

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

*FACULTE DES SCIENCES ET
TECHNOLOGIE*
DEPARTEMENT DES GENIE
MECANIQUE
N° :



DOMAINE : GENIE MECANIQUE
FILIERE : ENERGITIQUE

**Mémoire de fin d'étude pour l'obtention
Du diplôme de licence énergétique mécanique**

Intitulé :

**ETUDE COMPARATIVE DU COEFFICIENT DE
PUISSANCE D'UNE EOLIENNE VERTICALE
ET D'UNE EOLIENNE HORIZONTALE**

Présenter par :

- Bennaama sid elkheier
- Messaoudi hicham

Année universitaire : 2019 /2020

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

A ma chère mère qui a été toujours à ma côté

A mon père qui m'a toujours guidé et soutenu

A mes sœurs et frères pour leur soutien moral

A mes amies avec lesquelles j'ai partagé les meilleurs

moments de ma vie

A tous la famille Bennaama

A tous ceux qui m'ont aidé de près et loin et qui me

connais

BENNAAMA Sid elkheier

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

*A mes parents dont le rêve était toujours de me voir
réussir. Qu'ils sachent que leur place, dans mon cœur et
ma pensée, reste et demeure immense.*

*A mes chers frères et sœurs pour le soutien dans la vie et
qui m'ont compris aidé et supporté.*

*A tout la famille Messaoudi et tous ceux qui m'ont aidé
de près et de loin et qui me connaît.*

MESSAOUDI Hicham

Remerciement

Avant tout, nous remercions DIEU qui a illuminé notre chemin et nous a armé de courage pour achever ce travail.

Nous tenons aussi à exprimer notre vifs remerciements à :

❖ Notre encadreur Monsieur : BERKACHE Amar pour ses conseils et l'aide précieuse et la grande disponibilité manifestée lors de l'élaboration de ce mémoire.

❖ Tout le corps enseignant et personnel de département de génie mécanique qui ont contribué de près ou de loin à notre formation.

Partie I:

Fig1 : Moulin à Tour en toile

Fig2 : Moulin à Tour avec pales en bois

Fig3 : Éolienne américaine et champ éolien

Fig4 : Moulin sur pivot

Fig. 5 - Eolienne a axe horizontal

Fig. 6 - Fonctionnement des éoliennes en amont (*a*) et en aval (*b*).

Fig. 7 - Courbe de puissance et zones de fonctionnement d'une eolienne.

Fig. 8 – Éolienne de type Savonius.

Fig. 9 – Éolienne de type Darrieus.

Partie II:

Fig. 10 – Les éoliennes étudiées: a – à axe horizontal; b – à axe vertical.

Partie III:

Fig11:Limite de Betz.

Fig12:Volume éolienne.

Fig. 13 – Courbes de puissance des éoliennes traitées: *a* – eolienne a axe horizontal; *b* – eolienne a axe vertical.

Partie I:

Tableau 1: Distribution de puissance des éoliennes selon leur catégorie.

Partie II:

Tableau 2: Caractéristiques des éoliennes étudiées.

SOMMAIRE

Introduction	1
I- Généralités sur les éoliennes	
I.1. Historique.....	4
I.2 Eolienne à axe horizontal.....	6
I.2.1. Principe de fonctionnement.....	6
I.2.2. Catégories des éoliennes à axe horizontal.....	7
I.2.3. Courbe de puissance et zones de fonctionnement.....	8
I.3 Eolienne à axe vertical.....	9
I.3.1 Eolienne de type Savonius.....	9
I.3.2 Eolienne de type Darrieus.....	10
II. Comparaison entre les éoliennes à axe horizontal et les éoliennes à axe vertical	
II.1. Avantages et inconvénients d'une éolienne à axe horizontal.....	14
II.2. Avantages et inconvénients d'une éolienne à axe vertical.....	14
III. Calcul analytique du coefficient de puissance d'une éolienne	
III.1. Puissance du vent.....	16
III.2. Limite de Betz.....	17
Conclusion	22

Introduction

L'énergie éolienne est une forme indirecte de l'énergie solaire, puisque ce sont les différences de températures et de pressions induites dans l'atmosphère par l'absorption du rayonnement solaire qui mettent les vents en mouvement.

