



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة وهران 2 محمد بن أحمد
Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed

معهد الصيانة و الأمن الصناعي
Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle

Département de Maintenance en Instrumentation

MÉMOIRE

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière: Génie industriel

Spécialité: Génie industriel

Thème

Choix des systèmes éoliens appropriés pour les sites Algériens.

Présenté et soutenu publiquement par :

Bouabdellah Boualem & Benabdelkder Toufik

Devant le jury composé de :

Nom et Prénom	Grade	Etablissement	Qualité
Mr. ADJELOUA Abdelaziz	MCB	Univ. Oran-2, IMSI	Président
Mr. Abderrahim BENFEKIR	MCB	Univ. Oran-2, IMSI	Encadreur
Mr. BENARBIA Taha	MCB	Univ. Oran-2, IMSI	Examineur
Mme. GHAZLI Fatima Zohra	Doctorante	Univ. Oran-2, IMSI	Co. Encadrante

Dédicaces

Avec tout respect et amour Je dédie ce mémoire avec gratitude et reconnaissance : À mes parents, qui ont été ma source d'inspiration et de soutien tout au long de ce parcours. Votre amour inconditionnel m'a donné la force de persévérer.

À mes frères et sœurs qui m'ont encouragé et motivé durant cette période. Vos paroles d'encouragement et votre confiance en moi ont fait toute la différence.

À mes professeurs, Mr Benfekir Abderrahim et Mme Fatima Zahra Ghazliqui m'ont transmis leur savoir et leur passion pour l'apprentissage. Votre guidance a été essentielle dans la réalisation de ce projet. Cette dédicace vous est dédiée en signe de profond respect et d'appréciation.

Toufik.

Dédicaces

A mes chers parents pour leur amour inestimable leur confiance, leur soutien leurs sacrifices et toutes les valeurs qu'ils ont su m'inculquer.

A toute ma famille mon frère mes sœurs et leurs petits-enfants et tous ceux que j'aime.

Boualem

Remercîments

Avant tous, Je remercie Allah, le tout-puissant de m'avoir donné le courage, la volonté, la patience et la santé Durant toutes ces années d'étude et que grâce à lui ce travail a pu être réalisé.

Je tiens à remercier très vivement mes encadreurs de mémoire Monsieur Dr. BENFKIR RAHIM, et Mme. FATIMA ZAHRA GHAZLI à qui j'exprime reconnaissance pour tous les conseils et les encouragements qu'ils ma prodigué pendant toute la durée de ce travail.

Résumé

Le choix d'une éolienne pour un site donné est une opération très importante. Il est conseillé de faire une étude approfondie sur les caractéristiques de l'aérogénérateur et du site d'implantation avant toute installation d'un parc éolien pour bien choisir le système le mieux adapté aux besoins énergétiques.

Nos efforts se sont principalement dirigés vers la compréhension des caractéristiques du régime du vent et la détermination des éléments de base nécessaire pour le dimensionnement des systèmes éoliens les plus adaptés aux sept sites météorologiques répartis sur l'ensemble du territoire algérien.

Mots clé – éolienne, Analyse des données, Modélisation, conception d'un projet éolienne. Le vent

Abstract

The choice of a wind turbine for a given site is a very important operation. It is advisable to carry out an in-depth study of the characteristics of the wind turbine and the installation site before any installation of a windfarm in order to choose the system best suited to energy needs.

Our efforts have mainly been directed towards understanding the characteristics of the wind regime and determining the basic elements necessary for the sizing of the most suitable wind systems for the seven meteorological sites spread over the entire Algerian territory.

Keywords – wind turbine, Data analysis, Modeling, design of a wind turbine project. The wind

ملخص

يعد اختيار توربينات الرياح لموقع معين عملية مهمة للغاية. يُنصح بإجراء دراسة متعمقة لخصائص توربينات الرياح وموقع التثبيت قبل أي تركيب لمزرعة الرياح من أجل اختيار النظام الأنسب لاحتياجات الطاقة.

وجهت جهودنا بشكل أساسي نحو فهم خصائص نظام الرياح وتحديد العناصر الأساسية اللازمة لتحديد حجم أنظمة الرياح الأكثر ملاءمة لمواقع الأرصاد الجوية السبعة المنتشرة على كامل التراب الجزائري.

الكلمات المفتاحية - توربينات الرياح، تحليل البيانات، نمذجة، تصميم مشروع توربينات الرياح، الرياح.

Sommaire

Dédicaces	i
Dédicaces	ii
Remercîments	iii
Résumé	v
Sommaire	v
Liste des tableaux	ix
Liste des figures	x
Abréviations.....	xi
CHAPITRE1 Généralités sur les systèmes éoliens	
Introduction Générale	13
1.1.Introduction	14
1.2.Historique.....	15
1.3.Définition de l'énergie éolienne	16
1.4.Les différents types d'éoliennes.....	16
1.4.1.Les éoliennes à axe horizontal	17
1.4.2.Les éoliennes à axe vertical.....	18
1.5.Principe de fonctionnement.....	18
1.5.1.Eléments constitutifs d'un aérogénérateur (à axe horizontal)	19
1.5.2.Caractéristiques technologiques des éoliennes	20
1.5.3.Bilan des forces sur une pale	22
1.6.Puissance fournie par un aérogénérateur	23
1.6.1.Potentiel éolien disponible	23
1.6.2.Puissance moyenne récupérable.....	24
1.7.Régulation mécanique de la vitesse de l'éolienne	26
1.8.Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne	27
1.8.1.Avantages d'énergie éolienne	27
1.8.2.Inconvénients d'énergie éolienne	29
1.9.L'énergie éolienne dans le monde	30
1.10.L'énergie éolienne dans l'Algérie.....	30
1.11.Conclusion.....	30
Chapitre 2 Etudes de préfaisabilité	
2.1.Introduction	32
2.2.Le vent	32
2.3.L'origine de vent:	32
2.3.1.Force gravitationnelle.....	32

2.3.2.Force de pression.....	33
2.3.3.Force de Coriolis.....	33
2.3.4.Forces de frottement :	34
2.4.Causes principales du vent	34
2.4.1.Différance de température.....	34
2.4.2.Pression atmosphérique	34
2.5.Les variations du vent en fonction de l'attitude	34
2.6.Instruments pour mesure le vent :	35
2.6.1.Anémomètre	35
2.6.2.Manche à air (manche à vent)	36
2.7.Effets d'obstacles	36
2.8.Rugosité.....	37
2.9.Comment choisir une éolienne	37
2.10.Classification des éoliennes.....	38
2.10.1.Selon la puissance	38
2.10.2.Selon la surface balayée	38
2.10.3.Selon le type de fonctionnement.....	38
2.11.Les critères de choix d'un site éolien	38
2.11.1.Vitesse et régularité du vent	38
2.11.2.Météo et l'environnement	39
2.11.3.Proximité des lignes électriques :	39
2.11.4.Accessibilité.....	39
2.11.5.Conditions géographique	39
2.11.6.Technologie	39
2.11.7.Normes de bruits	39
2.11.8.Cout	39
2.12.Conclusion.....	39
Chapitre 3 Choix de sites éoliens	
3.1.Introduction	41
3.2.Mise en place d'un parc éolien	41
3.3.Evaluation du potentiel éolien	41
3.4.Etude de pré faisabilité	41
3.5.Etude d'impact :	41
3.5.1Adrar	42
3.5.2Oran.....	42
3.5.3Tiaret	42

3.5.4Djelfa	42
3.5.5Tébessa	43
3.6.Les études de sols.....	43
3.6.1Effet venturi	43
3.6.2.Effet tunnel.....	43
3.7.L'altitude.....	43
3.8.Effet des obstacles sur choix du site.....	44
3.8.1.Réduction de productivité éolienne.....	44
3.8.2.Augmentation des couts	44
3.8.3.Risque d'endommagement de l'éolienne.....	44
3.8.4.Impacts visuel	44
3.9.Estimation de l'énergie générer par une éolienne :	45
3.10.Estimation le bruits d'éolienne :	45
3.11.Les possibilités de raccordement électrique.....	47
3.12.Télesurveillance et maintenance d'un parc éolien.....	48
3.12.1.La télésurveillance	48
3.12.2.La maintenance.....	48
3.13.Sécurité de site	49
3.14.Risque d'incendie	49
3.15.Conclusion.....	49
Chapitre 4 Modélisation et simulation	
4.1.Introduction :	51
4.2.Analyse de données réelles du vent en Algérie.....	51
4.3.Distribution de Wei bull :	51
4.4.Évaluation du potentiel énergétique disponible.....	52
4.4.1.Puissance d'une éolienne.....	52
4.4.2.Puissance théorique de vent (disponible) contenu dans un cylindre de section S :	52
4.4.3.Théorèmes de BETZ :	53
4.4.4.Energie utilisable	53
4.4.5.Facteur de capacité.....	53
4.5.Choix des types éoliens.....	53
4.5.1.Eolienne H Darrieus 10kw.....	53
4.5.2.Éolienne savonius 48v 500w.....	55
4.5.3.EolienneFairWind F64-40	56
4.5.4.Éolienne domestique de petite échelle.....	57
4.6.Le cout d'éolienne.....	65

4.7.RESULTATS DE SIMULATION DES DONNEES	65
4.8.Discussion des résultats et la synthèse :.....	66
La synthèse	67
4.9.Conclusion:	67
Conclusion Générale	72

Liste des tableaux

Tableau 2. 1: Les coefficients de α	35
Tableau 2. 2: La longueur de rugosité.....	37
Tableau 3. 1: La longueur de rugosité.....	44
Tableau 3. 2: Les sociétés de distribution d'électricité.	47
Tableau 4. 1: fiche technique éolienne H Darrieus 10kw	55
Tableau 4. 2: fiche technique de éolienne savonieus 48v 500w	56
Tableau 4. 3: fiche technique d'éolienne fairwind f64-40.....	57
Tableau 4. 4: Résultats statistiques des données de vent et puissance disponible et puissance de betz et d'énergies disponible. D'Adrar	58
Tableau 4. 5: Résultats statistiques des données de vent et puissance disponible et puissance de betz et d'énergies disponible de Djelfa	59
Tableau 4. 6: Résultats statistiques des données de vent et puissance disponible et puissance de betz et d'énergies disponible de Hassi Rme.....	60
Tableau 4. 7: Résultats statistiques des données de vent et puissance disponible et puissance de betz et d'énergies disponible d'In Saleh	61
Tableau 4. 8: Résultats statistiques des données de vent et puissance disponible et puissance de betz et d'énergies disponible d'Oran.....	62
Tableau 4. 9: Résultats statistiques des données de vent et puissance disponible et puissance de betz et d'énergies disponible de Tébessa.	63
Tableau 4. 10: Résultats statistiques des données de vent et puissance disponible et puissance de betz et d'énergies disponible de Tiaret.....	64
Tableau 4. 11: Tableau présente le nombre et le facteur de puissance de chaque éolienne.....	65
Tableau 4. 12: le cout spécifique.....	65

Listes des figures

Figure 1. 1 Consommation d'énergie primaire dans le monde et prévisions [4].....	14
Figure 1. 2 Répartition d'énergie primaires dans le monde [5].....	15
Figure 1. 3 L'utilisation de l'énergie éolienne par l'homme est ancienne. Moulins dans la région de La Mancha, Espagne	15
Figure 1. 4 conversion de l'énergie cinétique du vent.....	16
Figure 1. 5 Diagramme de types d'éoliennes.....	16
FIGURE 1. 6 CONFIGURATION A AXE HORIZONTAL [7]	17
Figure 1. 7 Eolienne de type Darrieus et Savonius [7].....	18
Figure 1. 8 les composantes de l'aérogénérateur.	19
Figure 1. 9 forces appliquées sur un élément de pale [5]	22
Figure 1. 10 coefficient de puissance.	25
Figure 1. 11 coefficient de puissance en fonction de la vitesse normalisée λ pour différents types de turbines.	25
Figure 1. 12 diagramme de la puissance sur l'arbre en fonction de la vitesse du vent.	27
Figure 2. 1 force gravitationnelle la lune tourne autour de la terre, car elle attire par elle.	33
Figure 2. 2 effet de la force Coriolis sur la direction du vent.	33
Figure 2. 3 Circulation atmosphérique simplifiée.	34
Figure 2. 4 elle présente l'anémomètre.	35
Figure 2. 5 elle présente manche à air.	36
Figure 4. 1 éolienne H Darrieus 10 kw.	54
Figure 4. 2 éolienne savonius 48v 500w	59
Figure 4. 3 éolienne FairWind f64 40	60
Figure 4. 4 éolienne domestique	57
Figure 4. 5 présentation de l'énergie disponible en fonction de temps (Adrar)	58
Figure 4. 6 présentation de l'énergie disponible en fonction de temps (Djelfa).....	59
Figure 4. 7 présentation de l'énergie disponible en fonction de temps (hassi rmel)	60
Figure 4. 8 présentation de l'énergie disponible en fonction de temps (In saleh)	61
Figure 4. 9 présentation de l'énergie disponible en fonction de temps (oran).....	62
Figure 4. 10 présentation de l'énergie disponible en fonction de temps (Tébessa).....	63
Figure 4. 11 présentation de l'énergie disponible en fonction de temps (Tiaret)	64

Abréviations

$l(r)$: longueur de la corde à la distance r de l'axe de rotation

CL : coefficient de portance (sans dimension)

CD : coefficient de traînée (sans dimension)

Cz : coefficient de portance suivant le plan de rotation

Cx : coefficient de poussée

W : module du vent apparent.

α : l'angle d'incidence

V_h : vitesse du vent à hauteur de mesure (m/s)

V₁₀ : vitesse du vent à $h=10$ m en (m/s)

H : hauteur de mesure en (m)

IEC : International Eléctrotechnical Commission

HAWT : Horizontal Axis Wind Turbine

VAWT : Vertical Axis Wind Turbine

N : nombre d'heures par années

P(vi) : puissance effective a une vitesse (vi)

F(vi) : la probabilité aune vitesse (vi)

Lat : niveau de puissance acoustique pondéré de la source sonore.

$D_c = D_\Omega$: correction pour tenir compte de la directivité de la source (sans directivité on prend 0 dB) et de la réflexion sur le sol

H_s : hauteur de la source au-dessus du sol (hauteur du moyeu)

H_r : hauteur du point d'impact sonore

D_p : distance entre source sonore et point d'impact

A : est l'atténuation lors de la propagation du bruit entre la source

A_{div} : atténuation due à la propagation spatiale

D : distance entre source et point d'impact (m)

A_{atm} : atténuation par absorption atmosphérique.

α : coefficient d'absorption de l'air = 1,9 db /km dans les conditions les plus favorables de propagation du son (température de 10° et himidité atmosphérique relative de 70%

A sol : atténuation du sol.

Hm : hauteur moyenne (m) du trajet du son au-dessus du sol.

F : aire totale après intégration des sous aires calculées à chaque pas (m²).

D : distance comprise entre la source et le point d'impact sonore (m).

A écran : atténuation causée par absorption (barrière antibruit).

A divers : atténuation divers.

C met : correction météorologique.

Vi : est la vitesse du vent classé.

F(v) : est la fréquence d'occurrence.

N : est le nombre d'observations.

M: masse volumique d'air.

V: vitesse de vent.

E c: énergie cinétique.

ρ :La masse volumique de l'air (environ de 1,23kg/m³ à 15°C et à pression atmosphérique 1,0312 bar).

Wei bull : La distribution Wei bull est l'une des distributions de durée de vie les plus largement utilisées dans l'ingénierie de la fiabilité.

C_{wt}: le cout d'éolienne.

C_{spe}: le cout spécifique

Introduction générale

La consommation énergétique mondiale évolue rapidement dans toutes les régions du monde. Cette évolution va continuer à cause de l'augmentation de la population mondiale. Les sources d'énergies existantes n'arrivent plus à satisfaire la demande et de plus elles diminuent de jour en jour. Ainsi, les énergies renouvelables sont celles qui vont s'imposer bientôt à cause de la facilité de leurs exploitations [1].

Elles sont devenues une forme d'énergie indispensable par leur souplesse, La simplicité d'utilisation et la multiplicité des domaines d'activités où elles sont appelées à jouer un rôle [2].

Ces modes de production ainsi que les moyens de distribution associés sont influencés par plusieurs paramètres tels que : la pression atmosphérique, l'humidité relative, la température, la vitesse du vent [3].

La maîtrise de ces énergies devient une nécessité. Ceci amène beaucoup de chercheurs à réfléchir sur l'amélioration de ces énergies renouvelables.

La maîtrise de ces énergies devient une nécessité. Ceci amène beaucoup de chercheurs à réfléchir sur l'amélioration de ces énergies renouvelables.

L'une d'elles est l'énergie éolienne qui utilise la force du vent. Le vent est un phénomène aérodynamique par nature très complexe. Par suite de la variabilité des très nombreux paramètres qui le gouvernent, sa vitesse horizontale instantanée présente un caractère spatio-temporel fluctuant qui justifie des considérations spectrales. Une approche simple qui est valable pour les zones climatiques sahariennes.

Le premier chapitre comprendra des généralités les éoliennes. Nous présenterons la machine, ses différents composants et ses caractéristiques, les types d'éoliennes.

Dans le second chapitre nous présentons l'étude de préfaisabilité. L'origine du vent, les différents modèles utilisés pour mesurer la vitesse du vent, pour l'estimation de la production énergétique d'une éolienne.

Dans le troisième chapitre nous présentons le choix de sites éoliens, et en quatrième chapitre comprend la présentation de programme Matlab avec lequel la majeure partie de notre travail est effectuée, les différents résultats obtenus dans l'étude du gisement éolien d'Algérie. Le potentiel éolien en termes de vitesse.

Enfin on termine par une conclusion, où les principaux résultats obtenus sont mentionnés.

CHAPITRE1

Généralités sur les systèmes éoliens.

1.1. Introduction

Dans le cadre du développement durable, face au double enjeu planétaire posé par l'épuisement prochain des ressources énergétiques fossiles et les problèmes posés vis à vis du respect de l'environnement, de fortes incitations poussent au développement des énergies renouvelables. La filière d'énergie renouvelable est partagée en trois grandes familles : l'énergie d'origine mécanique (la houle, éolien), l'énergie électrique (panneaux photovoltaïques) ou l'énergie sous forme de chaleur (géothermie, solaire thermique,) en sachant qu'à l'origine de toutes ces énergies est l'énergie en provenance du Soleil transformée ensuite par l'environnement terrestre. En effet, la consommation mondiale d'énergie (*Fig. 1-1*) ne cesse de croître, posant des questions cruciales sur l'effet de serre et l'amenuisement des ressources énergétiques.

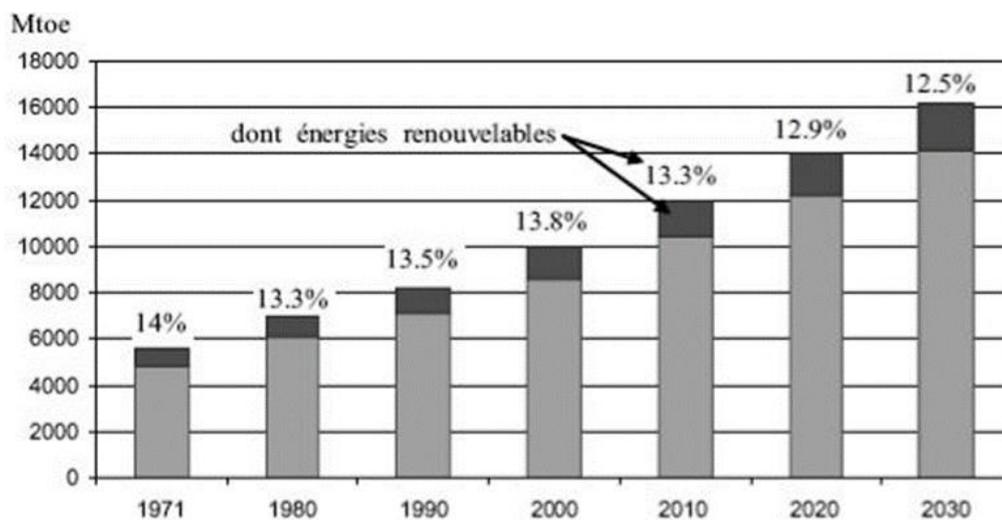


Figure 1.1 Consommation d'énergie primaire dans le monde et prévisions [4].

