

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur  
et de la Recherche Scientifique

Université Akli Mohand Oulhadj - Bouira -

X•O٧•EX •KIIε C:K:IA #IK•X - X:OEO:t -



وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
جامعة أكلي محمد أولحاج  
- البويرة -

**FACULTE DES SCIENCES ET DES SCIENCES APPLIQUEE**

**DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE**

## **PROJET DE FIN D'ETUDES**

Présenté pour l'obtention du Diplôme de Master en **Génie Mécanique**  
Option : **Énergétique**

*Thème :*

Analyse des performances énergétique et exérgétique des  
éoliennes

**Présenté par :**

Ouali Sofiane

Lounis Ishaq

**Le jury est composé de :**

**Président :** Merzouk M.

**M.A.A**

**Univ. Bouira**

**Promoteur :** Baghdadi F.

**M.A.A**

**Univ. Bouira**

**Examineur :** Bensalem C.

**M.C.B**

**Univ. Bouira**

*2021/2022*

## *Remerciements*

*Nous tenons tout d'abord à remercier le bon DIEU le tout puissant et miséricordieux qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce modeste travail.*

*En second lieu, nos très vifs et sincères remerciements vont à notre encadreur Madame **Baghdadi.F** ; qui nous a proposé cette thématique, d'avoir accepté de nous encadrer et orienter.*

*Nos vifs remerciements vont également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche en acceptant d'examiner notre travail et de l'enrichir par leurs propositions.*

*Nos remerciements vont aussi à nos chers parents qui ont toujours été là pour nous et qui nous ont donné un magnifique modèle de labeur et de persévérance. Nous espérons qu'ils trouveront ; dans ce travail ; toute notre gratitude, notre reconnaissance et notre amour.*

*Enfin, nous tenons autre fois à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.*

*Sofiane et Ishaq*

*Du profond de mon cœur je dédie ce travail :*

*A mes chers parents en témoignage de leurs affections,  
leurs sacrifices et leur encouragement*

*Que dieu les garde et les protège*

*A mes sœurs, mes sources de bonheur.*

*A celle sans qui ce travail n'aurait pas été le même, mon  
binôme Sofiane*

*A tous mes frères*

*A tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour que  
ce projet soit réalisé*

*A toute personne de ma promotion que je leurs souhaite  
plein de succès dans le monde professionnel*

*A tous ceux que j'aime et qui m'aiment.*

*Ishaq*

# *Dédicaces*

*C'est grâce à Dieu tout puissant, qui m'a donné la force et la volonté que j'ai pu achever ce modeste travail et je tiens à le dédier particulièrement.*

*Aux êtres les plus chers à mon cœur, mes parents, qui ont œuvré pour ma réussite, pour toute leur assistance et leur présence pour m'aider à avancer dans la vie. Merci pour les valeurs nobles, l'éducation et le soutien permanent venu de vous. Quoi que je fasse je ne pourrais jamais vous récompenser et A mes très chères sœurs.*

*A mon binôme Lounis Ishaq ainsi qu'à toute sa famille*

*Que toute personne m'ayant aidé de près ou de loin, trouve ici l'expression de ma reconnaissance.*

*Sofiane*

# Sommaire

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

## Chapitre I : Revue bibliographique sur l'énergie éolienne

I.1 Introduction.....	3
I.2 Historique.....	4
I.3 Bilan énergétique mondial .....	5
I.4 Energie éolienne .....	7
I.5 Types d'aérogénérateurs.....	7
I.5.1 Aérogénérateur à axe vertical .....	8
I.5.2 Aérogénérateur à axe horizontal .....	9
I.6 Constituants d'une éolienne .....	10
I.6.1 Principe .....	10
I.6.2 Constitution.....	10
I.6.3 Caractéristiques technologiques des éoliennes .....	12
I.7 Control de la puissance fournie par une éolienne .....	13
I.7.1 Au niveau de la turbine .....	14
I.7.2 Au niveau du générateur .....	14
I.7.3 Le système de commande d'un générateur :.....	14
I.8 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne .....	14
I.8.1 Les avantages .....	14
I.8.2 Les inconvénients.....	15
I.8 Conclusion .....	16

## Chapitre II : analyse générale sur les éoliennes

II.1 Introduction .....	17
II.2 Systèmes de régulation de vitesse d'une éolienne.....	18
II.2.1 Système à décrochage aérodynamique " Pitch " .....	18
II.2.2 Système à décrochage aérodynamique "Stall": .....	18

II.2.3 Système à décrochage aérodynamique "Active Stall" .....	19
II.3 Le coefficient de vitesse .....	19
II.4 Configuration des éoliennes .....	20
II.4.1 Éoliennes à vitesse fixe.....	21
II.4.2 Éoliennes à vitesse variable .....	21
II.5 Intérêt de la vitesse variable .....	21
II.5.1 Le coefficient de moment statique.....	22
II.5.2 Le coefficient de moment dynamique .....	22
II.6 Coefficient de Puissance $C_p$ .....	23
II.7 La puissance moyenne récupérable [24] .....	23
II.8 Régulation mécanique de la vitesse de l'éolienne .....	26
II.9 Coefficients de force qui s'exercent sur le rotor.....	28
II.10 Vitesse spécifique de l'éolienne .....	29
II.11 Modèle d'ajustement .....	29
II.11.1 Distribution de Weibull : .....	29
II.11.2 Distribution hybride de Weibull .....	30
II.11.3 Distribution de Rayleigh.....	30
II.12 Limite de Betz .....	30
II.13 Conversion d'énergie éolienne .....	32
II.14 Capacité éolienne.....	33
II.15 Facteur de capacité de l'éolienne .....	34
II.16 Facteurs de capacité et production projetée.....	35
II.17 Description d'une aile ou d'une pale d'éolienne .....	35
II.18 Triangle des vitesses sur une pale d'éolienne.....	36
II.19 Conclusion .....	38
 <b>Chapitre III : évaluation énergétique et exérgétique d'une éolienne</b>	
III.1 Introduction .....	39
III.2 Analyse thermodynamique.....	40

III.3 Méthodes d'analyses .....	40
III.3.1 Analyse énergétique .....	41
III.3.2 Analyse exergetique .....	44
III.3.2.1 C'est quoi l'exergie.....	45
III.3.3 La différence entre exergie et énergie .....	46
III.4 Le concept d'exergie et la signification de l'analyse exégétique .....	47
III.5 Exergie et information.....	49
III.6 Pertes exergetiques .....	49
III.7 Efficacité exergetique.....	50
III.8 L'exergie comme mesure de la qualité .....	50
III.9 Potentiel éolien d'Adrar .....	52
III.10 Puissance .....	55
III.11 Evolution des paramètres météorologiques dans le site adrar en 2014.....	56
III.11.1 Évolution de la température sur le site d'Adrar en été et en hiver.....	56
III.11.2 Évolution de la densité sur le site d'Adrar en été et en hiver .....	57
III.11.3 Evolution de la pression sur le site d'Adrar en été et en hiver.....	58
III.11.4 Evolution de l'humidité dans le site d'Adrar en été et en hiver .....	59
III.11.5 Vitesse du vent dans le site d'Adrar en été et en hiver : .....	60
III.12Rendement énergétique .....	61
III.13 Rendement exergetique .....	62
III.14 Discussion des résultats énergétique :.....	63
III.15 Énergie produite annuelle.....	64
III.15.1 Les Pertes énergétiques .....	66
III.16 Discussion des résultats exergetique :.....	67
III.17 Conclusion.....	67
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES .....	67
ANNEXES .....	38
Bibliographie.....	39

## Liste des figures

<b>FIGURE I.1</b> L'UTILISATION DE L'ENERGIE EOLIENNE PAR L'HOMME EST ANCIENNE. ....	4
<b>FIGURE I.2</b> PRODUCTION MONDIALE DE L'ENERGIE EOLIENNE [1]. ....	5
<b>FIGURE I.3</b> LES DIX PREMIERS PRODUCTEURS DE L'ENERGIE D'EOLIENNE DANS LE MONDE (MW). 5	
<b>FIGURE I.4</b> CARTE ANNUELLE DE LA VITESSE MOYENNE DU VENT A 10M DU SOL (M/S) EN ALGERIE, [5]. ....	6
<b>FIGURE I.5</b> LA PREMIERE FERME EOLIENNE EN ALGERIE. ....	6
<b>FIGURE I.6</b> REPRESENTATION DES CONCEPTS D'EOLIENNES A AXE HORIZONTAL ET A AXE VERTICAL. ....	7
<b>FIGURE I.7</b> AEROGENERATEUR A AXE VERTICAL. [6] ....	8
<b>FIGURE I.8</b> AEROGENERATEUR A AXE HORIZONTAL. ....	9
<b>FIGURE I.9</b> PRINCIPE DE CONVERSION D'ENERGIE. ....	10
<b>FIGURE I.10</b> CONSTITUTION D'UNE EOLIENNE. ....	10
<b>FIGURE I.11</b> PRINCIPALES COMPOSANTES INTERIEURES DE LA NACELLE D'UNE TURBINE EOLIENNE .....	11
<b>FIGURE I.12</b> STRUCTURE GENERALE DE CONTROLE D'UNE EOLIENNE. ....	13
<b>FIGURE II.1</b> SYSTEME D'ORIENTATION DES PALES. [19] ....	18
<b>FIGURE II.2</b> FLUX D'AIR SUR UN PROFIL DE PALE "STALL" [20]. ....	19
<b>FIGURE II.3</b> COEFFICIENTS DE PUISSANCE DE DIFFERENTS TYPES D'EOLIENNES EN FONCTION DU COEFFICIENT DE VITESSE. ....	20
<b>FIGURE II.4</b> VARIATION DE LA PUISSANCE EOLIENNE EN FONCTION DE LA VITESSE DU VENT. ....	22
<b>FIGURE II.5</b> TUBE DE COURANT AUTOUR D'UNE EOLIENNE. ....	24
<b>FIGURE II.6</b> COEFFICIENT DE PUISSANCE. ....	25
<b>FIGURE II.7</b> DIAGRAMME DE LA PUISSANCE SUR L'ARBRE EN FONCTION DE LA VITESSE DU VENT..	27
<b>FIGURE II.8</b> MODELE SCHEMATIQUE D'UN ROTOR SAVONIUS. ....	28
<b>FIGURE II.9</b> COLONNE D'AIR ANIMEE D'UNE VITESSE V. ....	33
<b>FIGURE III.1</b> UN TRACE SCHEMATIQUE DU TUBE DE FLUX D'UNE EOLIENNE POUR L'ANALYSE THERMODYNAMIQUE. ....	40
<b>FIGURE III.2</b> UNE ANALYSE DE PROCESSUS TYPIQUE AVEC JUSQU'A QUATRE NIVEAUX. ....	41
<b>FIGURE III.3</b> LIMITES POSSIBLES DU SYSTEME ENTOURANT LE PROCESSUS DE PRODUCTION D'UNE CENTRALE EOLIENNE. ....	44

<b>FIGURE III.4</b> LA ROSE DU VENT D'ADRAR,[49].	<b>FIGURE III.5</b> CARTE ANNUELLE DE LA
VITESSE.....	52
<b>FIGURE III.6</b> STATION EOLIENNE DE KABERTEN ADRAR.....	53
<b>FIGURE III.7</b> VITESSE DU VENT MOYENNE EN ADRAR.....	53
<b>FIGURE III.8</b> TEMPERATURE MESUREE AU30 JANVIER 2014 EN ADRAR,[50].	54
<b>FIGURE III.9</b> CARACTERISTIQUES (PUISSANCE-VITESSE) DE GAMESAG52.....	55
<b>FIGURE III.10</b> EVOLUTION DE LA TEMPERATURE DURANT LE MOIS DE AOUT 2014.....	56
<b>FIGURE III.11</b> EVOLUTION DE LA TEMPERATURE DURANT LE MOIS DE DECEMBRE 2014. ....	56
<b>FIGURE III.12</b> EVOLUTION DE LA DENSITE DURANT LE MOIS DE AOUT 2014.....	57
<b>FIGURE III.13</b> EVOLUTION DE LA DENSITE DURANT LE MOIS DE DECEMBRE 2014.....	57
<b>FIGURE III.14</b> VARIATION DE LA PRESSION DURANT LE MOIS AOUT 2014. ....	58
<b>FIGURE III.15</b> VARIATION DE LA PRESSION PENDANT LE MOIS DECEMBRE 2014. ....	58
<b>FIGURE III.16</b> EVOLUTION DE L'HUMIDITE RELATIVE DURANT LE MOIS DE AOUT 2014.....	59
<b>FIGURE III.17</b> EVOLUTION DE L'HUMIDITE RELATIVE DURANT LE MOIS DE DECEMBRE 2014. ....	59
<b>FIGURE III.18</b> VARIATION JOURNALIERE DE LA VITESSE DU VENT DURANT LE MOIS DE AOUT 2014. .....	60
<b>FIGURE III.19</b> VARIATION JOURNALIERE DE LA VITESSE DU VENT DURANT LE MOIS DE DECEMBRE 2014.....	60
<b>FIGURE III.20</b> LE RENDEMENT ENERGETIQUE DURANT LE MOIS D'AOUT. ....	61
<b>FIGURE III.21</b> LE RENDEMENT ENERGETIQUE DURANT LE MOIS DE DECEMBRE. ....	61
<b>FIGURE III.22</b> EVOLUTION DU C.F ET LA PRODUCTION PAR LES 12 WT. ....	66
<b>FIGURE III.23</b> LES PERTES ENERGETIQUES DANS LA FERME D'ADRAR 2014.....	66

## **LISTE DES TABLEAUX**

<b>TABLEAU III.1</b> DIFFERENCE ENTRE EXERGIE ET ENERGIE. ....	46
<b>TABLEAU III.2</b> INDICES DE QUALITE EXERGETIQUE DES DIFFERENTES FORMES D'ENERGIE ADAPTE DE MUR (1977). ....	51
<b>TABLEAU III.3</b> INDICES DE QUALITE EXERGETIQUE DE DIFFERENTS MATERIAUX. ADAPTE DE MUR (1977). ....	51
<b>TABLEAU III.4</b> RAPPORT DE PRODUCTION GENERALE DU PARC ANNEE 2015 (KWH).....	65

## Nomenclature

**EnR:** Energie Renouvelable.

**CDER:** Centre de Développement de l'Energie Renouvelable.

**MADA :** Machine Asynchrone à Double Alimentation

**GADA :** générateur asynchrone à double alimentation

**GW:** Giga Watt.

**MW:**Mega Watt.

**TWh:**Téra Watt heure.

**KW:** Kilo Watt.

**KWh :** Kilo Watt heure.

**KWh/an :** Kilo Watt heure par ans.

**tr/mn:** tour par minute.

**N :** un ensemble de valeurs mesurées de la vitesse du vent.

**E :** Energie produite.

**MPPT :** Maximum Power Point Tracking.

**V :** Vitesse du vent.

**Vd :** La vitesse de démarrage.

**VN:** vitesse nominale.

**VM:** La vitesse maximale admissible par l'éolienne

**P :** La Puissance active.

**Pn:** La Puissance nominale.

**Pm:** La Puissance mécanique.

**Peff :** puissance effective de l'énergie éolienne

**Vr :** Vent de combinaison ou vent relatif.

**r:** Le rayon du cercle

**R:** Rayon de pale. Cp: Coefficient de puissance.

**P<sub>turbine</sub>:** Puissance produit par la turbine.  $\rho$ : masse volumique de l'air.

**T :** température

**$\rho$ :** masse volumique de l'air.

**CP:** Coefficient de performance.

**$\Omega$** : La vitesse de rotation de l'éolienne.

**$\Lambda$**  :La vitesse spécifique.

**$V_{vent}$** : La vitesse du vent.

**$V_1$**  : La vitesse du vent avant les pales de l'éolienne.

**$V_2$**  : La vitesse du vent après prélèvement de l'énergie par les pales de l'éolienne.

**$\Delta E_c$** : La variation d'énergie cinétique du vent.

**$F$** : La fonction de répartition du vent.

**$F(v)$** : La fonction de répartition.

**$f_V$**  : La densité de probabilité.

**$K$** : paramètre de forme caractérise la répartition du vent.

**$C$** : paramètre d'échelle caractérise

**$C_t$**  : le coefficient de couple.

**$H_r$**  : humidité relative.

**$\Omega_m$** : La vitesse du rotor de la génératrice.

**$H_{nes}$** : L'hâture nécessaire de la tour.

**$V_{nes}$** : La vitesse du vent nécessaire de la tour

**$E_c$**  :exergie cinétique.

**$E_x$**  :exergie.

**$E_{xpo}$**  : exergie potentiel.

**$E_{xph}$**  : exergie physique.

**$E_{xch}$**  : exergie chimique.

## **Introduction générale**

L'énergie est devenue un élément fondamental à cause de nos différentes exigences en plusieurs termes domestiques et industriels. Ce qui nous incite à réfléchir toujours à de nouvelles techniques de production de cette énergie.

Depuis l'aube de l'humanité, la production de l'énergie était basée en une grande partie sur les combustibles comme le bois, les fossiles (charbon, pétrole, gaz...), puis l'uranium. Le grand problème accompagnant l'utilisation de ces matières est l'émission de gaz et les dégagements massifs de composés divers ; ce qui déséquilibre notre planète et pousse vers un cycle ouvert non renouvelable.

En à peine plus d'un siècle, l'énergie avec l'électricité comme forme moderne a pris une place de premier plan. Sa production couvre le tiers de la consommation énergétique mondiale qui est concentrée principalement dans des machines thermomécaniques où la combustion est à sa grande échelle avec l'émission directe de plusieurs millions de tonnes de CO<sub>2</sub> provoquant des degrés élevés de la pollution et de la température ; ainsi que la réduction des réserves naturelles. Alors, on a besoin de chercher d'autres solutions alternatives aux énergies fossiles pour produire l'électricité avec des sources renouvelables non polluantes et plus économiques en exploitant bien les éléments de la nature comme l'eau, le soleil et le vent.

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.

L'objectif de ce travail, réalisé à Adrar, au grand sud d'Algérie, est de voir l'impact des paramètres météorologiques que sont : la pression atmosphérique, l'humidité relative de l'air et la température sur le potentiel énergétique éolien disponible sur le site ainsi que leurs influences sur la puissance énergétique délivrée par le système éolien étudié dans le site. Ces éoliennes sont équipées par des systèmes de commande et de sécurité afin d'assurer un bon fonctionnement dans les différentes conditions mais dans les conditions climatiques comme Adrar de climat désertique sec et chaud ce système devient insuffisant à cause de la température ambiante élevée de la saison d'été.

On a structuré ce mémoire sur trois chapitres :

Après une introduction générale, le premier chapitre sera consacré à revus bibliographique sur l'énergie éolienne et son développement depuis sa naissance et on donne des statistiques sur la

production mondiale d'énergies éoliennes, les différents types d'éoliennes (à axe verticales, horizontales).

Dans le deuxième chapitre on va présenter une analyse générale sur les éoliennes et tous les systèmes des éoliennes (système de régulation de vitesse dune éoliennes) et leur configuration.

Le dernier chapitre sera consacré sur l'analyse énergétique et exergétique des éoliennes et leurs méthodes, on va présenter les différents paramètres météorologiques dans la ferme éolienne d'adrar et sa production annuelle d'énergie pour calculer les pertes et les rendements énergétiques des éoliennes dans la ferme.

# CHAPITRE I

*Revue bibliographique  
sur l'énergie éolienne*

## I.1 Introduction

Depuis l'utilisation du moulin à vent, la technologie des capteurs éoliens n'a cessé d'évoluer. C'est au début des années quarante que de vrais prototypes d'éoliennes à pales profilées ont été utilisés avec succès pour générer de l'électricité. Plusieurs technologies sont utilisées pour capter l'énergie du vent (capteur à axe vertical ou à axe horizontal). L'énergie éolienne est une ressource d'origine solaire, provient du déplacement des masses d'air qui est indirectement lié à l'ensoleillement de la terre. Par le réchauffement de certaines zones de la planète et le refroidissement d'autres, une différence de pression est créée et la masse d'air est en perpétuel déplacement. Environ 0,25% du rayonnement solaire total est converti en énergie éolienne. L'énergie éolienne est une énergie "renouvelable" non dégradée, géographiquement diffuse, et surtout en corrélation saisonnière (l'énergie électrique est largement plus demandée en hiver et c'est souvent à cette période que la moyenne des vitesses des vents est la plus élevée). L'énergie éolienne est devenue aujourd'hui une réalité. Elle est en plein développement en termes de puissance installée dans le monde. Plusieurs facteurs ont contribué et contribuent encore à son essor :

- ❖ L'énergie éolienne est propre : les éoliennes n'engendrent aucune pollution. Elle ne rejette aucune substance dangereuse dans l'environnement et n'engendre aucun déchet. L'utilisation d'une turbine de 1000 kW, dans des conditions normales, évite un rejet annuel de 2000 tonnes de dioxyde de carbone émis par d'autres sources de production d'électricité, comme par exemple les centrales électriques à charbon.
- ❖ L'énergie éolienne est abondante : le vent est inépuisable, Il constitue donc une véritable ressource renouvelable.
- ❖ L'énergie éolienne est prometteuse : l'énergie éolienne est actuellement la moins chère de toutes les énergies renouvelables existantes. Une étude faite en 2003 sur l'état de l'art de l'éolien montre que le coût à cette époque du kilowattheure (kWh) d'origine éolien était de 3.79 cent €/kWh [1]. Le développement de l'éolien permettra de réduire encore ce coût. Si les objectifs sont atteints, le prix diminuerait à 3.03 cent €/kWh en 2010, et à 2.45 cent €/kWh en 2020.
- ❖ L'énergie éolienne est la source d'énergie renouvelable la plus fiable : une éolienne a un taux de disponibilité matérielle de plus de 98%.

## I.2 Historique



**Figure I.1** L'utilisation de l'énergie éolienne par l'homme est ancienne.

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 et ainsi de l'utiliser sans présence de vent, ce type d'installation ne concernant que des besoins domestiques, non appliqués à l'industrie.

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.

### I.3 Bilan énergétique mondial

Actuellement, l'énergie éolienne connaît une grande croissance et attraction des investisseurs grâce à son faible risque et au besoin d'énergie propre et fiable. En comparaison, il faut noter qu'aucun réacteur nucléaire n'est entré en activité en 2008, selon l'IAEA (International Atomic Energy Agency) [1].

La figure (I.2) illustre la puissance éolienne mondiale installée. Elle est doublée en 2008 par rapport à celle installée en 2005.

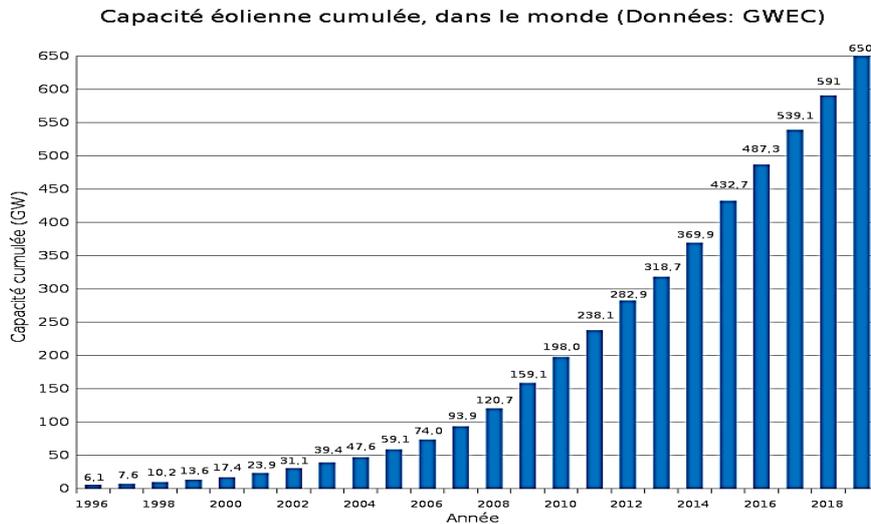


Figure I.2 Production mondiale de l'énergie éolienne [1].

La figure (I.3) illustre la croissance de la puissance installée entre deux années consécutives pour les dix premiers producteurs de l'énergie d'éolienne dans le monde pays [1], [2].

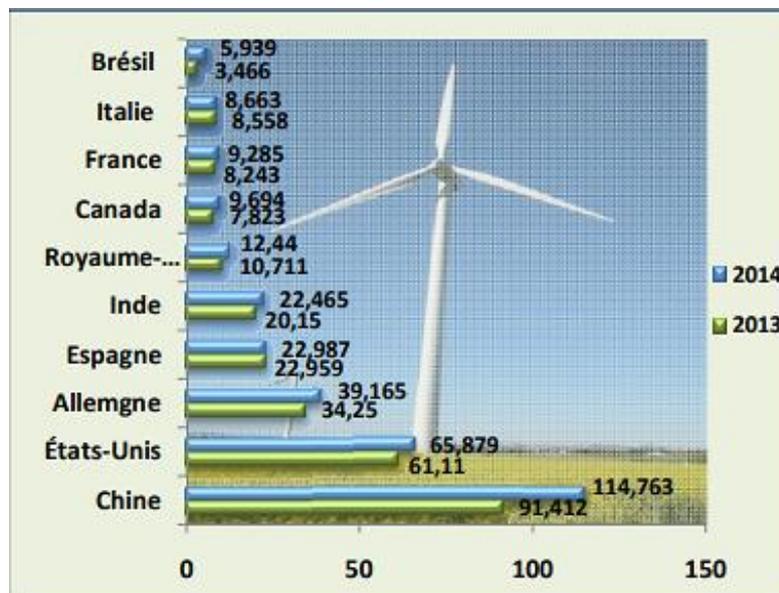
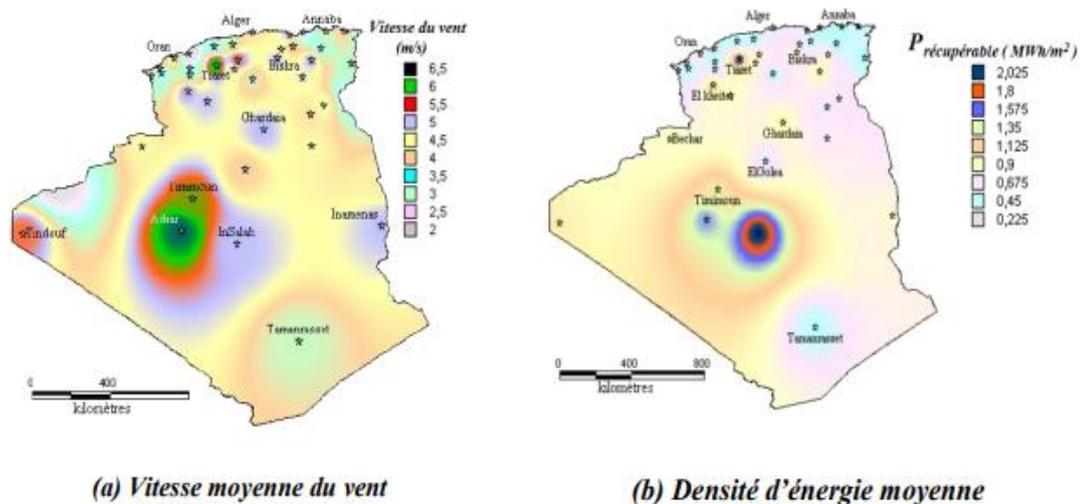


Figure I.3 Les dix premiers producteurs de l'énergie d'éolienne dans le monde (MW).