En fait, à cause de la masse et de la vitesse de l'air en mouvement, le vent possède une énergie cinétique. Tout en ralentissant cette masse d'air à l'aide d'un dispositif quelconque et en l'amenant à l'arrêt complet, une énergie cinétique est récupérée. C'est justement le rôle d'une turbine éolienne de capter cette énergie mécanique et de la transformer en énergie électrique par la génératrice couplée à l'arbre de la turbine.

L'énergie éolienne, qui est une partie de l'énergie renouvelable, est une énergie non polluante. Elle constitue un supplément intéressant à l'énergie de base fournie par les centrales thermiques et nucléaires. La consommation d'énergie a montré que la part des énergies renouvelables dans la production mondiale de l'énergie est de 18% seulement, dont 1,8% est produite à partir des éoliennes, mais ce secteur est en plein essor. À noter que les coûts de fabrication, d'installation et d'exploitation des éoliennes sont rapidement rentabilisés. L'énergie éolienne possède deux secteurs d'utilisation à savoir.

- a) L'éolien urbain: tournant à très basse vitesse, totalement silencieuses, de dimensions réduites, elles sont prévues pour être implantées en toiture de bâtiment et sont parfois appelées éoliennes urbaines.
- b) L'éolien offshore: il s'agit d'éoliennes installées dans la mer. Ce type d'installation présente des solutions aux nuisances esthétiques et sonores. Aussi, dans ce cas les éoliennes sont installées dans des secteurs disposant d'un vent beaucoup plus constant qu'à terre. Ce secteur permet le développement technique progressif d'éoliennes de très grande puissance .
- c) Il existe deux types d'éoliennes : l'éolienne à axe horizontal et l'éolienne à axe vertical. Ce mini projet traite la différence entre ces deux types

d'éoliennes. Pour cela, la section 2 présente le principe de fonctionnement, les catégories et les caractéristiques d'une éolienne à axe horizontal. Ceux d'une éolienne à axe vertical sont discutés dans la section 3. La section 4 étudie, à titre d'exemple, deux éoliennes de même puissance, l'une à axe horizontal et l'autre à axe vertical, et cela afin d'illustrer la comparaison entre elles et trouver les critères de choix de chaque type d'éolienne. Dans la section 5, une conclusion est donnée.

Partie I:
Généralités sur les éoliennes

I. Généralités sur les éoliennes

I.1. Historique

Il y a plus de 5000 ans que l'énergie du vent est utilisée par les hommes (la voile pour la navigation).

Les premiers moulins à vent, sont apparus au VII^{ème} siècle après Jésus-Christ en particulier en Perse, l'actuel Iran. Ils ont servi de meules à grains et vont évoluer au cours des âges pour devenir les éoliennes.

Au moyen âge, le moulin à tour (en toile), le moulin à grain et le moulin pivot sont utilisés.



Fig1 : Moulin à Tour en toile



Fig2 : Moulin à Tour avec pales en bois

Plus tard les éoliennes dites américaines seront utilisées comme pompe à eau. Des moulins à vent seront aussi utilisés pour les polders néerlandais : Ce sont des terres gagnées sur la mer ou sur des eaux intérieures, endiguées, drainées et mises en valeur. Le drainage s'effectuait alors avec des moulins à vent utilisés comme pompe pour capter l'eau emprisonnée par les digues.