Plus de 85% de l'énergie produite est obtenue à partir de matières fossiles (charbon, pétrole, gaz) ou fissiles pour l'énergie nucléaire. (Fig.1.2) montre la répartition en termes d'énergie primaire dans le monde pour toutes les ressources actuelles. Ces Energie renouvelable, pratiquement inépuisables et propres, sont intéressantes dans le contexte économique actuel où l'on ne chiffre qu'une partie des coûts en occultant certains « coûts collatéraux » (démantèlement de centrales, pollution), et ainsi de l'utiliser sans présence de vent, ce type d'installation ne concernant que des besoins domestiques, non appliqués à l'industrie.

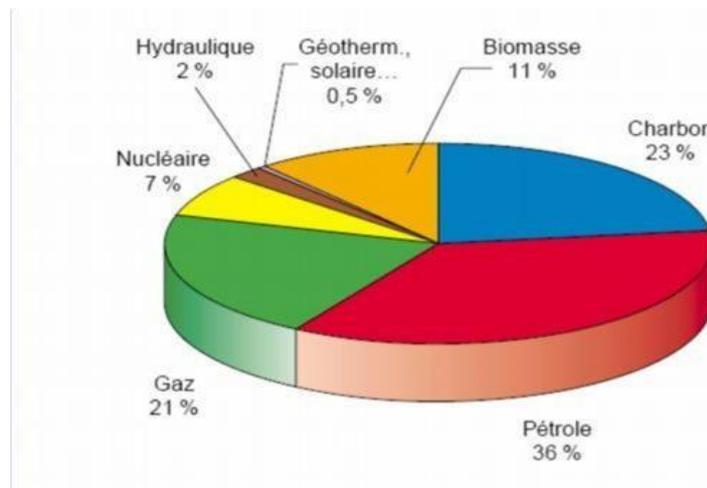


Figure 1. 2 Répartition d'énergie primaires dans le monde [5].

1.2. Historique



Figure 1. 3 L'utilisation de l'énergie éolienne par l'homme est ancienne. Moulins dans la région de La Mancha, Espagne

Pendant des siècles, l'énergie éolienne a été utilisée pour fournir un travail mécanique. L'exemple le plus connu est le moulin à vent utilisé par le meunier pour transformer le blé en farine, on peut aussi citer les nombreux moulins à vent servant à l'assèchement des polders en Hollande.

Par la suite, pendant plusieurs décennies, l'énergie éolienne a servi à produire de l'énergie électrique dans des endroits reculés et donc non-connectés à un réseau électrique. Des installations sans stockage d'énergie impliquaient que le besoin en énergie et la présence d'énergie éolienne soient simultanés. La maîtrise du stockage d'énergie par batteries a permis de stocker cette énergie

Depuis les années 1990, l'amélioration technologique des éoliennes a permis de construire des aérogénérateurs de plus de 5 MW et le développement d'éoliennes de 10 MW est

en cours. Ces unités se sont démocratisées et on en retrouve aujourd'hui dans plusieurs pays. Ces éoliennes servent aujourd'hui à produire du courant alternatif pour les réseaux électriques, au même titre qu'un réacteur nucléaire, un barrage hydro-électrique ou une centrale thermique au charbon. Cependant, les puissances générées et les impacts sur l'environnement ne sont pas les mêmes [6].

1.3. Définition de l'énergie éolienne

L'éolienne est un dispositif destiné à convertir l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, elles sont généralement utilisées pour produire de l'électricité et entre dans la catégorie des énergies renouvelables.

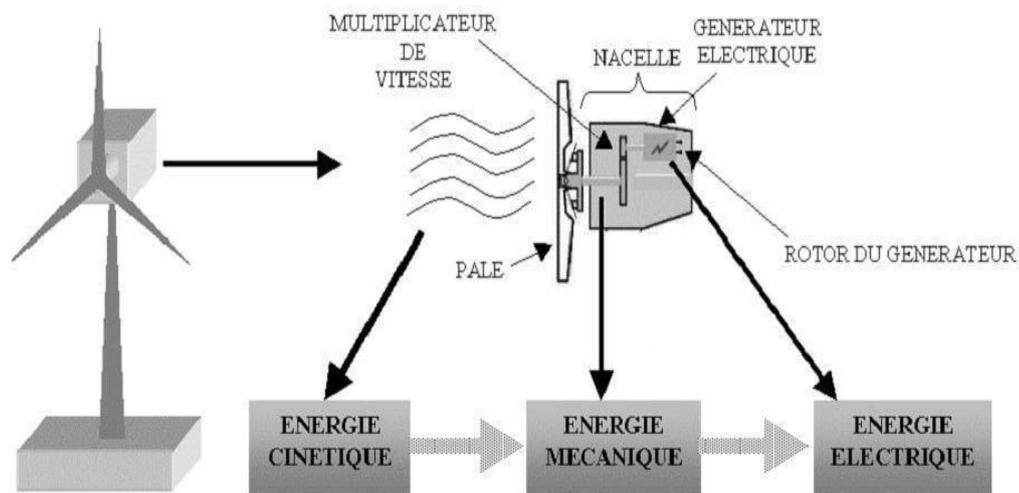


Figure 1. 4 conversion de l'énergie cinétique du vent

1.4. Les différents types d'éoliennes

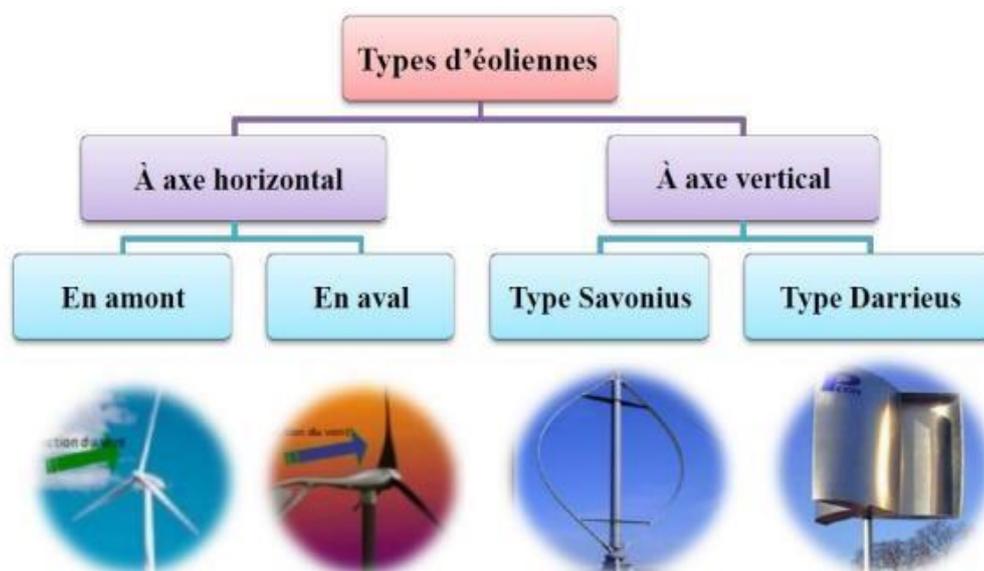


Figure 1. 5 Diagramme de types d'éoliennes

Dans la technologie concernant les dispositifs de conversion d'énergie éolienne, Il existe deux grandes catégories d'éoliennes : les éoliennes à axe vertical et les éoliennes à axe horizontal. Les éoliennes à axe horizontal sont les plus répandues dans l'éolienne de grande puissance. L'éolienne à axe vertical est plus récente, mais ce type de turbines connaît un développement accéléré, surtout pour des petites ou moyennes puissances adaptées à des applications urbaines ou domestique[7].

1.4.1 Les éoliennes à axe horizontal

Ce sont les machines les plus répandues actuellement du fait de :

- Leur rendement est supérieur à celui de toutes les autres machines. Elles sont appelées éoliennes à axe horizontal car l'axe de rotation du rotor est horizontal, parallèle à la direction de vent. Elles comportent généralement des hélices à deux ou trois pales, ou des hélices multi-pales pour le pompage de l'eau. -Elles ont un rendement élevé.
- Les éoliennes à axe horizontal (ou à hélice) sont de conception simple. Sur base la du nombre de pales que compte l'hélice, on peut distinguer deux groupes :

➤ Les éoliennes à rotation lente "multi-pales"

Elles sont, depuis longtemps, relativement répandues dans les campagnes, et servent quasi exclusivement au pompage de l'eau.

➤ Aérogénérateurs

Les éoliennes à rotation rapide, bi- ou tripales en général, constituent actuellement la catégorie des éoliennes en vogue, et sont essentiellement affectées à la production d'électricité, d'où leur nom le plus courant "**d'aérogénérateurs**".

Parmi les machines à axe horizontal parallèle à la direction du vent, il faut encore différencier l'aérogénérateur dont l'hélice est en amont de machine par rapport au vent « *hélice au vent* » et celle dont l'hélice est en aval de

Par rapport au vent « *hélice sous le vent* »

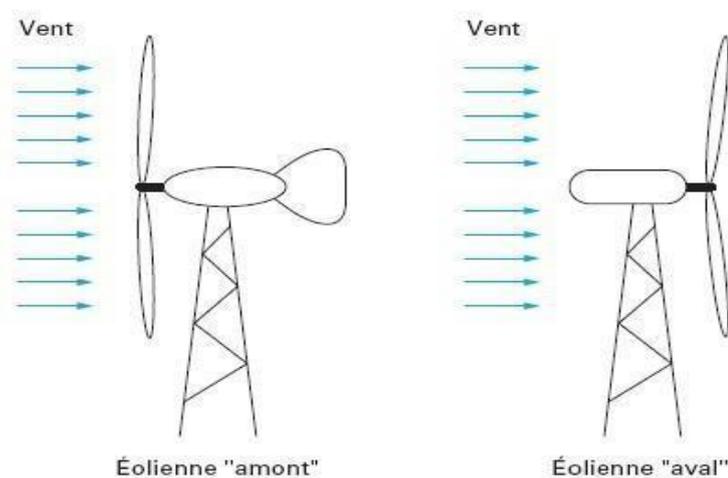


FIGURE 1. 6 CONFIGURATION A AXE HORIZONTAL [7]

1.4.2 Les éoliennes à axe vertical

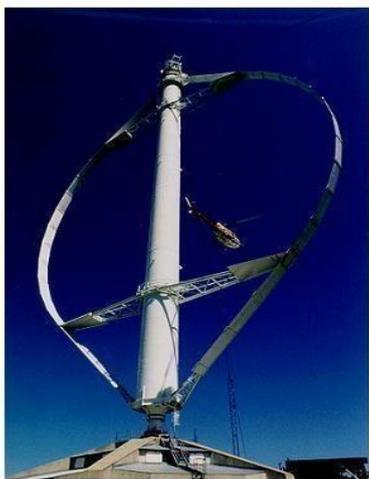
Pour ces capteurs, l'axe de rotation est vertical et perpendiculaire à la direction du vent, et sont les premières structures développées pour produire de l'électricité. Elles possèdent l'avantage d'avoir les organes de commande et le générateur au niveau du sol, donc elles sont facilement accessibles. Elles sont adaptées à tous les vents et ne nécessitent pas de dispositif d'orientation. Deux d'entre elles sont particulièrement remarquables : Savonius et Darrieus.

L'éolienne Savonius comporte principalement deux demi cylindres dont les axes sont décalés l'un par rapport à l'autre. Comme les machines à aubes, elle utilise essentiellement la traînée pour tourner.

Cette machine présente deux avantages :

- Elle est simple à fabriquer
- le démarre avec des vitesses de vent de l'ordre de 2 m/s.

L'éolienne inventée par le Français Darrieus est un rotor dont la forme la plus courante rappelle vaguement un fouet à battre les œufs. Cette machine est bien adaptée à la fourniture d'électricité. Malheureusement, elle ne peut pas démarrer seule. Ce type de machine, qui peut offrir les puissances les plus fortes n'a pas connu le développement technologique qu'il méritait à cause de la fragilité du mécanisme encore mal maîtrisée. Toutefois, cela devrait pouvoir être résolu si des efforts supplémentaires étaient faits dans la recherche sur ce sujet[7].



Éolienne de type Darrieus.



Éolienne de type Savonius.

Figure 1. 7 Eolienne de type Darrieus et Savonius [7]

1.5. Principe de fonctionnement

Les éoliennes permettent de convertir l'énergie du vent en énergie électrique. Cette conversion se fait en deux étapes :

- ❖ Au niveau de la turbine (rotor), qui extrait une partie de l'énergie cinétique du vent disponible pour la convertir en énergie mécanique, en utilisant des profils aérodynamiques. Le flux d'air crée autour du profil une poussée qui entraîne le rotor et une traînée qui constitue une force parasite.
- ❖ Au niveau de la génératrice, qui reçoit l'énergie mécanique et la convertit en énergie électrique, transmise ensuite au réseau électrique[8].

1.5.1 Eléments constitutifs d'un aérogénérateur (à axe horizontal)

L'aérogénérateur utilise l'énergie cinétique du vent pour entraîner l'arbre de son rotor : cette énergie cinétique est convertie en énergie mécanique qui est elle-même transformée en énergie électrique par une génératrice électromagnétique solidaire au rotor. L'électricité peut être envoyée dans le réseau de distribution, stockée dans des accumulateurs ou utilisée par décharges isolées[9].

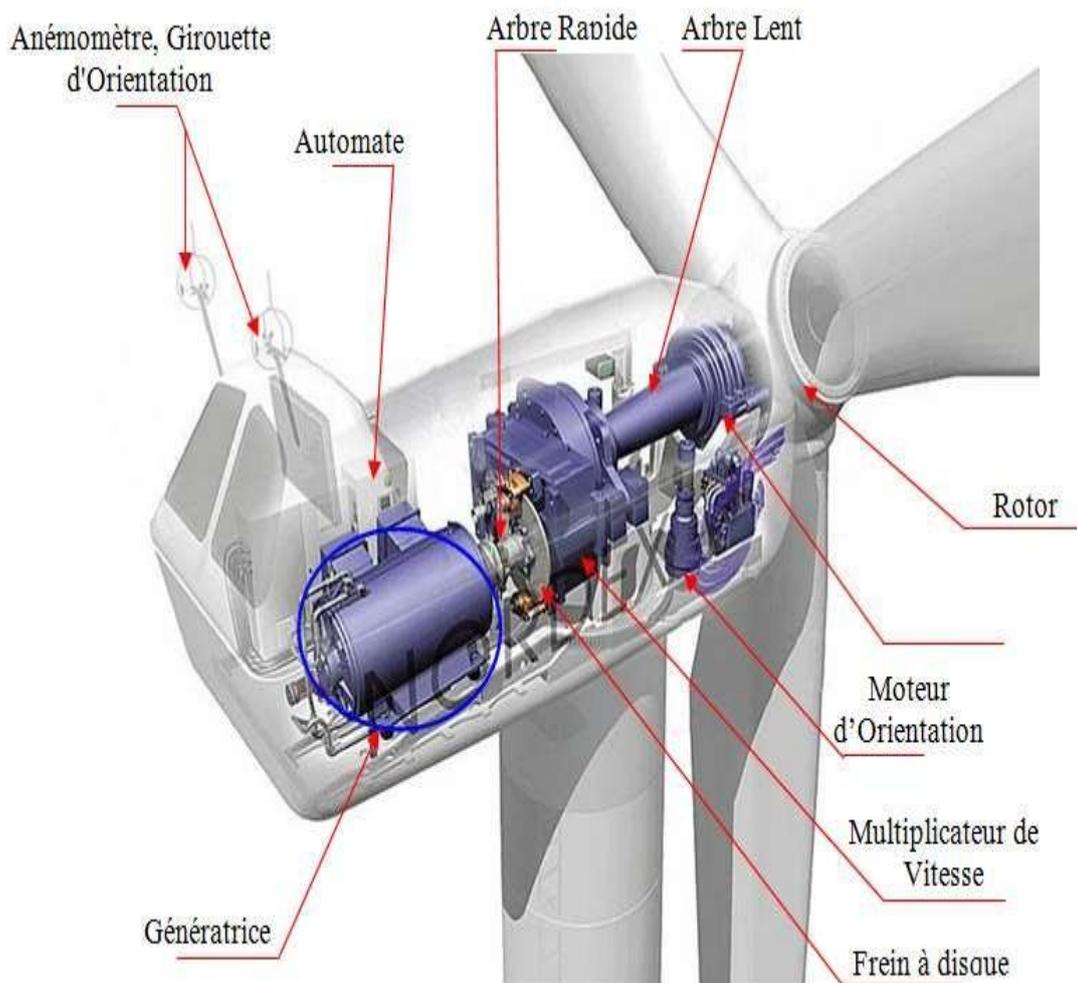


Figure 1. 8 les composantes de l'aérogénérateur.

1. **Les pales** : sont les capteurs de l'énergie cinétique qui transmettent l'énergie au rotor

2. **Le moyeu** : il est pourvu d'un système qui permet d'orienter les pales pour réguler la vitesse de rotation.
3. **L'arbre primaire** (ou arbre lent) : relie les pales au multiplicateur.
4. **Le multiplicateur** : il permet de réduire le couple et d'augmenter la vitesse. C'est l'intermédiaire entre l'arbre primaire et l'arbre secondaire.
5. **L'arbre secondaire** : il amène l'énergie mécanique à la génératrice. Il est équipé d'un frein à disque mécanique qui limite la vitesse de l'arbre en cas de vents violents.
6. **Le générateur électrique** : il assure la production électrique. Sa puissance peut atteindre jusqu'à 5 MW. Il peut-être une dynamo (produit du courant continu) ou un alternateur (produit du courant alternatif). L'alternateur est le plus utilisé pour des raisons de coût et de rendement.
7. **Le mât** : c'est un tube en acier, pilier de toute l'infrastructure. Sa hauteur est importante : plus elle augmente, plus la vitesse du vent augmente mais en même temps le coût de la structure augmente. En général, le mat a une taille légèrement supérieure au diamètre des pales.
8. **Le système d'orientation de la nacelle** : c'est une couronne dentée équipée d'un moteur qui permet d'orienter l'éolienne et de la verrouiller dans l'axe du vent grâce à un frein.
9. **Le système de refroidissement** : il est à air, à eau ou à huile et destiné au multiplicateur et à la génératrice.
10. **Les outils de mesure du vent** : girouette pour la direction et anémomètres pour la vitesse. Les données sont transmises à l'informatique de commande.
11. **Le système de contrôle électronique** : il gère le fonctionnement général de l'éolienne et de son mécanisme d'orientation.
12. Au pied du mât se trouve un **transformateur**.

1.5.2 Caractéristiques technologiques des éoliennes

1 Le supportage

Les pylônes peuvent être réalisés en acier ou en béton armé. Ils peuvent être autoporteurs et auto résistants ou haubanés. Si l'haubanage permet de réduire les dimensions du mât, par contre il pénalise l'emprise au sol. Pour limiter l'occupation au sol, le supportage de plusieurs

éoliennes par une seule structure est envisagé ; dans ce cas, les pylônes constitués de structures métalliques en treillis sont intéressants. Actuellement les mats en caisson, souvent en acier et fortement ancrés au sol, sont très répandus pour les éoliennes de forte puissance [10].

2- Les pales

Les pales sont une partie très importante des éoliennes. De leur nature dépendront le bon fonctionnement et la durée de vie de la machine ainsi que le rendement du moteur éolien. Plusieurs éléments caractérisent ces pales :

- La longueur
- La largeur
- Le profil
- Les matériaux
- Le nombre

Parmi ces éléments, certains sont déterminés par les hypothèses de calcul, puissance et couple et d'autres sont choisis en fonction de critères tel que : coûts, résistance au climat [11].

Longueur

Le diamètre de l'hélice est fonction de la puissance désirée. La détermination de ce diamètre fixe aussi la fréquence de rotation maximum, que l'hélice ne devra pas dépasser pour limiter les contraintes en bout de pales dues à la force centrifuge. Il est essentiel de prendre en compte le travail en fatigue des pales et les risques de vibrations, surtout pour les très longues pales.

Largeur

La largeur des pales intervient pour le couple de démarrage qui sera d'autant meilleur que la pale sera plus large. Mais pour obtenir des vitesses de rotation élevées, on préférera des pales fines et légères. Le résultat sera donc un compromis.

Le profil

Il est choisi en fonction du couple désiré. Pour la plupart des aérogénérateurs de moyenne et de faible puissance, les pales ne sont pas vrillées. Par contre, pour la plupart des machines de grande puissance (≥ 100 kW), elles le sont, c'est-à-dire qu'elles prennent la forme d'une hélice.

Les caractéristiques des différents profils sont déterminées en soufflerie. Ils ont en général été étudiés pour l'aviation (ailes ou hélices).