La chine a récemment pris la première place en termes d'équipement total avant les états unis en 2014. Il est estimé que l'énergie éolienne sera capable de contribuer en 2020 à au moins 12% de la consommation électrique mondiale, [1]. En Algérie, Les ressources énergétiques de l'Algérie ont déjà été estimées par le centre de développement des énergies renouvelables (CDER) depuis les années 90 à travers la production des atlas de la vitesse du vent et du potentiel énergétique éolien disponible en Algérie. Il est trouvé qu'un potentiel éolien considérable qui peut être exploité pour la production d'énergie électrique, surtout dans les trois régions situées au sud-ouest du Sahara (Tindouf, In Salah et Adrar) où les vitesses de vents sont élevées et peuvent dépasser 6m/s dans la région d'Adrar, [3]. Il est estimé qu'elles seules cumulent un potentiel approchant les 24 TWh/an [4].

La figure (I.4) présente la carte des vents en Algérie [5].



**Figure I.4** Carte annuelle de la vitesse moyenne du vent à 10m du sol (m/s) en Algérie, [5].

La politique énergétique en Algérie s'articule autour des préoccupations d'utilisation rationnelle de l'énergie, de promotion des énergies renouvelables et de protection de l'environnement, [7]. En jeudi 21/01/2010, la réalisation de la première ferme éolienne en Algérie, d'une puissance de 10 MW à Kaberten, Adrar (sud-ouest), elle a été confiée au groupe français VERGNET. Ce dernier a été retenu par la SKTM, filiale du groupe SONELGAZ, [4]. Des projets de ce genre sont en phase d'étude et d'autres commence à voir le jour tel que la première ferme éolienne de la Wilaya d'Adrar, opérationnelle depuis le 4 juillet 2014.



**Figure I.5** La première ferme éolienne en Algérie.

## I.4 Energie électronique éolienne

L'énergie du vent ou l'énergie éolienne est le résultat des déplacements de l'air et plus spécifiquement, l'énergie tirée du vent au moyen d'un dispositif aérogénérateur comme une éolienne ou un moulin à vent. Elle peut être utilisée de deux manières : directe et indirecte.

- ❖ **Direct** : Conservation de l'énergie mécanique : le vent est utilisé pour faire avancer un véhicule (navire à voile ou char à voile), pour pomper de l'eau (moulins de Majorque, éoliennes de pompage pour abreuver le bétail) ou pour faire tourner la meule d'un moulin,
- ❖ **Indirect** : Transformation en énergie électrique : l'éolienne est accouplée à un générateur électrique pour fabriquer un courant continu ou alternatif, le générateur est relié à un réseau électrique ou bien il fonctionne de manière autonome avec un générateur d'appoint (par exemple un groupe électrogène) ou un parc de batteries ou un autre dispositif de stockage d'énergie.

## I.5 Types d'aérogénérateurs

Deux grandes classes de turbines éoliennes sont présentes dans l'industrie, soit les éoliennes à axe horizontal soit les éoliennes à axe vertical (**Figure I.6**). Les éoliennes à axe horizontal sont composées principalement d'une tour au sommet de laquelle une nacelle est installée. Cette nacelle supporte le rotor de la turbine - moyeu et pales - et comporte le système d'entraînement ainsi que la génératrice. L'axe de rotation du rotor de la turbine est donc horizontal. Pour ce qui est des éoliennes à axe vertical, l'axe de rotation du rotor est perpendiculaire au sol ; ceci permet de placer le système d'entraînement ainsi que la génératrice au niveau du sol [6].



**Figure I.6** Représentation des concepts d'éoliennes à axe horizontal et à axe vertical.

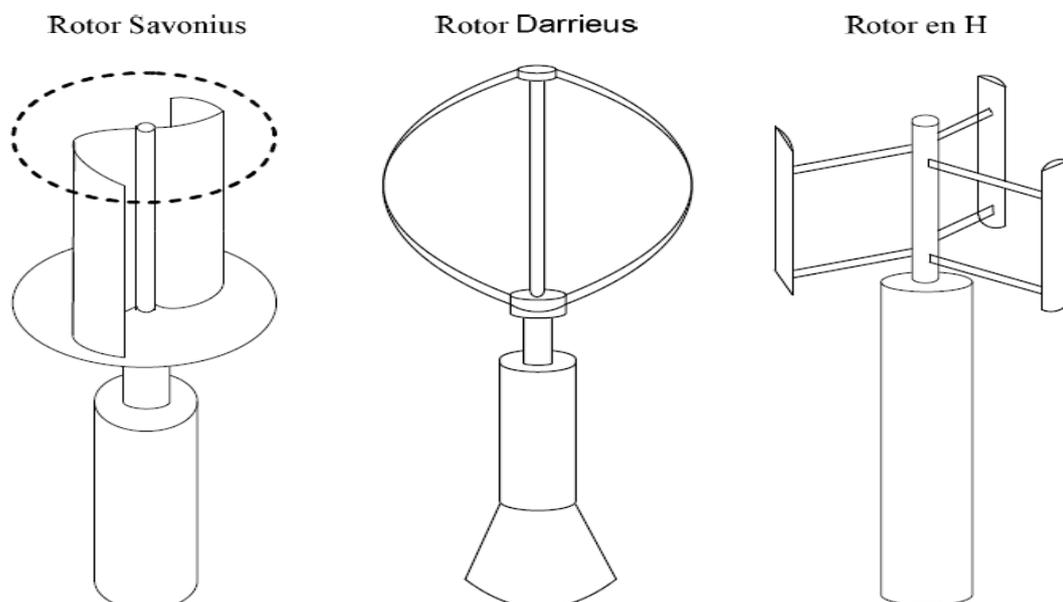
### I.5.1 Aérogénérateur à axe vertical

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
- Elle démarre avec des vitesses de vent de l'ordre de 2m/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.



**Figure I.7** Aérogénérateur à axe vertical.[6]

## I.5.2 Aérogénérateur 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 multipales 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 la machine par rapport au vent « hélice sous le vent »

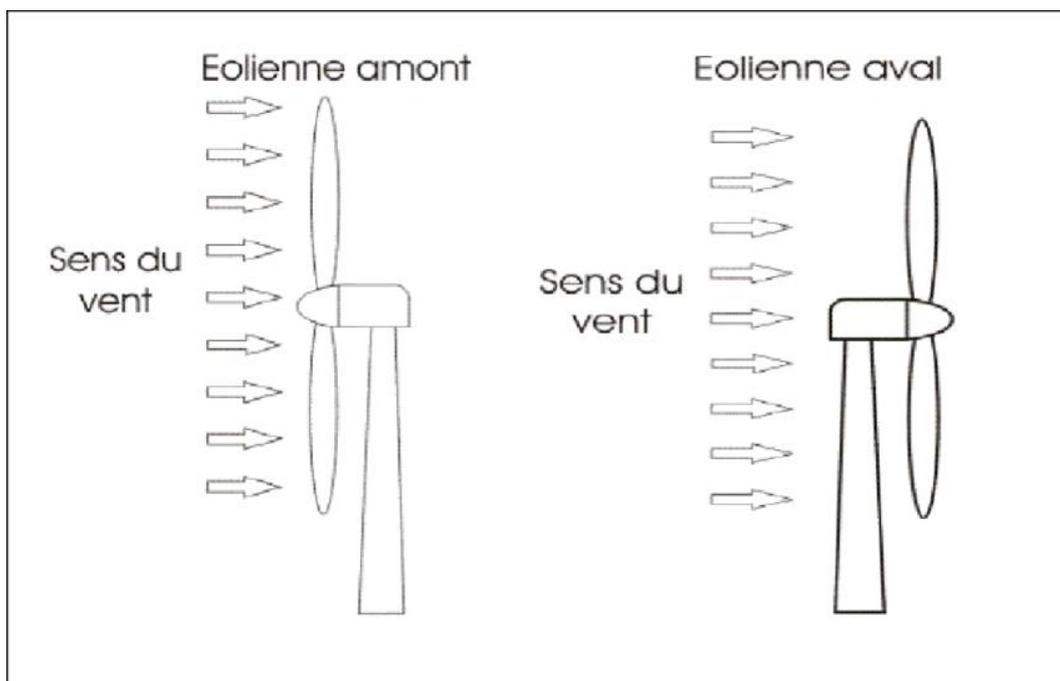


Figure I.8 Aérogénérateur à axe horizontal.

## I.6 Constituants d'une éolienne

### I.6.1 Principe

Les éoliennes permettent de convertir l'énergie du vent en énergie électrique [8]. Cette conversion se fait en deux étapes :

- ❖ Au niveau de la turbine, qui reçoit l'énergie cinétique du vent disponible pour la convertir en énergie mécanique ;
- ❖ Au niveau de la génératrice, qui reçoit l'énergie mécanique et la convertit en énergie électrique qui est transmise ensuite sur le réseau électrique. Il doit donc y avoir conversion et transmission régulières de l'énergie la seule possibilité de stockage étant inertielle au prix d'une accélération de la turbine. Ce fonctionnement général est illustré par la figure (I.8).

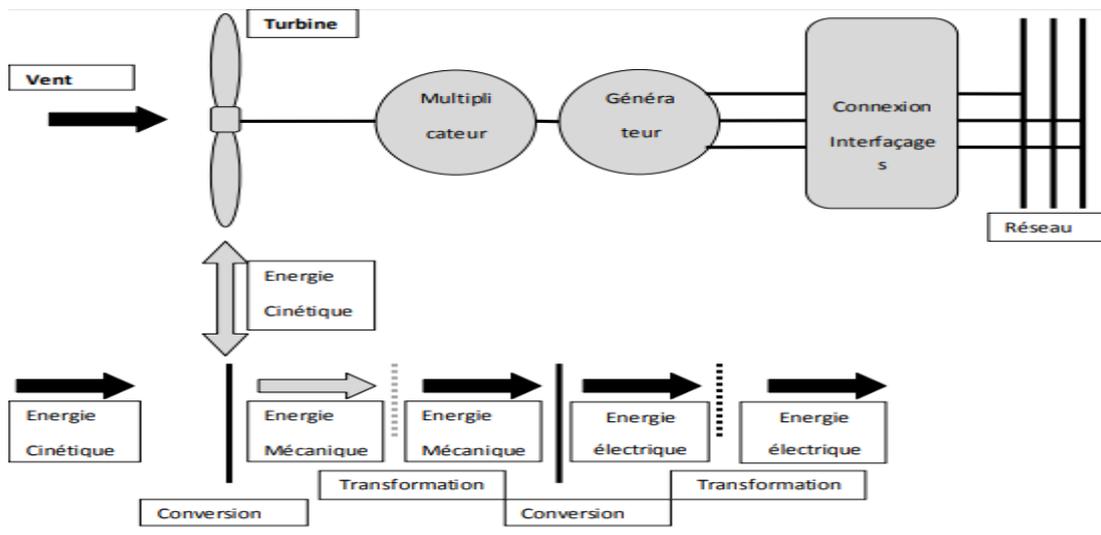


Figure I.9 principe de conversion d'énergie.

### I.6.2 Constitution

En général, l'éolienne est constituée de trois éléments principaux : Le mat, la nacelle et le rotor [7].

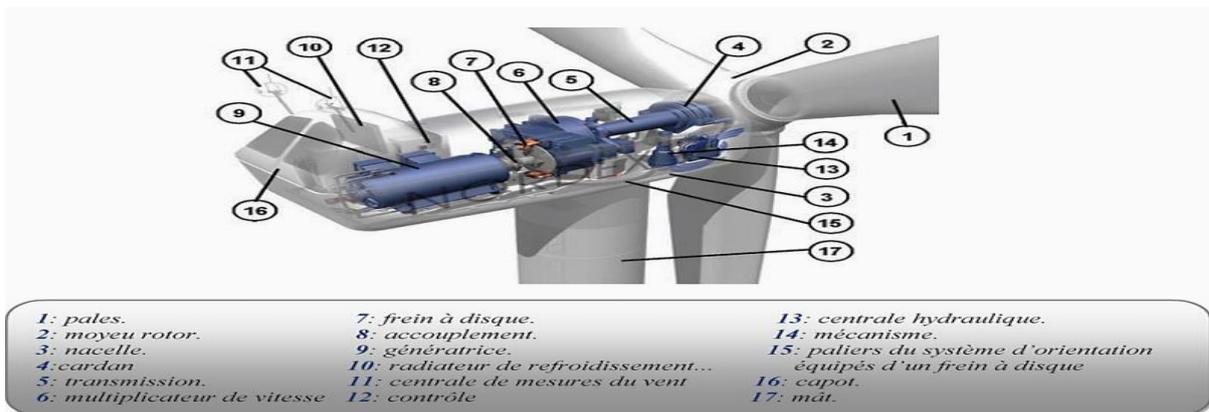
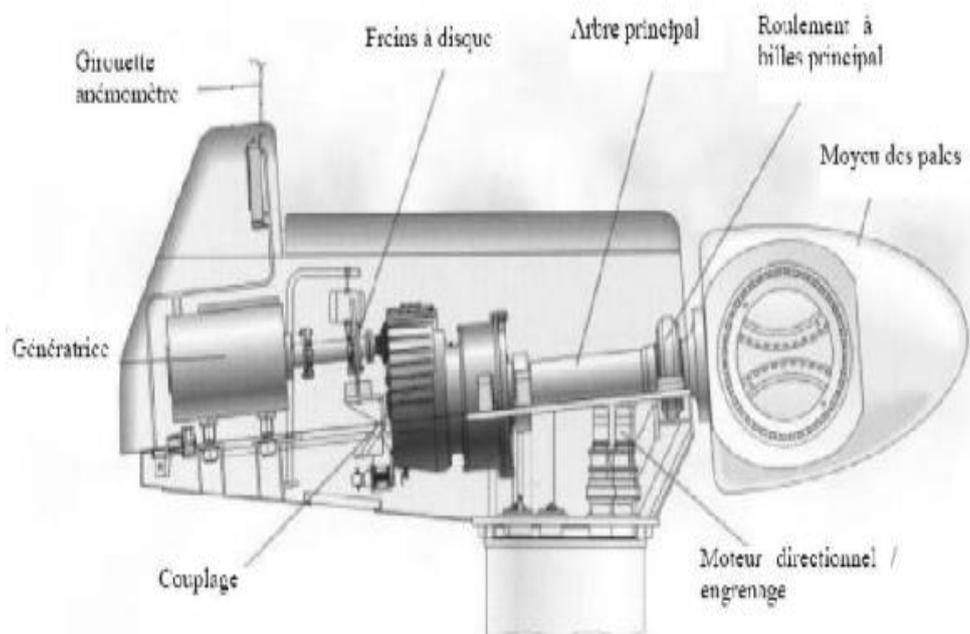


Figure I.10 Constitution d'une éolienne.

- ❖ **La tour** : C'est un élément porteur, généralement un tube en acier ou un treillis métallique. Avec l'augmentation des puissances nominales des éoliennes, le mat devient de plus en plus haut pour éviter les perturbations près du sol mais aussi permettre l'utilisation de pales plus longues. La tour a une forme conique ou cylindrique. A l'intérieur sont disposés les câbles de transport de l'énergie électrique, les éléments de contrôle, l'appareillage de connexion au réseau de distribution et l'échelle d'accès à la nacelle.
- ❖ **La nacelle** : Elle regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler la turbine éolienne à la génératrice électrique. Elle comprend les éléments suivants :
  - ✓ Arbre.
  - ✓ Multiplicateur.
  - ✓ Roulements.
  - ✓ Le frein à disque qui permet d'arrêter le système en cas de surcharge.
  - ✓ Le générateur.
  - ✓ Les systèmes d'orientation des pales (régulation de la vitesse) et de la nacelle (la surface balayée par l'aérogénérateur doit être perpendiculaire à la direction du vent).
  - ✓ Le moyeu : C'est l'élément qui supporte les pales. Il doit être capable de résister à des à-coups violents surtout lors du démarrage de l'aérogénérateur ou lors de brusques changements de vitesse de vent.



**Figure I.11** Principales composantes intérieures de la nacelle d'une turbine éolienne

- ❖ **Les pales** : Elles permettent de capter la puissance du vent et la transférer au rotor. Leur nombre est de trois pales dans la plupart des aérogénérateurs, car ce nombre constitue un compromis entre les performances de la machine et des raisons de stabilité.

Dans le cas des éoliennes produisant de l'électricité, un poste de livraison situé à proximité du parc éolien permet de relier ce parc au réseau électrique pour y injecter l'intégralité de l'énergie produite [8].

### I.6.3 Caractéristiques technologiques des éoliennes

- 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. [7]

- 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 ...

#### 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 :

- 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 ( $\geq 100$  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).
- Il est choisi en fonction du couple désiré.

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.

### I.7 Control de la puissance fournie par une éolienne

Les conditions de fonctionnement d'une turbine éolienne dépendent essentiellement des conditions de vent sur lesquelles aucune action n'est possible. On ne peut agir qu'en limitant, parfois de manière optimale dans certaines conditions, l'énergie effectivement convertie par la turbine puis par le générateur électrique avant le transfert vers le réseau.

Le contrôle de puissance fournie par le système peut se faire ; à chacun des deux niveaux de conversions de l'énergie ; de manière suivant les conditions de fonctionnement (voir la Figure (I.9) [8]).

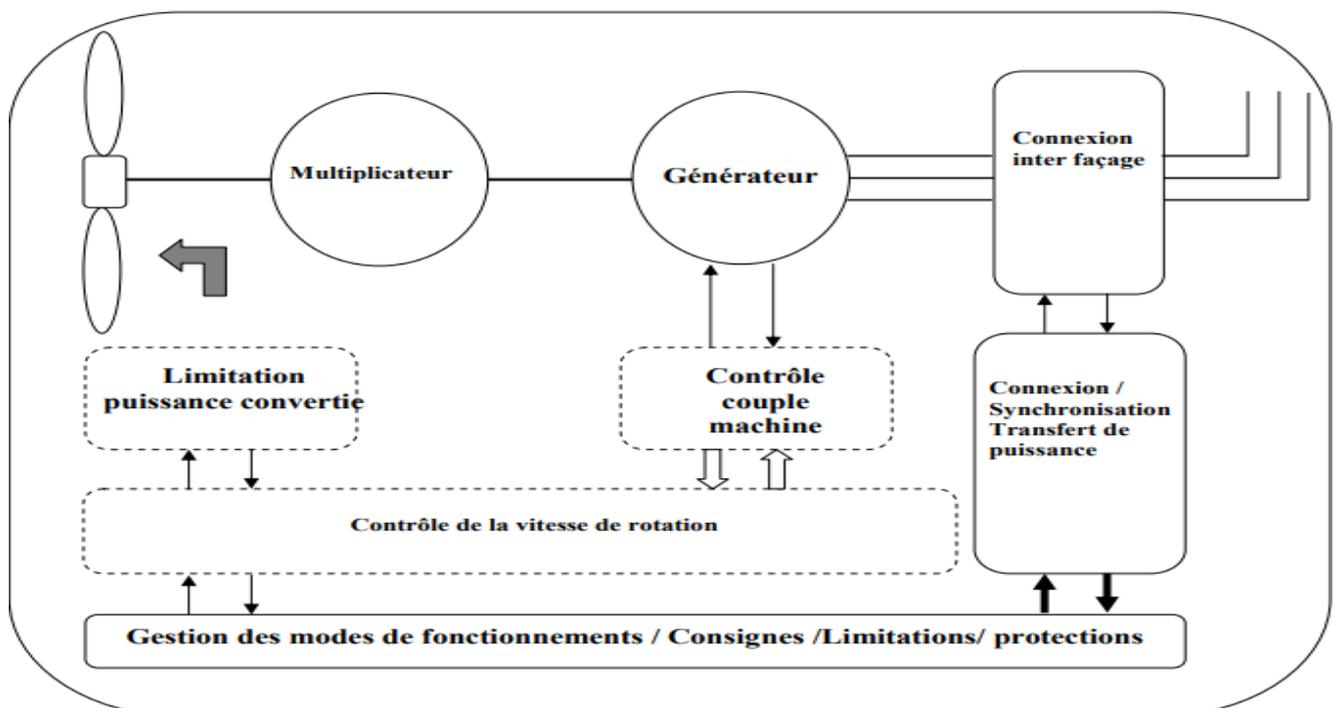


Figure I.12 Structure générale de contrôle d'une éolienne.

### **I.7.1 Au niveau de la turbine**

Essentiellement pour limiter la puissance pour les vents forts

### **I.7.2 Au niveau du générateur**

En particulier pour les structures à vitesse variable que l'on verra plus loin. Ceci permet par exemple d'optimiser le captage de l'énergie pour les vents faibles et moyens, et de contrôler les grandeurs affectant directement le fonctionnement du générateur (courant, vitesse), ou les contraintes de fonctionnement du système (tension de base continu, courant dans un système d'interfaçage au réseau).

### **I.7.3 Le système de commande d'un générateur :**

Il peut être décomposé en deux niveaux fonctionnels

- ✓ Les systèmes de contrôle des grandeurs physiques et les surveillances et protection.  
Il s'agit d'assurer la régulation et l'asservissement de la grandeur des valeurs des consignes délivrées par le niveau de commande supérieur.
- ✓ Le système de gestion des modes de fonctionnement, d'élaboration des lois consigne et de gestion des protections.

## **I.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.

### **I.8.1 Les avantages**

- ✓ L'énergie éolienne, propre, fiable, économique [10], et écologique, c'est une énergie qui respecte l'environnement [11].
- ✓ 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 CO<sub>2</sub>, ...etc. [12].
- ✓ L'énergie éolienne est une énergie renouvelable propre, gratuit, et inépuisable [13].
- ✓ Chaque mégawatheure d'électricité produit par l'énergie éolienne aide à réduire de 0,8 à 0,9 tonne les émissions de CO<sub>2</sub> rejetées chaque année par la production d'électricité d'origine thermique [12].

- ✓ Parmi toutes les sources de production d'électricité, celle d'origine éolienne subit de très loin le plus fort taux de croissance [14].
- ✓ 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 [15].
- ✓ 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 [15].
- ✓ Les parcs éoliens se démontent très facilement et ne laissent pas de trace [9].
- ✓ 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 [15].
- ✓ L'énergie éolienne se révèle une excellente ressource d'appoint d'autres énergies, notamment durant les pics de consommation, en hiver par exemple [9].
- ✓ 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 [9].

## I.8.2 Les inconvénients

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

- ✓ L'impact visuel : Ça reste néanmoins un thème subjectif [15]. 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 [12].
- ✓ Les bruits mécaniques ou aérodynamiques ont été réduits par l'utilisation de nouveaux profils [15], 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 [12].
- ✓ 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 [9].

- ✓ La source d'énergie éolienne étant stochastique [16], la puissance électrique produite par les aérogénérateurs n'est pas constante. La qualité de la puissance produite n'est donc pas toujours très bonne.

## **I.8 Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons présenté des généralités sur les systèmes éoliens en donnant quelques notions principales sur les technologies éoliennes concernant les différents types d'éoliennes utilisées, leurs principales constituants et l'intérêt du système éolien à vitesse variable.

Nous avons démontré aussi le potentiel énergétique de notre pays en matière des sources d'énergie éolienne et les ambitions que peut offrir l'Algérie que ce soit pour le marché national et international.

# CHAPITRE II

*Analyse générale sur  
les éoliennes*

## II.1 Introduction

Une éolienne marche comme une chaîne de transmission de la puissance. La puissance mécanique de l'air est transformée en puissance mécanique de rotation du rotor, qui est transformée en puissance électrique par le générateur, qui est à nouveau convertie dans une forme facile à transporter par des câbles hautes tension.

Un convertisseur d'énergie permet la conversion d'une forme d'énergie en une ou plusieurs autres formes d'énergie. Une éolienne convertit l'énergie de mouvement du vent en énergie électrique et thermique. Une cellule photovoltaïque convertit l'énergie lumineuse en énergie électrique. Le principe de fonctionnement de l'énergie éolienne est relativement simple : le vent fait tourner des pales qui font elles même tourner le générateur de l'éolienne. A son tour le générateur transforme l'énergie mécanique du vent en énergie électrique de type éolienne. L'électricité éolienne est dirigée vers le réseau électrique ou vers des batteries de stockage d'électricité éolienne.

## II.2 Systèmes de régulation de vitesse d'une éolienne

Les éoliennes sont en générale dimensionnées de manière à atteindre leurs performances à une puissance nominale  $P_n$  qu'est obtenue à partir d'une vitesse du vent  $V_n$ . En cas de vitesse du vent supérieure à  $V_n$ , il est nécessaire de perdre une partie de l'énergie supplémentaire afin d'éviter tout en dommage ment de l'éolienne, [18], [17]. Il y'a deux manières différentes de contrôler en toutes écrite la puissance extraite de la turbine à la valeur de la puissance nominale du générateur,[17] :

### II.2.1 Système à décrochage aérodynamique " Pitch "



Figure II.1 système d'orientation des pales.[19]

Ce système de régulation pivote les pales de quelques degrés à chaque variation de la vitesse du vent pour que les pales soient toujours positionnées à un angle optimal par rapport au vent, de façon à extraire la puissance maximale à tout moment (Figure II.1). C'est à dire il faut que varier l'angle de calage des pales pour profiter au maximum du vent instantané et limiter la puissance pour des vitesses de vent supérieures à la vitesse nominale.

### II.2.2 Système à décrochage aérodynamique "Stall":

Ce type de régulation est utilisé pour la plupart des éoliennes car il a l'avantage de ne pas nécessiter de pièces mobiles et de système de régulation dans le rotor. Les pales de l'éolienne sont fixes par rapport au moyeu de l'éolienne. Elles sont conçues spécialement pour subir des décrochages lors de vents forts. Le décrochage est progressif lorsque le vent atteint sa vitesse critique (FigureII-4).