Fig3 : Éolienne américaine et champ éolien

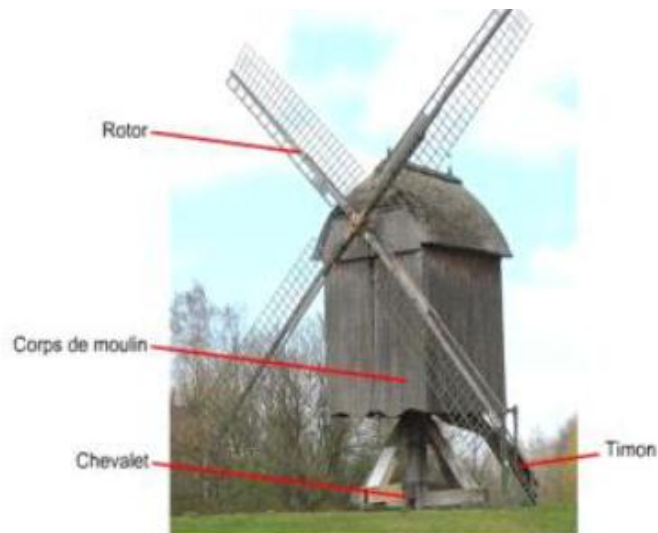


Fig4 : Moulin sur pivot

Mais c'est à partir des années 1950 que les éoliennes vont connaître un bond technique, bénéficiant de nombreux progrès technologiques et scientifiques dans de nombreux domaines (aérodynamique, structure, etc.)

Le véritable essor de l'éolien moderne coïncide avec le premier choc pétrolier de 1973, date à laquelle certains pays tels que le Danemark, les Pays-Bas et les États-Unis ont pris conscience de l'utilité de diversifier leurs sources d'approvisionnement électrique. Les turbines éoliennes rapides à ailes aérodynamiques étaient né.

I.2. Éolienne à axe horizontal

I.2.1. Principe de fonctionnement

Les éoliennes à axe horizontal ont été inspirées des moulins à vent.

Elles sont généralement formées de deux ou trois pales qui tournent de façon aérodynamique. Leur principe de fonctionnement est similaire à celui des turbines hydrauliques : la puissance mécanique du vent fait tourner des pales reliées directement ou via un multiplicateur de vitesse à un alternateur.

Ce dernier produit de l'électricité. Une éolienne est formée de trois parties principales : le rotor, la nacelle et la tour (Fig. 5). Les éoliennes à axe horizontal peuvent fonctionner en « amont » ou en « aval ». Pour les éoliennes qui fonctionnent en amont, le vent frappe les pales directement.

Il s'ensuit qu'elles doivent être rigides pour pouvoir résister au vent. La majorité des grandes éoliennes dont la puissance dépasse les 1000 kW fonctionnent avec ce principe. Pour les éoliennes fonctionnant en aval, le vent frappe sur l'arrière des pales. Cette configuration est plus utilisée pour les petites éoliennes (Fig. 6).



Fig. 5 - Eolienne a axe horizontal.

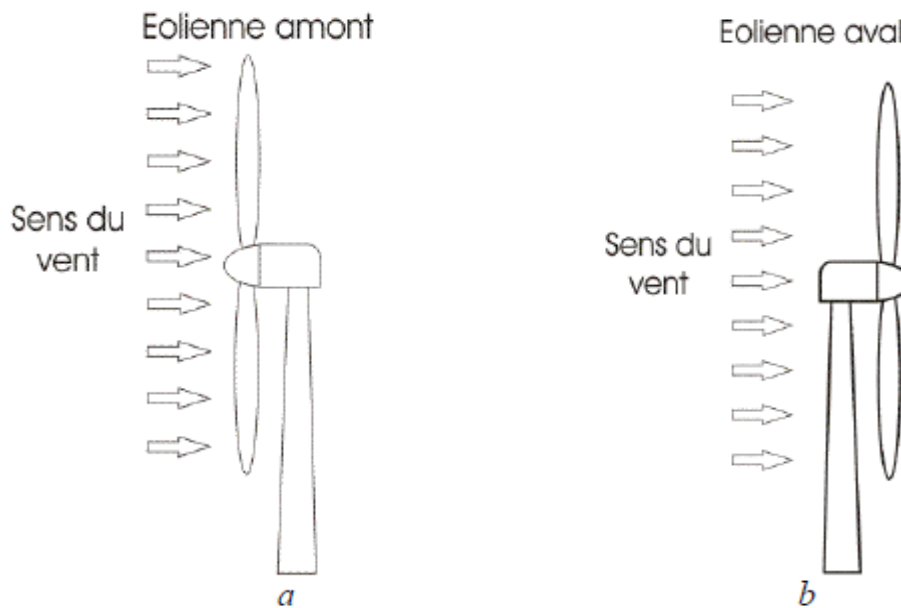


Fig. 6 - Fonctionnement des éoliennes en amont (a) et en aval (b).