Les matériaux

Les matériaux utilisés pour la réalisation des pales sont variés et ont bénéficié de nombreux progrès, particulièrement ceux dus aux pales d'hélicoptère.

Contrairement à ce que l'on croit fréquemment, ce n'est pas dans le domaine de l'aérodynamique que réside la difficulté mais bien dans celui de la construction et de la résistance des matériaux.

En effet, c'est dans le mode de réalisation des pales qu'il y a le plus à faire pour augmenter la sécurité de marche.

Les matériaux utilisés pour la réalisation des pales sont donc essentiels et doivent répondre à plusieurs exigences : ils doivent être assez légers, résistants à la fatigue mécanique, à l'érosion et à la corrosion, et de mise en œuvre ou d'usinage simple.

On rencontre plusieurs types de matériaux :

Le bois

Il est simple, léger, facile à travailler et il résiste bien à la fatigue mais il est sensible à l'érosion, peut se déformer et est réservé pour des pales assez petites.

Le lamellé-collé

C'est un matériau composite constitué d'un empilement de lamelles de bois collées ensemble. Il est possible de réaliser des pales jusqu'à 5 à 6 m de longueur ayant une bonne tenue en fatigue.

Les alliages d'aluminium

Pour des pales allant principalement jusqu'à 20 m de longueur. - **les Matériaux composite**

leur intérêt est de permettre la réalisation de toutes les formes et dimensions, ainsi que d'obtenir les caractéristiques mécaniques exactes recherchées : Pale vrillée, corde évolutive,

1.5.3 Bilan des forces sur une pale

L'action du vent relatif sur un profil aérodynamique engendre sur la section de pale de largeur D_r et de longueur de corde l une distance r de l'axe de rotation une force résultante F dont le changement de profil.

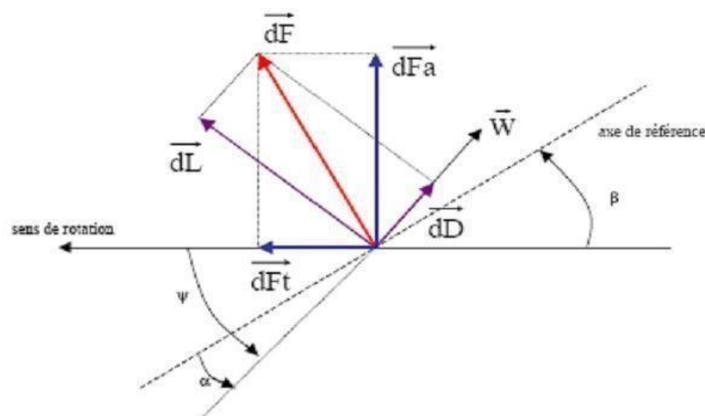


Figure 1. 9 forces appliquées sur un élément de pale [5]

On peut décomposer la force résultante Fd de la manière suivante :

❖ la portance dL , normale à la direction du vent apparent. □

La force de dD , parallèle à la direction du vent. On peut aussi la décomposer d'une autre manière

La pousse axiale dFa , perpendiculaire au plan de rotation. La pousse tangentielle dFt , dans la direction de rotation

Les modules des forces dD , dL s'expriment en fonction de deux coefficients, le coefficient de portance CL et le coefficient de traînée CD .

$$\text{La force de portance: } L = \frac{1}{2} \rho W^2 dA CL \quad (1)$$

$$\text{La force de traînée: } D = \frac{1}{2} \rho W^2 dA CD \quad (2)$$

$$\text{La poussée axial: } Ft = \frac{1}{2} CZ \rho W^2 S \quad (3)$$

$$\text{La poussée de rotation: } Fa = \frac{1}{2} CX \rho W^2 S \quad (4)$$

Avec $dA = l(r) \cdot dr$. surface du tronçon de pale $l(r)$: longueur de la corde à la distance r de l'axe de rotation

CL : coefficient de portance (sans dimension)

CD : coefficient de traînée (sans dimension)

Cz : coefficient de portance suivant le plan de rotation

Cx : coefficient de poussée

W : module du vent apparent.

Ces coefficients CL et CD dépendent du profil de la pale et de l'angle d'incidence α .

Dans l'analyse du fonctionnement des turbines éoliennes on utilise le diagramme du rapport Cx/Cz en fonction de l'angle d'incidence α . Ce rapport reflète le rendement de conversion de l'énergie éolienne.

1.6. Puissance fournie par un aérogénérateur

1.6.1 Potentiel éolien disponible

L'énergie cinétique d'une masse d'air m qui se déplace avec la vitesse V , est :

$$Ec = \frac{1}{2} m V^2 \quad (5)$$

Si cette énergie pouvait être complètement récupérée à l'aide d'un dispositif ayant la surface A ($A = \pi R^2$), situé perpendiculairement à la direction de la vitesse du vent, Le potentiel éolien moyen disponible sur un site est donnée par:

$$P_{disp} = \frac{1}{2} \rho A V^3 \quad (6)$$

Avec

$$m = \rho S V$$

ρ : densité d'air.

1.6.2 Puissance moyenne récupérable

En réalité, le dispositif de conversion (turbine éolienne) extrait une puissance Préc inférieure à la puissance disponible Pdisp.

Considérons le système éolien à axe horizontal représenté sur la Figure (I.10) sur lequel on a représenté la vitesse du vent V_1 en amont de l'aérogénérateur et la vitesse V_2 en aval. En supposant que la vitesse du vent traversant le rotor est égale à la moyenne entre la vitesse du vent non perturbé à l'avant de l'éolienne V_1 et la vitesse du vent après passage à travers le rotor V_2 . Soit $(V_1+V_2)/2$ est la masse d'air en mouvement de densité ρ traversant la surface S des pales en une seconde est : [9]

$$m = \frac{\rho S(V_1+V_2)}{2} \quad (7)$$

La puissance P_m alors extraite s'exprime par la moitié du produit de la masse et de la diminution de la vitesse du vent (seconde loi de Newton) :

$$P_m = \frac{m(V_1^2 - V_2^2)}{2} \quad (8)$$

Soit en remplaçant m par son expression dans (1-8)

$$P_m = \frac{\rho S(V_1+V_2)(V_1^2 - V_2^2)}{4} \quad (9)$$

Un vent théoriquement non perturbé traverserait cette même surface S sans diminution de vitesse, soit à la vitesse V_1 , la puissance P_{mt} correspondante serait alors :

$$P_{mt} = \frac{\rho S V_1^3}{2} \quad (10)$$

Le ratio entre la puissance extraite du vent et la puissance totale théoriquement disponible est alors :

$$\frac{P_m}{P_{mt}} = \frac{(1 + \frac{V_1}{V_2})(1 - (\frac{V_1}{V_2})^2)}{2} \quad (11)$$

Si on représente la caractéristique correspondante à l'équation ci-dessus (Figure 1.11), on s'aperçoit que le ratio P_m/P_{mt} appelé aussi coefficient C_p présente un maxima de $16/27$ soit 0.59.

C'est cette limite théorique appelée limite de Betz qui fixe la puissance maximale extractible pour une vitesse de vent donnée.

$$P_{\text{rec}} = \frac{1}{2} C_p \rho A V^3 \quad (12)$$

En prend en considération la limite de Betz et en remplaçant la densité de l'air par sa valeur moyenne, la moyenne maximale récupérable par unité de surface est donnée par[13]

$$P_{\text{rec}} = 0.37 V^3 \quad (13)$$

Cette limite n'est en réalité jamais atteinte et chaque éolienne est définie par son propre coefficient de puissance exprimé en fonction de la vitesse relative λ représentant le rapport entre la vitesse de l'extrémité des pales de l'éolienne et la vitesse du vent

$$\lambda = \frac{R\Omega}{V} \quad (14)$$

Ω : Vitesse angulaire du rotor de l'éolienne

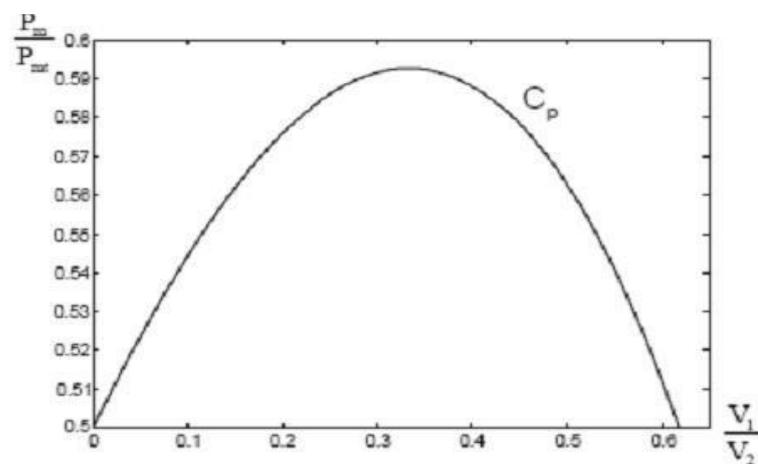


Figure 1. 10 coefficient de puissance.

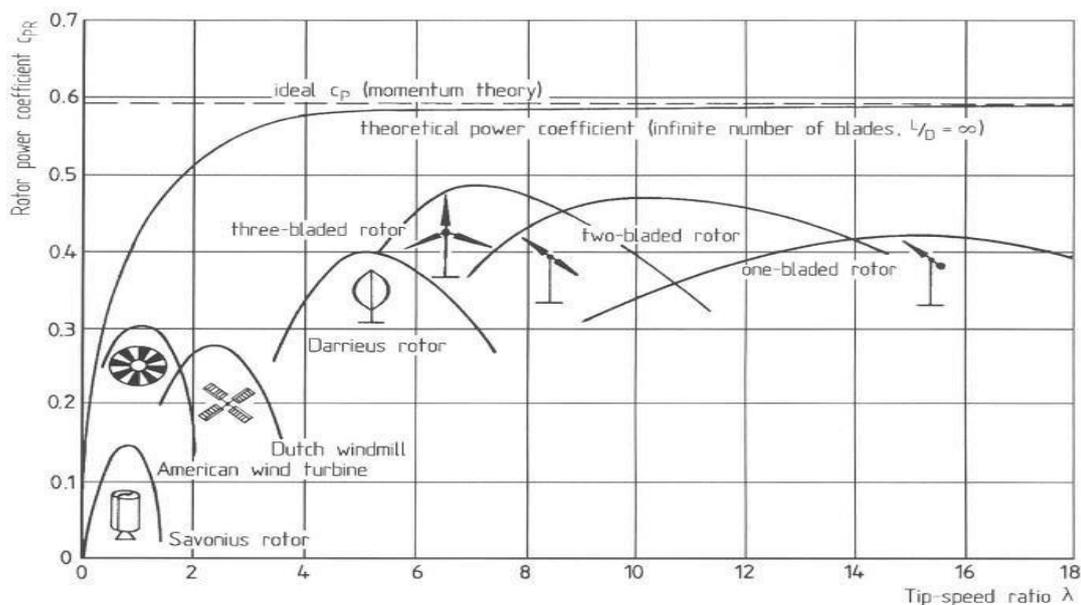


Figure 1. 11 coefficient de puissance en fonction de la vitesse normalisée λ pour différents types de turbines.

Des courbes typiques pour différents aérogénérateurs sont pressentes sur la figure (1.12). En générale dans un premier temps, le coefficient de puissance augmente avec la vitesse normalisée, atteignant un maximum pour une certaine valeur de λ puis diminue même avec l'augmentation de la vitesse normalisée.

Ces variations de $C_p(\lambda)$, dépendant de plusieurs propriétés aérodynamiques, mais essentiellement de plusieurs éléments dans la conception du rotor, notamment, dans le nombre de pales utilisées.

Nous définissons le couple sur l'arbre T de la manière suivante.

$$T = \frac{P}{\Omega} = \frac{1}{2} \frac{C_p}{\lambda} \rho \pi R^3 V^2 \quad (15)$$

Le coefficient de couple CT relié au coefficient de puissance par la relation suivant :

$$C_T(\lambda) = \lambda C_p(\lambda) \quad (16)$$

Le coefficient CT est, comme le coefficient C_p , fonction de la vitesse du vent et de la vitesse angulaire du rotor de l'éolienne Ω [14].

1.7. Régulation mécanique de la vitesse de l'éolienne

Une turbine éolienne est dimensionnée pour développer une puissance nominale P_n à partir d'une vitesse de vent nominale V_n . Pour des vitesses de vents supérieures à V_n , la turbine éolienne doit modifier ses paramètres aérodynamiques afin d'éviter les surcharges mécaniques (turbines, mat et structure), de sorte que sa vitesse de rotation reste constante.

D'après l'équation (10), on peut voir que la puissance produite est indéfiniment croissante en fonction de la vitesse du vent, ce qui n'est pas le cas dans la réalité. Les dispositifs de sécurité de la machine éolienne font en sorte à avoir l'expression de la puissance répartie sur différentes gammes de vitesses du vent. Où :

V_d : est la vitesse de démarrage, à partir de laquelle l'éolien commence à fournir de l'énergie

V_n : la vitesse nominale,

V_m : la vitesse d'arrêt de la machine pour laquelle la turbine ne convertit plus l'énergie éolienne, pour les raisons de sureté de fonctionnement.

Les vitesses V_n , V_d et V_m définissent quatre zones sur le diagramme de la puissance utile en fonction de la vitesse du vent [15]

- **Zone 1** : où $P = 0$ (la turbine ne fonctionne pas).
- **Zone 2** : dans laquelle la puissance fournie sur l'arbre dépend de la vitesse du vent V_d
- **Zone 3** : où généralement la vitesse de rotation est maintenue constante par un dispositif de régulation et où la puissance P turbine fournie reste sensiblement égale à P_n .
- **La zone 4** : dans laquelle le système de sûreté du fonctionnement arrête la rotation et le

transfert de l'énergie.

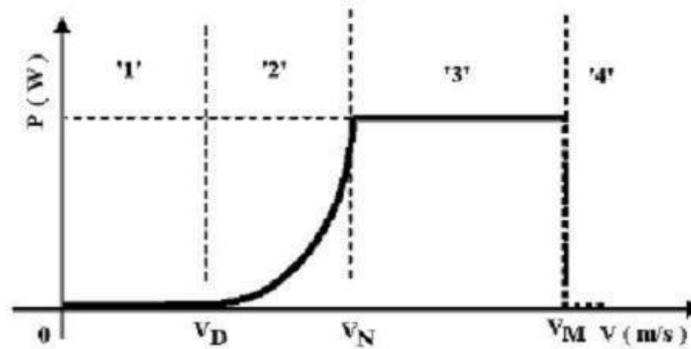


Figure 1.12 diagramme de la puissance sur l'arbre en fonction de la vitesse du vent.

La plupart des grandes turbines éoliennes utilisent deux principes de contrôle aérodynamique pour limiter la puissance extraite à la valeur de la puissance nominale de la génératrice :

Système « pitch » ou « à pas ou calage variable » qui permet d'ajuster la portance des pales à la vitesse du vent, principalement pour maintenir une puissance sensiblement constante dans la zone 3 de vitesses.

Système « stall » ou à « décrochage aérodynamique », le plus robuste car c'est la forme des pales qui conduit à une perte de portance au-delà d'une certaine vitesse de vent, mais la courbe de puissance maximale n'est pas plate et chute plus vite. Il s'agit donc d'une solution passive et robuste (pas besoin de système d'orientation des pales).

D'autres systèmes de régulation, dans les petites éoliennes notamment, sont exploités :

- Basculement (relèvement) de l'axe, normalement horizontal
- Pas variable par la pression du vent (modèle Air Wind : les pales en fibre, se déforment et provoquent un décrochage).
- Déviation par rapport à l'axe du vent. La dérive se trouve légèrement décalée par rapport à l'axe de rotation vertical (qui permet normalement à la turbine d'être face au vent) et crée une force de déviation qui régule la puissance aérodynamique (la turbine reçoit un vent de travers) [14].

1.8. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne

La croissance de l'énergie éolienne est évidemment liée aux avantages de l'utilisation de ce type d'énergie. Cette source d'énergie a également des désavantages qu'il faut étudier, afin que ceux-ci ne deviennent pas un frein à son développement.

1.8.1 Avantages d'énergie éolienne

L'énergie éolienne, propre, fiable, économique [16], et écologique, c'est une énergie qui respecte l'environnement [17].

- Bien que ne pouvoir envisager de remplacer totalement les sources traditionnelles d'énergie, l'énergie éolienne peut toutefois proposer une alternative intéressante et renouvelable. Elle s'inscrit parfaitement dans l'effort global de réductions des émissions de CO₂, ...etc. [18].
- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable propre, gratuit, et inépuisable [19].
- Chaque mégawatheure d'électricité produit par l'énergie éolienne aide à réduire de 0,8 à 0,9 tonne les émissions de CO₂ rejetées chaque année par la production d'électricité d'origine thermique [18].
- Parmi toutes les sources de production d'électricité, celle d'origine éolienne subit de très loin le plus fort taux de croissance [20].
- L'énergie éolienne n'est pas non plus une énergie à risque comme l'énergie nucléaire et ne produit pas de déchets toxiques ou radioactifs [21].
- L'exploitation de l'énergie éolienne n'est pas un procédé continu puisque les éoliennes en fonctionnement peuvent facilement être arrêtées, contrairement aux procédés continus de la plupart des centrales thermiques et des centrales nucléaires. Ceux-ci fournissent de l'énergie même lorsque que l'on n'en a pas besoin, entraînant ainsi d'importantes pertes et par conséquent un mauvais rendement énergétique [20].
- Les parcs éoliens se démontent très facilement et ne laissent pas de trace [4].
- C'est une source d'énergie locale qui répond aux besoins locaux en énergie. Ainsi les pertes en lignes dues aux longs transports d'énergie sont moindres. Cette source d'énergie peut de plus stimuler l'économie locale, notamment dans les zones rurales [4].
- La durée de vie des éoliennes modernes est maintenant de 20 à 25 ans, ce qui est comparable à de nombreuses autres technologies de production d'énergie conventionnelles [22].
- C'est l'énergie la moins chère entre les énergies renouvelables [23], selon l'article [24] le coût de l'éolienne à diminuer presque 90% depuis le début des années 80. Le coût de L'énergie éolienne continue de diminuer grâce aux percées technologiques, à l'accroissement du niveau de production et à l'utilisation de grandes turbines [22].
- Cette source d'énergie est également très intéressante pour les pays en voie de développement. Elle répond au besoin urgent d'énergie qu'ont ces pays pour se développer. L'installation d'un parc ou d'une turbine éolienne est relativement simple. Le coût d'investissement nécessaire est faible par rapport à des énergies plus traditionnelles, ce type d'énergie est facilement intégré dans un système électrique existant déjà [21].

- L'énergie éolienne se révèle une excellente ressource d'appoint d'autres énergies, notamment durant les pics de consommation, en hiver par exemple [4].

1.8.2 Inconvénients d'énergie éolienne

Même s'ils ne sont pas nombreux, l'éolien a quelques désavantages :

- L'impact visuel : Ça reste néanmoins un thème subjectif [21]. Des images de synthèse sont élaborées pour montrer l'impact visuel. Dans la plus grande majorité des cas, les enquêtes réalisées montrent une réelle acceptation des populations voisines ou visitant un site éolien [18].
- Les bruits mécaniques ou aérodynamiques ont été réduits par l'utilisation de nouveaux profils [21], extrémités de pale, mécanismes de transmission etc. et ne sont plus une gêne, même proche des machines (50-60 dB équivalent à une conversation). Une distance d'environ huit fois le diamètre permet de ne plus distinguer aucun bruit lié à cette activité (< 40 dB). De plus, il faut souligner que le bruit naturel du vent, pour des vitesses supérieures à 8 m/s, a tendance à masquer le bruit rayonné par l'éolienne [18].

Les éoliennes peuvent nuire à la migration des oiseaux en étant un obstacle mortel. En effet, les pales en rotation sont difficilement visibles par mauvais temps ou la nuit. Les oiseaux peuvent alors entrer en collision avec celles-ci. Plus le parc éolien est dense plus ce risque est grand. Des lumières sur les pales peuvent réduire ce danger. Cependant, aucune étude sérieuse ne semble actuellement avoir démontré la réalité du danger pour les oiseaux [4].