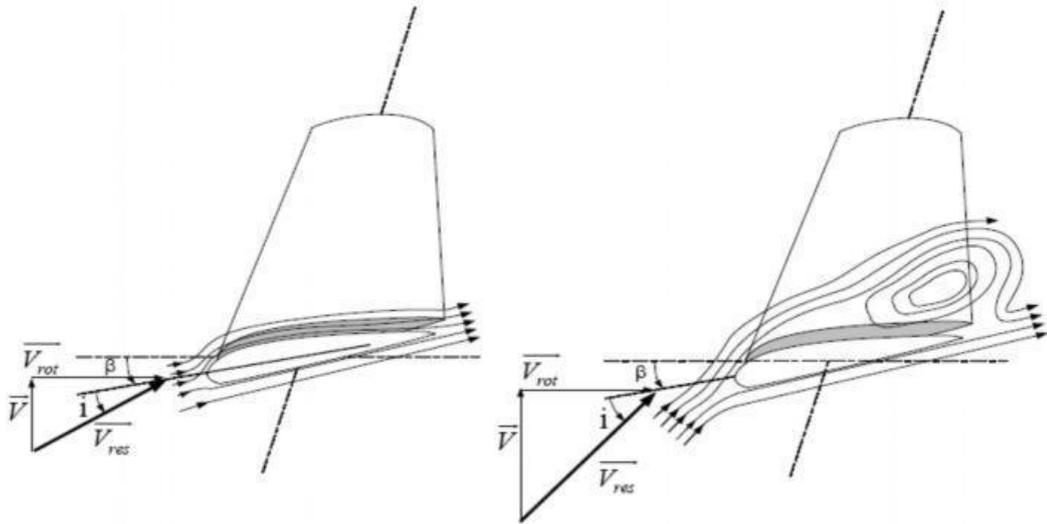


Figure II.2 Flux d'air sur un profil de pale "stall" [20].

### II.2.3 Système à décrochage aérodynamique "Active Stall"

Ce dernier type de régulation vise à utiliser les atouts de la régulation « stall » et de la régulation « pitch » afin de contrôler de manière plus précise la production d'électricité. Ce système est dit à régulation active par décrochage aérodynamique. On l'utilise pour les éoliennes de fortes puissances.

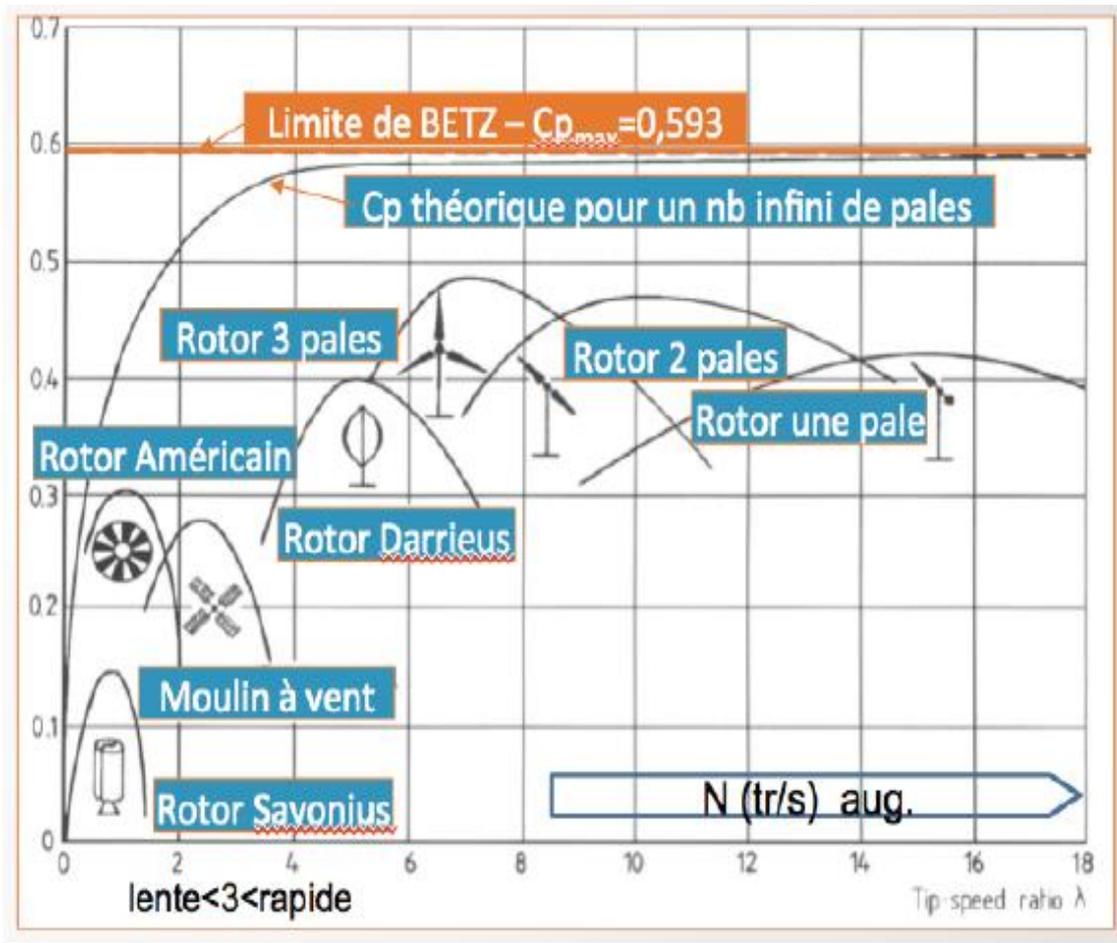
## II.3 Le coefficient de vitesse

Le coefficient de vitesse  $\lambda$  est le rapport entre la vitesse périphérique d'une éolienne  $R \omega$  et la vitesse du vent  $U$ . En étude expérimentale et numérique, ce paramètre permet d'étudier le coefficient de puissance  $C_p$  et le coefficient de moment dynamique  $C_t$  de l'éolienne. Son expression est donnée par la relation suivante :

$$\lambda = \frac{R\omega}{U} \quad (2.1)$$

Avec  $R\omega$  la vitesse de rotation de l'éolienne,  $R$  son rayon et  $U$  l'incidence du vent. Précédemment, on a vu que la puissance mécanique d'une éolienne est théoriquement limitée à  $\frac{16}{27}$  d'après la limite de Betz. En plus de cette limitation, s'ajoute une série de pertes qui définissent la valeur définitive de la courbe de performance de cette éolienne. La figure II.3 montre les courbes de rendement aérodynamique des différents types d'éoliennes qu'on peut trouver dans le commerce ou dans les centres de recherche. Cette figure nous informe que plus l'éolienne est rapide, plus elle est performante et plus la valeur maximale de son coefficient de vitesse  $\lambda$  est

élevée. Dans la catégorie d'éoliennes rapides, on peut citer les éoliennes bi et tri-pales. Ils représentent 80% du marché mondial et servent dans la plupart de temps à équiper les fermes éoliennes onshore et offshore. La vitesse de rotation des VAWTs est généralement faible et cela fait que ces éoliennes développent un important couple de démarrage qui se stabilise au bout d'une certaine période de fonctionnement. Avec la courbe de la figure 2.3, on voit que le coefficient de vitesse  $\lambda$  d'un rotor Savonius avoisine le 1. Ceci est la preuve de faibles vitesses de rotation obtenues avec ce type d'éolienne.



**Figure II.3** Coefficients de puissance de différents types d'éoliennes en fonction du coefficient de vitesse.

## II.4 Configuration des éoliennes

La configuration des éoliennes détermine leur capacité de régulation en vitesse et en puissance. La nature de leur partie électrique et de leur connexion au réseau définit si l'éolienne est à vitesse fixe ou à vitesse variable. Quant au rotor, sa nature détermine la méthode de régulation de la puissance, soit le décrochage aérodynamique passif, le décrochage aérodynamique actif et le calage variable des pales. La section suivante présente les configurations d'éoliennes à vitesse fixe

et à vitesse variable les plus couramment utilisées ainsi qu'une définition des concepts de décrochage aérodynamique et de calage variable des pales [21].

#### II.4.1 Éoliennes à vitesse fixe

Une éolienne à vitesse fixe désigne le fait que le rotor de celle-ci possède toujours la même vitesse angulaire d'opération, peu importe la vitesse du vent. Cette vitesse de fonctionnement dépend du design de la turbine elle-même et de la fréquence du réseau électrique.

Étant donné que l'éolienne est à vitesse fixe, et ce, indépendamment de la vitesse du vent, l'efficacité de la turbine, représentée par le coefficient de puissance  $C_p$ , est optimal uniquement pour une vitesse de vent unique. À cause de la variabilité de la vitesse du vent, cette configuration d'éolienne admette des fluctuations dans la puissance électrique produite et ceci peut créer des instabilités sur le réseau [21].

Les éoliennes à vitesse fixe possèdent tout de même quelques avantages, soit la simplicité, l'utilisation d'une technologie peu coûteuse et le faible besoin de maintenance.

#### II.4.2 Éoliennes à vitesse variable

Les éoliennes à vitesse variable sont actuellement les plus utilisées dans l'industrie. Le terme vitesse variable désigne le fait que la vitesse de la turbine est indépendante de la fréquence du réseau électrique. L'avantage principal d'opérer la turbine à vitesse variable est de maximiser la capture de l'énergie disponible dans le vent. Selon la référence [21], une éolienne à vitesse variable peut aller chercher de 8 à 15 % plus d'énergie dans le vent annuellement qu'une éolienne à vitesse fixe.

### II.5 Intérêt de la vitesse variable

La Figure (II.4) présente un exemple de courbes de la puissance produite en fonction de la vitesse du rotor. Sur celle-ci, on voit que pour chaque vitesse de vent, la puissance possède un maximum en fonction de la vitesse du rotor. En suivant ces maximums, on peut tracer une courbe (en pointillés) sur laquelle le coefficient de puissance est maximal. Le lieu où le coefficient de puissance est maximal correspond également à la vitesse spécifique optimale. En modifiant la vitesse d'opération de la turbine, il est possible de conserver un coefficient de puissance maximal en jouant sur la vitesse spécifique et ainsi maintenir l'opération de la turbine sur la courbe en pointillé. Donc pour optimiser la puissance mécanique produite à partir de l'énergie contenue dans le vent, on doit ajuster la vitesse angulaire du rotor en fonction de la vitesse du vent. Seule une configuration à vitesse variable peut arriver à faire ce genre d'optimisation [22].

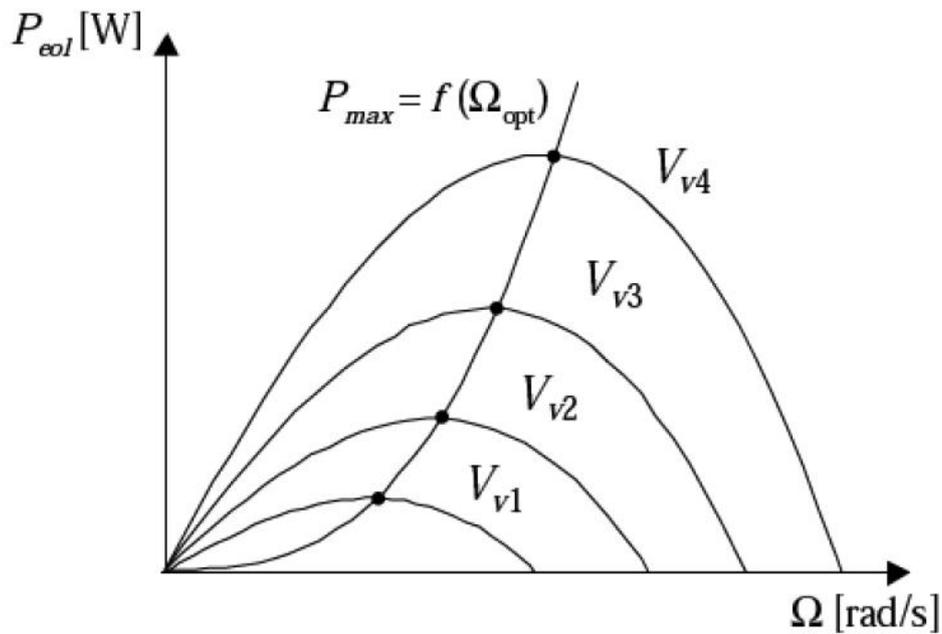


Figure II.4 variation de la puissance éolienne en fonction de la vitesse du vent.

La commande de l'éolienne permet de l'exploiter au maximum. La puissance électrique sera optimisée tout en fonctionnant sur une plage de vitesse plus importante.

### II.5.1 Le coefficient de moment statique

Le coefficient de moment statique  $C_m$  d'une éolienne est une grandeur obtenue en calant le rotor de l'éolienne selon différents angles d'incidence du vent. Son expression est donnée par la relation suivante :

$$C_m = \frac{M_s}{\frac{1}{4}\rho A D U^2} \quad (2.2)$$

Avec  $M_s$  le moment statique,  $\rho$  la masse volumique de l'air,  $D$  le diamètre du rotor,  $U$  la vitesse du vent et  $A$  la surface projetée du rotor. Pour un rotor Savonius, la surface de la voilure  $A = 4r$ . Avec  $r$  le rayon des aubes du rotor.

### II.5.2 Le coefficient de moment dynamique

Le coefficient de moment dynamique  $C_t$  d'une éolienne est une grandeur obtenue en variant le coefficient de vitesse  $\lambda$  de l'éolienne lors de la simulation dynamique.

Son expression est donnée par la relation suivante :

$$C_t = \frac{M_t}{\frac{1}{4}\rho A D U^2} \quad (2.3)$$

Avec  $M_t$  le moment dynamique de l'éolienne.

## II.6 Coefficient de Puissance Cp

L'énergie du vent est l'énergie cinétique de l'air récupérable qui traverse une certaine surface ( $S = \pi R^2$  où  $R$  = rayon de pale) ; la puissance est proportionnelle au cube de la vitesse

$V$  [m/s] :

$$P_{vent} = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 V^3 \quad (2.4)$$

Cependant, cette énergie ne peut pas être entièrement récupérée, car il faut évacuer l'air qui a travaillé dans les pales du rotor. On introduit alors le coefficient de puissance **Cp** dans le calcul de la puissance aérodynamique [23] :

$$P_{turbine} = \frac{1}{2} C_p \rho \pi R^2 V^3 \quad (2.5)$$

Où :

$\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3$ : masse volumique de l'air, dans les conditions normales de température et de pression au niveau de la mer. Le coefficient  $C_p$  caractérise le niveau de rendement d'une turbine éolienne. On peut le définir comme étant le rapport :

$C_p = (\text{puissance disponible sur l'arbre}) / (\text{puissance disponible (récupérable)})$

- La conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique comporte principalement deux étapes : dans un premier temps, l'énergie cinétique du vent est convertie en énergie mécanique pour entraîner l'arbre d'une éolienne. Les dispositifs de conversion critiques à ce stade sont pales de vent. Pour maximiser la capture de l'énergie éolienne, les pales du vent doivent être soigneusement conçues. Le coefficient de puissance  $C_p$  traite du rendement de conversion dans le premier étage, défini comme le rapport de la puissance mécanique effectivement captée par les pales à la puissance disponible dans le vent :

$$C_p = \frac{P_{me,out}}{P_w} = \frac{P_{me,out}}{\frac{1}{2} \rho A u^3} \quad (2.6)$$

Parce qu'il existe diverses pertes aérodynamiques dans les systèmes d'éoliennes, par exemple, bout de pale, racine de pale, perte de profil l et de rotation de sillage, etc., le vrai coefficient de puissance  $C_p$  est très inférieur à sa limite théorique, généralement compris entre 30 à 45 %.

## II.7 La puissance moyenne récupérable [24]

En réalité, le dispositif de conversion (turbine éolienne) extrait une puissance  $P_{rec}$  inférieure à la puissance disponible  $P_{disp}$ . Considérons le système éolien à axe horizontal représenté sur la

Figure (II.5) 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  $\frac{(V_1+V_2)}{2}$  est la masse d'air en mouvement de densité  $\rho$  traversant la surface  $S$  des pales en une seconde est :

$$M = \frac{\rho S (v_1 + v_2)}{2} \quad (2.7)$$

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) :

$$P_m = \frac{m(v_1^2 - v_2^2)}{2} \quad (2.8)$$

Soit en remplaçant  $m$  par son expression :

$$P_m = \frac{(v_1 + v_2)(v_1^2 - v_2^2)}{4} \quad (2.9)$$

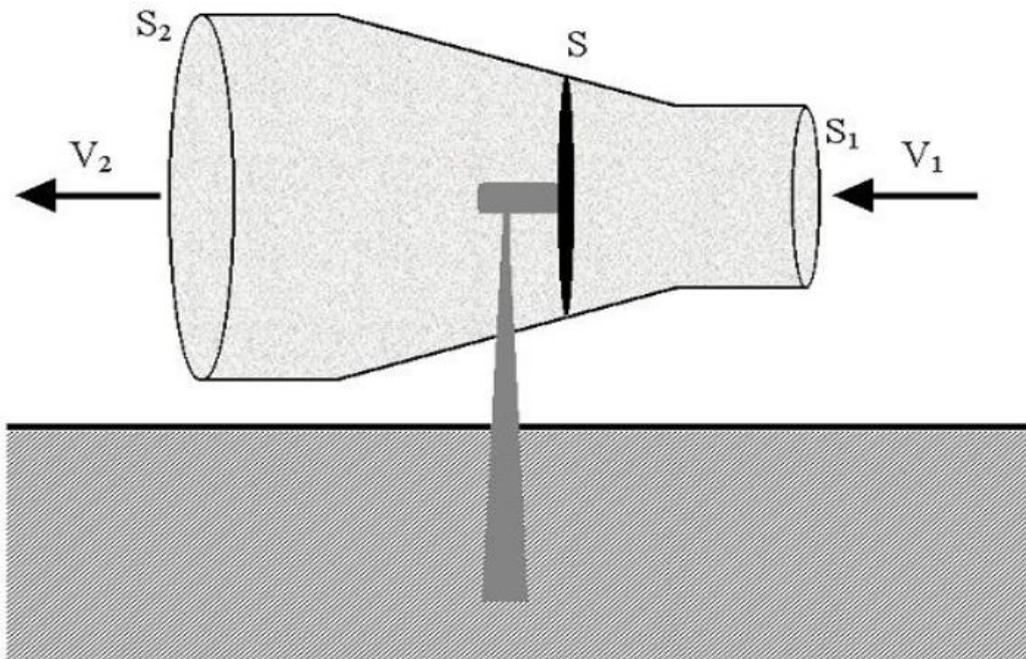


Figure II.5 tube de courant autour d'une éolienne.

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 :

$$P_{mt} = \frac{\rho S V_1^3}{2} \quad (2.10)$$

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

$$\frac{P_m}{P_{mt}} = \frac{\left(1 + \left(\frac{V_1}{V_2}\right)\right)\left(1 - \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^2\right)}{2} \quad (2.11)$$

Si on représente la caractéristique correspondante à l'équation ci-dessus (Figure I-8), on s'aperçoit que le ratio 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

$$P_{rec} = \rho A V^2 \quad (2.12)$$

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 [25] :

$$P_{rec} = 0.37 V^3 \quad (2.13)$$

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  $\lambda$  représentant le rapport entre la vitesse de l'extrémité des pales de l'éolienne et la vitesse du vent

$$\lambda = \frac{R\Omega}{V} \quad (2.14)$$

$\Omega$  : Vitesse angulaire du rotor de l'éolienne

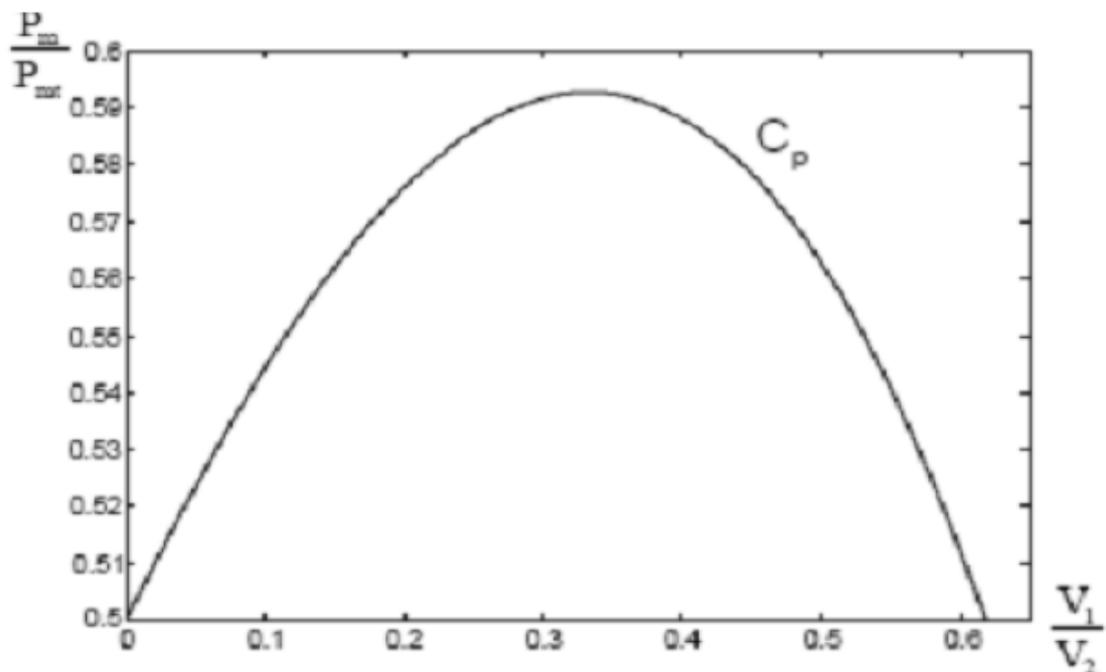


Figure II.6 coefficient de puissance.

Des courbes typiques pour différents aérogénérateurs sont présentes sur la figure (II.6). En générale dans un premier temps, le coefficient de puissance augmente avec la vitesse normalisée,

atteignant un maximum pour une certaine valeur de  $\lambda$  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 :

$$T = \frac{P}{\Omega} = \frac{1}{2} \frac{C_p}{\lambda} \rho \pi R^3 v^2 \quad (2.15)$$

Le coefficient de couple  $C_T$  relié au coefficient de puissance par la relation suivante :

$$C_p(\lambda) = \lambda C_T(\lambda) \quad (2.16)$$

Le coefficient  $C_T$  est, comme le coefficient  $C_p$ , fonction de la vitesse du vent et de la vitesse angulaire du rotor de l'éolienne  $\Omega$ . [26]

## II.8 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 [27]

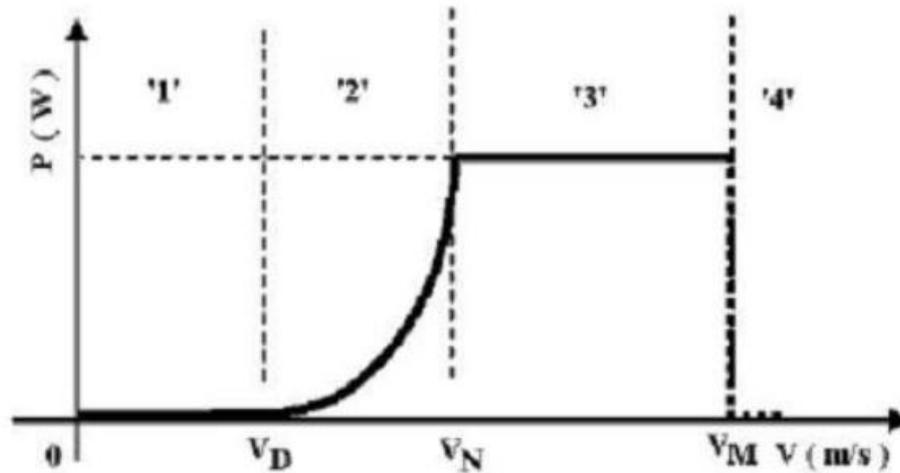
D'après l'équation (I-10), on peut voir que la puissance produite est indéfiniment croissante en fonction de la vitesse du vent, ce qui n'est pas le cas dans la réalité. Les dispositifs de sécurité de la machine éolienne font en sorte à avoir l'expression de la puissance répartie sur différentes gammes 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 sûreté 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 : [27]

- **La zone 1** : où  $P = 0$  (la turbine ne fonctionne pas).
- **La zone 2** : dans laquelle la puissance fournie sur l'arbre dépend de la vitesse du vent  $V_d$ .
- **La 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 II.7** 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 : [26]

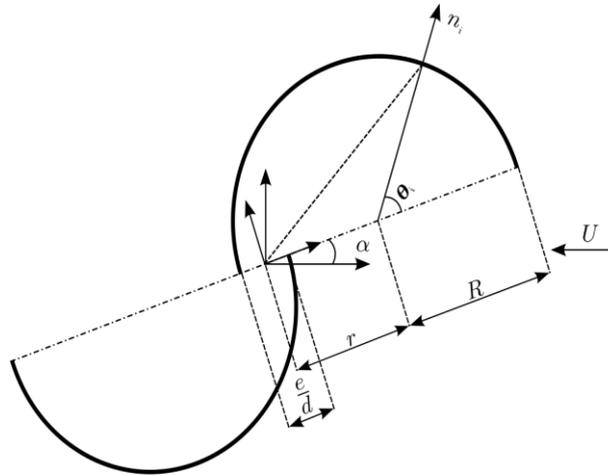
- Système « pitch » ou « à pas ou calage variable » qui permet d'ajuster la portance des pales à la vitesse du vent, principalement pour maintenir une puissance sensiblement constante dans la zone 3 de vitesses.
- Système « stall » ou à « décrochage aérodynamique », le plus robuste car c'est la forme 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).