I.2.2. Catégories des éoliennes à axe horizontal

Les éoliennes à axe horizontal se divisent en deux catégories: industrielles et domestiques.

Les éoliennes industrielles produisent plus d'énergie et donc elles sont les plus chères. Elles sont réservées à des applications de forte puissance. Leur mât possède une hauteur de 50 à 120 m et un diamètre de 4 à 6 m. Ceci nécessite des fondations très puissantes pour soutenir l'ensemble. La hauteur totale d'une éolienne industrielle est de 25 à 180 m. Sa puissance varie entre 100 kW et 5 MW. À noter que les éoliennes qui produisent une puissance comprise entre 15 kW et 60 kW sont dites éoliennes semi-commerciales. Leur mât est compris entre 12 et 30 m.

Concernant les éoliennes domestiques, celles-ci sont encore appelées petites éoliennes dont la puissance est comprise entre 100 W et 20 kW. Leur mât ne dépasse pas 12 m. Vu leur taille relativement petite, elles peuvent être installées dans les zones urbaines. En plus la nuisance sonore est quasi nulle.

Le Tableau 1 illustre la distribution de puissance pour chaque catégorie.

Éoliennes commerciales kW	Éoliennes industrielles kW	Éoliennes domestiques W
15	100	100
20	200	200
30	300	300
50	500	400
60	600	600
	750	750
	1 000	1 000
	1 500	2 000
	2 000	3 000
	3 000	5 000
	4 000	10 000
	4 500	20 000
	5 000	

Tableau 1

Distribution de puissance des éoliennes selon leur catégorie

I.2.3. Courbe de puissance et zones de fonctionnement

Il est très important de noter que l'éolienne ne peut pas fonctionner quelle que soit la vitesse du vent. Il existe une vitesse minimale pour son démarrage et une vitesse maximale au-delà de laquelle la turbine risque de s'endommager. En fait, l'éolienne possède quatre zones de fonctionnement (Fig. 7)

- a) Zone I: quand la vitesse du vent est inférieure à la vitesse de démarrage minimum – la turbine est arrêtée.
- b) Zone II: dans cette zone, la puissance est proportionnelle au cube de la vitesse du vent.
- c) Zone III: à partir de la vitesse nominale, la puissance est maintenue constante avec des méthodes mécaniques de limitation de vitesse de la turbine.

- d) Zone IV: une fois la vitesse maximum atteinte il est dangereux de laisser l'éolienne tourner, des systèmes de freinage mécaniques, souvent un frein à disque, sont activés pour arrêter complètement la turbine.