- La source d'énergie éolienne étant stochastique [23], la puissance électrique produite par les aérogénérateurs n'est pas constante. La qualité de la puissance produite n'est donc pas toujours très bonne. Jusqu'à présent, le pourcentage de ce type d'énergie dans le réseau était faible, mais avec le développement de l'éolien, notamment dans les régions à fort potentiel de vent, ce pourcentage n'est plus négligeable. Ainsi, l'influence de la qualité de la puissance produite par les aérogénérateurs augmente et par suit, les contraintes des gérants du réseau électrique sont de plus en plus strictes.
- Les systèmes éoliens coûtent généralement plus cher à l'achat que les systèmes utilisant des sources d'énergie classiques, comme les groupes électrogènes à essence, mais à long terme, ils constituent une source d'énergie économique et ils demandent peu d'entretien [9].

- Selon l'article de [20], il a fallu plusieurs décennies pour réaliser des éoliennes silencieuses, esthétiques et résistantes aux conditions météorologiques très capricieuses.

1.9. L'énergie éolienne dans le monde

Les nouvelles exigences sur le développement durable conduisent les Etats à remettre en cause des méthodes de production d'énergie et à augmenter la part des énergies renouvelables dans la production. Le protocole de Kyoto engage les pays signataires à réduire leurs émissions de gaz à effet de serre. Cet accord a participé à l'émergence de politiques nationales de développement de l'éolien et d'autres énergies également car les éoliennes n'émettent pas de dioxyde de carbone [25]. Trois facteurs ont contribué à rendre la solution éolienne plus compétitive.

- Les nouvelles connaissances et le développement de l'électronique de puissance
- L'amélioration des performances en aérodynamique pour la conception des turbines éoliennes.
- Le financement des états pour l'implantation de nouvelles éoliennes.

1.10. L'énergie éolienne dans l'Algérie

L'Algérie, pays africain disposant du plus grand potentiel éolien terrestre du continent. L'Algérie possède le potentiel éolien terrestre le plus élevé du continent qui s'élève à 7.700 gigawatts (GW), soit plus de 11 fois la capacité éolienne mondiale actuellement.

1.11. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté brièvement les systèmes éoliens. On peut dire que le fonctionnement des éoliennes est relativement simple, en utilisant l'énergie du vent pour générer de l'électricité. Elles peuvent être installées dans des endroits venteux, offrant ainsi une source d'énergie utilisable presque partout. L'énergie éolienne est considérée comme l'une des meilleures solutions pour la production d'énergie dans certains cas. Elle présente plusieurs avantages, tels que l'absence d'émissions de gaz ou de liquides nocifs dans l'environnement, ainsi que l'absence de contribution à l'effet de serre.

Chapitre2

Étude de pré faisabilité

2.1 Introduction

Penser d'installer des éoliennes pour produire l'énergie électrique dépend de deux paramètres. Le premier paramètre est la disponibilité du vent dans le site choisis et l'autre est la nature de se site. Ou la conception de ces machines dépend de la vitesse moyenne du vent et l'altitude de site. Plusieurs méthodes ont été établies pour déterminer la distribution de la vitesse moyenne du vent puis de construire une base de données de gisement de vent.

2.2 Le vent

Le vent est un mouvement d'air a grande échelle qui peut être provoqué par des différences de températures de pression atmosphérique et d'autre facteurs météorologiques. Le vent est une source d'énergie propre, renouvelable quasi instantanément et quasi infinie à l'échelle humaine et terrestre. Il doit ses caractéristiques à sa nature même : le vent naît des processus cycliques (rotation terrestre, convection chaud/froid, etc.) La première partie du chapitre sera consacrée à l'introduction d'éléments de physique atmosphérique en définissant les couches ainsi que les forces qui régissent le mouvement des masses d'air et les causes principales des vents. En seconde partie sont présentés les critères de choix des sites éoliens [26].

2.3 L'origine de vent:

L'air qui constitue l'atmosphère est un mélange de gaz et de particules de forme solides ou liquides. Sa composition est relativement constante jusqu'à une altitude inférieure à 100km et est majoritairement composée d'azote et d'oxygène. La quasi-totalité de sa masse est située à une altitude de moins de 16 km, dans les basses couches atmosphériques. Au sein de ces couches, le déplacement des masses d'air, appelé vent n'est autre que le résultat de la mise à L'équilibre d'un ensemble de forces qui sont

2.3.1 Force gravitationnelle

La force gravitationnelle est le phénomène de réaction physique qui cause l'attraction mutuelle entre deux corps, en générale cette attraction se fait entre un objet et un astre comme la terre ou la lune, cette force produite accélération gravitationnelle.

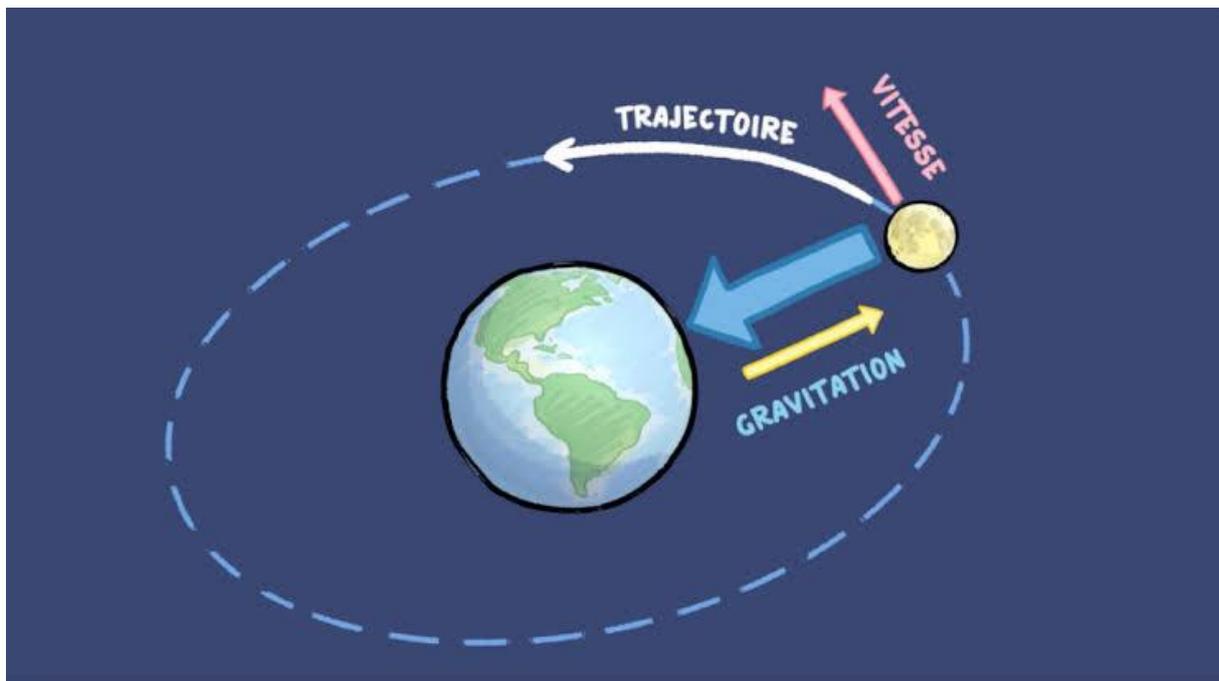


Figure 2. 1 force gravitationnelle la lune tourne autour de la terre, car elle attire par elle.

2.3.2 Force de pression

La force de pression dirigée des hautes pressions vers les basses pressions, ces forces sont dues au gradient de pression résultant de l'échauffement inégal de l'air suivant les latitudes, la nature des sols et la répartition des océans et des continents. Les forces de pressions sont à l'origine du déplacement des masses d'air.

2.3.3 Force de Coriolis

Cette force est le résultat de la rotation de la terre autour de son axe et est perpendiculaire à la vitesse du vent.



Figure 2. 2 effet de la force Coriolis sur la direction du vent.

2.3.4 Forces de frottement :

Ces forces traduisent la friction turbulente de l'air avec le sol. Elles interviennent dans la couche limite atmosphérique. La force gravitationnelle et la force du gradient de pression sont les deux forces qui peuvent initier un mouvement d'air. Leurs actions se feront ressentir près du sol dans une zone appelée couche limite atmosphérique[26].

2.4 Causes principales du vent

2.4.1 Différence de température

Le chauffage inégal de la surface terrestre par le soleil crée des différences de température à différents endroits ce qui entraîne des mouvements d'air.

2.4.2 Pression atmosphérique

L'atmosphère consiste en une mince couche de gaz qui entoure la terre et qui se trouve réchauffée par le rayonnement solaire. Ce dernier n'étant pas uniforme à la surface de la terre, l'échauffement est donc différent selon les régions. L'air chauffé se dilate et l'air refroidi se contracte ; ce processus crée tout autour du globe des zones de pression relatives hautes ou basses. Par exemple, près de l'équateur l'air chauffé se dilate et s'élève et une fois en altitude s'éloigne de l'équateur en direction du nord et du sud. Ainsi, la diminution de pression à cet endroit se traduit par la présence d'une zone de basse pression atmosphérique, ce qui déclenche des vents à plus bas niveaux et le long des fronts[27].



Figure 2. 3 Circulation atmosphérique simplifiée.

2.5 Les variations du vent en fonction de l'altitude

La vitesse du vent augmente avec l'altitude par rapport au sol, les données météorologiques en fonction de l'altitude sont données pour une altitude de 10m alors que l'altitude des éoliennes est supérieure à 10m donc il est nécessaire de disposer la méthode de Justus en 1978 pour transposer les vitesses du vent à 10m en vitesses du vent à l'altitude envisagée pour les éoliennes [26].

$$v_h = v_{10} \left(\frac{h}{10}\right)^a \quad (17)$$

V_h : vitesse du vent à hauteur de mesure (m/s)

V_{10} : vitesse du vent à $h=10m$ en (m/s)

H : hauteur de mesure en (m)

Le coefficient α a sensiblement les valeurs suivantes :

Tableau 2. 1: Les coefficients de α .

LIEU	1 DE α
EN MER	0,13
SUR UN RIVAGE	0,16
EN PLAINE	0,2
EN PLAINE BOISSE	0,24
EN VILLE	0,3

2.6 Instruments pour mesure le vent :

2.6.1 Anémomètre

L'anémomètre est un instrument qui nous indique la vitesse du vent. L'anémomètre est composé de coupelles en forme de demi-sphères vides orientées dans le même sens qui tournent librement autour d'un axe. Dans les anémomètres modernes, un système électronique permet alors de calculer le nombre de tours effectués par les coupelles dans un certain temps. L'anémomètre a été inventé par l'architecte italien Léon Battista Alberti en 1450 [26].



Figure 2. 4 elle présente l'anémomètre.

2.6.2 Manche à air (manche à vent)

La manche à air est un instrument qui nous indique l'origine du vent et nous donne aussi une approximation de la vitesse du vent. C'est un tube de toile souple fermé à l'une des extrémités que l'on appelle manchon et fixé à un mât. Le vent s'engouffre par l'ouverture et soulève le manchon. Il y a toujours au moins trois bandes rouges et deux bandes blanches qui s'alternent. Ces bandes nous permettent une approximation de la vitesse du vent. Chaque bande correspond à une vitesse de 5 nœuds (environ 9 km/h). Alors quand il y a cinq bandes du tube de toile complètement à l'horizontal on peut dire qu'il y a un vent d'au moins 25 nœuds (environ 45 km/h). Le tube de toile peut aussi pivoter sur son axe alors il nous permet de connaître la direction du vent. Le manchon pointe vers où le vent se dirige.



Figure 2. 5 elle présente manche à air.

2.7 Effets d'obstacles

L'effet d'obstacle étant défini comme une décroissance relative de la vitesse du vent causée par la présence d'un obstacle autour de l'anémomètre. Cet effet est fonction des paramètres suivants [28].

- 1-Distance entre l'obstacle et le point de mesure
- 2-Hauteur de l'obstacle
- 3-Hauteur au dessus du sol de l'anémomètre
- 4-Longueur de l'obstacle
- 5-Porosité de l'obstacle

2.8 Rugosité

La rugosité de la surface d'un terrain donne est déterminée par la taille et la distribution des divers éléments rugueux qu'elle contient. Pour des régions continentales, ces éléments rugueux correspondent généralement à de la végétation (herbes, arbres, forêts) et à des zones urbaines ou industrielles. La rugosité d'une surface est habituellement représentée par une échelle de longueur qu'on appelle *longueur de rugosité* que l'on note par Z_0 . Une définition simple de la longueur de rugosité a été donnée par Littau (1969) et détaillée plus tard par Petersen et al. (1981), DucheneMarullaz et Sacre (1984) et Petersen (1989) [29].

Tableau 2. 2 La longueur de rugosité.

$Z_0 = [m]$	Caractéristique du terrain	Classe de rugosité
1	VILLE FORET	3
0,5	BANLIEUE	3
0,3	BRISE-VENT	3
0,2	BEUCOUP D'ARBRE	2
0,1	TERRAIN AGRICOLE DENSE	2
0,05	TERRAIN AGRICOLE DEGAGE	1
0,03	TERRAIN AGRICOLE AVEC PEU D'INSTRUCTION	1
0,0003	SURFACE DU SABLE(LISSE)	0
0,0001	PLANC D'EAU (LAC, MER CALME)	0

2.9 Comment choisir une éolienne

Pour choisir une éolienne, l'analyse de ses caractéristiques et des données techniques est essentielle. Le choix devra principalement se baser sur [30] :

- La puissance électrique nominale.
- La courbe de puissance (la vitesse de démarrage et la vitesse permettant d'atteindre la puissance nominale).
- L'émission sonore, le service après-vente, le prix de l'éolienne.

2.10 Classification des éoliennes

2.10.1 Selon la puissance

Un ensemble de paramètres techniques caractérisent une éolienne, dont sa puissance maximale, aussi appelée puissance nominale. Lorsqu'on parle d'une éolienne de 50kW, il s'agit d'une éolienne dont la puissance maximale théorique est de 50 kW, La réglementation actuelle s'applique essentiellement aux installations « classées », c'est-à-dire aux éoliennes ou projets éoliens dont la puissance varie entre 100 kW et plus de 3 MW[31].

- Classe1 : $P \geq 3 \text{ MW}$
- Classe2 : $500 \text{ kW} \leq P < 3 \text{ MW}$
- Classe3 : $100 \text{ kW} \leq P < 500 \text{ kW}$

Il est communément acquis que la catégorie des éoliennes de moyenne puissance sont comprises entre les puissances de 100 kW et 1 MW et Le petit éolien correspond aux éoliennes de puissances inférieures à 100 KW.

2.10.2 Selon la surface balayée

Certaines normes, comme la norme IEC (International Electrotechnical Commission), catégorisent les éoliennes sur base de la surface balayée plutôt que sur une puissance électrique et distingue ainsi 2 classes d'éoliennes, petites et grandes, en fonction d'une surface balayée de 200m², Cette limite de surface balayée d'une valeur de 200m² correspond à des éoliennes de diamètre de rotor de 16m.

2.10.3 Selon le type de fonctionnement

Le marché distingue 2 types de technologies :

- 1) • Les éoliennes à axe horizontal - HAWT (Horizontal Axis Wind Turbine)
- 2) • Les éoliennes à axe vertical – VAWT (Vertical Axis Wind Turbine)

2.11 Les critères de choix d'un site éolien

Les critères de choix de l'implantation éolienne dépendent de la taille, puissance et du nombre d'unités. Ils incluent la présence d'un vent régulier et diverses conditions telles que : présence d'un réseau électrique pour recueillir le courant, absence de zones d'exclusion (dont périmètre de monuments historiques, sites classés.), terrain approprié, etc. Un bon site éolien doit présenter les qualités suivantes :

2.11.1 Vitesse et régularité du vent

Les sites éoliens doivent avoir des vents forts et régulier afin d'optimiser la production d'énergie éolienne. Les régions côtières et les zones ouverte sont considérer comme des zones de vent favorables[26].

2.11.2 Météo et l'environnement

Les conditions météorologiques l'environnement peuvent affecter la performance et le rendement d'une éolienne. La présence des éléments suivants augmente les chances que le site soit favorable à l'énergie éolienne : grandes étendues d'espaces, faibles précipitations, moyenne pression atmosphérique et une altitude modérée [32].

2.11.3 Proximité des lignes électriques :

Les sites éoliens choisis doivent être situés à proximité des lignes électriques existantes pour faciliter le transport et la distribution de l'énergie produite.

2.11.4 Accessibilité

Le site doit être facilement accessible pour permettre aux techniciens d'effectuer des inspections et des entretiens périodiques et pour installer des composants supplémentaires.

2.11.5 Conditions géographique

Certains sites peuvent présenter des caractéristiques géographiques qui affectent l'efficacité de l'utilisation de l'énergie éolienne. Par exemple, les sites situés au bord de la montagne ou des canyons peuvent causer un flux de vent vertical, ce qui réduit le rendement éolien [33]

2.11.6 Technologie

Vous devez tenir compte de la technologie utilisée pour le parc éolien, certaines technologies ne fonctionnent pas correctement dans toutes les régions.

2.11.7 Normes de bruits

Vous devez vous assurer que les éoliennes ne génèrent pas de niveaux sonores intolérables qui peuvent perturber les habitants.

2.11.8 Coût

Les coûts initiaux du projet de construction doivent être pris en compte, ainsi que les coûts de l'exploitation et de l'intérêt.

2.12 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons donné des informations sur l'évolution mensuelle et annuelle de la vitesse moyenne du vent de l'Algérie. Celles-ci sont nécessaires pour le choix des sites d'implantation de systèmes éoliens et aussi nous avons donné des critères pour choisir un bon site pour l'implantation des éoliennes.

Chapitre 3

Choix des sites éoliens

3.1. Introduction

Le choix de site ne doit absolument pas seulement obéir aux critères techniques garantissant la présence d'un vent suffisant et la possibilité de raccordement routier et électrique ni uniquement aux opportunités foncière, la zone doit aussi être sélectionnée grâce à des investigations au préalable pour qu'elle soit en accord avec les enjeux environnementaux locaux.

3.2. Mise en place d'un parc éolien

L'utilisation des éoliennes pour la production d'électricité est devenue une des méthodes prépondérantes de production d'énergie renouvelable et contribue activement à la lutte pour la réduction de l'émission de gaz à effet de serre. Cependant, malgré l'avantage écologique que représente l'éolien par rapport à d'autres sources d'énergie, l'implantation de nouveaux parcs éoliens est soumise à des règles très strictes afin de rentabiliser au maximum les infrastructures et ainsi proposer aux consommateurs un prix au kWh le plus compétitif possible, en dépit de solutions alternatives parfois plus économiques mais également plus polluantes.

3.3. Evaluation du potentiel éolien

Le choix final du terrain se fait sur la base d'un ensemble de mesures destinées à connaître le gisement éolien du lieu. Pour cela des campagnes sont réalisées à l'aide de masts de mesure. Elles durent de 6 à 12 mois. Les principales mesures concernent la vitesse du vent, l'orientation du vent, et des données sur l'humidité, la pression atmosphérique et la température de l'air. Autant d'éléments qui influencent la future production éolienne.

3.4. Etude de préfaisabilité

Elle permet de savoir s'il est intéressant d'employer davantage de moyens et de temps pour évaluer la pertinence du projet, en s'appuyant sur : -une estimation de la taille du projet - une évaluation rapide du potentiel éolien -une analyse du branchement au réseau électrique existant -une budgétisation de l'installation -une estimation des obstacles potentiels à venir Cette étude, réalisée en quelques jours, doit mettre en évidence les problèmes majeurs pouvant apparaître.

3.5. Etude d'impact :

Il s'agit d'une démarche globale d'évaluation des impacts du projet sur l'environnement et la biodiversité, les riverains, le paysage et le patrimoine local, L'étude d'impact est accompagnée d'une étude de danger, conformément à la réglementation relative aux installations classées pour la protection de l'environnement dont font partie les parcs éoliens.

3.5.1 Adrar

Le paysage

Adrar se distingue par ses différents paysages comme sebkha de Gourara et tamantite et le forêts ...etc.

Les monuments touristiques

- Palais de tamantite
- La casbah de melouka
- La place de liberté
- La places des martyrs. [36]

3.5.2 Oran

Le paysage

Cette ville classée 2ème d'Algérie, son climats méditerranée classique est marquée par une sécheresse estival, des hivers doux.

Les monuments touristiques

- Le front de mer
- La montagne de murdjajo
- Santa Cruz
- La place d'armes
- Victor Hugo [35]

3.5.3 Tiaret

Le paysage

Tiaret est une wilaya algérienne située à l'ouest du pays, c'est une région à vocation agropastorale.