## II.9 Coefficients de force qui s'exercent sur le rotor

En 1989, Chauvin et Benghrib ont étudié la traînée et la portance aérodynamique d'un rotor Savonius en soufflerie [28]. Dans leurs études, un modèle mathématique du rotor Savonius a été présenté pour calculer les coefficients de traînée et de portance aérodynamique de l'éolienne. Des détails sur ce modèle, sont accessibles dans la thèse de Zéroual Aouachria [29]. Un schéma du rotor Savonius est donné par la figure II.8 suivantes :



**Figure II.8** Modèle schématique d'un rotor Savonius.

Sur la figure II.8, les parties concaves des aubes du rotor de l'éolienne sont appelées intrados et les parties convexes s'appellent extrados. La vitesse du vent au niveau de la partie intrados de l'aube reculant du rotor de l'éolienne est généralement très perturbée par rapport celle qui se trouve au niveau de l'intrados de l'aube avançant. Dans une expérimentation avec un rotor Savonius, la vitesse infinie doit être mesurée loin des aubes du rotor. Les expressions des coefficients de forces  $C_1$  et  $C_2$  qui s'exercent sur l'aube 1 et l'aube 2 du rotor sont données par les relations suivantes :

$$C_1 = \frac{F_{Aube1}}{\frac{1}{2}\rho AU^2} \quad (2.17)$$

$$C_2 = \frac{F_{Aube2}}{\frac{1}{2}\rho AU^2} \quad (2.18)$$

Les lettres 1 et 2 désignent les aubes 1 et 2 du rotor.  $F_{Aube1}$  est la force aérodynamique qu'agit sur l'aube avançant du rotor.  $F_{Aube2}$  est la force aérodynamique qui agit sur l'aube reculant du rotor. Les directions des deux forces  $F_{Aube1}$  et  $F_{Aube2}$  dépendent de la position angulaire du rotor  $\theta$

Le coefficient de la force résultante  $C_{res}$  qui s'exerce sur le rotor est donné par la relation suivante :

$$C_{res} = \frac{F_{res}}{\frac{1}{2}\rho AU^2} \quad (2.19)$$

$F_{res}$  peut être déterminée à partir de  $F_{Aube1}$  et  $F_{Aube2}$ . Par cette méthode, il faut déterminer d'abord l'angle défini par les forces  $F_{Aube1}$  et  $F_{Aube2}$  et ensuite déterminer  $F_{res}$ . Ici, la force résultante  $F_{res}$  a été obtenue en même temps que les forces  $F_{Aube1}$  et  $F_{Aube2}$  avec la simulation CFD.

## II.10 Vitesse spécifique de l'éolienne

Dit aussi paramètre de rapidité ou encore rapport de vitesse en bout de pale (tip-speed ratio), comme étant le rapport de la vitesse d'extrémité des pales sur la vitesse du vent :

$$\lambda = R\Omega V_{vent} \quad (2.20)$$

## II.11 Modèle d'ajustement

De par la forme des nuages de points obtenus, les études de modélisation de la distribution des vitesses du vent ont été orientées vers des modèles associant puissance et exponentielle. Les modèles usuels étant :

- La distribution de Weibull
- La distribution hybride de Weibull
- La distribution de Rayleigh

### II.11.1 Distribution de Weibull :

On rappelle que la fonction de répartition  $F(v)$  est la probabilité que la vitesse du vent soit inférieure à une certaine valeur  $v$  et que la densité de probabilité  $f(v)$  est la dérivée de :

$$fV = \frac{dF(V)}{dV} \quad (2.21)$$

Parmi les distributions utilisées dans les modèles statistiques, la distribution de Weibull s'est avérée appropriée pour la description des propriétés statistiques du vent. La fonction de répartition Weibull à deux paramètres  $c$  et  $k$  s'écrit :

$fV = 1 - e^{-(V/C)^k}$  il résulte la fonction de la densité de probabilité.

$fV = KVVCKe^{-(V/C)^k}$  Avec: - k paramètre de forme caractérise la répartition du vent, - c paramètre d'échelle caractérise la vitesse du vent (plus c est élevé plus l'énergie se trouve dans les hautes vitesses) - V vitesse du vent « instantanée » (moyennée sur 10 mn).

### II.11.2 Distribution hybride de Weibull

La distribution hybride de Weibull est utilisée lorsque la fréquence des vents calmes enregistrée, sur un site donné, est supérieure ou égale à 15% [30]. En effet, cette proportion ne peut pas être négligée et doit être prise en compte lors de la caractérisation d'un site du point de vue éolien. Cette distribution s'écrit :

$$F(v) = (1 - ff_0) \left(\frac{c}{k}\right) \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad (2.22)$$

$$F(v) = ff_0$$

Où  $ff_0$  représente la fréquence des vents calmes.

### II.11.3 Distribution de Rayleigh

La distribution de Rayleigh est un cas particulier de la distribution de Weibull pour le cas où le facteur de forme  $k$  est égal à 2. Sa densité de probabilité est donnée par :

$$F(v) = 2 \frac{v}{c^2} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^2} \quad (2.23)$$

Toutefois la distribution de Weibull classique (fonction de deux paramètres) est la plus indiquée. L'utilisation de ces deux paramètres permet l'évaluation d'un nombre important de propriétés de la distribution, d'où une meilleure caractérisation des sites.

## II.12 Limite de Betz

On peut estimer la valeur maximale de ce rendement, par la formule de Betz [31]. Cette dernière démontre qu'indépendamment du modèle de turbine, seuls 16/27èmes (59 %) de l'énergie cinétique du vent peuvent être transformés en énergies mécanique. Représentant ainsi la puissance maximale qui peut être récupérée par une éolienne.

C'est la valeur maximale de ce coefficient qui correspond à la limite dénommée limite de Betz du coefficient de puissance Albert Betz a démontré que la puissance maximale récupérable est égale aux 16/27 de la puissance incidente  $p_{th}$  [32]. Par la relation suivante :

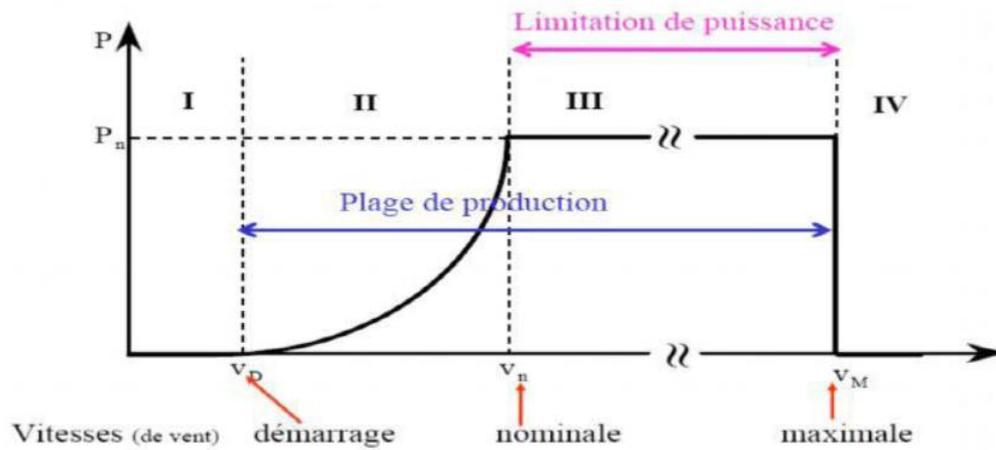
$$P_m = P_{th} \quad (2.24)$$

Pour commencer à produire de l'énergie, une éolienne exige une vitesse de vent minimale, dite vitesse de démarrage. Pour la plupart des éoliennes modernes, cette vitesse de vent est de 3 m/s. Quand le vent augmente, la production augmente avec le cube de la vitesse du vent. Pour une certaine vitesse de vent (dite vitesse nominale), la puissance qui arrive sur la génératrice est égale à la puissance maximale de cette génératrice.

Il faut donc limiter la puissance pour éviter que la génératrice ne soit détruite, quand le vent est trop violent (tempête), l'éolienne doit être arrêtée : c'est la vitesse d'arrêt [33]. Pour les vitesses de vent comprises entre la vitesse nominale et la vitesse d'arrêt, la production est constante, égale à la puissance de la génératrice. La puissance est régulière au niveau du rotor.

Alors Chaque éolienne admet trois paramètres techniques donnés par le constructeur qui sont les vitesses essentielles pour son exploitation (Figure II.9) :

- ✓ La vitesse de démarrage  $V_D$  : la vitesse ou l'éolienne commence à produire l'énergie
- ✓ La vitesse moyenne nominale  $V_n$  : la vitesse ou l'éolienne produite une énergie maximale
- ✓ La vitesse seuil  $V_M$  : vitesse ou l'éolienne s'arrête. La courbe montre que la puissance énergétique récupérable par une éolienne varie très rapidement avec la vitesse du vent. En effet, une éolienne ne délivre sa puissance nominale que dans un intervalle de vitesses du vent restreint.
- ✓ Pour les vitesses du vent autour de  $V_d$ , les pales démarrent leur rotation
- ✓ Au voisinage de  $V_n$ , la puissance délivrée augmente très rapidement. C'est la fourchette de croissance exponentielle de la puissance.
- ✓ Entre  $V_n$  et  $V_m$ , la rotation des pales est freinée par inclinaison des pales au niveau du moyeu. Cela permet à la machine d'éviter les trop fortes contraintes mécaniques dues aux très grandes vitesses. Dans cette fourchette de vitesses, l'énergie délivrée est alors constante.
- ✓ Au-delà de  $V_m$ , l'éolienne est arrêtée. C'est la vitesse de coupure.



**Figure II.9** Courbe de la puissance éolienne en fonction de la vitesse du vent.

**Zone I :  $V < V_d$  :** La vitesse du vent est trop faible. La turbine peut tourner mais l'énergie à capter est trop faible.

**Zone II :  $V_d < V < V_n$  :** Le maximum de puissance est capté dans cette zone pour chaque vitesse de vent. Différentes méthodes existent pour optimiser l'énergie extraite. Cette zone correspond au fonctionnement à charge partielle.

**Zone III :  $V_n < V < V_m$  :** La puissance disponible devient trop importante. La puissance extraite est donc limitée, tout en restant le plus proche possible de la puissance nominale de la turbine ( $P_n$ ). Cette zone correspond au fonctionnement à pleine charge.[32]

## II.13 Conversion d'énergie éolienne

La turbine éolienne transforme une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. On peut écrire l'énergie cinétique d'une colonne d'air de longueur  $dx$ , de section  $S$ , de masse volumique  $\rho$ , animée d'une vitesse  $v$ , (figure II.10) comme suite [33],[34] :

$$dE_c = \frac{1}{2} \rho S dx v^2 \quad (2.25)$$

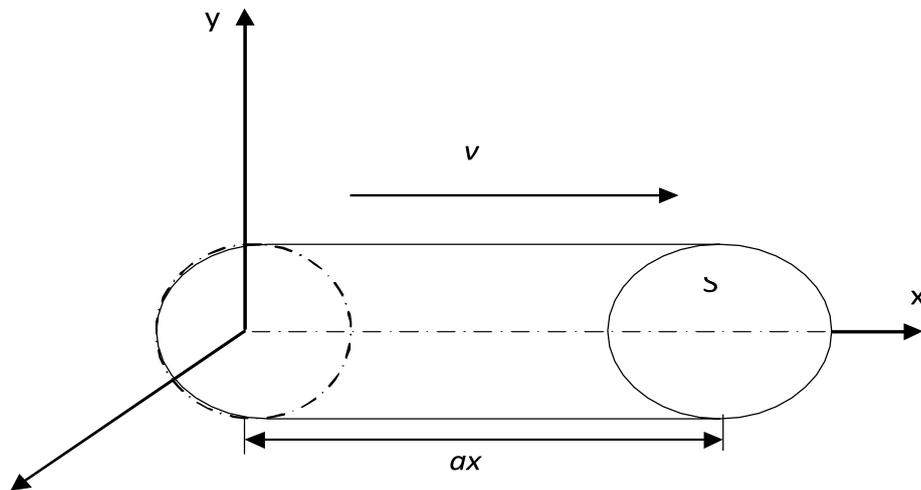


Figure II.9 Colonne d'air animée d'une vitesse  $v$ .

La puissance  $P_m$  extraite du volume d'air en mouvement est la dérivée de l'énergie cinétique par rapport au temps.

En supposant que  $dx = v dt$ , on déduit l'expression de  $P_m$  :

$$P_m = \frac{dE_c}{dt} = \frac{1}{2} \rho S v^3 \quad (2.26)$$

$E_c$ : énergie cinétique

$\rho$ : masse volumique de l'air en ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ), elle dépend des conditions climatiques.

La masse volumique peut être exprimée par,[35]:

$$\rho = \frac{100P_0}{R_d(T+273.15)} \quad (2.27)$$

$\rho$  : la densité( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

$R_d$  : constante des gaz parfaits( $287\text{JK}^{-1}\text{kg}^{-1}$ )

$T$  : température( $^{\circ}\text{C}$ )

$P_0$  : pression atmosphérique( $1013.25\text{mbar}$ )

## II.14 Capacité éolienne

Les éoliennes peuvent être divisées en plusieurs grandes catégories compte tenu de leur capacité nominale : micro, petites, moyennes, grandes et très grandes éoliennes. Bien qu'une définition restreinte des micro-éoliennes ne soit pas disponible, elle est acceptée qu'une turbine dont la puissance nominale est inférieure à plusieurs kilowatts peut être classée comme micro éolienne [36].

Les micro-éoliennes sont particulièrement adaptées aux emplacements où le réseau électrique est indisponible. Ils peuvent être utilisés sur une structure par base, tels que l'éclairage public, le pompage de l'eau et les habitants des zones reculées, en particulier dans les pays développés. Parce que les micro-éoliennes nécessitent relativement peu vitesses de démarrage au démarrage et fonctionnent dans des vitesses de vent modérées, ils peuvent être largement installés dans la plupart des régions du monde pour exploiter pleinement les ressources éoliennes et améliorer considérablement la disponibilité de la production d'énergie éolienne. Les petites éoliennes se réfèrent généralement aux turbines dont la puissance de sortie est inférieure à 100kW [37].

Les petites éoliennes ont été largement utilisées dans les maisons d'habitation, fermes et autres applications individuelles à distance telles que les stations de pompage d'eau, sites télécoms, etc., dans les régions rurales. Les petites éoliennes distribuées peuvent augmenter l'approvisionnement en électricité des régions tout en retardant ou en évitant la nécessité d'augmenter la capacité des lignes de transmission.

Les éoliennes les plus courantes ont des tailles moyennes avec des puissances nominales de 100 kW à 1 MW. Ce type d'éoliennes peut être utilisé soit sur le réseau ou systèmes hors réseau pour l'alimentation du village, les systèmes hybrides, l'énergie distribuée, l'éolienne centrale électrique, L'éolien mégawatt jusqu'à 10 MW peuvent être classées comme grandes éoliennes. Ces dernières années, les éoliennes de plusieurs mégawatts sont devenues le courant dominant du marché. International de l'énergie éolienne. La plupart des parcs éoliens utilisent actuellement des mégawatts d'énergie éolienne turbines, en particulier dans les parcs éoliens offshore.

Les éoliennes ultra-larges sont appelées éoliennes avec la capacité supérieure à 10 MW. Ce type d'éolienne en est encore aux premiers stades de la recherche et développement.

## II.15 Facteur de capacité de l'éolienne

En raison de la nature intermittente du vent, les éoliennes ne produisent pas d'électricité tout le temps. Ainsi, un facteur de capacité d'une éolienne est utilisé pour fournir une mesure de la puissance de sortie réelle de l'éolienne sur une période donnée (par exemple, une année) divisée par sa puissance de sortie si la turbine a fonctionné tout le temps. Un facteur de capacité raisonnable serait de 0,25 à 0,30 et un très bon facteur de capacité serait d'environ 0,40 [38]. En fait, le facteur de capacité de l'éolienne est très sensible à la vitesse moyenne du vent.

## II.16 Facteurs de capacité et production projetée

Un facteur très important pour les résultats finaux d'une ACV d'une éolienne est l'estimation production d'énergie. L'énergie électrique produite est corrélée au facteur de capacité, défini comme le rapport entre l'énergie effectivement produite et l'énergie qu'il est possible de produire si fonctionnant à la puissance nominale tout le temps. La plupart des évaluations examinées supposent une capacité assez élevée et donc une production totale élevée d'énergie électrique, et une réduction des émissions et de la consommation d'énergie par kWh d'énergie électrique produit. De nombreuses ACV reposent totalement sur des chiffres théoriques sur la production et aboutissent à des facteurs de capacité qui s'avèrent être des estimations trop élevées lorsqu'elles sont comparées aux chiffres réellement mesurés. Par exemple, White (2005) compare les facteurs de capacité prévus pour trois parcs éoliens avec les facteurs de capacité réels mesurés sur l'utilisation réelle, qui étaient nettement inférieures aux prévisions.

La capacité projetée était de 0,33, 0,35 et 0,31, alors que les facteurs de capacité réelle étaient de 0,256, 0,286 et 0,199 respectivement. Pour les trois parcs éoliens, les facteurs de capacité ont été largement surestimés, ce qui rend l'estimation de la puissance produite, et donc du taux de retour énergétique et mesures similaires, hautement imprécis si le nombre projeté est utilisé. Ardenne et al. (2008) trouve le facteur de capacité réel mesuré sur une année à 0,19 par rapport au facteur de capacité de conception de 0,3.

Selon le facteur de capacité utilisé, de grandes différences dans les résultats de l'électricité produite se produiront. Étant donné que les résultats des évaluations sont souvent présentés en consommation d'énergie ou en émissions par kWh de l'énergie électrique produite, le facteur de capacité choisi peut avoir un impact important sur le résultat. Communiquer les émissions et la consommation d'énergie sous la forme d'une valeur fixe par kWh d'énergie électrique produite peut être problématique compte tenu des grandes différences de résultat selon les productions.

La production est souvent difficile à estimer, et l'incertitude de celle-ci doit être communiquée.

## II.17 Description d'une aile ou d'une pale d'éolienne

La (Figure II-11) décrit une pale d'éolienne et identifie les différentes zones avec la terminologie appropriée

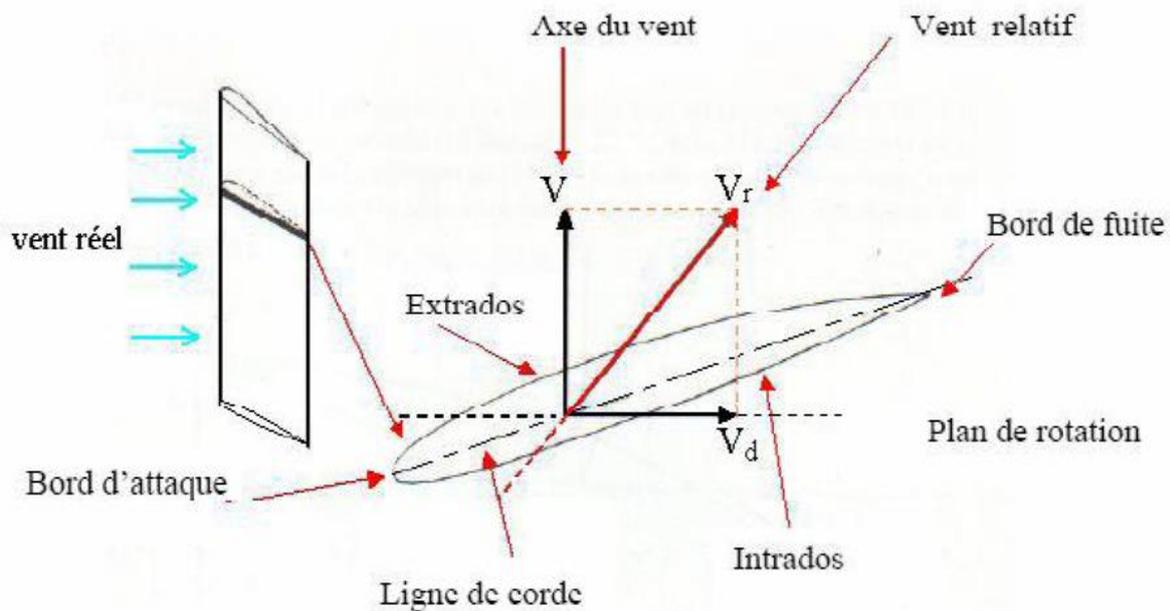


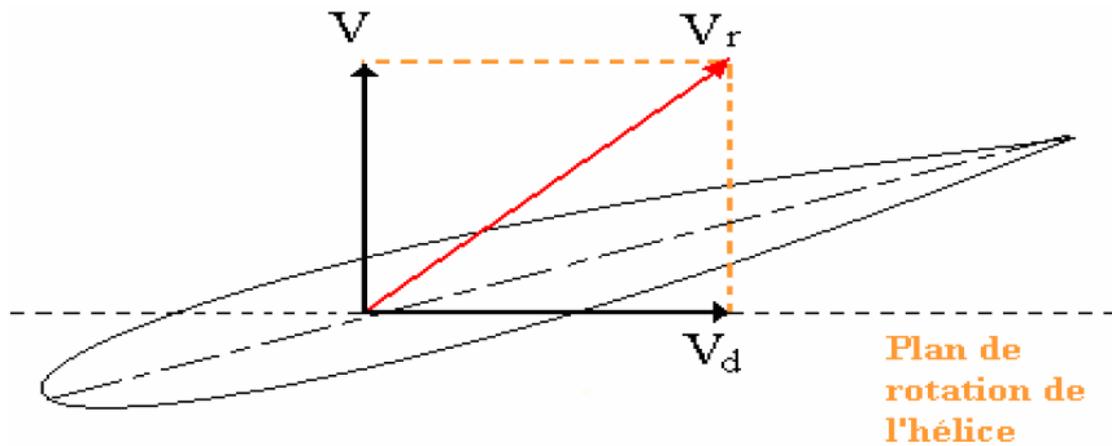
Figure II.11 Description d'une pale d'éolienne [39].

## II.18 Triangle des vitesses sur une pale d'éolienne

Supposons qu'il n'y ait pas de vent et que la pale tourne malgré tout. Lors de sa rotation, la pale « voit » du vent arriver parallèlement à son plan de rotation. C'est le même phénomène que si vous rouliez à vélo lorsqu'il n'y a pas de vent. Vous sentez le vent « créé » par votre déplacement. Ce vent souffle dans votre visage.

Supposons maintenant que la pale ne tourne pas et que le vent souffle : la pale « voit » le vent arriver selon la direction du vent. Pour reprendre l'image de notre cycliste, vous ne roulez pas et le vent souffle sur votre côté. Vous ressentez donc le vent selon sa direction.

Supposons enfin que le vent continue de souffler dans la même direction et que la pale tourne dans son plan de rotation. La pale « voit » maintenant un vent qui est une combinaison des deux vents précédents, à savoir le vent réel et le vent dû à la rotation. Dans le cas de notre cycliste, ceci revient à rouler vite avec un vent de côté. Vous ressentez une combinaison du vent de face et de celui de côté. Ce vent de combinaison est le vent relatif. La figure (II-12) illustre le concept du vent relatif « vu » par la pale.



**Figure II.12** Triangle des vitesses et vent relatif [39].

Où :

$V$  : vent qui souffle réellement.

$V_d$  : vent dû à la rotation.

$V_r$  : vent de combinaison ou vent relatif.

$V_r$  est la résultante de  $V$  et  $V_d$ .

La construction de résultantes forme un triangle, d'où le nom de triangle des vitesses. Lors du mouvement de rotation des pales, chaque point appartenant aux pales se déplace sur un cercle. Le rayon  $r$  du cercle, correspond à la distance depuis le centre de rotation.

Plus le rayon du cercle sur lequel le point se trouve est grand, plus le point devra parcourir de distance à chaque tour, et donc, plus sa vitesse tangentielle,  $Vd$  sera élevée. On peut écrire que, pour un régime,  $\omega$ , de rotation des pales la vitesse tangentielle  $Vd$  sera :  $Vd = r \cdot \omega$  Tous les points d'une même pale n'ont donc pas la même vitesse tangentielle.

Comme le vent relatif est une combinaison de la vitesse tangentielle et de la vitesse du vent, chaque section de la pale, selon sa distance du centre de rotation, ne « voit » pas le même vent relatif. Chaque section de la pale ayant un vent relatif différent, il faut que l'angle d'attaque soit lui aussi différent si l'on souhaite avoir la portance maximale dans chaque section.

Afin de remplir cette condition, la pale est vrillée ou possède un gauchissement géométrique. Dans bien des cas, les pales des éoliennes de petite puissance, moins de 5 kW, ne possèdent pas de gauchissement géométrique. L'angle d'attaque est donc optimal pour une partie seulement de la pale. Des raisons de simplicité de fabrication et de coût peuvent expliquer ce choix.

## II.19 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté une analyse générale sur les éoliennes. Nous avons parlé du fonctionnement des éoliennes et du fonctionnement de leurs lois, et par la conversion d'énergie mécanique on conclut que l'éolienne est transformée une partie de l'énergie cinétique de vent en énergie mécanique.

On conclut que par la limite de Betz la puissance théorique maximale développée par un capteur éolien est égale à  $16/27$  (environ 60 %) de la puissance incidente du vent qui traverse l'éolienne.

# CHAPITRE III

*Evaluation énergétique et  
exérgétique d'une éolienne*

### III.1 Introduction

Alors que les combustibles fossiles tels que le pétrole et le charbon s'épuisent, le besoin d'utiliser des sources d'énergie renouvelables (SER) devient de plus en plus urgent. Le soutien à ce point de vue devient plus grand à mesure que les technologies SER, en plus d'être bénéfiques pour l'environnement, deviennent économiquement durables.

L'énergie éolienne est une forme indirecte d'énergie solaire puisque le vent est induit principalement par le chauffage inégal de la croûte terrestre par le soleil. La conversion de cette énergie éolienne en énergie électrique peut réduire dans une large mesure le déficit énergétique. Contrairement aux rayonnements solaires directs, l'énergie éolienne non conventionnelle peut être disponible en permanence dans des emplacements de vent sélectionnés. Cependant, l'étendue de la production d'électricité peut varier en raison des vitesses de vent variables au cours des jours, d'un endroit à l'autre et d'une saison à l'autre.

La capacité d'énergie éolienne est actuellement en croissance rapide dans le monde entier. À la fois différentes formes d'analyse du cycle de vie deviennent courantes pour mesurer l'impact environnemental des systèmes éoliens. Cette mémoire identifie plusieurs problèmes avec les méthodes actuelles d'évaluation de l'impact environnemental de l'énergie éolienne et suggère des améliorations qui rendront ces évaluations plus robustes.

L'utilisation du concept d'exergie combiné à l'analyse du cycle de vie a été proposée par plusieurs chercheurs au fil des ans. Les avantages et des inconvénients liés à l'utilisation de l'analyse du cycle de vie basée sur l'exergie sont trouvés. Pour certaines applications l'utilisation de l'exergie peut résoudre de nombreux problèmes avec l'analyse du cycle de vie actuelle méthodes, alors que d'autres problèmes subsistent.