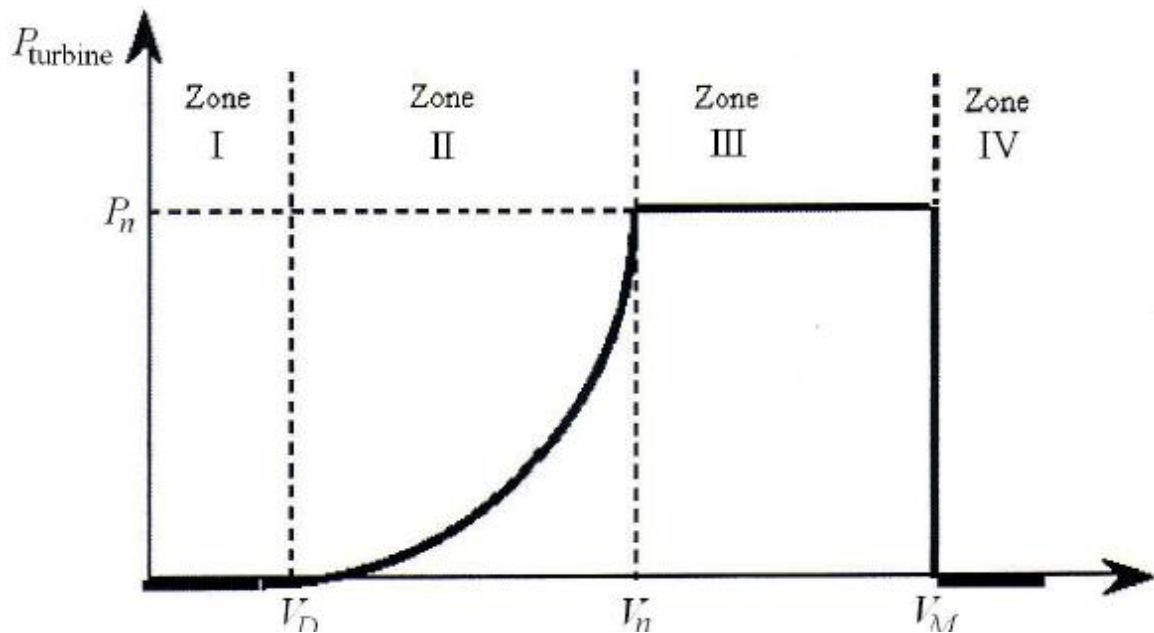


Fig. 7 - Courbe de puissance et zones de fonctionnement d'une éolienne.

I.3. Éolienne à axe vertical

Silencieuses, les éoliennes à axe vertical peuvent être installées sur des supports fixés sur le toit d'une résidence, d'un bâtiment commercial, d'une ferme ou d'une usine. Par conséquent, son installation ne nécessite pas des endroits vastes. En plus, elles captent l'énergie du vent quelque soit sa direction.

Il existe trois types d'éoliennes à axe vertical : Savonius, Darrieus et à cône.

I.3.1. Éolienne de type Savonius

Son rotor est composé par deux demi-cylindres qui tournent sur un même axe (Fig. 8). Les efforts exercés par le vent sur chacune des faces d'un corps creux sont d'intensité différente, il en résulte alors un couple moteur entraînant la rotation de l'ensemble. Cette éolienne est caractérisée par sa forme esthétique et par sa faible vitesse de démarrage (2 à 3 m/s). Peu bruyante, elle s'intègre

parfaitement en ville et son fonctionnement ne dépend pas de la direction du vent.

Le coefficient de performance, C_p , peut atteindre la valeur de 0,3. Par contre, son rendement est faible et son poids est élevé.

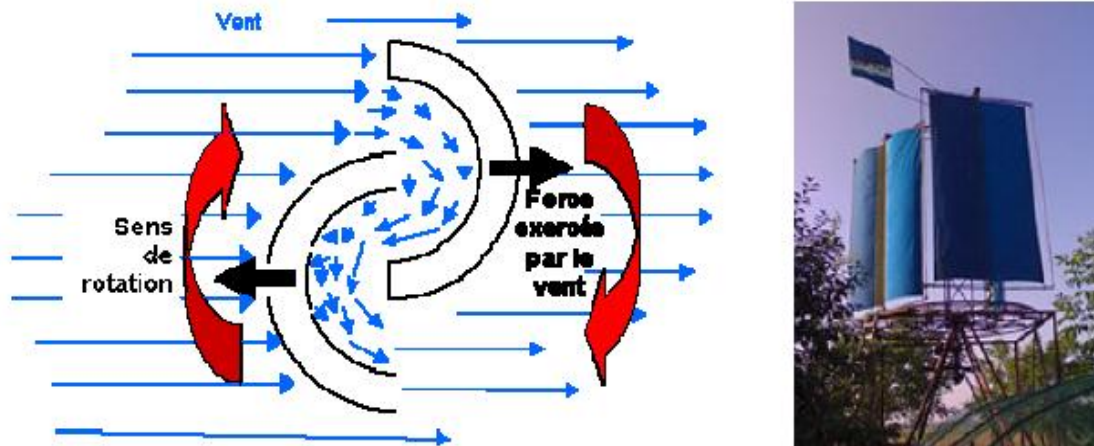


Fig. 8 – Éolienne de type Savonius.