III.3.2. Les monuments touristiques :

Il y'a : Columnata à (sidi Hosni),

Khrbetouledbouziane(dahmouni)

Souamah à (mechraa es safa) [38]

3.5.4 Djelfa

Le paysage

Elle située dans les hauts-plateaux, à 300 KM au sud d'Alger, elle s'étale sur les vastes plaines steppiques qui rattrapent le piémont sud de l'atlas tellien.

Les monuments touristiques

- Le rochet de sel
- Le forêt de senalba,
- Le chott zahrez Gharbi
- Le cordan dunaire de hassi bahbah [34].

3.5.5 Tébessa

Le paysage

Est une zone de transition météorologique, elle se distingue par quatre étages bioclimatiques (le sub-humide, le semi-aride, le sub-aride et l'aride ou saharien doux).

Les monuments touristiques

- Arc de Caracalla,
- Basilique de Tébessa,
- Cimetre de l'école du doctorsaadane
- fouilles de la zaouia [37].

3.6. Les études de sols

Il doit être suffisamment résistant pour supporter les fondations de l'éolienne. Ce critère n'est pas déterminants car dans le cas d'un sol meuble, des pieux seront alors enfoncés sous les fondations de l'éolienne, Certains sites bien spécifiques augmentent la vitesse du vent et sont donc plus propices à une installation éolienne :

3.6.1 Effet venturi

Est un phénomène de physique, lorsque l'air s'engouffre entre deux obstacles ou bien deux grandes bâtiments il est accélère par l'effet venturi.

3.6.2 Effet tunnel

Est phénomène quantique qui survient lors du passage d'une particule à travers une barrière de potentiel élevé. L'installation d'une éolienne dans un tel tunnel est donc plus avantageuse d'un point de vue énergétique et aussi le tunnel doit être enclavé pour éviter les turbulences qui peuvent changer la vitesse et la direction du vent.

3.7. L'altitude

Le vent est engendré par une différence de température ou de pression. Il est ralenti par les obstacles, et la rugosité du sol, et est généralement plus fort en altitude. Les plaines ont des

vents forts parce qu'il y a peu d'obstacles. Les cols de montagne ont eux aussi des vents forts, parce qu'ils canalisent les vents de haute altitude. Dans certains cols, les vents proviennent de l'écart de température entre les deux versants [39].

Tableau 3. 1 La longueur de rugosité.

REGION	LONGITUDE(°)	LATITUDE(°)	ALTITUDE(M)
ADRAR	-0,3	27,9	263
IN SALEH	2,5	27,2	293
HASSI RMEL	0,3	29,3	312
ORAN	-0,6	35,6	90
TIARET	1,4	35,3	1127
DJELFA	4,5	35,7	667
TEBESSA	8,1	35,5	813

3.8. Effet des obstacles sur choix du site

En généralement, les obstacles peuvent avoir plusieurs effets sur le choix de site éolienne.

3.8.1 Réduction de productivité éolienne

Les obstacles tels que les montagnes, les Collines, les arbres, les bâtiments, etc. peuvent créer des turbulences et perturber le flux d'air, réduisant ainsi la vitesse du vent et la productivité de l'éolienne.

3.8.2 Augmentation des coûts

Les obstacles peuvent augmenter les coûts d'installation et de la maintenance de l'éolienne en raison de la nécessité de structures plus hautes, de pales plus longues, des fondations plus profondes.

3.8.3 Risque d'endommagement de l'éolienne

Les obstacles tels que les bâtiments, les antennes ...etc. Peuvent créer des risques d'endommagement de l'éolienne en particulier pendant les périodes de vent forts.

3.8.4 Impacts visuel

Elles peuvent créer des impacts visuels sur le paysage et la perception des communautés locales ce qui peut entraîner des réactions adverses et des contraintes réglementaires.

Par conséquent, il est important de prendre en compte les obstacles dans le processus de sélection de sites éoliens[40].

3.9. Estimation de l'énergie générer par une éolienne :

Pour estimer l'énergie générer par une éolienne nous utilisons la méthode de l'histogramme.

$$E = \sum_{i=1}^n p_{eff}(v_i)F(v_i)N \quad (18)$$

N : nombre d'heures par années

P(v_i) : puissance effective a une vitesse(v_i)

F(v_i) : la probabilité aune vitesse (v_i)

Le facteur de capacité est définie comme le rapport entre l'énergie réelle E produite dans une période de temps et l'énergie produite si la turbine fonctionne a sa puissance nominale P_n pour une année : [41]

$$Cf = \frac{E}{p_n \times 8760} \quad (19)$$

3.10. Estimation le bruits d'éolienne :

Normalement pour la mesure de bruits des éolienne le niveau de puissance acoustique pondéré est calculé sous forme d'un niveau moyen à 500Hz la valeur de l'impact sonore est calculé d'après la norme ISO 9613-2 de la manière suivante: [42]

$$L_{at}(d_w) = L_{wa} + D_c - a - c_{met} \quad (20)$$

L_{at}: niveau de puissance acoustique pondéré de la source sonore.

D_c = DΩ : correction pour tenir compte de la directivité de la source (sans directivité on prend 0 dB) et de la réflexion sur le sol

$$D\Omega = 10 \log \left[1 + \frac{d_p^2 + (h_s - h_r)^2}{d_p^2 + (h_s + h_r)^2} \right] \quad (21)$$

H_s : hauteur de la source au-dessus du sol (hauteur du moyeu)

H_r : hauteur du point d'impact sonore (fonction de la réglementation mais aussi ajustable lors de la définition du calcul).

D_p : distance entre source sonore et point d'impact, projetée sur le sol (m), elle se calcule à partir des coordonnées (x, y) de l'origine (indice s) et du point d'impact (indice r) :

$$dp = \sqrt{(xs - xr)^2 + (ys - yr)^2} \quad (22)$$

A est l'atténuation lors de la propagation du bruit entre la source (nacelle de l'éolienne) et le point d'impact. L'atténuation totale est :

$$A = Adiv + Aatm + Asol + Aecran + Adivers \quad (23)$$

Adiv : atténuation due à la propagation spatiale :

$$Adiv = 10 \log(d) + 11 \quad (24)$$

D : distance entre source et point d'impact (m)

Aatm : atténuation par absorption atmosphérique.

$$Aatm = \frac{\alpha d}{1000} \quad (25)$$

α : coefficient d'absorption de l'air = 1,9 db/km dans les conditions les plus favorables de propagation du son (température de 10° et humidité atmosphérique relative de 70%).

Asol : atténuation du sol :

$$Asol = 4,8 - \left[\left(\frac{2hm}{d} \right) \left(17 + \frac{300}{d} \right) \right] \geq 0 \quad (26)$$

Hm : hauteur moyenne (m) du trajet du son au-dessus du sol. En l'absence de modèle numérique de terrain, hm se calcul comme suit :

$$hm = \frac{hs+hr}{2} \quad (27)$$

Si des courbes de niveaux sont disponibles, on calcule la surface vertical F entre l'éolienne et le point d'impact sonore, délimitée par le sol et la ligne droite passant par l'éolienne et le point d'impact sonore. Hm se calcule comme suit :

$$hm = \frac{f}{d} \quad (28)$$

f : aire totale après intégration des sous aires calculées à chaque pas (m²)

d : distance comprise entre la source et le point d'impact sonore (m)

si $Asol < 0$ alors $Asol = 0$ utilisée

Aecran : atténuation causée par absorption (barrière antibruit). En général, quand y a aucune protection sonore on Aecran = 0

Adivers : atténuation divers (végétation, construction, industrie) en règle générale, ces atténuations ne sont pas prises en compte dans les calculs Adivers=0

Cmet : correction météorologique. Celle-ci se détermine comme suit :

$$C_{met} = 0 \text{ si } dp < 10(hs + h)$$

$$C_{met} = C0 \left[1 - \frac{10(hs+hr)}{dp} \right] \text{ si } dp > 10(hs + hr) \quad (29)$$

3.11. Les possibilités de raccordement électrique

Le nouveau parc éolien devra évidemment être intégré au réseau d'énergie électrique et celui-ci doit être en mesure de supporter cette nouvelle capacité de production intermittente. L'incidence de ce branchement sur le réseau devra être évaluée car elle dépend de la taille du parc éolien et de la production estimée. Les modalités et certifications nécessaires à la connexion varient suivant l'intégration de la puissance éolienne dans le circuit. Pour cela on va montrer les principales sociétés de distribution d'électricité dans les sites choisis [43].

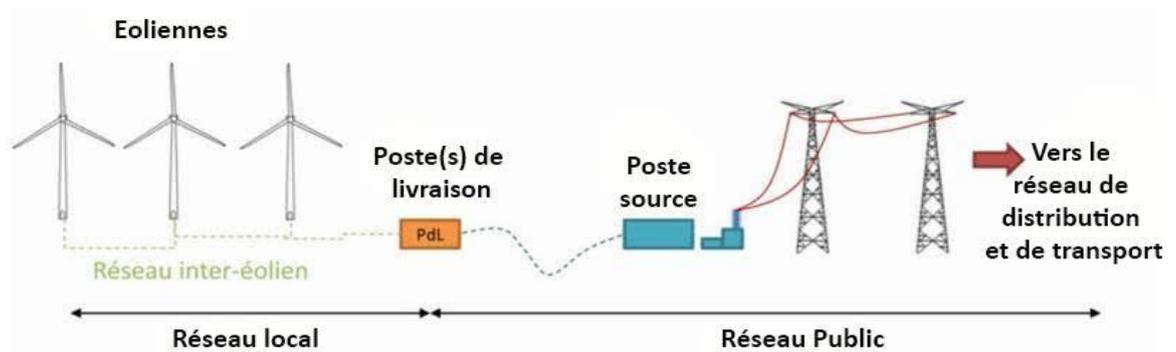


Figure 3. 1 Schéma de raccordement électrique d'un parc éolien.

Tableau 3. 2 Les sociétés de distribution d'électricité.

Les sites choisis	société de distribution d'électricité
Oran	Sociétés de distribution Arziw. Sénia. Port d'Oran
Tiaret	Société de distribution algérienne de Tiaret
Adrar	unité de SADEG, GOURARA expert indus

3.12. Télésurveillance et maintenance d'un parc éolien

3.12.1 La télésurveillance

Est un outil essentiel pour assurer le bon fonctionnement et la rentabilité d'un parc éolien, elle permet de surveiller a distance les différentes éoliennes qui le composent. Les capteurs et les cameras installes sur l'éolienne transmettant en temps réel des informations sur leur éta de fonctionnement leur vitesse... etc. Grace a la télésurveillance les couts de la maintenance sont réduits, et aussi elle permet de maximiser la production d'énergie du parc éolien.

3.12.2 La maintenance

Est essentielle pour assurer u fonctionnement efficaces et fiables des turbines éoliennes, cette maintenance peut être divisée en deux catégorie :

La maintenance préventive

Cette maintenance comprend notamment la lubrification des composants mécaniques, la vérification et le remplacement des pièces usées, le nettoyage de pales d'éoliennes, le réglage de l'orientation de l'éolienne pour optimiser sa production d'énergie... etc.

La maintenance corrective

Quant à elle, intervient lorsque des pannes surviennent sur les équipements. Elle consiste a identifier la source du problème a réparer ou remplacer les pièces défectueuses[44].



Figure 3. 2 la maintenance d'une éolienne.

3.13. Sécurité de site

L'accès aux aérogénérateurs et aux postes de livraison sera fermé à toute personne étrangère au personnel de l'installation. La porte des aérogénérateurs est équipée d'un système de verrouillage à clé. Les prescriptions à observer à proximité des éoliennes en matière de risques (consignes de la sécurité, interdiction d'accès, risques d'électrocution et risque de chute de glace en cas de températures négatives) seront affichées sur le chemin d'accès de chaque aérogénérateur.

3.14. Risque d'incendie

Les abords du site seront entretenus par l'exploitant (débranchement) afin de limiter le risque de propagation d'un incendie et de favoriser l'accès au site par les secours. Des extincteurs en état de bon fonctionnement seront disponibles dans les aérogénérateurs et dans le poste de livraison [45].

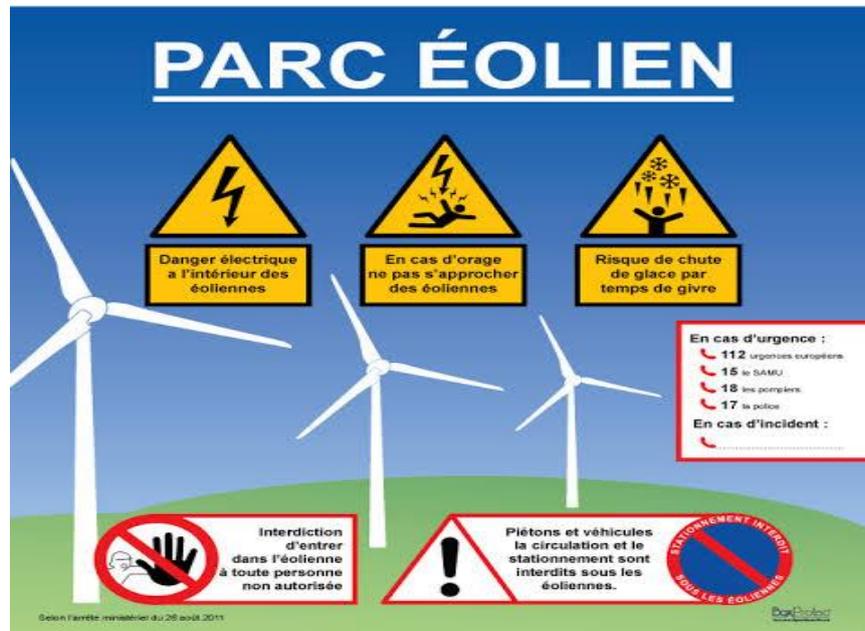


Figure 3. 3 Risque d'incendie.

3.15. Conclusion

Dans ce chapitre nous traitons les différentes techniques d'identification des sites ventaux pour l'installation d'un parc éolien, nous avons étudié et analysé tout les données des sites telles que les influences locales qui affectent le comportement des vents, la possibilité de se connecter au réseau électrique nationale, les différentes restrictions réglementations, l'environnement, les conditions et les paysages, on peut connaître l'étendue de la réussite du projet.

Chapitre 4

Modélisation et simulation.

4.1. Introduction :

L'analyse de la vitesse du vent sur un site représente la première étape de tout projet éolien, qui permet d'estimer le potentiel venteux d'une région. Le vent présente un caractère aléatoire, son analyse doit se baser sur des méthodes statistiques. Ainsi, les paramètres qui vont caractériser le régime des vents sur un site seront la valeur de la vitesse moyenne et les lois statistiques régissant les variations temporelles. Parmi ces lois, il est impératif d'utiliser la loi de Wei bull qui permet de caractériser la distribution des fréquences de vitesses de vent. Deux paramètres caractérisent cette loi et qui sont à l'origine de nombreuses études menés dans d'autres pays. En effet, ces deux paramètres sont le facteur de forme "k" et le facteur d'échelle "c" qui dictent la manière dont la vitesse du vent varie statistiquement durant une période donnée et distinguent les caractéristiques de chaque site

Ce chapitre présente aussi les différents modèles utilisés pour l'estimation de la production énergétique d'une éolienne et l'évaluation du potentiel énergétique totale de toute une ferme éolienne pendant dix- année. Ces modèles mathématiques probabilistes seront réunis dans un programme de calcul Matlab.

4.2. Analyse de données réelles du vent en Algérie

Le vent est une énergie propre, renouvelable et de plus en plus économique. Mais, c'est un phénomène variable. Cependant, la production de l'énergie éolienne dépend de cette variation de la vitesse du vent du site envisagé. Par conséquent, nous avons besoin d'évaluer les caractéristiques du vent du site pour pouvoir dimensionner un projet éolien. De même, cette étude offre aux investisseurs de déterminer la production prévisionnelle de la future installation éolienne. Alors l'analyse préliminaire des données du vent est nécessaire pour garantir le meilleur établissement d'un parc éolien.

Grace a une répartition géographique plus ou moins uniforme entre le sud et le nord , le nouvel atèles vent a 10m du sol reflète des changement dans l'estimation de la ressource éolienne, voila dans ces tableaux au-dessus on a la vitesse moyennes et leurs fréquence des sites qu'on a choisis (Adrar, in Saleh, Hassi Rmal, Oran, Tiaret, Tébessa, Djelfa) dans les années entre (1976-1988).

4.3. Distribution de Wei bull :

L'analyse du vent est effectuée à l'aide de la méthode expérimentale météorologique, utilisant les tableaux de mesure, indiquant les fréquences cumulées $F_c(V)$ des vitesses du vent « supérieures ou égales » aux vitesses classées V , la fréquence d'occurrence $f(V)$ est définie par la relation suivante:

$$f(v) = Fc(v) - Fc(v + 1) \quad (30)$$

La vitesse moyenne V_m du vent est définie par:

$$Vm = \sum_{i=1}^n V_i f(V_i) \quad (31)$$

Avec:

V_i : est la vitesse du vent classé

$F(v)$: est la fréquence d'occurrence

N : est le nombre d'observations.

La densité de puissance varie considérablement selon les lieux et les jours. Elle dépend de la vitesse et de la fréquence du vent.

4.4. Évaluation du potentiel énergétique disponible

4.5. Puissance d'une éolienne

L'énergie fournie par le vent est une énergie cinétique, en fonction de la masse et de la vitesse du volume d'air. Si on considère que la masse volumique de l'air (masse de l'air par unité de volume) est constante, on peut dire que l'énergie fournie par le vent est en fonction de sa vitesse

$$EC = \frac{1}{2} MV$$

Avec :

M : masse volumique d'air

v : vitesse de vent

Ec : énergie cinétique

4.6. Puissance théorique de vent (disponible) contenu dans un cylindre de section S :

$$P = \frac{1}{2} \rho \sum_{i=1}^n V_i^3 f(v_i) \quad (32)$$

Avec :

ρ : La masse volumique de l'air (environ de 1,23kg/m³ à 15°C et à pression atmosphérique 1,0312 bar)

4.7. Théorèmes de BETZ :

D'après la limite de Betz, la densité de puissance du vent devient égale à 59% de la puissance récupérable :

$$P_{\text{betz}} = \frac{16}{27} P \quad (33)$$

De même, le potentiel éolien disponible E_d dans le site étudié, par unité de surface et pendant un an, est exprimé à la limite de Betz par :

$$E_d = 8,67 P_{\text{betz}} \quad (34)$$

4.8. Energie utilisable

L'énergie utilisable désigne l'énergie qui peut être exploitée et transformée en une forme utile :

$$E_u = \left(\frac{P_n}{2}\right) \times (V_c^3 - V_d^3) \quad (35)$$

Avec

- P_n : puissance nominale
- V_c : vitesse de coupure
- V_d : vitesse de démarrage

4.9. Facteur de capacité

$$F_c = \frac{E_u}{P_n \times (365.5 \times 24)} \quad (36)$$

4.10. Choix des types éoliens

Le choix type des aérogénérateurs éoliens destinés à l'installation de la centrale éolienne sont dépendantes des caractéristiques de site étudié. Chaque éolienne est caractérisée généralement par ; sa puissance nominale, vitesse de démarrage, vitesse nominale, vitesse de coupure, diamètre de rotor, longueur des pales, surface

4.11. Eolienne H Darrieus 10kw

L'éolienne Darrieus de 10 kW est une éolienne de type vertical à axe de rotation vertical, caractérisée par sa forme en "S" ou en "C" et ses pales incurvées. Ce type d'éolienne est également connu sous le nom de rotor de Savonius. L'énergie éolienne est captée par les pales qui tournent autour d'un axe vertical en raison de la différence de pression entre la face convexe et la face concave des pales.

L'éolienne Darrieus de 10 kW est généralement utilisée pour des applications industrielles ou agricoles telles que l'alimentation énergétique d'une ferme, d'un champ de puits pétroliers, d'une usine ou d'un entrepôt. Elle peut également être utilisée dans des zones isolées où l'accès au réseau électrique est limité.

Le principal avantage de l'éolienne Darrieus de 10 kW est qu'elle est robuste et ne nécessite que très peu d'entretien. De plus, elle est facile à installer et à utiliser. Cependant, elle est moins efficace que les éoliennes à axe horizontal et est généralement moins adaptée aux conditions de vent irrégulières [47].



Figure 4 1 éolienne H Darrieus 10kw.