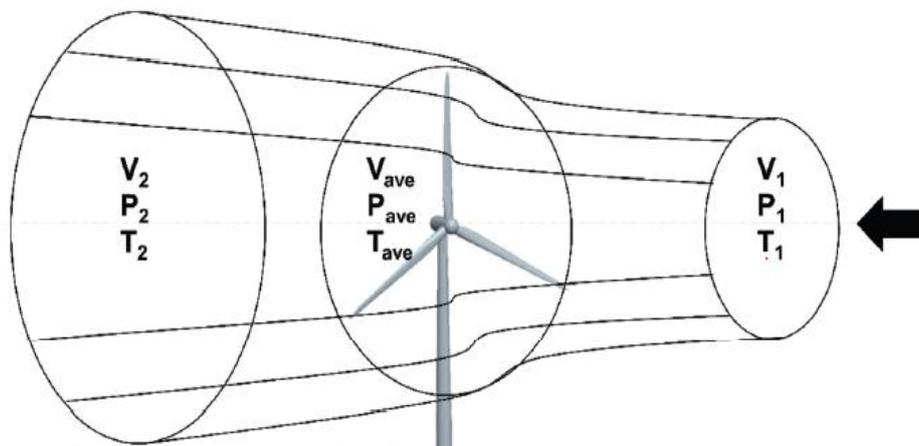
La méthode d'analyse exergétique du cycle de vie est utilisée pour évaluer la durabilité d'une éolienne existante. L'éolienne évaluée semble durable dans la mesure où qu'il restitue beaucoup plus d'exergie qu'il n'en utilise au cours du cycle de vie.

### III.2 Analyse thermodynamique

Évaluations thermodynamiques générales impliquant les équations de bilan énergétique et exergétique, et les rendements énergétique et exergétique sont donnés pour analyser les potentiels d'amélioration des éoliennes. Dans du point de vue le plus général, une équation d'équilibre pour une quantité donnée dans un processus doit être écrit comme suit ;

$$\text{saisir} + \text{génération} - \text{production} - \text{consommation} = \text{accumulation} \quad (3.1)$$

Éq (3.1) est censé être le bilan quantitatif du processus et doit être donné comme La quantité accumulée dans un processus est égale à la différence entre la quantité nette transférée à travers la limite du système plus la quantité générée et la quantité consommée à l'intérieur les frontières du système.



**Figure III.1** Un tracé schématique du tube de flux d'une éolienne pour l'analyse thermodynamique.

### III.3 Méthodes d'analyses

Il existe deux méthodes d'analyse de l'éolienne

- ✓ Analyse énergétique
- ✓ Analyse exergétique

L'analyse énergétique est basée sur la première loi de la thermodynamique et qui fournit une évaluation qualitative des différentes pertes dans les différents composants des différents systèmes.

L'analyse exergétique est basée sur la deuxième loi de la thermodynamique et qui fournit une vision plus claire des pertes d'énergie dans le système, car elle présente une analyse quantitative et qualitative des différentes pertes.

### III.3.1 Analyse énergétique

Après que plusieurs chercheurs du monde entier aient commencé à travailler sur des méthodes similaires à l'analyse énergétique, le mot analyse énergétique a été prononcé lors d'une conférence organisée par la Fédération internationale des instituts d'études avancées en 1974, où des directives avec des conventions pour l'analyse énergétique ont été fournies (Mortimer, 1991). Les lignes directrices définissent la technique, les unités ainsi que les méthodes de calcul et de communication des résultats.

Depuis lors, ces conventions ont changé et différents types d'analyse énergétique ont évolué. Crawford (2009) décrit deux méthodes traditionnelles différentes d'analyse énergétique, à savoir l'analyse des processus et l'analyse des entrées-sorties (E/S). L'analyse des processus, ou analyse de la chaîne de processus, mesure les flux de matériaux et d'énergie des processus au cours du cycle de vie et tente de traduire les flux de matériaux en énergie en utilisant un facteur d'énergie intrinsèque pour résumer la consommation totale d'énergie.

L'analyse des entrées-sorties, quant à elle, utilise une matrice de différentes parties d'une économie entière et utilise des facteurs économiques pour calculer la consommation d'énergie (White et Kulcinski, 1998).

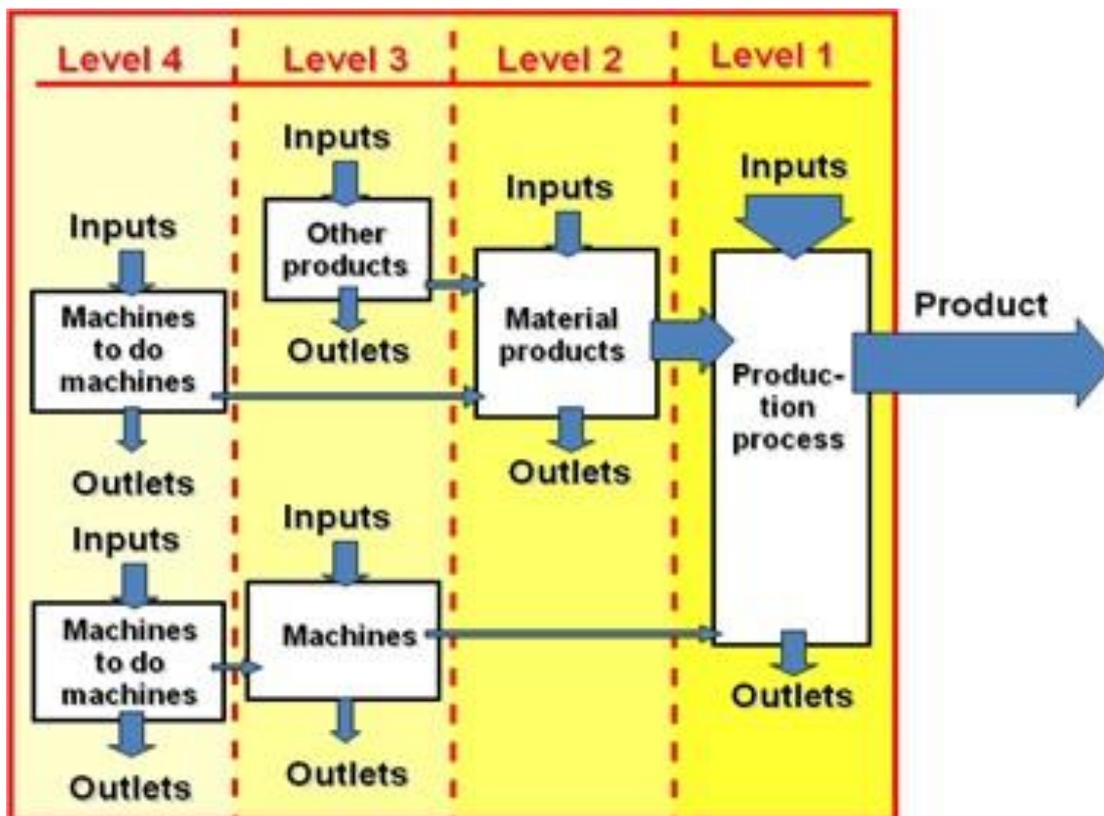


Figure III.2 Une analyse de processus typique avec jusqu'à quatre niveaux.

L'analyse énergétique des systèmes éolienne découle de l'énergie cinétique du flux d'air  $E_c$  qui se calcule comme :

$$E_c = \frac{1}{2} m V^2 \quad (3.2)$$

Où  $m$  et  $V$  sont respectivement la masse et la vitesse du flux d'air. La masse  $m$  peut encore être exprimé comme :

$$m = \rho A V t \quad (3.3)$$

Où  $\rho$  est la masse volumique de l'air,  $A$  est la surface balayée par le rotor perpendiculairement à l'écoulement, et  $t$  est le temps pendant lequel le flux traversant la zone balayée à la vitesse  $V$ . Par en appliquant la théorie de la quantité de mouvement simple, le taux de variation de la quantité de mouvement est égal au changement global de vitesse multiplié par le débit massique  $\dot{m}$ , c'est-à-dire,

$$\dot{M} = \dot{m}(V_1 - V_2) \quad (3.4)$$

Où  $V_1$  et  $V_2$  sont les vitesses du vent à l'entrée et à la sortie, respectivement, du tube de courant. Le taux de changement de quantité de mouvement est également égal à la résultante force de poussée. Ainsi, la puissance consommée par le WT est calculée comme :

$$P = \dot{m}(V_1 - V_2) V_{\text{moy}} \quad (3.5)$$

Où  $V_{\text{moy}}$  est la vitesse d'écoulement moyenne au rotor. En revanche, le taux de changement d'énergie cinétique du flux peut être calculé comme

$$E_c = \frac{1}{2} \dot{m}(V_1^2 - V_2^2) \quad (3.6)$$

Basé sur la conservation de l'énergie, Eqs. (3.5) et (3.6) doivent être égaux, ce qui Résulte-en :

$$V_{\text{moy}} = \frac{1}{2}(V_1 + V_2) \quad (3.7)$$

Ainsi, le retard du vent devant les rotors ( $V_1 - V_{\text{moy}}$ ) est égal à la Ralentissement du vent après le rotor ( $V_{\text{moy}} - V_2$ ). Par Éqs. (3.3), (3.5) et (3.7), La puissance du rotor peut être calculée comme :

$$P = \frac{1}{4} \rho A (V_1 + V_2)^2 (V_1 - V_2) \quad (3.8)$$

Soit Éq (3.8) peut être reformulé comme :

$$P = \frac{1}{4} \rho A V_1^3 (1+a)^2 (1-a) \quad (3.9)$$

Afin d'obtenir la puissance maximale, assimiler 0 à la différenciation de l'Eq. (3.9) Par rapport à 'a' résultant en un  $a = \frac{1}{3}$ . Ainsi, la puissance maximale :

$$P_{\text{max}} = \frac{8}{27} \rho A V_1^3 \quad (3.10)$$

Est atteint, lorsque la vitesse du vent à l'exutoire est égale au tiers de la vitesse du vent à l'entrée.

Définir le coefficient de puissance comme :

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho A V_1^3} \quad (3.11)$$

Le coefficient de puissance maximum est calculé  $C_{pmax}=0,593$ . Ce maximum coefficient de puissance, appelé limite de Lanchester-Betz (ou limite de Betz) [40,41], explique la puissance maximale qui peut être extraite du flux d'air et peut également être facilement dérivé par d'autres théories (par exemple, la théorie du disque rotor et l'élément de pale théorie de la quantité de mouvement [42]).

Malgré la simplicité lors du calcul du coefficient de puissance, le totale puissance d'entrée au dénominateur ne tient pas compte des impacts de la pression, la température, et l'humidité. En fait, la densité de l'air change à mesure que la température ambiante changement de pression, de température et d'humidité, qui peut être exprimé comme

$$\rho = \frac{1 + \omega}{R_a + \omega R_v} \frac{P}{T} \quad (3.12)$$

Où ( $\omega$ ) est le taux d'humidité de l'air, constante des gaz  $R_a = 287,1$  J/kg K, eau constante de vapeur  $R_v = 461,5$  J/kg K, et T est la température absolue (unité : K). Dans de plus de distinguer l'énergie éolienne P, la lettre minuscule p est utilisée pour représenter la pression (unité : Pa) dans l'air humide ci-après. La coefficient de puissance d'un WT compte tenu d'un ensemble complet de variables météorologiques peut être exprimé comme :

$$C_p = \frac{2(R_a + \omega R_v)}{1 + \omega} \frac{TP}{p A V_1^3} \quad (3.13)$$

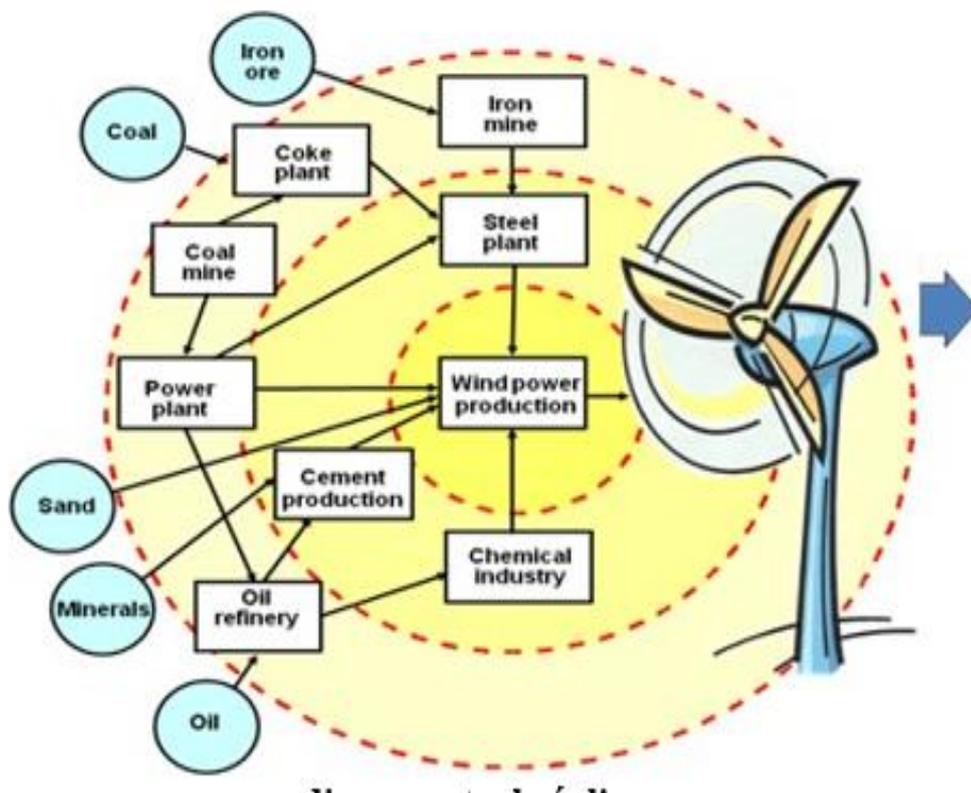
Les dérivations ci-dessus fournissent les bases de la théorie disponible énergie/puissance qu'un WT peut extraire du flux d'air. Cependant, divers effets pourrait avoir une influence sur la puissance de sortie réelle, par exemple, les tourbillons libérés de l'extrémité de la pale et le moyeu pourraient affecter de manière significative la force de portance du rotor et la puissance de sortie [43]. Du pouvoir des pertes se produisent également lors de la transformation de l'énergie par le rotor en mécanique arbre et au générateur qui convertit l'énergie cinétique angulaire en énergie électrique.

Dans De plus, des vitesses de vent élevées et soutenues pourraient entraîner une forte fatigue et des charges extrêmes sur les systèmes éoliens sans contrôle de turbine approprié ou protection de sécurité. Ainsi, le vent la puissance est destinée à être limitée, lorsque la vitesse du vent entrant est au-delà d'une valeur nominale valeur (c'est-à-dire la vitesse nominale du vent), grâce à différentes stratégies comprenant généralement régulation du décrochage, régulation du Tangage et contrôle du lacet [44]. En conséquence, la puissance de sortie La puissance d'un WT correspond à quatre étapes de fonctionnement :

(1) puissance nulle lorsque la vitesse du vent entrant est inférieure à une vitesse de vent de démarrage, (2) augmentée de manière exponentielle puissance à mesure que la vitesse du vent augmente entre la vitesse de démarrage et la vitesse nominale vitesse du vent, (3) puissance de sortie nominale lorsque la vitesse du vent se situe entre la vitesse du vent nominale et une vitesse de vent de coupure, et (4) une puissance nulle lorsque la vitesse du vent entrant est supérieure à la vitesse de coupure du vent.

### III.3.2 Analyse exergétique

Étant donné que l'analyse énergétique est basée sur la première loi de la thermodynamique, elle échoue souvent à identifier les pertes de travail ou l'utilisation efficace des ressources. Une analyse énergétique basée sur les processus pourrait prendre en compte l'exergie pour former une analyse exergétique. Pour estimer l'apport total d'exergie dans un certain processus, vous devez prendre en compte tous les différents apports d'exergie.



**Figure III.3** Limites possibles du système entourant le processus de production d'une centrale éolienne.

Wall (1977) a appelé la budgétisation des entrées et des sorties d'exergie comme un moyen d'exprimer la somme des ressources naturelles consommées à travers une certaine analyse d'exergie de processus. À partir de cette idée, plusieurs types de méthodes basées sur l'exergie ont évolué, qui seront décrites dans le segment 2.3.

### III.3.2.1 C'est quoi l'exergie

En thermodynamique, l'exergie d'un système est définie comme le maximum quantité de travail utile au cours d'un processus qui peut amener le système à l'équilibre avec un environnement de référence [45]. Basé sur la deuxième loi de la thermodynamique, l'analyse exergétique est un outil alternatif utile pour l'analyse, l'évaluation et la conception de nombreux systèmes électriques et énergétiques, par exemple, les énergies renouvelables et traditionnels systèmes. La différence significative entre les analyses énergétiques et exergétiques peut être caractérisée par [46] :

- Dans un processus irréversible réel, l'exergie est toujours consommée ; il n'est donc pas soumis à une loi de conservation. En revanche, l'énergie n'est ni créée ni détruite, mais passer d'une forme à une autre, au cours d'un processus. Ainsi, il est soumis à la loi de conservation de l'énergie.
- Bien que d'un point de vue théorique l'exergie puisse être définie sans environnement de référence, il est souvent défini comme une quantité relative à un environnement de référence spécifié et est égal à zéro lorsqu'il est en équilibre avec le milieu de référence.

L'exergie totale  $E_x$  d'un écoulement de masse unitaire se compose généralement de quatre parties, qui peut s'exprimer comme :

$$E_x = E_{x_c} + E_{x_{po}} + E_{x_{ph}} + E_{x_{ch}} \quad (3.14)$$

Où  $E_{x_c}$ ,  $E_{x_{po}}$ ,  $E_{x_{ph}}$  et  $E_{x_{ch}}$  représentent les valeurs cinétique, potentielle, physique et exergies chimiques, respectivement. Pour l'analyse thermodynamique des systèmes WT, le l'exergie potentielle et l'exergie chimique sont négligeables dans l'exergie totale. Ainsi, le l'exergie totale pour un WT peut être réduite comme :

$$E_x = E_{x_c} + E_{x_{ph}} \quad (3.15)$$

Où l'exergie cinétique est définie ici comme le maximum possible l'énergie cinétique disponible que le flux d'air peut produire d'une vitesse du vent à une arrêt complet et l'exergie physique comprend l'enthalpie et l'entropie changements liés au fonctionnement de la turbine. L'exergie physique peut être calculée comme une courbe de puissance typique des WT avec quatre étapes opérationnelles :

$$E_{x_{ph}} = c_p(T_2 - T_1) + T_0 \left( c_p \ln \left( \frac{T_2}{T_1} \right) - R \ln \left( \frac{P_2}{P_1} \right) - \frac{c_p(T_0 - T_{ave})}{T_0} \right) \quad (3.16)$$

Où le premier terme et le deuxième terme du côté droit de l'Eq. (3.16) sont les contributions d'enthalpie et d'entropie, respectivement.  $c_p$  est la chaleur spécifique de l'écoulement ;  $T_0, T_1, T_2, T_{ave}$  sont la température de référence, la température d'entrée, la température de sortie, et la température moyenne, respectivement ;  $P_1$  et  $P_2$  sont la pression d'entrée et de sortie pression,

respectivement ; et  $R$  est une constante liée au gaz et constantes de vapeur d'eau. Idéalement, la température et la pression à l'entrée et à la sortie sont nécessaires pour calculer l'exergie physique.

Cependant, il est fastidieux de mesurer la températures et pressions à l'entrée et à la sortie du tube de flux WT en temps réel applications, sans parler de la situation lors de l'évaluation de l'énergie éolienne les performances d'efficacité des ressources et/ou des WT avant de déployer les WT. De plus, la variable météorologique humidité n'est pas prise en compte dans l'Eq. (3.15). Pour gérer ça difficulté.

### III.3.3 La différence entre exergie et énergie

Est clairement expliquée par Gong et Wall (1997), voir tableau III.1 La première loi de la thermodynamique conclut que ni l'énergie ni la masse ne peuvent disparaître.

L'énergie est définie comme un mouvement ou une capacité à produire un mouvement et est une mesure de quantité. L'énergie est toujours conservée et ne peut être ni produit ni consommé.

En même temps, seule une partie de cette énergie peut être convertie en travail, pour la plupart des vecteurs énergétiques.

L'exergie est définie comme le travail, ou la capacité à produire du travail, où travail signifie mouvement ordonné. L'exergie est une mesure de la qualité et de la quantité et n'est que conservés dans des processus réversibles. Comme les processus réels sont toujours irréversibles, l'exergie est toujours perdue dans processus réels.

**Tableau III.1** différence entre exergie et énergie.

Energie	Exergie
<ul style="list-style-type: none"> <li>-La première loi de la thermodynamique.</li> <li>-L'énergie est le mouvement ou la capacité à produire du mouvement.</li> <li>-L'énergie et la matière sont "la même chose".</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-La deuxième loi de la thermodynamique.</li> <li>-L'exergie est un travail, c'est-à-dire un mouvement ordonné ou la capacité de produire du travail.</li> <li>-L'exergie et l'information sont « la même chose ».</li> <li>-L'exergie est toujours conservée dans un processus réversible, mais réduit dans un processus irréversible.</li> </ul>

### III.4 Le concept d'exergie et la signification de l'analyse exérgétique

L'exergie est la propriété du système, qui donne la puissance maximale qui peut être distraite du système, lorsqu'il est amené à un état d'équilibre thermodynamique à partir d'un état de référence. Le transfert d'exergie peut être associé au débit massique, à l'interaction de travail et à l'interaction de chaleur. L'exergie dynamique et cinétique sont deux autres formes d'exergie qui existent dans la technologie RES. L'exergie est le travail théorique maximal (travail de puits ou travail électrique) pouvant être obtenu lorsque les systèmes interagissent jusqu'à l'équilibre, le transfert de chaleur se produisant uniquement avec l'environnement. L'exergie est une mesure de l'écart entre l'état du système et celui de l'environnement, et est donc un attribut du système et de l'environnement ensemble une analyse exérgétique (également appelée analyse de la seconde loi) s'est avérée être un outil puissant dans la simulation des analyses thermodynamiques de l'énergie systèmes.

Le concept d'exergie a ses racines dans la thermodynamique classique du début du 19<sup>ème</sup> siècle et l'histoire du concept est bien documentée, par ex. par Sciubba et Wall (2007). Le mot exergie a été introduit par Zoran Rant en 1953 comme un mot pour « travail externe » ou « capacité de travail technique ». Depuis lors, plusieurs définitions légèrement différentes de l'exergie ont existé. Une définition moderne commune telle qu'énoncée par Wall (1977) est : "L'exergie d'un système dans un certain environnement est la quantité de travail mécanique qui peut être extraite au maximum du système dans cet environnement".

Szargut (1989) définit l'exergie légèrement différemment comme le processus inverse de création du matériau à partir de l'environnement de référence :

Le travail minimal nécessaire pour produire un matériau dans son état spécifié à partir de matériaux communs dans l'environnement de manière réversible, la chaleur n'étant échangée qu'avec l'environnement."

Sciubba et Wall (2007) définissent l'exergie comme :

"... le travail théorique utile maximal obtenu si un système S est mis en équilibre thermodynamique avec l'environnement au moyen de processus dans lesquels le S n'interagit qu'avec cet environnement."

Parfois, l'exergie est définie comme la partie de l'énergie qui peut être entièrement convertie en tout autre type d'énergie, ce qui n'est pas tout à fait correct puisque l'exergie résulte de la possibilité d'interagir avec l'environnement (Szargut, 1988). Par exemple, la suppression de l'énergie d'un vecteur énergétique dont la température est inférieure à celle de l'environnement entraînera une augmentation de l'exergie.

Pour décrire la différence entre l'énergie et l'exergie, le concept d'anergie a été introduit tel que présenté dans l'équation (3.17) (Szargut, 1988).

$$A' = W - E \quad (3.17)$$

Où A' est l'anergie, W l'énergie et E l'exergie. Il est important de noter que l'anergie peut être négative, c'est-à-dire lorsque l'exergie est supérieure à l'énergie, comme pour les systèmes froids ou les systèmes à basse pression. Ainsi, l'anergie n'est pas un concept communément accepté ou nécessaire.

L'exergie est fortement liée à l'entropie puisque l'exergie d'un système est (Wall 1977) :

$$E = T_0(S^{\text{tot}} - S^{\text{tot}}) \quad (3.18)$$

$$E = T_0(S_{\text{tot}} - S_{\text{tot}}) \quad (3.19)$$

Qui peut être déduit à l'aide de relations thermodynamiques en :

$$E = U + p_0 - T_0 S - \sum \mu_{i0} n_i \quad (3.20)$$

Pour un flux, l'exergie vaut :

$$E = H - T_0 S - \sum \mu_{i0} n_i \quad (3.21)$$

Où E est l'exergie, T<sub>0</sub> est la température de l'environnement, S est l'entropie, S<sup>tot</sup> est l'entropie du système total, S<sub>eq<sup>tot</sup></sub> est l'entropie du système total à l'équilibre, U est l'énergie interne, P<sub>0</sub> est la pression de l'environnement, μ<sub>i0</sub> est le potentiel chimique de la substance i dans son état environnemental, n<sub>i</sub> est kmol de l'élément i et H est l'enthalpie.

L'exergie n'est pas un attribut statique, mais doit être formulée par rapport à un environnement de référence ou à un état de référence. Plus le contenu exergétique est élevé, plus un système est éloigné thermodynamiquement de son environnement de référence.

L'exergie est aussi parfois quantifiée en plusieurs types d'exergie différents, tels que : l'exergie cinétique, l'exergie potentielle, l'exergie physique, l'exergie chimique et l'exergie nucléaire (Szargut, 2005).

$$E = \frac{v^2}{2} + gX + E_{\text{ph}} + E_{\text{ch}} + E_{\text{nu}} \quad (3.22)$$

Où g est la constante gravitationnelle, v est la vitesse liée à la surface de la Terre, X est la hauteur au-dessus du niveau le plus bas prévalant à proximité de l'appareil considéré.

### III.5 Exergie et information

Puisque l'exergie est une mesure de combien un système s'écarte de son équilibre avec l'environnement, plus il faut d'informations pour le décrire, plus il s'écarte. Cela crée un lien fort entre l'exergie et l'information (Wall 1977). La relation entre l'exergie  $E$  et l'information  $I$  en unités binaires (bits) est :

$$E = k'T_0I \quad (3.23)$$

Où  $I$  est une information,  $T_0$  est la température de l'environnement et  $k' = k \ln 2 \approx 1,0 \cdot 10^{-23} \text{ J / K}$  et  $k$  est la constante de Boltzmann. Ainsi  $k'T_0 \approx 2,9 \times 10^{-21} \text{ J}$  est la quantité d'exergie d'un bit d'information à température ambiante.

### III.6 Pertes exergétiques

Dans un processus réel, il y a toujours une perte d'exergie, c'est-à-dire que l'entrée d'exergie dépasse toujours la sortie d'exergie du fait des irréversibilités. Cela signifie que l'exergie n'est pas préservée ou équilibrée dans les processus réels, alors que l'énergie est toujours préservée et équilibrée, ce qui est une différence fondamentale. Cette exergie perdue s'évanouit en rien et peut être appelée destruction par exergie,  $\Delta E$ . Dans la littérature, la destruction par exergie peut également être appelée destruction de la disponibilité, irréversibilité, perte travail (Gong et Wall, 1997) et la perte d'exergie interne (Szargut, 1989).