I.3.2. Éolienne de type Darrieus

Cette éolienne peut fournir une puissance plus élevée que celle du type Savonius. Par contre, elle ne peut pas démarrer toute seule. Son fonctionnement est basé sur le fait qu'un profil placé dans un écoulement d'air selon différents angles est soumis à des forces de direction et d'intensités variables, la résultante de ces forces génère alors un couple moteur entraînant la rotation du dispositif (Fig. 9).

Ces forces sont créées par la combinaison de la vitesse propre de déplacement du profil et de la vitesse du vent. Lorsqu'elle est à l'arrêt, l'éolienne doit donc être lancée par un dispositif annexe (montage d'une éolienne Savonius sur le même rotor ou utilisation d'une génératrice en moteur).

Ces éoliennes sont la plupart du temps de puissance moyenne et ne dépassent que très rarement 500 kW en raison de leur grande sensibilité. Leur rendement est plus important que celui d'une éolienne de type Savonius.



Fig. 9 – Éolienne de type Darrieus.

Partie II:
**Comparaison entre les éoliennes à axe
horizontal et les éoliennes à axe
vertical**

II. Comparaison entre les éoliennes à axe horizontal et les éoliennes

Considérons deux éoliennes de même puissance nominale (1 kW) et fabriquées par la même compagnie chinoise – “Quingdao Hongkun Wind Power Equipment, Ctd”. Une des éoliennes est a axe horizontal, l’autre est a axe vertical (Fig. 10). Les caractéristiques de ces deux éoliennes sont données dans le Tableau 2. Les courbes de puissance en fonction de la vitesse de vent de ces éoliennes sont illustrées par la Fig. 10.



Fig. 10 – Les éoliennes étudiées: a – à axe horizontal; b – à axe vertical.

Axe de l'éolienne	Poids kg	Prix USD	Nombre de lames	Hauteur du mat m	Diamètre m	Vitesse du vent m/s	Tension V
Horizontal	320	1200	3	6	3,2	3...25	48
Vertical	395	2000	6	8	1,8	3...30	220

Tableau 2

Caractéristiques des éoliennes étudiées

II.1. Avantages et inconvénients d'une éolienne à axe horizontal

Avantages des éoliennes à axe horizontal :

- Ajustement des pâles (permet de régler le couple du rotor et donc la puissance fournie)
- Protection contre les vents trop rapides
- La forme des pâles offre les meilleures conditions aérodynamiques possibles, pour un rendement maximum.

Inconvénients des éoliennes à axe horizontal :

- Retard au déclenchement car elles doivent s'orienter face au vent.
- Elles provoquent du bruit. Elles peuvent causer des dangers pour les oiseaux.

II.2. Avantages et inconvénients d'une éolienne à axe vertical

Avantages des éoliennes à axe vertical :

- Indépendante du sens du vent.
- Générateur + Boîte d'équipement au sol (moins cher et plus simple).
- Maintenance au sol.

Inconvénients des éoliennes à axe vertical :

- Elles ne peuvent pas démarrer seules.
- Impossibilité de réguler leur régime par l'ajustement des pâles.

La grande majorité des éoliennes de grande puissance sont des éoliennes tri-pâles à axe horizontal pour des raisons d'acceptabilité visuelle de la population.

Partie III:
**Calcul analytique du coefficient de
puissance d'une éolienne**

III. Calcul analytique du coefficient de puissance d'une éolienne

III.1. Puissance du vent

En utilisant la distribution de Weibull, on calcule la puissance que fournit le vent à l'éolienne.