Fiche technique

Tableau 4. 1 fiche technique éolienne H Darrieus 10kw

Puissance nominale	10kw
Vitesse de vent à puissance nominale	10 M/S
Vitesse de début de production	3 M/S
Vitesse de coupure	20 M/S
Vitesse de survie	55 M/S
nombre des pales	3
Matériaux des pales	Aluminium
Diamètre de rotor	8,9 M
Langueur des pales	7,6 M
Surface balayé	68 M ²
Mât	14 M

4.12. Éolienne savonius 48v 500w

L'éolienne Savonius de 48 V et 500 W est un petit générateur d'énergie éolienne qui utilise un rotor en forme de S pour capturer le vent et le transformer en électricité. Elle est généralement utilisée dans des applications résidentielles ou commerciales où un petit supplément d'électricité est nécessaire. Elle est également très adaptable aux installations off-grid où l'accès à l'électricité est limité. Elle est particulièrement efficace à basse vitesse du vent et peut fonctionner dans des conditions de vent faible ou turbulente. Elle est facile à installer, peu bruyante et nécessite peu d'entretien [48].

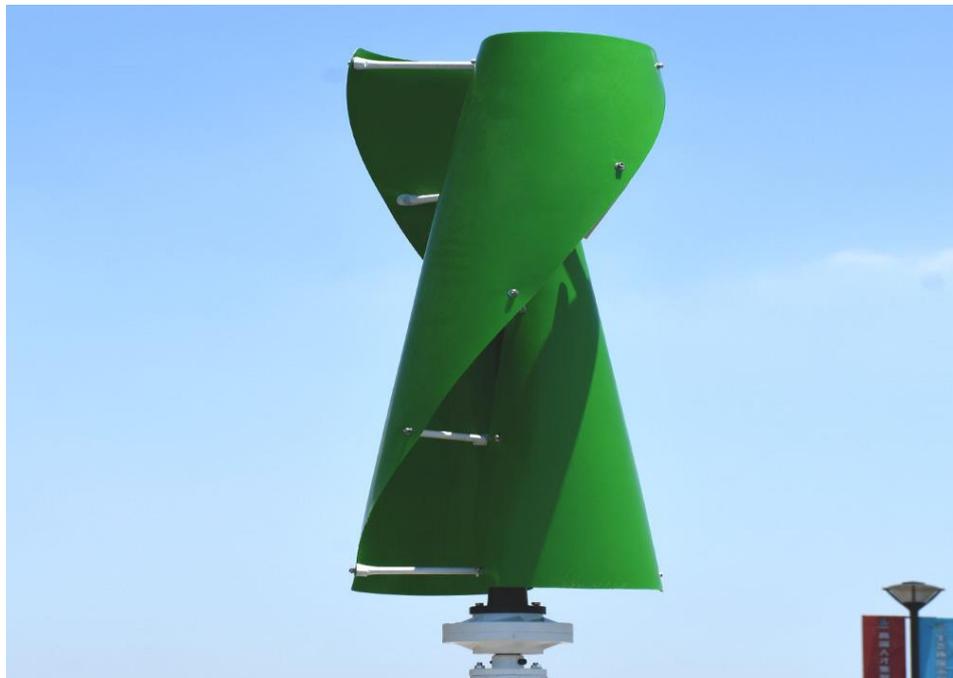


Figure 4.1 éolienne savonius 48v 500w

Fiche technique*Tableau 4. 2 fiche technique de éoliennesavonieus 48v 500w*

Puissance nominale	500w
Tension nominale	48V
Vitesse de démarrage	1,3 M/S
Vitesse de vent nominale	11M/S
Vitesse de vent maximale	40 M/S
Poids	24 KG
Diamètre de l' éolienne	0,52 M
Langueur des pales	1,3
Matériaux des pales	Aluminium
Courant	Triphasée
Installation	Facile

4.13. Eolienne FairWind F64-40

L'éolienne Fairwind F64-40 est une éolienne à axe horizontal de 64 mètres carrée de diamètre de rotor et une puissance de 40 kW. Elle est conçue pour fonctionner à des vitesses de vent allant de 4 à 25 m/s et est équipée d'un système de régulation de vitesse pour optimiser ses performances.

L'éolienne Fairwind F64-40 utilise une technologie de pales en fibre de verre, ce qui la rend légère et résistante aux conditions climatiques extrêmes. Elle est également équipée d'un système de freinage hydraulique pour assurer une sécurité maximale lors de l'arrêt de l'éolienne.

Avec ses performances élevées et sa taille imposante, l'éolienne Fairwind F64-40 est adaptée pour les grands parcs éoliens offshore et onshore, où elle peut produire suffisamment d'énergie pour alimenter des milliers de foyers [49].

*Figure 4. 2 éolienne FairWind f64 40*

Fiche technique*Tableau 4. 3 fiche technique d'éolienne fairwind f64-40*

Puissance nominale	40 KW
Vitesse de vent nominal	14 M/S
Vitesse de démarrage	4 M/S
Vitesse de coupure	20 M/S
Vitesse de mise en sécurité	55 M/S
Diamètre de rotor	8 M
Langueur des pales	8 M
Surface balayée	64 M ²
Hauteur de mat	12,24 M
Vitesse de vent nominal	14 M/S

4.14. Éolienne domestique de petite échelle

Une éolienne domestique de petite échelle est généralement utilisée pour produire de l'électricité à petite échelle et peut contribuer à la réduction de la consommation d'énergie provenant du réseau électrique.

Fiche technique*Tableau 4. 4 fiche technique d'éolienne dommestique de petite échelle*

Puissance nominale	10 KWH
Vitesse de vent nominal	12M/S
Vitesse de démarrage	4M/S
Vitesse de coupure	25M/S
Vitesse de mise en sécurité	30M/S
Diamètre de rotor	10M
Langueur des pales	5M
Hauteur de mat	30M

*Figure 4. 3 éolienne domestique*

Statistique d'Adrar

Tableau 4. 5 Résultats statistiques des données de vent et puissance disponible et puissance de betz et d'énergies disponible. D'Adrar

La region	Le moi	Vm	puissance	P betz	Energie dispo	Eu1/Ed	Eu2/Ed	Eu3/Ed	Eu4/Ed
Adrar	1	34.68	9.7511	5.778	4.0625	0,9812	0,3938	0.3925	0.1915
	2	33.32	10.2003	5.0646	4.3351	0,9195	0,3690	0.3678	0.1794
	3	37.4	15.5498	9.2147	7.0721	0,5636	0,2262	0.2254	0.11
	4	32.64	11.9915	6.1262	5.2250	0,7629	0,3062	0.3051	0.1489
	5	30.60	12.8654	7.6239	6.8786	0,5795	0,2325	0.2318	0.1131
	6	29.24	10.744	6.3677	5.5774	0,7147	0,2868	0.2859	0.1395
	7	36.72	16.2454	9.6279	8.4220	0,4733	0,1899	0.1893	0.8081
	8	34.68	14.3947	8.5302	7.4725	0,5334	0,2140	0.2133	0.1041
	9	36.72	13.8958	8.2545	7.2134	0,5526	0,2218	0.2210	0.9425
	10	33.32	9.6374	5.7143	4.0056	0,9952	0,3994	0.3980	0.1942
	11	36.72	11.0308	6.5075	5.7007	0,6993	0,2806	0.2797	0.1195
	12	34.68	9.2486	5.4806	4.800	0,8305	0,3333	0.3322	0.1620

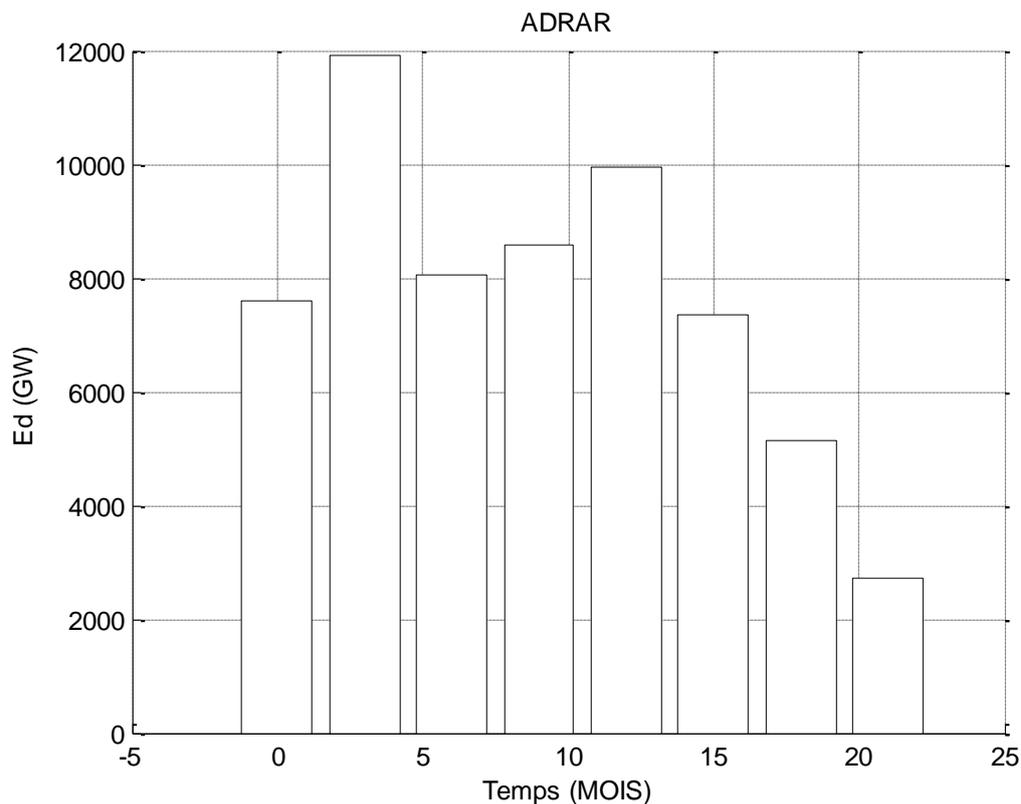


Figure 4. 4 présentation de l'énergie disponible en fonction de temps (Adrar)

Statistiques de Djelfa :

Tableau 4. 6 Résultats statistiques des données de vent et puissance disponible et puissance de betz et d'énergies disponible de Djelfa

La region	Le moi	Vm	puissance	P betz	Energie dispo	Eu1/Ed	Eu2/Ed	Eu3/Ed	Eu4/Ed
Djelfa	1	38.86	2.5123	1.4887	1.3041	0,3056	0,1226	0.1222	0.5966
		42.88	3.1694	1.8781	1.6452	0,2423	0,0972	0.9692	0.4729
	3	53.60	3.4459	2.0414	1.7883	0,2229	0,0894	0.8912	0.4350
	4	58.96	3.5277	3.0906	1.8303	0,2178	0,0874	0.8712	0.4250
	5	56.28	3.2089	1.9014	1.6658	0,2393	0,0960	0.9572	0.4670
	6	52.26	2.2411	1.3279	1.1634	0,3426	0,1375	0.1370	0.6687
	7	50.92	2.1086	1.1297	1.0958	0,3637	0,1460	0.1455	0.7100
	8	46.90	1.7820	1.0567	1.1266	0,3538	0,1420	0.1415	0.6909
	9	34.84	1.1198	0.6633	0.9812	0,4062	0,1630	0.0162	0.7929
	10	29.48	1.2507	0.7406	0.6488	0,6144	0,2466	0.0245	0.1199
	11	29.48	1.6517	0.9580	0.8570	0,4651	0,1866	0.0186	0.9078
	12	39.18	1.0016	1.1851	1.0389	0,3837	0,1350	0.1533	0.7489

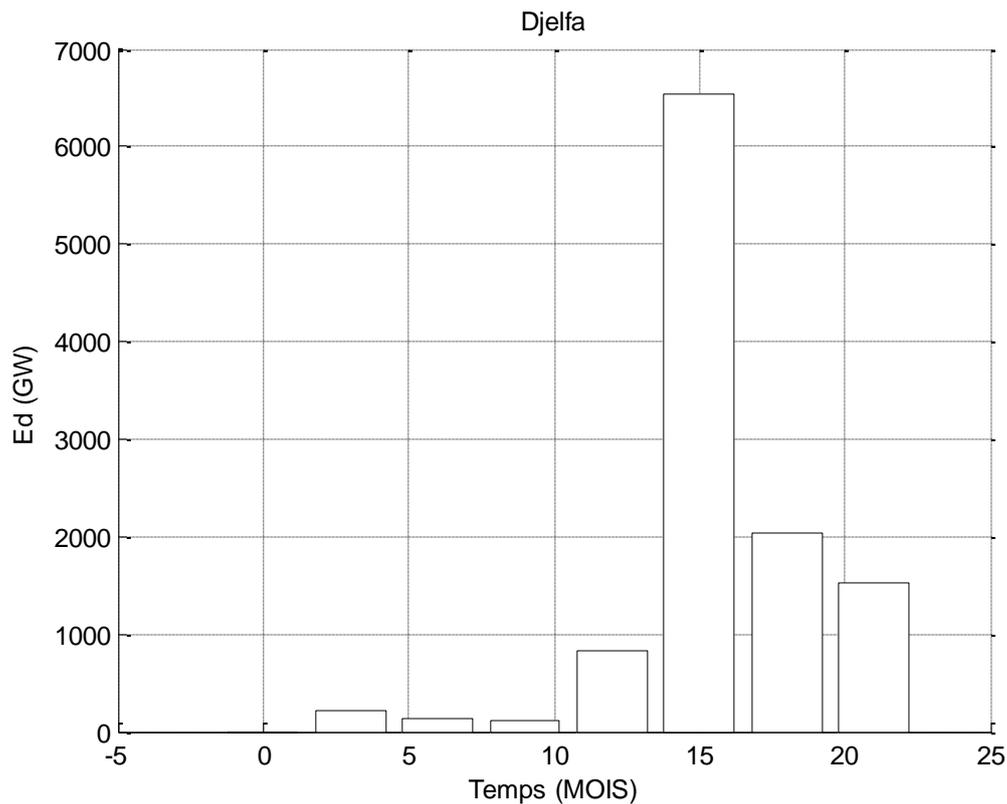


Figure 4. 5:présentation de l'énergie disponible en fonction de temps (Djelfa)

Statistiques de Hassi Rmel :

Tableau 4. 7 Résultats statistiques des données de vent et puissance disponible et puissance de betz et d'énergies disponible de Hassi Rmel

La region	Le moi	Vm	puissance	P betz	Energie dispo	Eu1/Ed	Eu2/Ed	Eu3/Ed
Hassi Rmel	1	20.70	1.9690	1167.4141	10.2265	0,3898	0,1564	0.1559
	2	31.50	3.7394	2216.9535	19.4079	0,2054	0,0824	0.8216
	3	35.10	3.0924	2424.1081	20.2430	0,1969	0,0790	0.7877
	4	41.40	4.7909	2839.0057	24.7697	0,1609	0,0645	0.6437
	5	45.90	6.4543	3824.7996	33.5053	0,1189	0,0477	0.4759
	6	50.40	6.6783	3957.5210	34.6680	0,1149	0,0461	0.4599
	7	45	5.1879	3074.3501	26.9303	0,1480	0,0594	0.5921
	8	28.8	2.5874	1533.3556	13.4322	0,2967	0,1191	0.1187
	9	26.10	1.9838	1175.6424	10.2997	0,3870	0,1553	0.1548
	10	24.30	2.0896	1238.3204	10.8476	0,3675	0,1474	0.1470
	11	21.60	1.6675	988.2166	8.6567	0,4605	0,18 48	0.1842
	12	21.60	2.2999	1363.8437	11.9385	0,3339	0,1340	0.1335

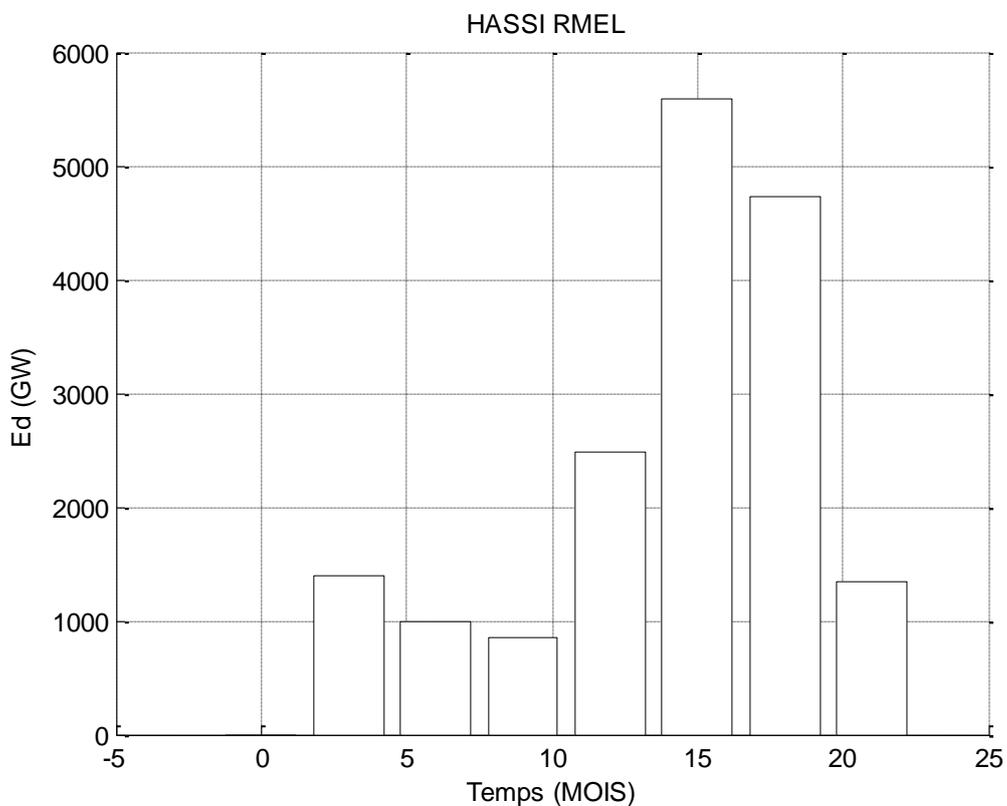


Figure 4. 6 présentation de l'énergie disponible en fonction de temps (hassi rmel)

Statistiques d'In Saleh :

Tableau 4. 8 présentation des Résultats statistiques des données de vent et puissance disponible et puissance de betz et d'énergies disponible d'In Saleh

La region	Le moi	Vm	puissance	P betz	Energie dispo	Eu1/Ed	Eu2/Ed	Eu3/Ed	Eu4/Ed
In Saleh	1	17.04	1.3982	728.5016	7.2585	0,5492	0,2204	0.2196	0.1071
	2	19.88	1.9090	1131.8602	9.9141	0,4021	0,1613	0.1608	0.7847
	3	29.11	4.3191	2559.5486	22.4216	0,1777	0,0713	0.7111	0.3470
	4	25.56	2.3386	1386.7896	12.1396	0,3283	0,1317	0.1313	0.6709
	5	26.27	3.1623	1873.9691	16.4150	0,2428	0,0991	0.9714	0.4739
	6	26.98	2.7145	1608.6057	12.0913	0,3296	0,1323	0.1318	0.6434
	7	29.82	5.6408	3342.7383	29.1824	0,1366	0,0548	0.5464	0.2666
	8	27.69	4.8536	3276.2744	25.1961	0,1582	0,0634	0.6328	0.3087
	9	23.43	4.0395	3986.0362	26.3612	0,1512	0,0606	0.6049	0.2951
	10	20.59	3.0369	1740.4539	14.2463	0,2798	0,1123	0.1119	0.5461
	11	18.46	2.6292	1558.9944	13.6490	0,2920	0,1172	0.1168	0.5700
	12	17.75	1.7840	1761.3060	9.2606	0,4304	0,1727	0.1721	0.8401