Dans le même temps, certaines sorties d'exergie ne sont pas utilisées, mais émises dans l'environnement. Cette exergie peut être appelée (Gong et Wall, 1997) ou la perte d'exergie externe (Szargut, 1989).

Il est important de séparer la destruction d'exergie causée par les irréversibilités du flux d'exergie vers l'environnement puisque le premier mentionné par définition n'a pas exergique et donc pas d'effets sur l'environnement, alors que ce dernier a de l'exergie et peut causer des dommages (Gong et Wall 1997).

La destruction d'exergie est liée à la génération d'entropie et peut être décrite par :

$$\Delta E = T_0 \Delta S^{\text{tot}}, E_{in}^{\text{tot}} - E_{out}^{\text{tot}} \quad (3.24)$$

Où  $\Delta E$  est la destruction d'exergie,  $\Delta S^{\text{tot}}$  est l'augmentation d'entropie totale,  $E_{in}^{\text{tot}}$  est l'exergie d'entrée totale et  $E_{out}^{\text{tot}}$  est l'exergie de sortie totale.

### III.7 Efficacité exergétique

Il existe différentes façons de définir l'efficacité exergétique. Wall (1977) la définit comme l'exergie utilisée divisée par l'exergie qu'il est théoriquement possible d'utiliser. La définition la plus courante est cependant l'exergie utilisée divisée par l'exergie utilisée. Wall (2002) énonce les rendements exergétiques comme suit :

$$\eta_{ex,1} = \frac{E_{out}}{E_{in}} \quad (3.25)$$

Où  $E_{out}$  est la sortie exergétique et  $E_{in}$  est l'entrée exergétique. Une partie de la production est généralement un gaspillage :

$$E_{out} = E_{pr} - E_{waste} \quad (3.26)$$

Où  $E_{pr}$  est l'exergie du produit et  $E_{waste}$  est l'exergie du déchet. Cela crée une nouvelle définition de l'efficacité exergétique :

$$\eta_{ex,2} = \frac{E_{out} - E_{waste}}{E_{in}} = \frac{E_{pr} - E_{waste}}{E_{in}} = \eta_{ex,1} \cdot \frac{E_{waste}}{E_{in}} \quad (3.27)$$

Il est également possible qu'une certaine exergie soit une exergie de transit,  $E_{tr}$ , qui traverse le système sans être affectée. Le rendement exergétique devient alors :

$$\eta_{ex,3} = \frac{E_{out} - E_{waste} - E_{tr}}{E_{in} - E_{tr}} = \frac{E_{pr} - E_{in}}{E_{tr} - E_{in}} \quad (3.28)$$

Szargut et al. (1988) appelle l'exergie des produits utiles divisée par l'exergie d'alimentation le degré cumulé de perfection (CDP) et définit l'effet exergétique utile divisé par l'exergie motrice comme l'efficacité exergétique.

### III.8 L'exergie comme mesure de la qualité

Une façon courante d'utiliser l'exergie dans la pratique consiste à exprimer la qualité des différents vecteurs énergétiques, ou la quantité d'énergie qui peut être transformée en énergie utile. Wall (1977) présente des indices de qualité exergétique, voir tableau III.2 :

**Tableau III.2** Indices de qualité exergétique des différentes formes d'énergie Adapté de Mur (1977).

Forme d'énergie	Indice de qualité (Pourcentage d'exergie)
Énergie potentielle	100
Énergie cinétique	100
Énergie électrique	100
Énergie chimique	100
Énergie nucléaire	95
Lumière du soleil	93
Vapeur chaude	60
Chauffage urbain	30
Chaleur perdue	5
Radiation thermique de la terre	0

L'exergie peut également être utilisée comme mesure de la qualité d'autres ressources, comme différents matériaux, puisque le contenu en exergie dépend de l'ordre des éléments dans le matériau.

Forme de matière	Indice de qualité (Pourcentage d'exergie)
-Matière sous une forme ordonnée	100
-La matière en tant que marchandise commerciale	100 presque 90 approx
-Mélanges d'éléments	50-80
-De riches gisements minéraux	50 approx
-Minerai	20-50
-Dépôts minéraux pauvres	0 approx
-Minéral dissous dans l'eau de mer ou le sol	

**Tableau III.3** Indices de qualité exergétique de différents matériaux. Adapté de Mur (1977).

### III.9 Potentiel éolien d'Adrar

Adrar se trouve au Sud-Ouest de l'Algérie, à environ 1540 km d'Alger. Cette région est caractérisée par sa topographie relativement plate, ainsi que par une géomorphologie désertique. Adrar et ses alentours sont caractérisés par un potentiel du vent considérable venant de la direction dominante Est Nord Est (ENE), [47],[48],[49], figures (III.05) et (III.06).

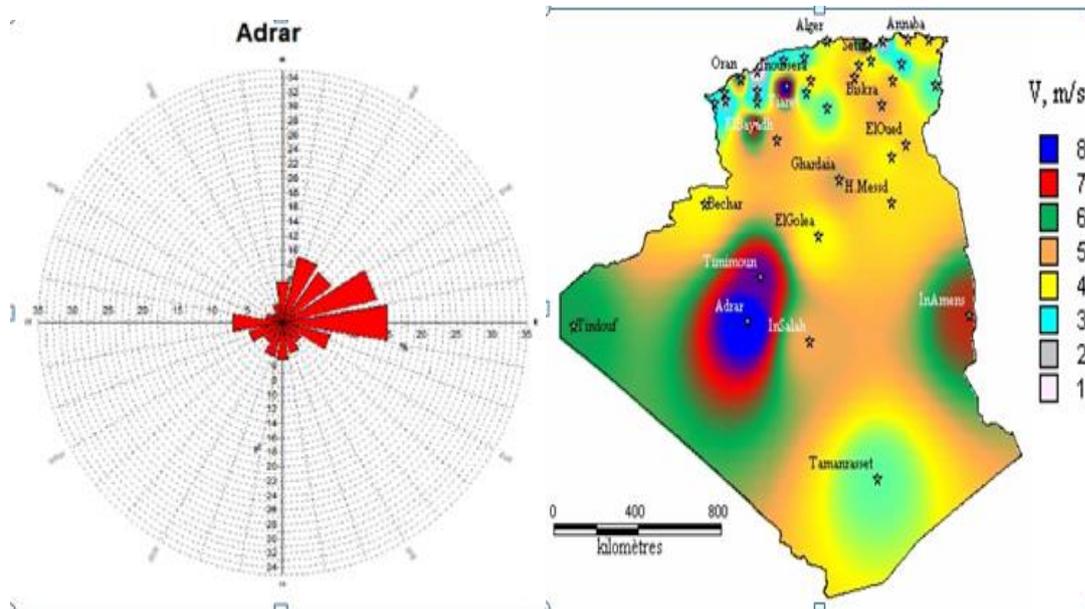


Figure III.4 La rose du vent d'Adrar,[49].

Figure III.5 Carte annuelle de la vitesse

Moyenne du vent a 50m du sol (m/s) en Algérie

Les données du vent de la région d'Adrar classent cette dernière comme la première présentant le meilleur potentiel du vent en Algérie, [50]. En effet, l'Algérie s'engage dans la voie de promotion et exploitation de l'énergie éolienne ainsi que plusieurs actions sont proposées pour les mettre en place, en particulier la zone d'Adrar et précisément Kaberten 72 km au nord de la Wilaya d'Adrar, ses coordonnées géographiques : 28°27' 7.28" N 0°02' 59.08" W), ou la réalisation de la première ferme éolienne en Algérie. Elle se trouve à une altitude d'environ (263 m) à proximité d'une ligne électrique afin de raccorder le parc et réduire les coûts de production d'électricité. Ce parc éolien à une capacité de 10 MW, avec une surface de 30 hectares, il est constitué de 12 turbines éolienne type Gamesa G52 de 0.85 MW chacune, ces éoliennes sont à rotor tripale de 52 m de diamètre, un GADA fonctionne à vitesse variable avec un régulateur pitch. Ce projet a été retenu par la compagnie (SKTM), filiale du groupe SONELGAZ,[47],[48], [51], figure (III.07) :



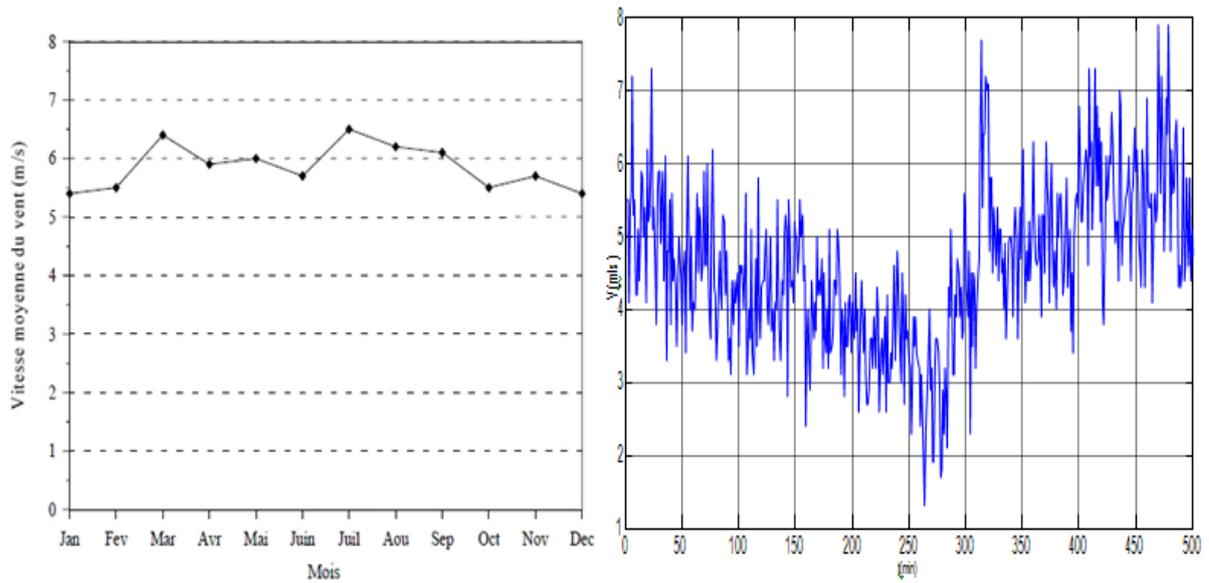
(a) localisation de Kaberten (Adrar)

(b) Turbine Gamesa G52-850 kW

Figure III.6 Station éolienne de Kaberten Adrar.

L'étude du potentiel éolien d'Adrar est basée sur les vitesses horaires du vent de la période (2003-2008) mesurées à une hauteur de 10 mètres par la station de mesure appelé l'Office National de la Météorologie (ONM),[48].

Les mesures des vitesses du vent ont permis de tracer les courbes suivantes,[50] :



Vitesses moyennes annuelle du vent du D'Adrar,[52] Vitesses du vent mesurée au 30 Janvier 2014 (Adrar), [50]

Figure III.7 Vitesse du vent moyenne en Adrar.

On remarque que la vitesse moyenne annuelle du vent est environ (5.93m/s),[52].

Notons que les vitesses du vent réel mesurée au 30 Janvier 2014, est à une température moyenne (15°C) pour avoir la même densité d'air ( $\rho=1.225\text{Kg/m}^3$ ) indiquée dans les caractéristiques de (Gamesa G-52) [51], et valider une bonne comparaison :

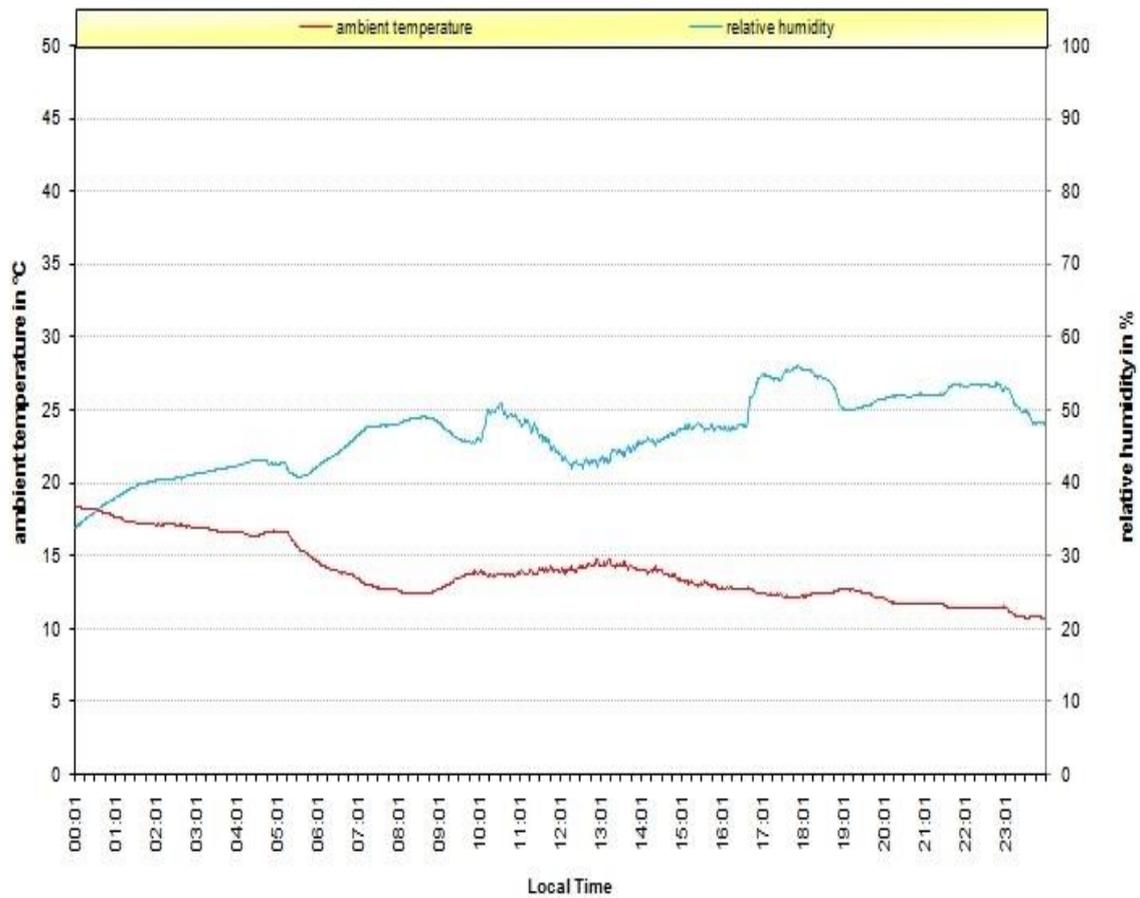


Figure III.8 Température mesurée au 30 Janvier 2014 en Adrar,[50].

La vitesse du vent mesurée au 30 Janvier 2014 est à une hauteur de 10 mètres, alors que la hauteur de (Gamesa G52) est (55m) ; pour avoir les vitesses du vent à la hauteur de Gamesa on utilise la loi d’extrapolation verticale de la vitesse du vent suivante,[05],[53] :

$$V_2 = V_1 \frac{\ln\left(\frac{h_2}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{h_1}{z_0}\right)} \tag{3.29}$$

Où :  $V_1, V_2$  sont les vitesses du vent aux hauteurs ( $h_1=10m$ ) et ( $h_2=55m$ ) respectivement.

$Z_0$  est la rugosité du sol ,en Adrar égale à 0.01,[05] En appliquant la formule (3.29) on obtient la vitesse du vent à 55m ( $V_2=6.9m/s$ ) correspondante à la vitesse ( $V_1=5.53m/s$ ). Donc on utilise un profil du vent instantané proche à cette valeur.

### III.10 Puissance

La puissance du vent en relation avec la vitesse  $v$  par une section de la roue  $S$  avec une densité d'air  $\rho$  qui s'exprime par l'équation suivante [53] :

$$P(v) = \frac{1}{2} \rho s v^3 \tag{3.30}$$

La densité (1.225 kg/m<sup>3</sup>) de référence correspond à la densité de l'air sec au niveau de la mer à la température de 15°C et la pression  $P = 1013.3$  mbar, est employée dans les courbes de puissance pour les fabricants des éoliennes ( $T = 15$  °C). Mais la densité d'air est un paramètre local où elle dépend de la pression atmosphérique et de la température à chaque emplacement. En supposant que l'air est un gaz parfait nous pouvons conclure le rapport suivant [54] :

$$\rho = \frac{335.49}{T} \exp(-0.034 \frac{Z}{T}) \tag{3.31}$$

Où  $z$  est l'altitude (m) et  $T$  est la température (K).

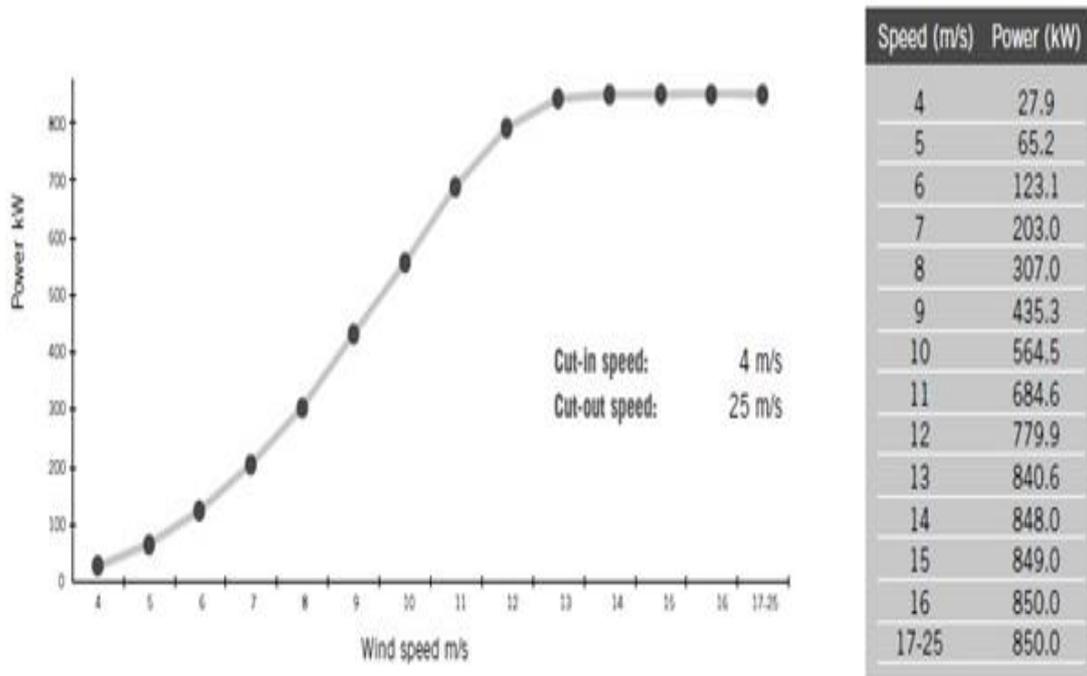


Figure III.9 Caractéristiques (puissance-vitesse) de GamesaG52.

### III.11 Evolution des paramètres météorologiques dans le site adrar en 2014

#### III.11.1 Évolution de la température sur le site d'Adrar en été et en hiver

- Température durant mois d'août 2014 :

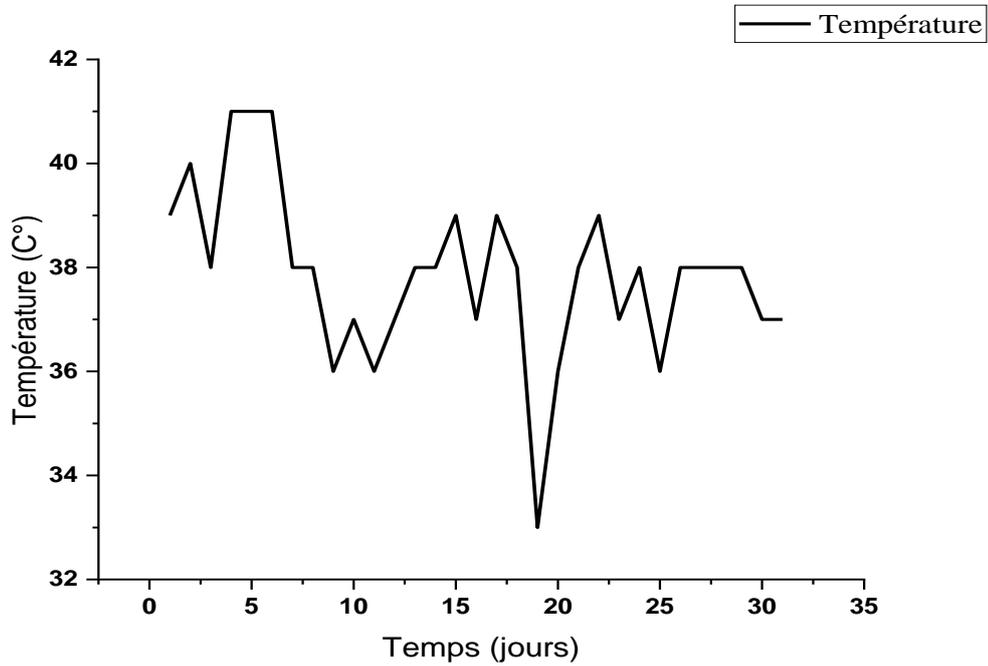


Figure III.10 Evolution de la température durant le mois de Août 2014.

- Température durant mois décembre 2014

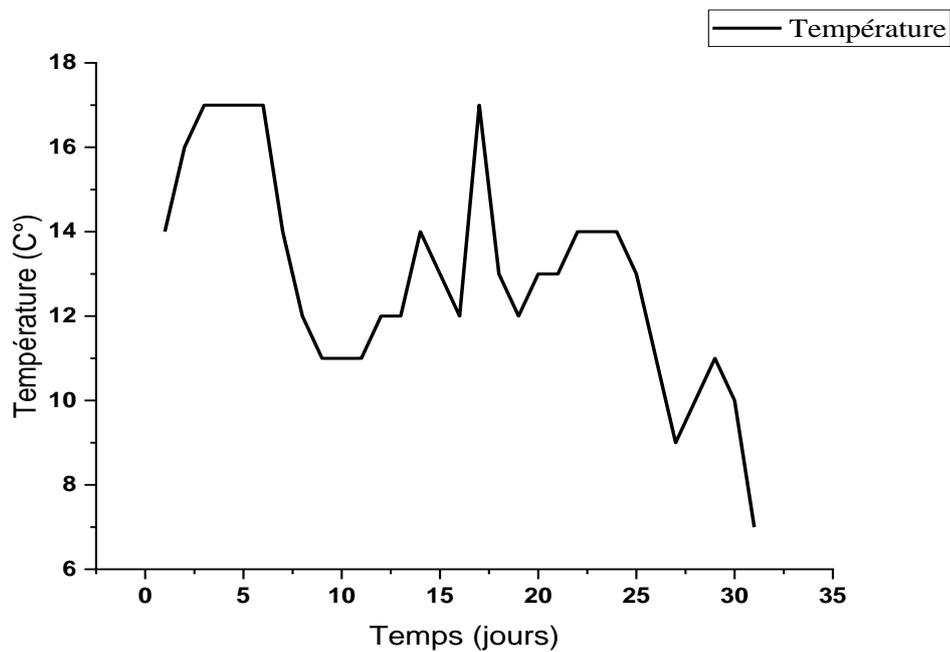


Figure III.3 Evolution de la température durant le mois de Décembre 2014.

### III.11.2 Évolution de la densité sur le site d'Adrar en été et en hiver

- Densité durant mois d'aout 2014 :

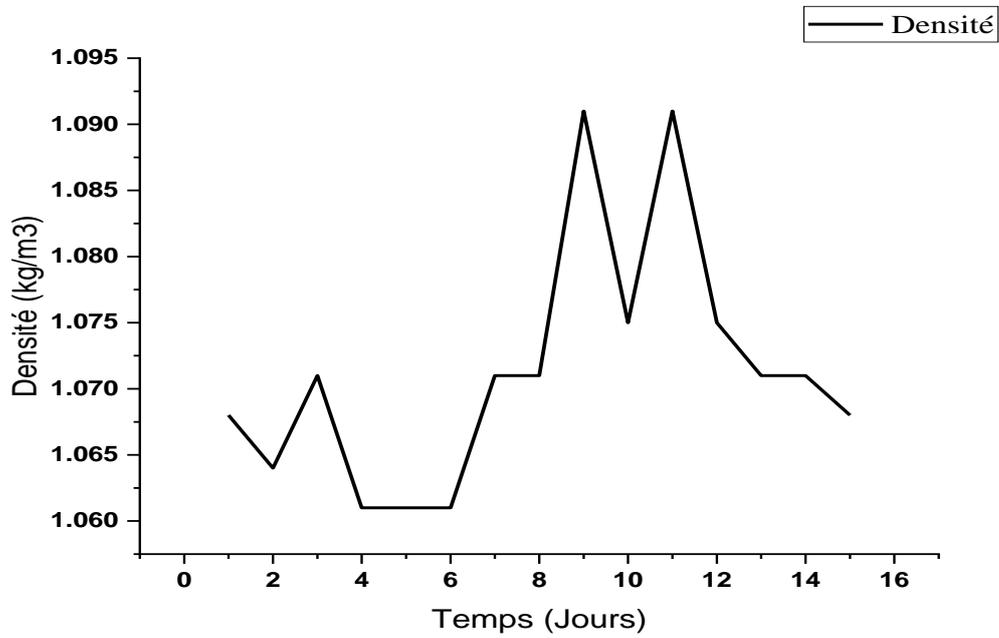


Figure III.4 Evolution de la densité durant le mois de Août 2014.