La Puissance du vent contenue dans un cylindre de section S se calcul à partir de:

$$P_{cinétique} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot v^3$$

ρ : masse volumique de l'air (kg/m^3)

S : surface du capteur éolien (m^2)

v : vitesse du vent (en m/s)

Connaître la vitesse moyenne du vent ne suffit pas pour calculer la puissance moyenne.

La puissance moyenne du vent est déterminée grâce à la distribution de Weibull.

La puissance est proportionnelle au cube de la vitesse. Il faudra donc prendre en compte la probabilité de l'occurrence de chaque vitesse de vent et la puissance correspondante.

Les vents forts contenant le plus d'énergie, influenceront d'autant plus sur la puissance moyenne, bien qu'ils aient une faible probabilité.

En multipliant la puissance de chaque vitesse de vent par la probabilité de l'occurrence de cette vitesse selon la répartition de Weibull, nous pouvons calculer la distribution de l'énergie éolienne (en $\text{kWh/m}^2/\text{an}$ ou en W/m^2) à des vitesses de vent différentes.

Cette distribution est appelée la densité de puissance.

III.2. Limite de Betz

Sur un site théorique, dans le cas d'une éolienne qui présente une puissance nominale de MW, on observe que cette puissance est inférieure à la puissance du vent disponible.

Nous allons expliquer d'où proviennent les pertes.

Pour évaluer le prélèvement de puissance dans le débit d'air à travers le rotor, on définit le coefficient de puissance C_p . Il indique quelle part de puissance du vent non freiné est transformée en puissance utile.

Le coefficient de puissance d'une éolienne se calcule à partir de l'équation suivante :

$$C_p = \frac{P_{eolienne}}{P_o}$$

Où $P_o = P_{cinétique}$ est la puissance incidente du vent non perturbé La vitesse de vent $V_{entrant}$ rencontrant l'éolienne est freinée à la surface du rotor.

En aval du rotor, $V_{sortant}$ s'élève encore à environ 1/3 de la vitesse en amont du rotor.

Si l'on rapport C_p en fonction du rapport de la vitesse de vent avant le rotor $\frac{V_{sortant}}{V_{entrant}}$, c'est-à-dire du freinage, on obtient un maximum à $\frac{V_{sortant}}{V_{entrant}} = \frac{1}{3}$

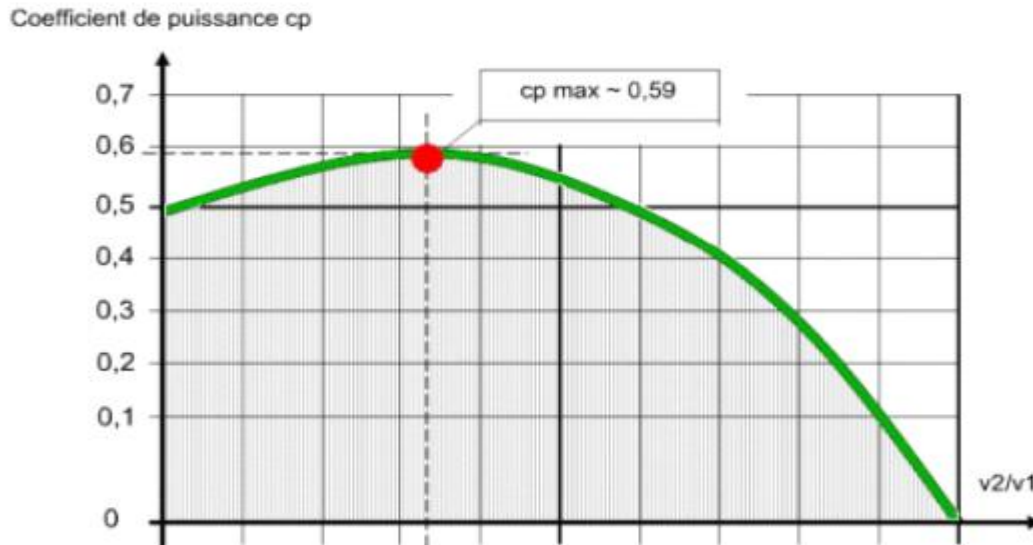


Fig11:Limite de Betz

Ce coefficient de puissance maximum C_{pmax} est aussi appelé valeur limite de Betz.