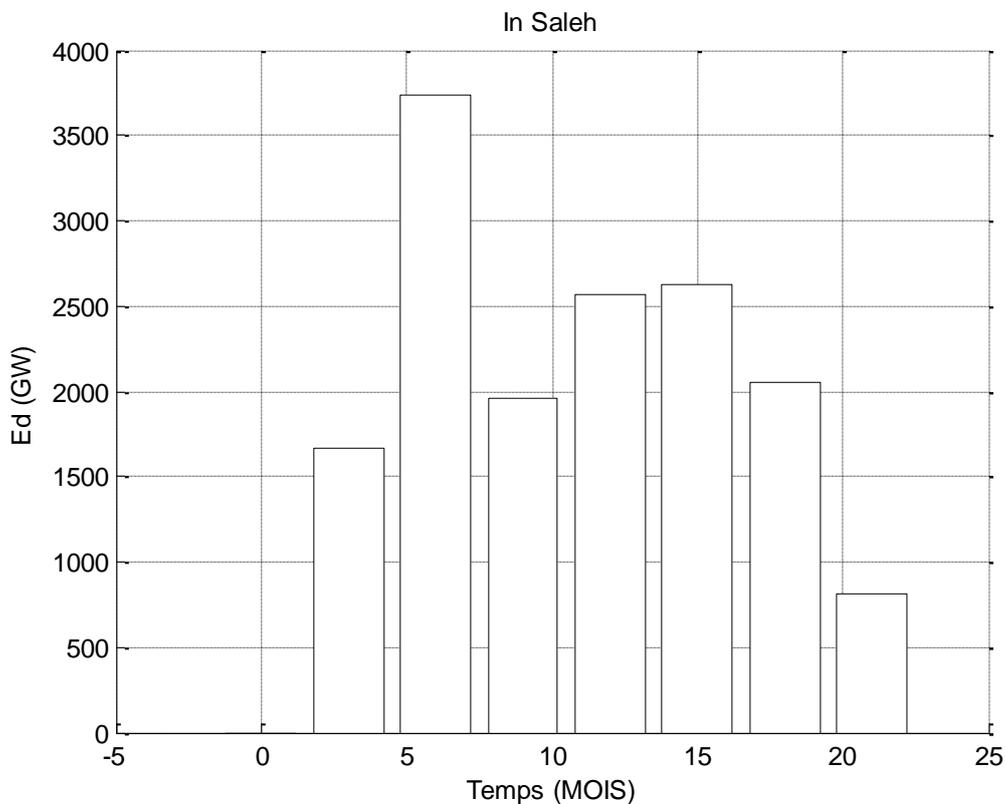


Figure 4. 7 présentation de l'énergie disponible en fonction de temps (In saleh)

Statistiques d'Oran :

Tableau 4. 9 Résultats statistiques des données de vent et puissance disponible et puissance de betz et d'énergies disponible d'Oran

La region	Le moi	Vm	puissance	P betz	Energie dispo	Eu1/Ed	Eu2/Ed	Eu3/Ed	Eu4/Ed
Oran	1	62.08	4.0676	2.4103	2.1115	0,5492	0,2204	0.3250	0.3684
	2	87.30	6.2103	3.6799	3.2237	0,4021	0,1613	0.4946	0.2413
	3	91.18	6.7775	3.0162	3.5183	0,1777	0,0713	0.4532	0.2211
	4	108.64	9.5827	5.6787	5.9745	0,3283	0,1317	0.2669	0.1302
	5	116.40	10.7869	6.3924	5.5996	0,2428	0,0991	0.2847	0.1389
	6	116.40	10.5914	6.2764	5.4982	0,3296	0,1323	0.2900	0.1415
	7	116.40	9.0476	5.5531	5.2159	0,1366	0,0548	0.3057	0.1491
	8	112.52	9.5835	5.6792	4.9748	0,1582	0,0634	0.3205	0.1563
	9	102.82	7.8202	4.6343	4.0597	0,1512	0,0606	0.3927	0.1678
	10	77.60	5.2845	3.1317	3.7432	0,2798	0,1123	0.4259	0.2078
	11	65.96	3.6768	1.1789	2.9087	0,2920	0,1172	0.5482	0.2674
	12	67.90	4.0306	2.3410	2.0507	0,4304	0,1727	0.7577	0.3323

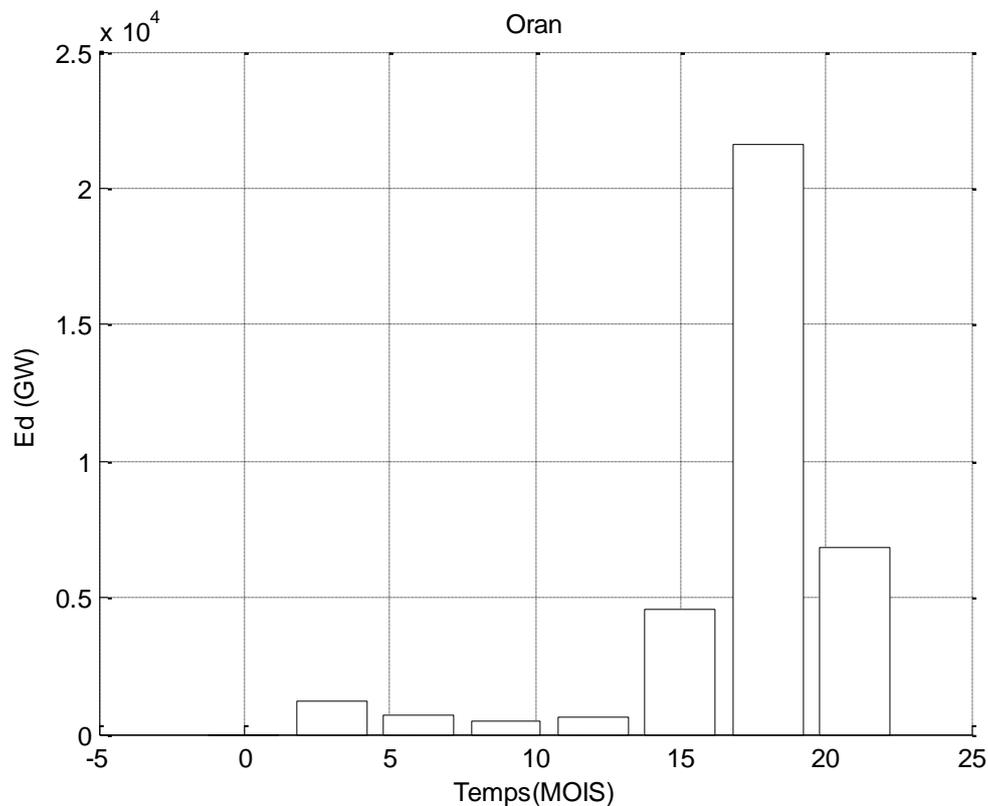


Figure 4. 8 présentation de l'énergie disponible en fonction de temps (oran)

Statistiques de Tébessa :

Tableau 4. 10 Résultats statistiques des données de vent et puissance disponible et puissance de betz et d'énergies disponible de Tébessa.

La region	Le moi	Vm	puissance	P betz	Energie dispo	Eu1/Ed	Eu2/Ed	Eu3/Ed
Tébessa	1	59.1	2158.4747	1279.0961	11.2048	0,5492	0,2204	0.1423
	2	59.1	2040.4265	1209.1418	10.591	0,4021	0,1613	0.1505
	3	63.04	1876.6179	1112.0698	9.7417	0,1777	0,0713	0.1636
	4	68.95	2458.1500	1456.6930	12.7607	0,3283	0,1317	0.1249
	5	68.95	1622.3981	961.3025	8.421	0,2428	0,0991	0.1893
	6	82.74	1957.6393	1153.1565	10.1104	0,3296	0,1323	0.1577
	7	84.71	2008.0483	1199.9542	10.4239	0,1366	0,0548	0.1529
	8	78.8	1778.3894	1048.8344	9.1799	0,1582	0,0634	0.1737
	9	57.13	950.1774	563.0671	4.9325	0,1512	0,0606	0.3232
	10	39.4	723.7919	429.9237	4.7574	0,2798	0,1123	0.3351
	11	43.34	1008.8817	737.8541	5.2371	0,2920	0,1172	0.3044
	12	47.28	1178.2850	698.2435	6.1166	0,4304	0,1727	0.2607

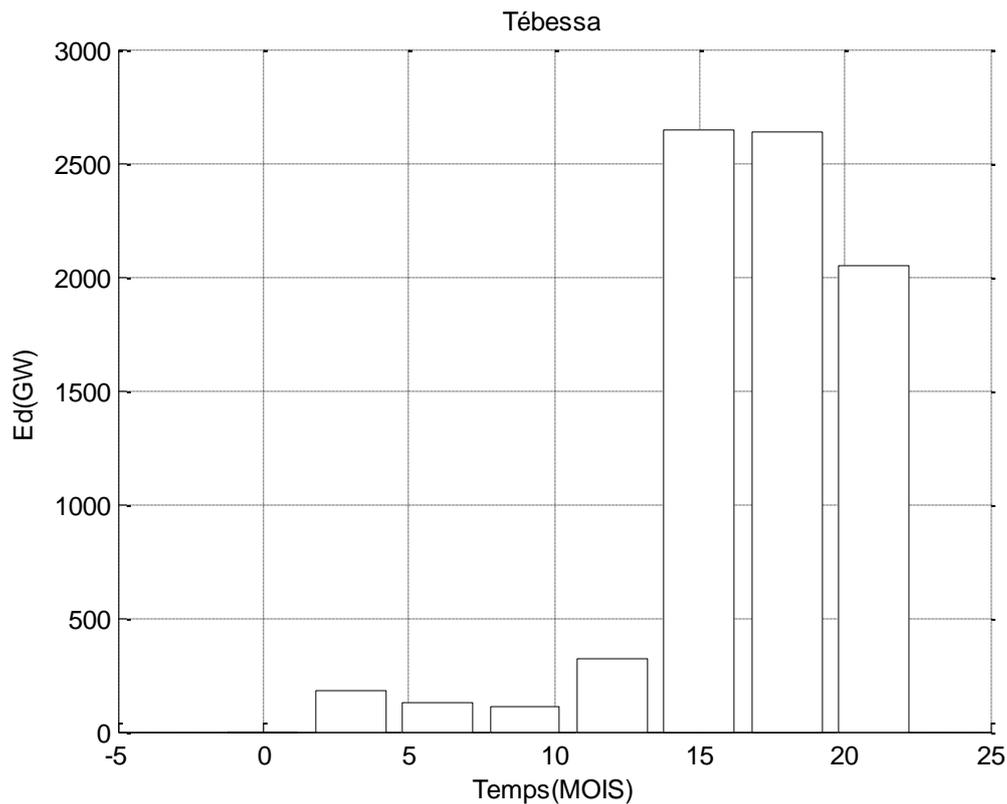


Figure 4. 9 présentation de l'énergie disponible en fonction de temps (Tébessa)

Statistiques de Tiaret :

Tableau 4. 11 Résultats statistiques des données de vent et puissance disponible et puissance de betz et d'énergies disponible de Tiaret.

La region	Le moi	Vm	puissance	P betz	Energie dispo	Eu1/Ed	Eu2/Ed	Eu3/Ed
Tiaret	1	167.58	17.7519	10.5197	8.2152	0,5492	0,2204	0.1941
	2	172.90	17.0287	10.6830	9.3584	0,4021	0,1613	0.1703
	3	164.92	12.9941	7.7008	6.746	0,1777	0,0713	0.2363
	4	164.92	12.1018	7.1713	6.2822	0,3283	0,1317	0.2538
	5	183.54	11.8633	7.0301	5.1584	0,2428	0,0991	0.3091
	6	186.20	11.9168	7.0619	6.1852	0,3296	0,1323	0.2578
	7	172.90	8.2298	4.8769	4.2711	0,1366	0,0548	0.3733
	8	178.22	8.1056	4.8034	4.2077	0,1582	0,0634	0.3789
	9	159.60	7.3254	4.3410	4.8027	0,1512	0,0606	0.3320
	10	119.70	6.3733	4.7769	3.3084	0,2798	0,1123	0.4819
	11	151.62	12.1159	7.7724	6.8086	0,2920	0,1172	0.2342
	12	146.30	11.9718	7.0944	6.2146	0,4304	0,1727	0.2565

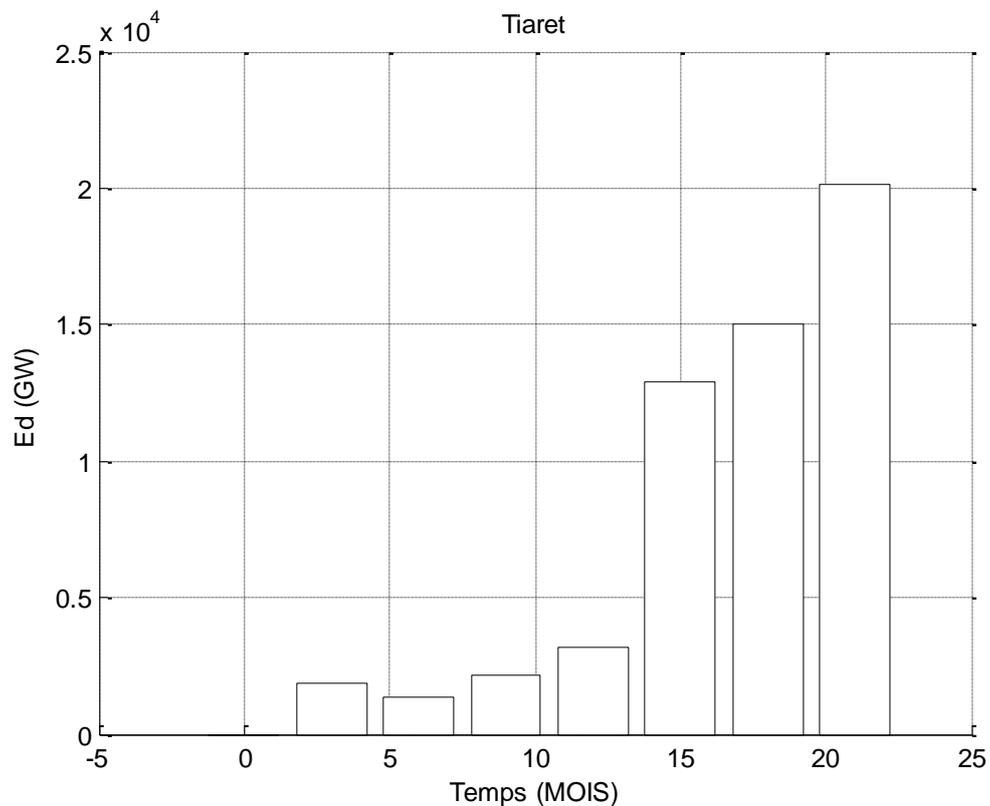


Figure 4. 10 présentation de l'énergie disponible en fonction de temps (Tiaret)

Tableau 4. 12 Tableau présente le nombre et le facteur de puissance de chaque éolienne.

La région	Consommation	Eu1/E d	Eu2/E d	Eu3/E d	Eu4/E d	Nombre des éoliens 1	Nombre des éoliens 2	Nombre des éoliens 3	Nombre des éoliens 4
Adrar	141.18	66.46	28.77	28.68	26.77	1609	32188	402	1610
Oran	143.38	45.95	44.44	40.78	21.01	1643	32690	408	1635
Djelfa	81.60	34.64	13.74	35.88	58.63	930	18605	233	931
In Salah	14.89	28.98	11.64	37.59	48.78	169	3395	43	170
Facteur		0.45	0.3	0.45	0.38				

4.15. Le coût d'éolienne

Le coût des éoliennes peut varier considérablement selon le type de l'éolienne et le coût des matières premières (acier). La variation peut être de 25-30% du prix. Cette différence n'est pas négligeable car le coût total d'achat des éoliennes représente généralement 74% du coût total du projet. Le coût de l'éolienne peut être déterminé comme suit:[51]

$$C_{wt} = C_{spe} P_n \quad (36)$$

Où P_n est la puissance nominale et C_{spe} est le coût spécifique des éoliennes. Elle est donnée par:

Tableau 4. 13 le coût spécifique.

P_r (kW)	Coût spécifique(\$/ kW)
<10	3000
10–20	2200–2900
20–200	1500–2300
200>	1000–1600

4.16. RESULTATS DE SIMULATION DES DONNEES

Les histogrammes ci-dessus (Figures 4.5, 4.6...et 4.11) représentent énergie disponible (Ed) des régions étudiées (Adrar, oran, hassirmel, In Saleh, Djelfa, Tébessa, Tiaret) durant les années d'observations utilisées (1977-1988). Le repère des x décrit les 12 mois de l'année. Le repère des y décrit énergie disponible . En remarque dans ces figures :

Une courbe représentant l'évolution du potentiel éolien, c'est-à-dire la puissance du vent, au fil du temps, avec des variations saisonnières. L'interprétation générale de cette courbe peut être la suivante :

L'évolution du potentiel éolien avec le temps et les variations saisonnières observées dans la courbe sont des phénomènes courants. La compréhension de ces variations est essentielle pour optimiser la production d'énergie éolienne et pour la planification de projets dans cette industrie. Le potentiel éolien augmente et diminue en fonction des saisons. Cela est généralement observé car les conditions météorologiques varient tout au long de l'année. Par exemple, dans de nombreuses régions, les vents peuvent être plus forts en hiver en raison des conditions météorologiques dominées par les systèmes de haute pression. En revanche, les vents peuvent

être plus faibles pendant les périodes estivales lorsque les systèmes de basse pression prédominent.

Il convient de noter que le potentiel éolien peut également être influencé par des facteurs géographiques spécifiques. Par exemple, la proximité d'un relief montagneux, la présence de collines ou de vallées, la distance par rapport à la côte ou la situation dans une région particulièrement venteuse peuvent tous affecter les caractéristiques du vent.

4.17. Discussion des résultats et la synthèse :

	Cout parc 1	Cout parc 2	Cout parc 3	Cout parc 4
Adrar	35,39 8,000\$	48,282,000\$	28,944,000\$	35,420,000\$
In Saleh	3,718,000\$	5,092 ,500\$	3,096,000\$	3,740,000\$
Djelfa	20,460,000\$	27,907,500\$	16,776,000\$	20,482,000\$
Oran	36,146,000\$	49,035,000\$	29,376,000\$	35,970,000\$

Pour analyser ce tableau, nous pouvons voir que toutes les régions mentionnées ont leur consommation d'énergie électrique spécifiée. Nous avons également des valeurs pour chaque région concernant les facteurs Eu/Ed (Eu représente la production d'énergie éolienne et Ed la consommation d'énergie). De plus, les nombres d'éoliennes pour chaque critère sont donnés, ainsi que les coûts correspondants (E1, E2, E3 et E4).

Maintenant, nous allons déterminer la meilleure éolienne pour chaque site, en fonction des critères spécifiés :

- Pour la région Adrar on a : - $Eu1/Ed = 66.46\%$ - $Eu2/Ed = 28.77\%$ - $Eu3/Ed = 28.68\%$ - $Eu4/Ed = 26.77\%$

Pour cette région, la meilleure éolienne serait la "E1" étant donné le pourcentage élevé d'électricité produite par cette éolienne par rapport à la consommation totale, ainsi que son coût relativement bas.

- Pour la région Oran on a : - $Eu1/Ed = 45.95\%$ - $Eu2/Ed = 44.44\%$ - $Eu3/Ed = 40.78\%$ - $Eu4/Ed = 21.01\%$

Pour cette région, la meilleure éolienne serait la "E2" en raison de sa part élevée d'électricité produite par rapport à la consommation totale. Bien que son coût soit élevé, cette éolienne assure une production d'électricité plus stable.

- Pour la région Djelfa on a : - $Eu1/Ed = 34.64\%$ - $Eu2/Ed = 13.74\%$ - $Eu3/Ed = 35.88\%$ - $Eu4/Ed = 58.63\%$

Pour cette région, la meilleure éolienne serait la "E4" en raison de sa part élevée d'électricité produite par rapport à la consommation totale. Bien que son coût soit élevé, cette éolienne offre une production d'électricité significativement plus élevée par rapport aux autres éoliennes.

- Pour la région In Salah on a : - $Eu1/Ed = 28.98\%$ - $Eu2/Ed = 11.64\%$ - $Eu3/Ed = 37.59\%$ - $Eu4/Ed = 48.78\%$

Pour cette région, la meilleure éolienne serait également la "E4" en raison de sa part élevée d'électricité produite par rapport à la consommation totale. Son coût est aussi le plus bas parmi les autres éoliennes.

En conclusion, la meilleure éolienne pour chaque site est la suivante : - Adrar : E1 - Oran : E2 - Djelfa : E4 - In Salah : E4

La synthèse :

	Eolienne 1	Eolienne2	Eolienne3	Eolienne4
Adrar	√			
In Saleh				√
Djelfa				√
Oran		√		

4.18. Conclusion:

Ce travail présente une approche pratique d'aide pour l'exploitation des systèmes éoliens adaptés aux sites Algériens . Après l'évaluation des caractéristiques du vents des sept sites météorologiques repartis sur le territoire algérienne, nous avons estimé l'énergie que pourra fournir un système éolien donné sur les sept sites . Cette estimation qui a été effectuée pour trois types d'éoliens donne un choix des systèmes éoliens les mieux adaptées pour les sept sites météorologiques algériens, cette estimation pourra etre effectuée pour d'autres types d'éolien et elle constitue un outil d'aide à la décision aux choix du système éolien approprié.

