaya d'Adrar. Monographie d'Adrar. DCW; 2016*.
- [26] Himri Y, Boudghene Stambouli A, Himri S. Wind speed data analysis used in installation of wind energy conversion systems in Algeria. *IEEE PES T&D 2010, New Orleans, LA, USA: IEEE; 2010, pp. 1–5*.
- [27] Justus C, Mikhail A. Height variation of wind speed and wind distributions statistics. *Geophys Res Lett* 1976;3(5):261–4. <https://doi.org/10.1029/g1003i005p00261>.
- [28] Gouieries L. *Wind power plants theory and design*. Pergamon Press; 1982.
- [29] Gipe P. *Wind energy comes of age*. New York, N.Y.: Wiley; 1995.
- [30] Bauer L. *Dewind D6 62/1000 – 100 MW – Wind Turbine. Enwind-Turbine-Modelscm; 2019*.
- [31] Himri Y, Rehman S, Himri S, Mohammadi K, Sahin B, Malik A. Investigation of wind resources in Timimoun region, Algeria. *Wind Eng* 2016;40(3):250–60. <https://doi.org/10.1177/0309524x16645483>.
- [32] SONELGAZ. *Guide Technique de l'Electricité*. SONELGAZ; 2014.
- [33] *Natural Resources Canada (NRCAN). Clean Energy Project Analysis*. Canada; 2005:30.
- [34] Rehman S, Ahmed M, Mohamed M, Al-Sulaiman F. Feasibility study of the grid connected 10 MW installed capacity PV power plants in Saudi Arabia. *Renew Sustain Energy Rev* 2017;80:319–29. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.218>.
- [35] Rehman S, Shash A, Amoudi O. Photovoltaic technology of electricity generation for desert camping. *Int J Global Energy Issues* 2006;26(3/4):322. <https://doi.org/10.1504/ijgei.2006.011262>.
- [36] Le Dû M, Dutil Y, Rousse D, Paradis P, Groulx D. Economic and energy analysis of domestic ground source heat pump systems in four Canadian cities. *J Renew Sustain Energy* 2015;7(5):053113. <https://doi.org/10.1063/1.4931902>.
- [37] *Country policy profile: Slovakia*. EurObsv'ER; 2015.