- Densité durant mois décembre 2014 :

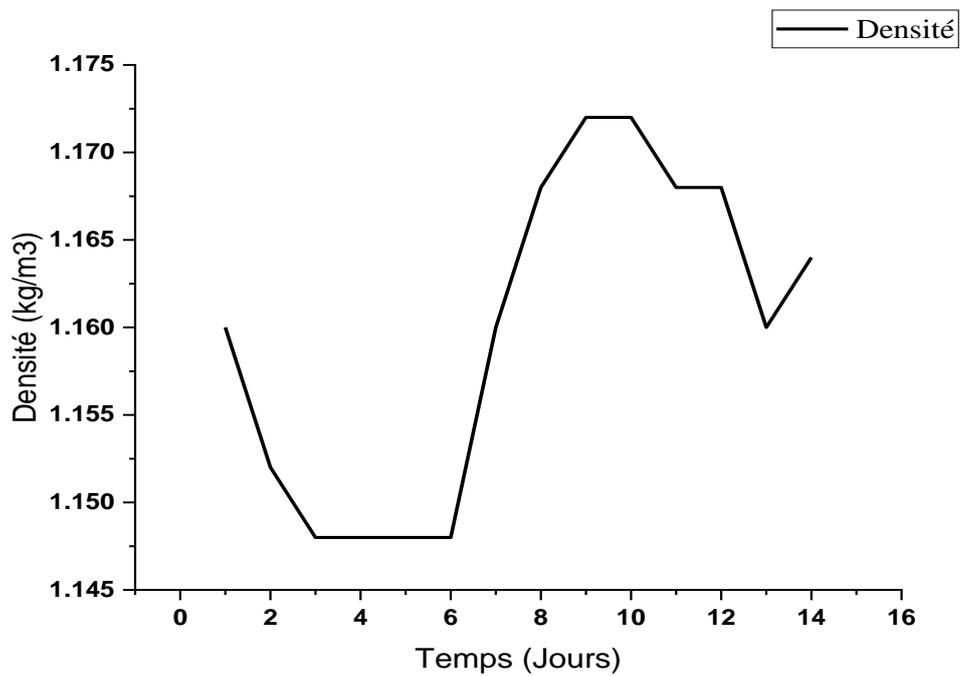


Figure III.5 Evolution de la densité durant le mois de décembre 2014.

### III.11.3 Evolution de la pression sur le site d'Adrar en été et en hiver

- La pression durant mois d'aout 2014 :

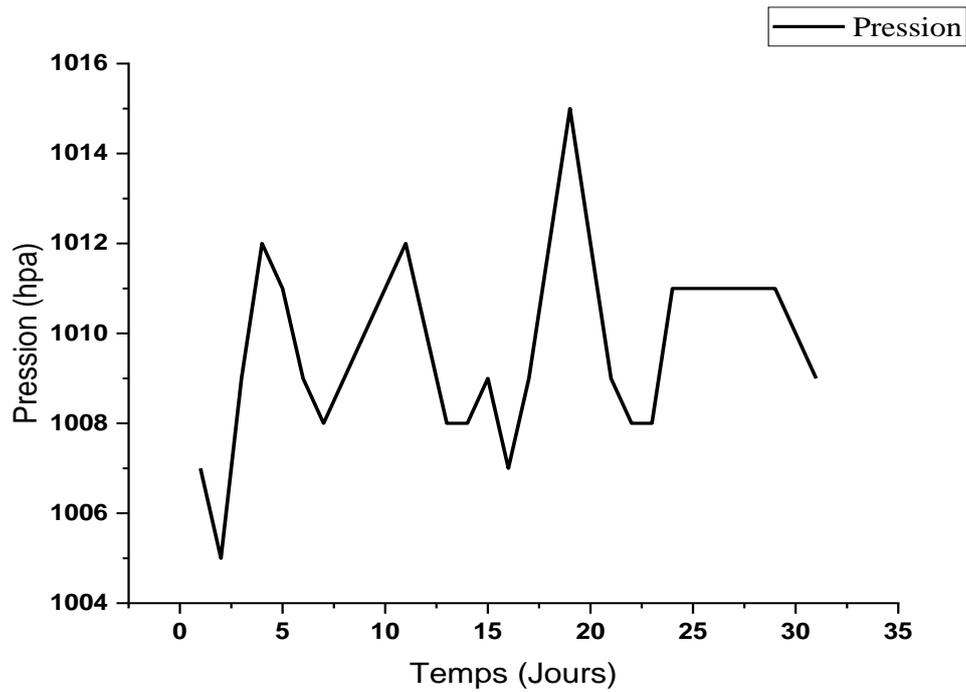


Figure III.6 Variation de la pression durant le mois Août 2014.

- La pression durant mois décembre 2014 :

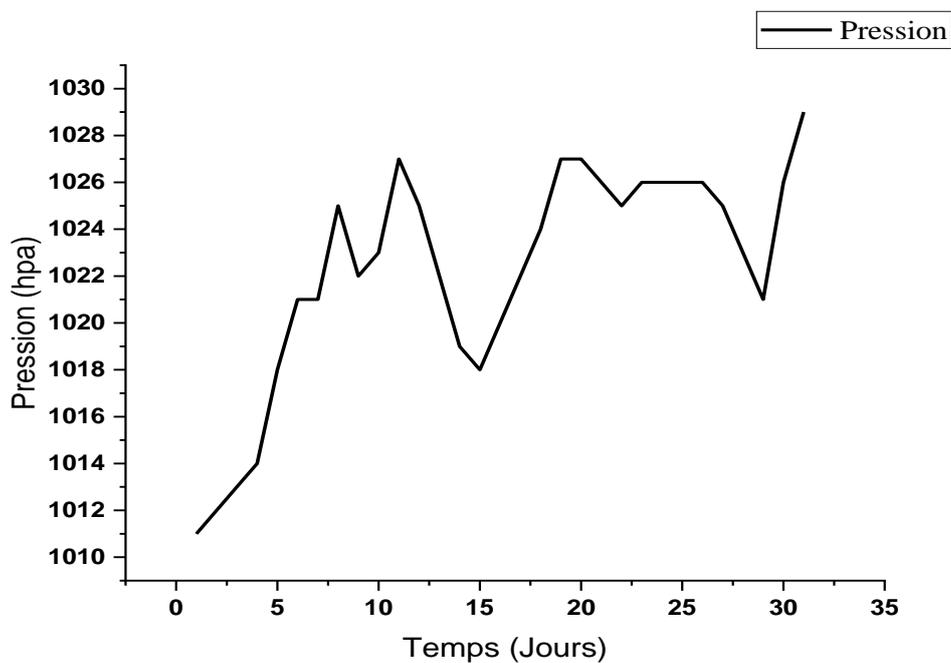


Figure III.15 Variation de la pression pendant le mois Décembre 2014.

### III.11.4 Evolution de l'humidité dans le site d'Adrar en été et en hiver

- Humidité relative durant mois d'aout 2014 :

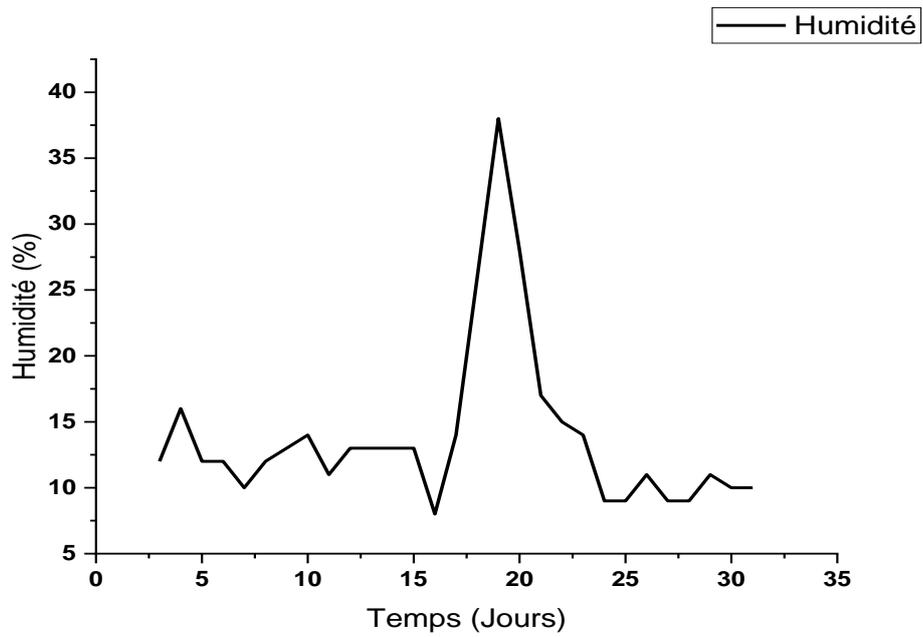


Figure III.7 Evolution de l'humidité relative durant le mois de Août 2014.

- Humidité relative durant mois décembre 2014 :

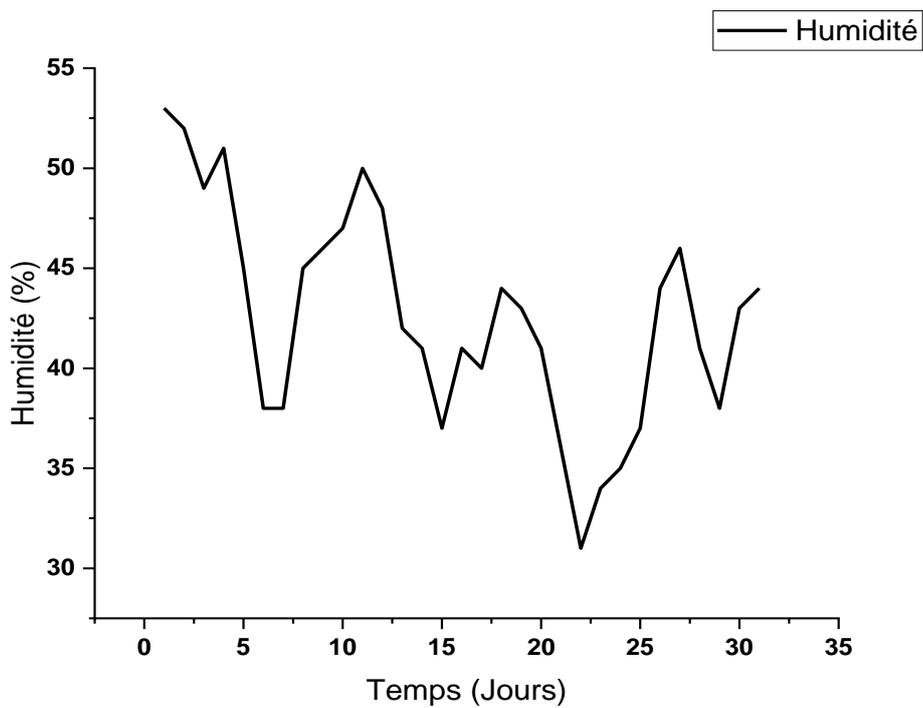


Figure III.8 Evolution de l'humidité relative durant le mois de décembre 2014.

### III.11.5 Vitesse du vent dans le site d'Adrar en été et en hiver :

- Vitesse du vent dans le mois d'aout 2014 :

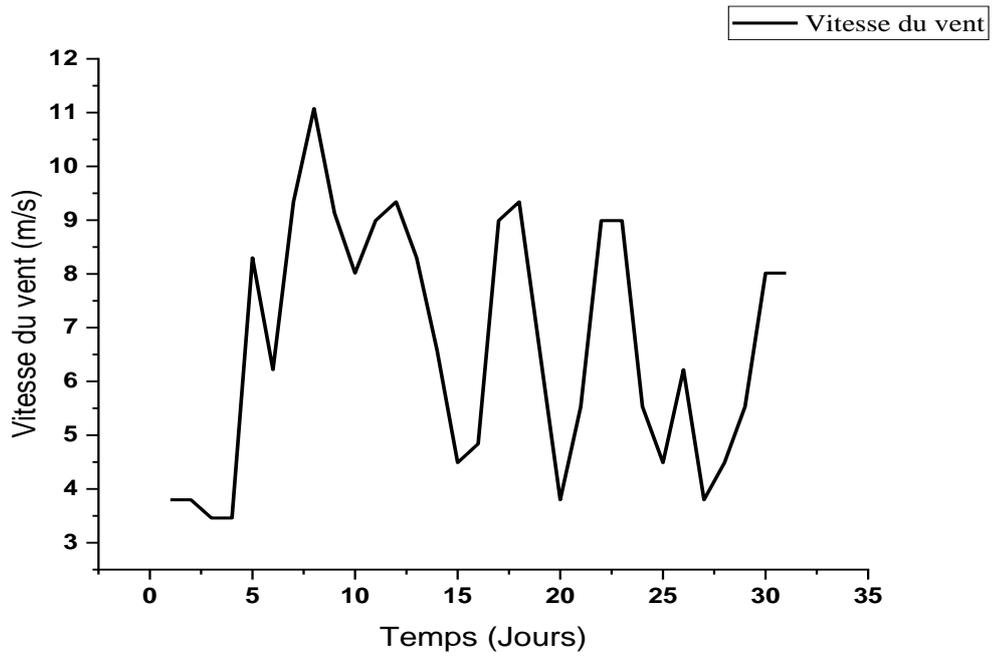


Figure III.18 Variation journalière de la vitesse du vent durant le mois de Août 2014.

- Vitesse du vent dans le mois décembre 2014 :

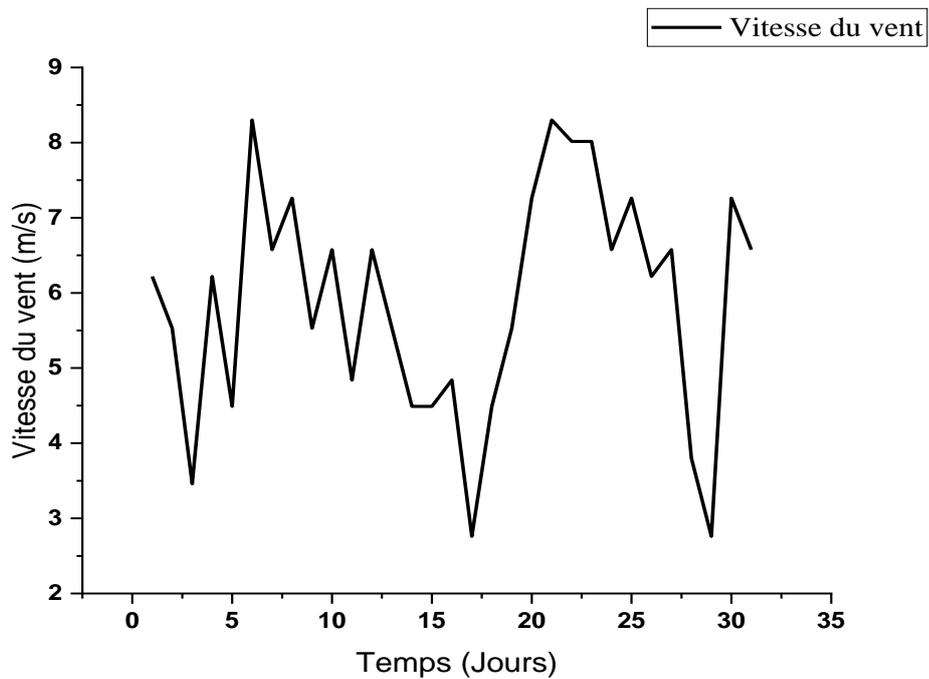


Figure III.19 Variation journalière de la vitesse du vent durant le mois de décembre 2014.

### III.12 Rendement énergétique

- A l'été (Aout 2014) :

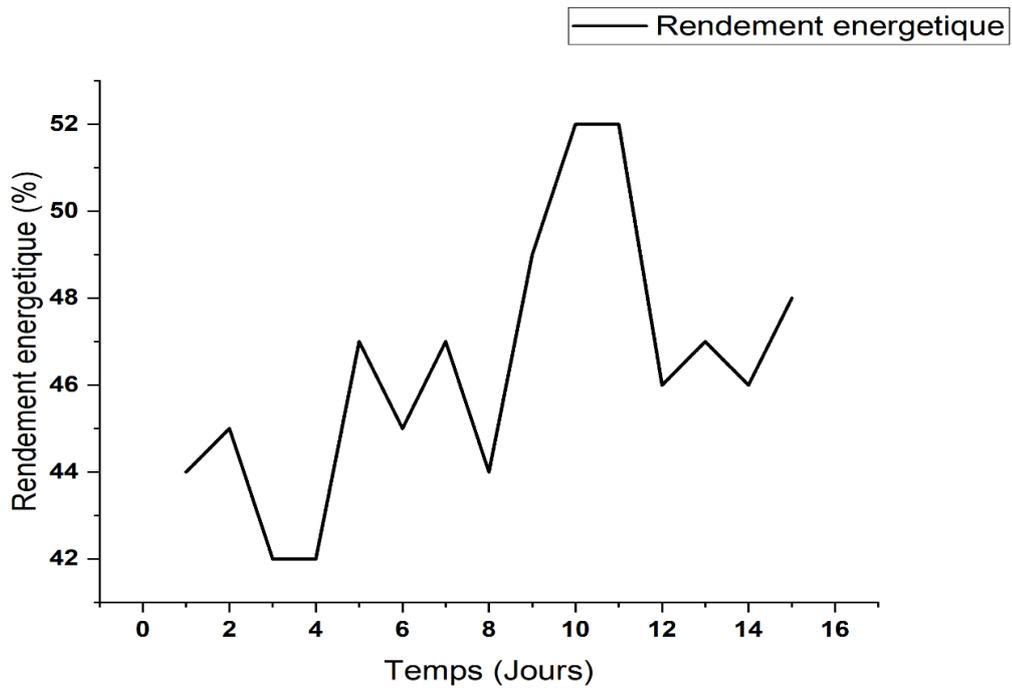


Figure III.9 Le rendement énergétique durant le mois d'aout.

- A l'hiver (Décembre 2014) :

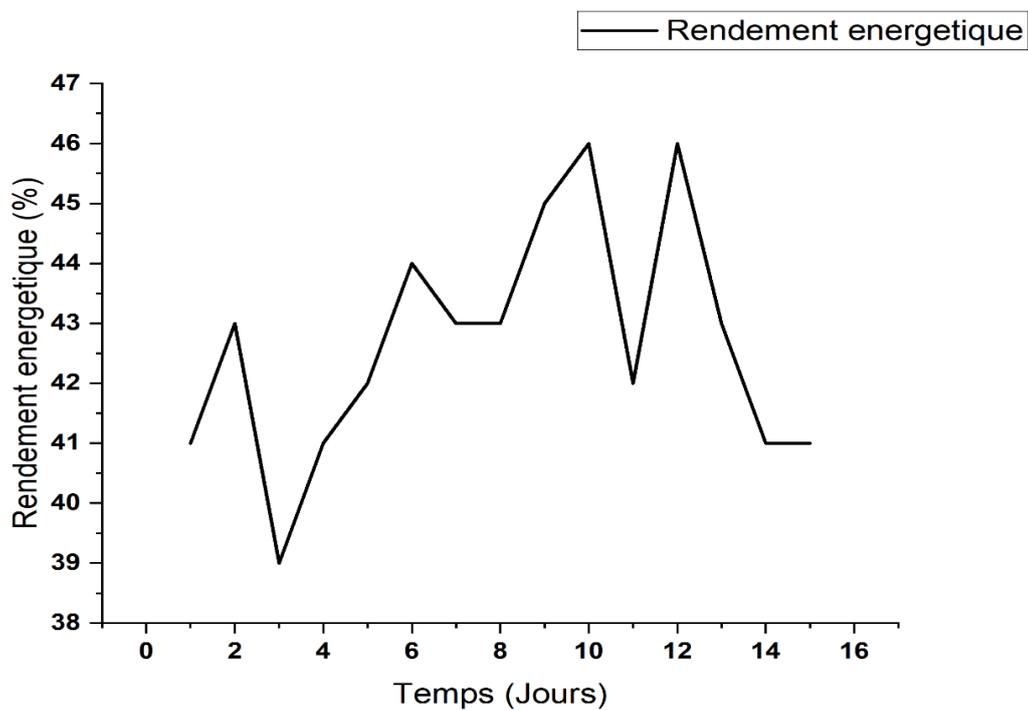


Figure III.21 Le rendement énergétique durant le mois de décembre.

### III.13 Rendement exergetique

On va calculer le rendement exergetique par l'équation suivante :

$$\eta_{ex,1} = \frac{E_{out}}{E_{in}}$$

On a :  $E_{out}^{energetique} = 21\,512\,071$  KWh (en l'années 2015) et il y a une perte de 10 % entre l'énergie et l'exergie, il faut multiplier  $\times 0.9$ .

$$\text{Donc : } E_{out}^{exergetique} = E_{out}^{energetique} \times 0.9 = 19.36\text{GWh.}$$

On néglige les exergies (potentiel, physique, chimique).

On calcule l'exergie cinétique par l'équation  $E_x = P_{gen} \Delta T$  et en calcul la densité par l'équation (3.31).

On suppose que le  $C_p = 0.4 = \frac{(1+b)(1-b^2)}{2}$  alors on extrait la valeur de b dans l'équation précédent

Donc le  $b = 0.7339$ .

$$P = \frac{1}{4} \rho A V_m^3 \left(1 - \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^2\right) \left(1 - \frac{V_1}{V_2}\right) \text{ avec } b = \frac{V_1}{V_2}$$

$$E_c = E_{in} = P = \frac{1}{4} \rho A V_m^3 (1-b^2) (1+b)$$

Donc la valeur du rendement exergetique d'après les équations précédentes c'est :

$$\eta_{ex,1} = 33.17 \%$$

On trouve le rendement exergetique est 33.17 car il existe une perte de (10%) entre l'énergie et l'exergie.

### III.14 Discussion des résultats énergétique :

Les courbes des figures **III.10** et **III.11** traduisent l'évolution de la température dans la zone d'Adrar, montrent que la température :

- Elle retrouve ses valeurs maximales pour les mois d'été, tandis que ses valeurs minimales sont observées pour les mois d'hiver.
- Elle oscille entre 33° et 41° dans le mois d'aout, tandis que dans le mois décembre elle varie entre 7° et 17°.

Ces résultats montrent que la température varie en général entre 7° et 41° environ au cours de cette campagne de mesures (Aout, décembre) dans la zone d'adrar.

Les variations des courbes de la figure **III.12** et **III.13** révèlent que la densité de l'air dans la zone d'Adrar :

- L'air froid est plus dense que l'air chaud.
- La densité diminue un peu lorsque l'humidité de l'air augmente.
- La température et la pression atmosphérique ont une influence directe sur la densité de l'air.

Ces résultats montrent que la densité varie en général entre 1,061kg/m<sup>3</sup> et 1,172kg/m<sup>3</sup> au cours de cette campagne de mesures.

Les variations des courbes de la figure **III.14** et **III.15** révèlent que la pression atmosphérique dans la zone d'Adrar :

- Varie de façon légère.
- Retrouve ses valeurs minimales aux mois d'été, tandis que ses valeurs maximales apparaissent aux mois d'hiver.
- Oscille entre 1005 et 1015 hpa au cours du mois d'aout, tandis qu'elle varie entre 1011 et 1029 hpa au cours du mois de décembre.

Ces résultats montrent qu'au cours de mois aout et décembre, la pression atmosphérique dans Adrar varie de façon régulière, Elle est faible dans le troisième trimestre de l'année d'étude et forte dans le dernier.

Les courbes des figures **III.16** et **III.17** qui traduisent l'évolution de l'humidité relative durant l'année 2014, révèlent que :

- L'humidité relative varie de façon alternative au cours de chaque mois.
- Elle retrouve ses valeurs maximales aux mois d'hiver et ses valeurs minimales aux mois d'été.
- Elle oscille entre 8 et 38 % dans le mois d'aout.

- Dans le mois décembre elle varie entre 31 et 53 %.
- Elle est très instable dans le mois de Décembre et plus forte dans le mois d'aout.

Ces résultats montrent que l'humidité relative varie en générale entre 8 et 53 % au cours de cette campagne de mesure dans la zone d'Adrar.

Lorsque la température augmente l'humidité relative diminue.

Les courbes des figures **III.18** et **III.19** qui traduisent l'évolution de la vitesse de vent sur site d'Adrar durant l'années 2014, montrent que :

- Au cours de la période de mesures, la vitesse de vent varie de façon quasi sinusoïdale au cours de chaque journée.
- Il oscille généralement entre 10 km/h et 40 km/h durant Aout et décembre.

Le site d'Adrar est caractérisé par un gisement éolien très important et presque stable au cours de l'année qui oscille entre des vitesses de vent allant de 10 km/h jusqu'à 40 km/h. Ce qui montre que ce site est très favorable à implanter des parcs éoliens en termes de vitesse de vents sans tenir comptes des autres paramètres météorologiques.

Les courbes des figures **III.20** et **III.21** qui traduisent le rendement énergétique des éoliennes dans le ferme d'adrar dans les mois d'aout et décembre :

- Oscille entre 42 et 52 % dans le mois d'aout, tandis que dans le mois décembre varie entre 39 et 46 %.
- Trouve ses valeurs maximales dans le mois d'aout, tandis que ses valeurs minimales dans le mois décembre.
- Le rendement énergétique dans aout 2014 dépasse le rendement énergétique dans décembre 2014.

Pour favoriser le bon rendement d'une éolienne le choix du site d'implantation est primordial, La vitesse du vent doit être comprise en général entre 4 et 25 m/s.

Dans cette ferme l'Aout 2014 a plus de vents que décembre 2014 donc le rendement énergétique dans Aout doit être mieux, Et chaque année ça change en fonction du la vitesse du vent.

### **III.15 Énergie produite annuelle**

Les éoliennes ne peuvent pas fonctionner d'une façon permanente et efficacement au cours de l'année, pour des raisons diverses qu'on peut citer ci-dessous :

- Intermittence du phénomène éolien

- Vitesses excessives du vent à cause des rafales, les tempêtes ou dans le cas extrême les ouragans (régions cycloniques)
- Conditions climatiques extrêmes (température très élevée ; climat saharien)
- Pannes des aérogénérateurs (mécaniques ou électriques)

Le tableau donne un rapport de la production générale en termes d'énergie électrique (en KWh) du parc de Kabertène durant une année allant du 01/01/2015 Au 31/12/2015. Le tableau montre en détail l'énergie électrique produite et le nombre d'heures de fonctionnement de chacune des douze éoliennes présentes sur le parc.

Avec :

- **Disponibilité (%)** = Aérogénérateur OK(h)/nombre d'heures année.
- **Équivalent heures** = Production (kWh)/ Puissance nominale.
- **Facteur de capacité : Cf (%)** = Production (kWh) / (nombre d'heures année×Puissance nominale).