Conclusion Générale

Conclusion générale.

L'énergie éolienne est l'une des énergies dans l'ancienne énergie de la Terre est considéré comme respectueux de l'environnement, pour cela, dans cette étude on veut de rechercher les moyens d'investir sur cette énergie dans notre pays l'Algérie.

L'intérêt de notre travail se base sur le choix de systèmes éolien le plus adapté aux sites algériens, A cet effet nous avons détaillé une étude sur l'origine de vent, la définition de la machine éolienne qui transforme l'énergie cinétique du vent en une énergie mécanique, nous présenterons aussi les différents types et classes d'éoliennes, leurs caractéristiques, leurs différents composants et leurs avantages et les inconvénients

Une description a été faite du logiciel Matlab dans le but de permettre de choisir la meilleure machine éolienne adaptée pour les sept sites choisis dans l'étude

Adrar, In Saleh, Hassi Rmel représente le Sud

Oran représente le Nord

Tiaret, Djelfa représente l'ouest

Tébessa représente le milieu

Nous avons obtenu des résultats très satisfaisant :

Pour la région d'Adrar on voit que la meilleure éolienne est l'éolienne 1 avec une ferme qui contient 1609 éoliennes

Pour les région de Djelfa et In Saleh on a trouve que l'éolienne 4 c'est la meilleure parmi les autres éoliennes

Pour la région d'Oran on a obtenu que la meilleure éolienne c'est l'éolienne 2

Cette estimation pourra être effectuée pour d'autres types de machines et plusieurs hauteurs au-dessus du sol et elle constitue un outil d'aide à la décision aux choix du système éolien approprié.

Annexe

Adrar

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	ans	Fré	K	C
0	5,1	4,9	5,7	5,1	4,9	4,5	5,8	5,7	5,9	5,1	5,3	5	5,2	17	2.23	7.3
3	5,2	5,2	5,9	5,2	5,3	4,8	6	5,9	5,9	5,2	5,3	5	5,4	23.8	2.2	7.9
6	5,1	5,3	5,8	5,3	5,4	5,2	6,1	5,9	5,7	4,8	5	5	5,4	16.1	2.21	7.4
9	5,5	5,9	7,6	7	7,9	7,4	8,6	8,1	7,6	6,1	6,4	5,4	6,9	8.2	2.27	7
12	6,2	6,4	7,4	6,6	6,7	6,3	6,9	6,6	6,3	6	6,6	6,2	6,5	11.4	2.04	6.6
15	6,3	6,4	7	6,9	6,9	6,5	6,3	6,2	6,3	6,2	6,5	6,3	6,5	8.4	1.83	6.6
18	5,1	5,3	6,2	6,2	6,3	6,3	6,5	5,8	5,9	5,3	5	4,9	5,8	8.3	1.91	6.4
21	5,1	4,9	5,5	4,8	4,5	4,3	5,4	5,1	5,4	4,9	5,4	5,1	5	6.8	2	6.2
24	5,4	5,5	6,4	5,9	6	5,7	6,5	6,2	6,1	5,5	5,7	5,4	5,9			

Djelfa

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Ans	fré	K	C
0	2,8	2,8	2,3	2,3	2,1	1,5	1,3	1,1	0,9	1,5	2,1	2,5	1,9	9.8	1.31	3.1
3	2,8	2,9	2,4	2,4	2,1	1,5	1,2	1	0,9	1,7	2,2	2,7	2	5.1	0.53	0.3
6	2,7	2,7	2,1	2,3	2,1	1,6	1,2	0,9	0,8	1,5	2,3	2,5	1,9	5.6	0.62	0.8
9	3,1	3,4	3,7	4,1	4,3	3,5	3,5	3	2,4	2,8	2,9	2,9	3,3	7.2	0.93	2.3
12	4,7	5,2	5,2	5	4,9	4,3	4,3	4,1	3,7	3,8	4,2	4,4	4,5	22.6	1.79	4.4
15	4,9	5	5,3	5,4	5	4,7	4,4	4,4	3,7	4	4,2	4,4	4,6	6.6	0.86	1.8
18	2,9	3,2	4	4,4	4,2	3,9	3,8	3,5	2,6	2,2	2,2	2,7	3,3	13.4	1.54	4.6
21	2,6	2,7	2,5	2,7	2,4	2,2	2	1,7	1,2	1,6	2,1	2,5	2,2	29.7	1.91	5.4

Annexe

In Saleh

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	ans	fré	K	C
0	2,4	2,5	3,8	2,6	3	3,2	4,3	4,1	4,1	3,4	3,1	2,8	3,3	14.6	1.62	4.8
3	2,2	2,6	3,7	2,8	3,2	3,1	4,3	4,1	4,3	3,3	2,9	2,7	3,3	32.7	2.04	6.5
6	2,3	2,6	3,5	2,8	3,4	3,2	4,4	4,1	4,1	3,2	2,9	2,5	3,1	18.8	1.84	6.1
9	3,4	4,2	5,6	4,8	5,7	5,1	6,4	6	6,3	5,3	5,1	3,8	5,1	6.1	1.24	2.7
12	4,6	4,8	5,6	4,7	4,9	4,5	5,3	5,3	5,3	5	5,2	4,7	5	6.6	1.16	2.9
15	4,1	4,4	5,2	4,6	4,5	4,2	4,4	4,4	4,2	4,1	4,6	4,1	4,4	7.6	1.22	3.5
18	2,4	2,8	4,1	3,6	3,7	3,8	3,9	3,9	3,3	2,9	2,6	2,5	3,3	7.1	1.17	3.2
21	2,3	2,3	3,5	2,5	2,7	2,9	3,5	3,5	3,7	2,9	2,7	2,6	2,9	6.4	1.13	2.7
24	3	3,3	4,4	3,5	3,9	3,7	4,6	4,4	4,4	3,7	3,6	3,2	3,8			

HassiRmel

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Ans	Fré	K	C
0	2	2,8	2,9	3,4	4,1	3,9	3,5	2,7	1,6	2	2,1	2,3	2,8	20	1.81	5.9
3	2	2,7	2,9	3,2	3,9	3,8	3,5	2,2	1,4	2	2,2	2,2	2,7	15.9	1.94	5.2
6	1,8	2,5	2,7	3,1	4,1	3,9	3,6	1,9	1,3	1,9	2,2	2,3	2,7	13.6	1.77	4.8
9	2,9	4,2	5,1	5,3	6,2	6,1	5,9	5,1	4,6	3,9	3,5	3,5	4,6	8	1.36	3.7
12	4,8	5,6	5,5	5,4	5,7	5,9	5,3	4,8	4,4	4,6	4,2	4,9	5,2	12.5	1.5	4.4
15	4,7	5,6	5,5	5,7	5,5	5,7	5,3	4,2	4,5	4,7	4,2	4,8	5,1	11.2	1.35	4.5
18	2,3	3,5	3,9	4,6	5,1	5,6	5	3,2	2,9	2,7	2,4	2,4	3,6	9	1.31	4.7
21	2	2,8	3,1	3,3	3,8	4,3	3,6	2,6	1,6	2,2	2	2,2	2,8	9.7	1.44	4.9
24	2,8	3,7	3,9	4,2	4,8	4,9	4,4	3,2	2,5	2,9	2,8	3	3,7			

Oran

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Ans	fré	K	C
0	2,8	3,1	2,7	3	2,8	2,6	2,6	2,4	2,2	2,2	2,3	2,8	2,6	21.7	2.81	6.4
3	2,9	3,1	2,8	2,9	2,8	2,4	2,3	2	1,8	2,1	2,3	2,7	2,5	13.7	1.57	4.1
6	2,7	2,9	2,7	2,7	2,8	2,5	2,2	2,1	1,7	2	2,4	2,7	2,4	10	1.54	3.7
9	3,3	3,6	4,2	4,8	4,9	4,2	3,8	3,6	3,1	3,3	3,2	3,2	3,8	3.4	0.98	1.6
12	5,3	5,6	5,8	6,6	6,8	6,9	6,5	6,3	5,8	5	4,7	5,1	5,9	7	1.34	2.2
15	5,7	6,5	6,8	7,5	7,8	7,8	7,7	7,7	7,3	6,6	5,7	5,6	6,9	20.7	1.84	5.3
18	3,2	4,5	4,7	5,6	6	6	6	5,8	5,3	4	3,4	3,5	4,8	19.4	1.75	6.9
21	3	3,5	3,2	3,6	3,5	3,3	3,3	3,2	2,8	2,5	2,6	3	3,1	4.2	1.18	3.7
24	3,6	4,1	4,1	4,6	4,7	4,5	4,3	4,1	3,8	3,4	3,3	3,6	4			

Annexe

Tiaret

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Ans	fré	K	C
0	6,3	6,3	4,8	4,5	3,8	3,6	3,2	2,8	3,1	3,6	5,5	5,2	4,4	7	1.49	4.8
3	6,3	6,4	5,1	4,9	4	3,6	2,9	2,7	2,8	3,8	5,4	5,4	4,4	5	1.31	3.4
6	6,4	5,9	5	4,5	3,4	3,6	2,9	2,6	2,7	3,9	,3	5,5	4,3	8.4	1.91	5.5
9	6,4	6,6	6,2	6,1	5,4	5,4	3,9	3,8	4,2	4,8	6,2	5,8	5,4	6.3	1.19	6
12	8,3	8,4	6,9	6,9	6,4	5,9	4,9	4,8	5,1	5,9	7,3	7,4	6,5	14.8	1.48	7.7
15	8,1	8	7,7	7,3	7,1	7,4	6,4	6	6,3	6,2	7,7	7,1	7,1	13.2	1.69	6.3
18	6,3	6,5	6,2	6,2	6,9	7	6,5	6,7	6	4,5	5,7	5,5	6,2	26.6	1.64	8
21	5,7	6,2	4,9	4,6	4,1	4,1	3,9	3,8	3,2	3,9	5,4	5,7	4,6	18.7	2.18	7.2

Tébessa

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Ans	fré	K	C
0	2,2	2	1,8	2,1	1,8	1,8	1,6	1,7	1,3	1,1	1,7	1,9	1,8	9.7	1.4	3.3
3	2,2	2	1,7	1,8	1,5	1,4	1,3	1,3	0,9	1,1	1,6	1,8	1,6	9.9	1.35	3
6	2,2	1,9	1,6	1,8	1,4	1,5	1,1	1,1	1	1,1	1,5	1,8	1,5	10.6	1.32	3.1
9	2,8	2,7	2,7	3,4	2,7	2,5	2,3	2	1,8	1,7	2,3	2,3	2,4	7.2	1.12	2
12	4,7	4,6	4,4	4,8	3,9	3,7	3,7	3,8	3,3	3,2	3,7	3,8	4	13	1.24	3.5
15	4,7	4,7	4,5	4,8	4,1	4,2	4,3	4,1	3,6	3,6	3,7	3,9	4,2	11.2	1.23	3.5
18	3	3	3,2	3,5	3,5	4,2	4,3	4	2,9	2	2,2	2,4	3,2	19.7	1.54	4.4
21	2,3	2,2	2,1	2,5	2,2	2,6	2,3	2,4	1,8	1,7	1,7	2,2	2,2	18.7	1.66	5

Références bibliographiques

- [1] M.M.AyiagnigniGbambié, 'Analyse Statistique de Données de Vent Côtière au Nord du Golfe de Guinée', Rapport de Master, CIPMA/FAST/UAC/2012, pp 1-43.
- [2] S.M.ElMoustapha, M.L.Ndiaye, P.A.Ndiaye, A.K.O.Mahmoudet I.Youm, 'Influence des Paramètres Météorologiques sur la Production d'un Aérogénérateur : Applications sur le Littoral Sahélien', Revue des Energies Renouvelables, Vol.17, N°1, pp. 43– 54, 2014
A.M.Houekpohéha, B.Kounouhéwa, B.N.Tokpohozinet N.Awanou, 'Estimation de la Puissance Énergétique Éolienne à Partir de la Distribution de Weibull sur la Côte Béninoise à Cotonou dans le Golfe de Guinée', Revue des Energies Renouvelables, Vol. 17, N°3, pp. 489– 495, 2014
- [3] www.energies-renouvelables.org consulté le 06/03/2023
- [4] Nicolas LAVERDURE « Sur l'intégration des générateurs éoliens dans les réseaux faibles ou insulaires » thèse de doctorat de L'INPG Spécialité Génie Électrique Institut national polytechnique de décembre 2005
- [5] Gamme de la société REpower , sur le site repower.fr. Université Ahmed Draia-ADRAR, 2017.
- [6] Énergie éolienne, Théorie, conception et calcul pratique des installations, Désiré Le Gourières, Édition EYROLLES, 1980
- [7] N. Laverdure, D. Roye, S. Bacha, R. Belhomme, "Technologie des systèmes éoliens – intégration dans les réseaux électriques", la Revue 3EL, no. 39, 2004
- [8] <http://ooxygene.alwaysdata.net/eolienne.html> consulté le 25/03/2023
- [9] C.Boris et G. Christophe « Énergie éolienne, fonctionnement, contraintes et perspective sur l'avenir <http://membres.lycos.fr/tipemaster/TIPE/Eole.html>
- [10] C. Benoudjit « étude pour la conception d'un banc d'essais pour énergie éolienne » : thèse de magistère de l'université de Batna, juin 2004
- [11] Frédéric POITIERS, « Étude et commande de génératrices asynchrone à double alimentation reliée au réseau » thèse de doctorat de l'université de Nantes, 2003
- [12] N. KASBADJI MERZOUK « Évaluation du Gisement énergétique éolien contribution à la détermination du profil vertical de la vitesse de vent en Algérie » thèse de doctorat de l'université de Tlemcen, 2006
- [13] L. KHTTACHE « Étude et commande d'un système Éolien à base d'une Machine Électrique Double Alimentée » Thèse de magister université de Batna ,2007
- [14] O. GERGAUD « Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur » thèse de doctorat de l'école Normale supérieure de CACHAN, 2002
- [15] Chouicha, A. "Évolution du pluralisme syndical." *L'Algérie face à la mondialisation. Dakar: Codesria* (2008): 277-300.
- [16] T. Grignoux, R. Gibert, P. Neau, C. Buthion, « Éoliennes en milieu urbain - État de l'art », janvier 2006, pp. 1-129
- [17] J. Chen, C. Nayar, L. XU, « Design and FE analysis of an outer-rotor PM

Références bibliographiques

- generator for directly coupled wind turbine applications », proceeding of the IEEE industry applications conference, New York, USA, 1998, vol 1, pp. 387-394.
- [18] S El Aimani, « Modélisation des différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension », thèse de doctorat, l'université des sciences et technologies de Lille (USTL).
- [19] R. Michaux, P. Letellier, « Les machines discoïdes à champs axial dans les systèmes de production électrique », revue de l'électricité et de l'électronique, N° 3, mars 1997, pp. 37-42.
- [20] Bernard Multon, Gael Robin, Marie Ruellan, Hamid Ben Ahmed, « 3ème situation énergétique mondiale à l'aube du millénaire. Perspectives offertes par les ressources renouvelables », revue 3Ei No36 mars 2004, pp. 1-14.
- [21] . Ben Ahmed, « Généralités sur l'énergie éolienne et convertisseurs associés et convertisseurs associés », séminaire électrotechnique de l'académie de Rennes, 9 mars 2004
- [22] .W. Smith, J.A. Taylor, D. L. Books, R.C. Dugan, « Interconnection studies for wind generation », conference papers IEEE2004, paper N° 04 C3, pp. C3-1.C3-8.
- [23] R. Ramakumar, Albrecht Naeter, « Role of renewable energy in the development and electrification of remote and rural areas », IEEE – PES general meeting Denver, Colorado, USA, June 6 à 12, 2004.
- [24] R. Ramakumar, P. Chiradeja, « Distributed generation and renewable energy systems 3 », 2002. 37th intersociety energy conversion engineering conference, IECEC 2002 paper N° 20027, pp. 716-724.
- [25] World Wind Energy Association WWEA. Rapport Mondial 2009 sur l'Energie Eolienne. Date de publication : Mars 2010
- [26] Pierre-Philippe Kastendeush, « la mesure du vent : convections, instrument et donnée », revue géographique de l'est [en ligne], vol.40/3/2000, mise en ligne le 2 août 2013.
- [27] Kasbadji Merzouk « Atlas vent de l'Algérie, Résultats Préliminaires ». Revue des Energies Renouvelables, numéro spéciale JNVER99, pp 209-214, 1999.
- [28] N.Kasbadji. MERZOUK « Evaluation du gisement énergétique éolien contribution à la détermination du profil vertical de la direction du vent en Algérie » thèse de Doctorat, l'Université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen, 2006.
- [29] HAMMOUCHE, R. Atlas vent de l'Algérie/ONM.
[30] <https://energies.wallonie.be> consulté le 27/04/2023
- [31] Algiers : Office des publications Universitaires (OPU), 1990

Références bibliographiques

- [32] G. Solari « Wind Speeds Statistics », Collège on atmospheric Boundary Layer and Air Pollution. ICTP, Trieste, Italie 1994
- [33] GENIVAR, Analyse des vents et des surcotes de tempêtes. projet de réhabilitation dubriselames à l'entrée du port de mer de la compagnie minière Québec cartier Société en commandite 200 .
- [34] -[https:// ar.m .wikipedia.org/djelfa](https://ar.m.wikipedia.org/djelfa)/consulé le 05/05/2023
- [35] -[https:// ar.m .wikipedia.org/oran](https://ar.m.wikipedia.org/oran)/consulé le 05/05/2023
- [36] -[https:// ar.m .wikipedia.org/adrar](https://ar.m.wikipedia.org/adrar)/consulé le 05/05/2023
- [37] -[https:// ar.m .wikipedia.org/tebessa](https://ar.m.wikipedia.org/tebessa)/consulé le 05/05/2023
- [38] -[https:// ar.m .wikipedia.org/tiaret/](https://ar.m.wikipedia.org/tiaret) consulé le 05/05/2023
- [39] -[https://www.creuse.gouv.fr/La télésurveillance/](https://www.creuse.gouv.fr/La_t%C3%A9l%C3%A9surveillance/) consulté le 09/05/2023
- [40] -[https://www.creuse.gouv.fr/La maintenance/](https://www.creuse.gouv.fr/La_maintenance/) consulté le 09/05/2023
- [41] -[https://www.creuse.gouv.fr/consignrs de sécurité/](https://www.creuse.gouv.fr/consignrs_de_s%C3%A9curit%C3%A9/) consulté le 11/05/2023
- [42] -[https://www.creuse.gouv.fr/sécurité d'incendie/](https://www.creuse.gouv.fr/s%C3%A9curit%C3%A9_d%27incendie/) consulté le 12/05/2023
- [43] -Mémoire présenté dans le cadre du programme de maîtrise en ingénierie en vue de l'obtention du grade de maître en science appliquées "évaluation du potentiel éolien d'une par modélisation sur ordinateur : comparaison des résultats du logiciel anémoscope avec les données de référence en fonction du relief ", Présenté par : RICHARD VAGLIANI le Février2012.
- [44] [https://www. techno-science.net](https://www.techno-science.net) Les études de sols
- [45] Mémoire présente par M.BENMEJAHED.N.CHAZALI,Z.BOUZID,A.BENMANSOUR,S.M.BOU DIA choix du site et dimensionnement d'une installation éolienne dans le nord algérien et son effet sonore ».
- [46] A.Betz, "WindEnergieundihreAusnutzungdurchWindmuehlen"Vandenhoecket Ruprecht,Gottingen1926
- [47] [https://www.éolienne-herags.com /](https://www.éolienne-herags.com/) consulté le 14/06/2023
- [48] <https://energieplus-lesite.be/theories/eolien8/rendement-des-eoliennes/> consulté le 14/06/2023
- [49] [https://eolienneshop.com/products/leolienne-savonius /](https://eolienneshop.com/products/leolienne-savonius/) consulté le 14/06/2023
- [50] M. Kasbadji, —Evaluation du gisement énergétique éolien contribution à la détermination du profil vertical de la vitesse du vent en Algérie, || Dr. Univ. Abou BekrBelkaid Tlemcen, 2006.
- [51] S. Diaf and G. Notton, —Technical and economicanalysis of large-scalewindenergy conversion systems in Algeria,||Renew. Sustain. EnergyRev., vol. 19, pp. 37–51, Mar. 2013.

Références bibliographiques