**Tableau III.4** Rapport de production générale du parc année 2015 (kWh).

Dispositif	Production (KWh)	Aérogénérateur OK (h)	Disponible (%)	Equivalent Heures	C.F (%)
<b>WT01</b>	2 250 284	7 215	92,00	2 674,39	<b>30,22</b>
<b>WT02</b>	1 697 193	5 432	70,17	1 996,70	<b>22,79</b>
<b>WT03</b>	697 817	2 258	47,95	820,96	<b>9,37</b>
<b>WT04</b>	1 906 719	6 242	85,77	2 243,20	<b>25,61</b>
<b>WT05</b>	1 944 630	6 513	93,66	2 287,80	<b>26,12</b>
<b>WT06</b>	2 387 932	7 625	95,72	2 809,33	<b>32,07</b>
<b>WT07</b>	1 875 750	6 009	75,47	2 206,76	<b>25,19</b>
<b>WT08</b>	2 200 120	7 369	90,76	2 588,38	<b>29,55</b>
<b>WT09</b>	1 952 431	6 877	88,84	2 296,98	<b>26,22</b>
<b>WT10</b>	1 162 480	4 592	65,67	1 367,62	<b>15,61</b>
<b>WT11</b>	1 894 519	7 180	89,26	2 228,85	<b>25,44</b>
<b>WT12</b>	1 542 196	5 129	69,32	1 814,35	<b>20,71</b>
<b>Parc total</b>	21 512 071	72 441	80,38	25 308,32	<b>24,08</b>

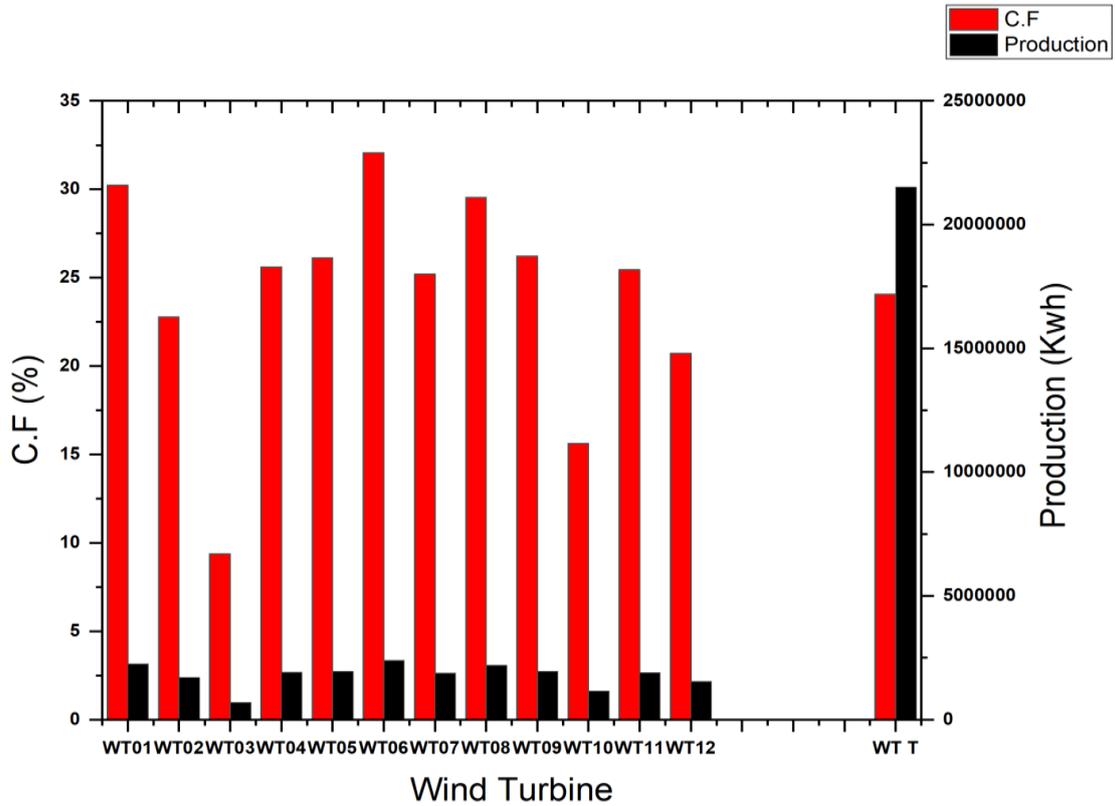


Figure III.22 Evolution du C.F et la production par les 12 WT.

### III.15.1 Les Pertes énergétiques

Avec :

$$P_{vent} = P_{sortie} + P_{perte}$$

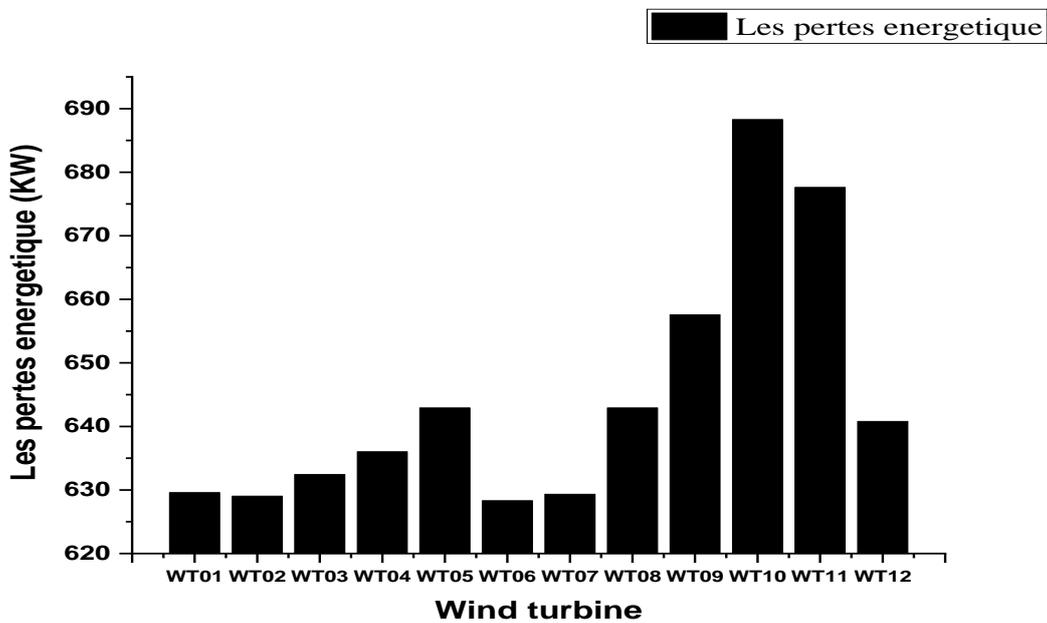


Figure III.23 les pertes énergétiques dans la ferme d'adras 2014.

### III.16 Discussion des résultats exérgétique :

Le tableau et la figure **III.22** traduisent la production annuelle de l'énergie dans le site d'adrar.

- On trouve une valeur maximale de la production dans la turbine 06 (WT06) et une valeur minimale de la production dans la turbine (WT03).
- Plus la production est élevée, plus le C.F et grand.
- Le facteur de capacité oscille entre 9.37 et 32.07 % dans le parc.
- La production d'énergie annuelle dans la ferme est de 21 512 071 KWh.
- L'efficacité varie énormément d'une machine à une autre.

La figure **III.23** donne les pertes énergétiques des éoliennes de la ferme d'adrar en 2014 montrent que :

- La turbine 10 (WT10) a la plus grande perte d'énergie 688,29 KW.
- La turbine 06 (WT06) a la perte d'énergie la plus faible 628,31 KW.
- Perte moyenne annuelle énergétique dans la ferme c'est 644,93 KW.
- Le rendement énergétique annuelle dans l'années 2015 a cette ferme C'est 31%.
- Le rendement exergetique annuelle dans l'années 2015 a cette ferme C'est 33.17 %.

Dans cette ferme on trouve que la turbine 06 a le meilleur rendement dans cette ferme d'adrar car la production d'énergie était grande dans la ferme aussi que le facteur de capacité, et de l'autre cote il avait le plus faible nombre de perte de l'énergie.

Nous concluons que plus les pertes d'énergie sont faibles, plus la production est élevée.

### III.17 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié les analyses énergétiques et exérgétiques des éoliennes dans la ferme d'adrar (kabertene), et Nous avons analysé plusieurs courbes des données météorologie (vitesse du vent, densité, température, humidité, pression) que nous avons tracées avec le logiciel Origin pro pour comprendre le fonctionnement des éoliennes dans ce pays.

Le site d'Adrar est caractérisé par un gisement éolien très important et presque stable au cours de l'année, les hautes températures qui caractérisent le site d'Adrar à des effets indésirables sur le fonctionnement des aérogénérateurs ainsi que la vitesse du vent qui est directement liée à le rendement énergétique des éoliennes.

## **CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES**

Les énergies renouvelables participent à la lutte contre le changement climatique et à la maîtrise de l'approvisionnement énergétique propre. C'est aussi à la lutte contre les gaz à effet de serre et la prise de conscience collective d'un environnement plus « propre » qui conduit notre pays pour développer d'autres sources d'énergies dites « vertes », parmi elles l'énergie éolienne.

Dans ce cadre ; et afin de diversifier ces choix énergétiques, notre pays s'engage avec détermination sur la voie des énergies renouvelables, et commence à s'intéresser à la filière éolienne.

L'analyse des ressources éoliennes des sites montre que ces sites sont caractérisés par un potentiel énergétique éolien important que peut être effectivement exploité.

De ce travail, il ressort que dans Adrar, l'humidité relative varie en général entre 7 et 54 % au cours de la campagne de mesure.

La pression atmosphérique dans la zone d'Adrar varie de façon régulière. Elle est faible dans le troisième trimestre de l'année d'étude et forte dans le dernier.

La température varie considérablement au cours de l'année, La température et l'humidité relative sont deux grandeurs qui varient en sens inverse. Quant à la puissance éolienne dans la zone d'Adrar ; c'est une fonction décroissante de la température et de l'humidité relative, mais une fonction croissante de la pression atmosphérique.

Le rendement énergétique change avec le changement de la vitesse du vent et la densité de l'air et la hauteur de l'éolienne Parce que la vitesse du vent est d'autant plus grande que nous montons.

Dans cette ferme nous avons trouvé que le rendement énergétique des mois aout et décembre 2014 varie entre 39 et 53% Et c'est un très bon résultat Cela indique une grande production d'énergie dans l'années 2015 (21 512 071 KWh), et on concluons que Plus le rendement est élevé, plus la production est élevée et plus le facteur de capacité est élevé.

Pour l'exergie, ont calculé le rendement exergetique annuelle et on trouve une bonne valeur varie 33.17 % ainsi que le rendement energetique ont trouvé ça valeur annuelle 31 % et se sont des bons résultats dans l'années 2015 dans la ferme d'adRAR.

Nous n'avons pas pu faire tout le travail parce que on a un manque des donnes dans l'analyse d'exergie.

L'Algérie est l'un des pays qui accuse un retard remarquable dans la filiale éolienne, d'autant plus que sa situation géographique lui permet d'établir plusieurs stations éoliennes. Cependant il ne faut pas omettre bien évidemment le facteur économique qui joue un rôle déterminant dans la réalisation de ces projets, sachant que l'Algérie dispose d'un gisement énorme en gaz naturel, qui est parmi les causes principales de ce retard.

# **ANNEXES**

## Données météorologiques sur site d'Adrar d'Août 2014 :

<b>2014</b>	<b>Température (°C)</b>	<b>Humidité (%)</b>
<b>Aout</b>	<b>Avg</b>	<b>Avg</b>
<b>1</b>	39	-
<b>2</b>	40	-
<b>3</b>	38	12
<b>4</b>	41	16
<b>5</b>	41	12
<b>6</b>	41	12
<b>7</b>	38	10
<b>8</b>	38	12
<b>9</b>	36	13
<b>10</b>	37	14
<b>11</b>	36	11
<b>12</b>	37	13
<b>13</b>	38	13
<b>14</b>	38	13
<b>15</b>	39	13
<b>16</b>	37	8
<b>17</b>	39	14
<b>18</b>	38	26
<b>19</b>	33	38
<b>20</b>	36	28
<b>21</b>	38	17
<b>22</b>	39	15
<b>23</b>	37	14
<b>24</b>	38	9
<b>25</b>	36	9
<b>26</b>	38	11
<b>27</b>	38	9
<b>28</b>	38	9
<b>29</b>	38	11
<b>30</b>	37	10
<b>31</b>	37	10

<b>Pression (hpa)</b>	<b>Vitesse du vent (km/h)</b>
<b>Avg</b>	<b>Avg</b>
1007	11
1005	11
1009	10
1012	10
1011	24
1009	18
1008	27
1009	32
1010	26
1011	23
1012	26
1010	27
1008	24
1008	19
1009	13
1007	14
1009	26
1012	27
1015	19
1012	11
1009	16
1008	26
1008	26
1011	16
1011	13
1011	18
1011	11
1011	13
1011	16
1010	23
1009	23

## Données météorologiques sur site d'Adrar de décembre 2014 :

<b>2014</b>	<b>Température (°C)</b>	<b>Humidité (%)</b>
<b>Décembre</b>	<b>Avg</b>	<b>Avg</b>
<b>1</b>	14	53
<b>2</b>	16	52
<b>3</b>	17	49
<b>4</b>	17	51
<b>5</b>	17	45
<b>6</b>	17	38
<b>7</b>	14	38
<b>8</b>	12	45
<b>9</b>	11	46
<b>10</b>	11	47
<b>11</b>	11	50
<b>12</b>	12	48
<b>13</b>	12	42
<b>14</b>	14	41
<b>15</b>	13	37
<b>16</b>	12	41
<b>17</b>	17	40
<b>18</b>	13	44
<b>19</b>	12	43
<b>20</b>	13	41
<b>21</b>	13	36
<b>22</b>	14	31
<b>23</b>	14	34
<b>24</b>	14	35
<b>25</b>	13	37
<b>26</b>	11	44
<b>27</b>	9	46
<b>28</b>	10	41
<b>29</b>	11	38
<b>30</b>	10	43
<b>31</b>	7	44

<b>Pression (hpa)</b>	<b>Vitesse du vent (km/h)</b>
<b>Avg</b>	<b>Avg</b>
1011	18
1012	16
1013	10
1014	18
1018	13
1021	24
1021	19
1025	21
1022	16
1023	19
1027	14
1025	19
1022	16
1019	13
1018	13
1020	14
1022	8
1024	13
1027	16
1027	21
1026	24
1025	23
1026	23
1026	19
1026	21
1026	18
1025	19
1023	11
1021	8
1026	21
1029	19

## Caractéristiques de la turbine G52/850 du Constructeur Gamesa



Caractéristiques des turbines du Constructeur GAMESA		Caractéristiques Rotor	
Nom de l'aérogénérateur	G52/850	Vitesse minimale de rotation	19,44 tours/min
Puissance nominale	850 kW	Vitesse maximale de rotation	30,8 tours/min
Diamètre de rotor	52 m	Vent minimum	4 m/s
Surface balayée	$(52)^2 / 4 \times \pi \approx 2124 \text{ m}^2$	Vent nominal	16 m/s
Puissance unitaire	$850 \times 1 \text{ turbine} = 850 \text{ kW}$	Vent maximal	25 m/s
Puissance de parc	$850 \times 12 \text{ turbines} = 10200 \text{ kW}$		

### Origin pro

*Origin* est un logiciel de traitement et d'analyse de données scientifiques pour environnement Microsoft Windows développé par **Origin Lab**.

Il permet notamment de tracer des graphes 2D et 3D et possède des fonctions d'analyse de pics.

Il est aussi capable d'importer des fichiers de divers formats tels que Excel, ASCII.

Dans cette mémoire on a utilisé Origin pro 2021 version 9.8.0.200 pour tracer les graphes avec les données de la ferme d'adrar (aout et decembre 2014).

## **Bibliographie**

- [1] WWEA, Rapport Mondial sur l'Énergie Éolienne'. (Allemagne, 2011).
- [2] <http://fr.wikipedia.org/> (Mai 2015).
- [3] N. KasbadjiMerzouk ; ' Quel avenir pour l'Énergie Éolienne en Algérie ? CDER, N°14, pp\_6-7, 2008.
- [4] Z. TIR ; Contribution à l'Étude d'un Aérogénérateur Asynchrone en Cascade'. Mémoire de magister, Université de Setif, Algeria, 2009.
- [5] N. KasbadjiMerzouk ; 'Evaluation du gisement énergétique éolien contribution à la détermination de profil vertical de la vitesse du vent en Algérie'. Thèse de doctorat, Université de Tlemcen, Algérie, 2006.
- [6] Muljadi, C.P. Butter"eld, P. Migliore, Variable speed operation of generators with rotor-speed feedback in wind power applications, Fifteenth ASME Wind Energy Symposium, Houston, Texas, 1996.Énergie éolienne, Théorie, conception et calcul pratique des installations, Désiré Le Gourières, Edition EYROLLES, 1980.
- [7] S. Hassaine ; 'Application des nouvelles techniques de commande de la machine synchrone à aimants permanents'. Thèse de docteur en es-sciences, Université d'Oran, Algeria, 2008.
- [8] Jean-Claude Sabonnadier " nouvelles technologies de l'énergie (1) les énergies renouvelable", livre 2001.
- [9] <http://www.energies-renouvelables.org>
- [10] T.Grignoux, R. Gibert, P. Neau, C. Buthion, « Eoliennes en milieu urbain -État de l'art », janvier 2006, pp. 1-129.

- [11] J. Chen, C. Nayar, L. XU, « Design and FE analysis of an outer-rotor PM generator for directly coupled wind turbine applications », proceeding of the IEEE industry applications conference, New York, USA, 1998, vol 1, pp. 387-394.
- [12] 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).
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] H. Ben Ahmed, « Généralités sur l'énergie éolienne et convertisseurs associés et convertisseurs associés », séminaire électrotechnique de l'académie de Rennes, 9 mars 2004.
- [16] 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 à12, 2004.
- [17] M.M. Ayiagnigni Gbambié, 'Analyse Statistique de Données de Vent Côtier au Nord du Golfe de Guinée', Rapport de Master, CIPMA/FAST/UAC/2012, pp 1-43.
- [18] M. Mayouf ; 'Contribution à la modélisation de l'aérogénérateur synchrone a aimant permanent'. Mémoire de magister. Université de Batna, Algeria, 2008.
- [19] Hassaine ; 'Application des nouvelles techniques de commande de la machine synchrone à aimants permanents'. *Thèse de docteuressciences*, Université d'Oran, Algeria, 2008.
- [20] Bernard MULTON, Xavier ROBOAM, Brayima DAKYO, Cristian NICHITA, Olivier GERGAUD et Hamid BEN AHMED. Aérogénérateurs électriques.
- [21] Bernard MULTON « Aérogénérateurs électriques » Master Recherche Equipe SETE Module C16. STS IST Paris – ENS Cachan 2007.

- [21] M .Lopez, Contribution à l'optimisation d'un système de conversion éolien pour une unite de production isolée, Thèse de Doctorat, universitéparis-sud11,France.
- [22] E.Muljadi, Pitch-Controlled Variable-Speed Wind Turbine Generation, IEEE Transaction on Industry Applications, vol. 37, No 1, Jan./Feb. 2001.
- [23] Bernard MULTON « Aérogénérateurs électriques » Master Recherche Equipe SETE Module C16. STS IST Paris – ENS Cachan 2007.
- [24] Frédéric POITIERS, « Etude et commande de génératrices asynchrones à double alimentation reliée au réseau » thèse de doctorat de l'université de Nantes, 2003.
- [25] N. KASBADJI MERZOUK « Evaluation du Gisement énergétique éolien contribution à la détermination du profile vertical de la vitesse de vent en Algérie » thèse de doctorat de l'université de Tlemcen, 2006.
- [26] L. KHTTACHE « Etude et commande d'un système Eolien à base d'une Machine Electrique Double Alimentée » Thèse de magister université de Batna ,2007.
- [27] 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 supérieur de CACHAN, 2002.
- [28] [Chauvin 89] A. Chauvin & D. Benghrib. Drag and lift coefficients evolution of a Savonius rotor. Experiments in Fluids, vol. 8, pages 118–120, 1989.
- [29] Zéroual Aouachria. Eolienne Savonius comportement mécanique et aérodynamique. PhD thesis, Université de provence, 1987.
- [30] European Wind Energy Association. Wind energy – the facts, part I: Technology,2009, <http://www.wind-energy-the-facts.org/en>
- [31] Irwin JS. A theoretical variation of the wind profile power law exponent as a function of surface roughness length and stability. Atmos Environ 1979;13:191-194.

- [30] S. Metatla . « Optimisation et régulation des puissances d'une éolienne à base d'une MADA » Mémoire de magister d'école nationale supérieure Polytechnique d'Alger, 2009.
- [31] R. Maouedj, S. Bousalem ,B. Benyoucef, « Optimisation d'un système de pompage éolien Application aux sites sahariens»,Revue des Energies Renouvelables,2008 .
- [32] C.W. Pereira, « L'énergie éolienne Principe de fonctionnement », développement viable Mai ,2006.
- [33] R. Maouedj, S. Bousalem , B. Benyoucef, « Optimisation d'un système de pompage éolien Application aux sites sahariens», Revue des Energies Renouvelables,2008 ..
- [34] Fernando D. Bianchi, Hernan De Battista, Ricardo J. Mantz; '*Wind Turbine Control Systems*' .Edition Springer,2007.
- [35] Hélimax Énergieinc. 'Rapport Météorologique(18mois)' .Montréal,janvier2007.
- [36] European Wind Energy Association. Wind energy – the facts, part I: Technology,2009, <http://www.wind-energy-the-facts.org/en>
- [37] Doran, A., Classification of wind turbines, <http://www.articlesbase.com/electronics-articles/classification-of-wind-turbines-429469.html>.
- [38] Renewable Energy Research Laboratory/University of Massachusetts at Amherst. Wind power: capacity factor, intermittency, and what happens when the wind doesn't blow? [http://www.ceere.org/rerl/about\\_wind/RERL\\_Fact\\_Sheet\\_2a\\_Capacity\\_Factor.pdf](http://www.ceere.org/rerl/about_wind/RERL_Fact_Sheet_2a_Capacity_Factor.pdf).
- [39] PHILIPPE TERRIER avec la collaboration de CLAUD THÉORÊT, ING « TCH-090-095 projet technologique étude d'un éolien » MONTRÉAL, 14 août 2006 révision juillet 2007.
- [40] Lanchester FW. A contribution to the theory of propulsion and the screw propeller. Journal of the American Society for Naval Engineers. 1915;27:509-510.
- [41] Betz A. Schraubenpropeller mit geringstem Energieverlust. Gottinger Nachrichten. 1919:193:213.

- [42] Burton T, Jenkins N, Sharpe D, Bossanyi E. Aerodynamics of horizontal axis wind turbine. In: Burton T, Jenkins N, Sharpe D, Bossanyi E, editors. Wind Energy Handbook. 2nd ed. John Wiley & Sons; 2011. pp. 39-136.
- [43] Moriarty PJ, Hansen AC. AeroDyn Theory Manual: National Renewable Energy Laboratory Golden. Colorado: USA; 2005. pp. 2-10.
- [44] Hansen MO. Aerodynamics of Wind Turbines. London: Routledge; 2015. pp. 63-77.
- [45] Rant Z. Exergie, ein neues wort fur‘technische arbeitsfaehigkeit’(exergy, a new word for technical availability). Forschung auf dem Gebiet des Ingenieurwesens A. 1956;22:36-37
- [46] Şahin AD, Dincer I, Rosen MA. Thermodynamic analysis of wind energy. International Journal of Energy Research. 2006;30:553-566.
- [47] Mustapha Merdaoui1, Ali Houha, Arezki Smaïli;‘Etude et dimensionnement du futur parc éolien de Kaberten situé dans la région d’Adrar’. Revue des Energies Renouvelables SMEE’10 Bou Ismail Tipaza, pp\_269 – 274, 2010.
- [48] Fatiha Sebaa-Ben Miloud et R. Aïssaoui;‘Etude du potentiel éolien d’Adrar Sélection de sites pour la ferme éolienne de 10 MW’, Revue des Energies Renouvelables SMEE’10 Bou Ismail Tipaza, pp\_295 – 300, 2010.
- [49] M. Ben Medjahed, N.Ghellai, A.Bnmansour, S.M.Boudia, A.M.TabetHellal, L.Boudaoud ; ‘Evaluation du gisement éolien dans le sud Algérien cas d’Adrar’,1 er International Conférence en Energies Renouvelables et leurs Applications, 17-18 Février 2014, Adrar.
- [50] l’Office National de la Météorologie. Adrar, 2015.
- [51] Sustainable Energy Developments; ‘Technical and Economic Feasibility Study’. Rapport New York, états-unis, 2013.

[52] S. DIAF, D. DIAF; 'Evaluation du potentiel éolien et estimation de la production d'une ferme éolienne dans la région d'Adrar'. Séminaire International sur le Génie Climatique et l'Energétique, SIGCLE'2010.

[53] <http://wind-data.ch> (Mai 2015).

[54] S. Mathew, Wind Energy - Fundamentals, Resource Analysis and Economics, vol. 1. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2006.

## Résumé

La demande croissante sans cesse de l'énergie, l'épuisement des énergies fossiles et la pollution de notre planète poussent les pays à se diriger vers des énergies plus propres et renouvelables. L'énergie éolienne fait partie de ces énergies propres, inépuisables qui ont été jadis très utilisées par nos ancêtres et qui pourront être exploitées à nouveau avec de très bons rendements. Dans cette étude, nous avons choisi la 1ère ferme éolienne en Algérie à la région d'Adrar Kabertene pour étudier et analyser l'énergie et l'exergie des éoliennes durant les périodes (aout et décembre 2014 et l'années 2015). Enfin, nous concluons que la région d'Adrar est caractérisée par une énergie potentielle du vent favorable d'augmenter la capacité de production en énergie éolienne.

## Abstract

The increasing demand for energy, fossil fuel depletion and pollution Planet pushes countries to turn to cleaner and renewable energy. Wind energy is one of the clean and inexhaustible energy that were once very used by our ancestors and which may be operated again with very good yields. In this study, we chose the 1st wind farm in Algeria in the Adrar Kabertene region to study and analyze the energy and exergy of wind turbines during the periods (August and December 2014 and the year 2015). Finally, we conclude that the region of Adrar is characterized by a potential wind energy favorable to increase the production capacity of wind energy.

## الملخص

نظرا للطلب المتزايد على الطاقة وكذا التلوث الناجم عنه في كوكبنا ومع استنفاد مصادر الطاقة الاحفورية، مما دفع بالكثير من الدول للاتجاه نحو الطاقة النظيفة والمتجددة. طاقة الرياح هي إحدى هذه الطاقات النظيفة والمتجددة والتي كانت تستخدم استخداما مكثفا من طرف أسلافنا ويمكن ان تستخدم مجددا وبمردودية جيدة في هذه الدراسة، اخترنا مزرعة الرياح الأولى في الجزائر في منطقة أدرار كابرتنن لدراسة وتحليل الطاقة والطاقة الخارجية لتوربينات الرياح خلال الفترتين (أغسطس وديسمبر 2014 وعام 2015). في الاخير استخلصنا بان منطقة إدرار تتميز بطاقة كامنة للرياح جيدة تسمح بزيادة استغلال لهذه الطاقة.