Elle représente une limite supérieure théorique pour le prélèvement de puissance dans le vent pour une éolienne idéale.

$$C_{pmax} = \frac{16}{27} \approx 0.59$$

De l'énergie du vent (source primaire du système éolien), on ne peut en récupérer qu'au maximum 59 %. C'est la limite de Betz.

En pratique, une éolienne sert à récupérer l'énergie du vent ; en contrepartie celle-ci dévie le vent avant qu'il atteigne la surface balayée par le rotor. Une éolienne ne pourra donc jamais récupérer l'énergie totale fournie par le vent. Lorsque l'énergie cinétique du vent est convertie en énergie mécanique par le rotor, le vent est freiné par celui-ci. La vitesse du vent en amont du rotor est toujours supérieure à celle en aval.

Or la masse d'air qui traverse la surface balayée par le rotor est identique à celle sortante. Il en résulte un élargissement de la veine d'air (tube de courant) à l'arrière du rotor. Ce freinage du vent est progressif, jusqu'à ce que la vitesse de

l'air à l'arrière du rotor devienne à peu près constante. Ce rapport caractérise la limite maximum de l'énergie, due à la masse d'air en amont, susceptible d'être captée par une éolienne.

Elle est théorique puisque basée sur des conditions d'écoulement parfaites et sans pertes.

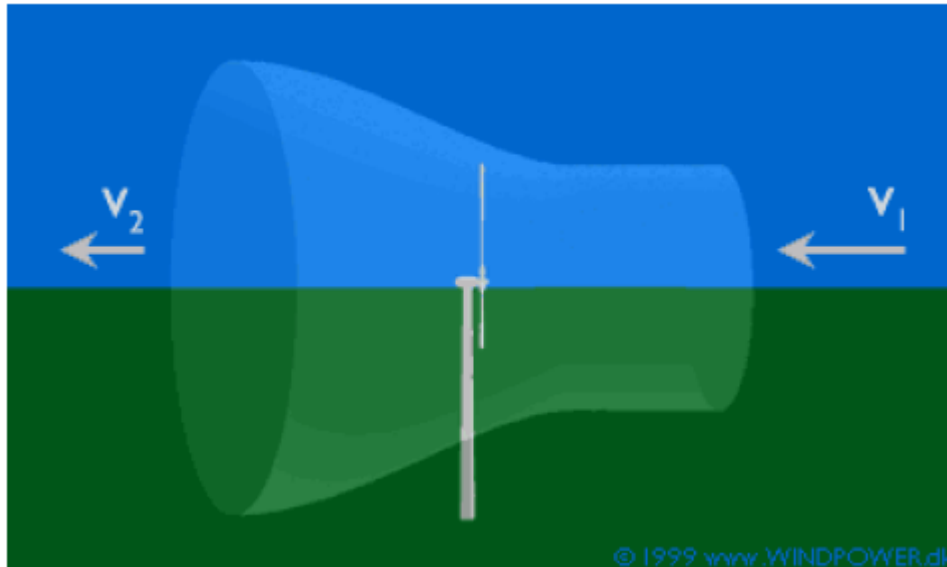


Fig12:Volume éolienne

En réalité la puissance récupérée est inférieure à cette puissance maximum, car « du vent à l'ampoule » dans notre cas, ou « du vent au réseau électrique » à l'échelle nationale, il y a plusieurs étapes de conversion d'énergie, chacune avec son propre rendement (par exemple le rendement d'une hélice est d'environ 85%).

De plus, en pratique tous les organes ne sont pas à leur rendement maximum en même temps, ce qui réduit encore le rendement global. Ainsi une éolienne industrielle aura un rendement global compris entre 50 et 55%, une éolienne artisanale entre 25 et 40%.

En fait, l'étude menée sur ces deux types d'éoliennes montrent que

- a) L'éolienne à axe horizontal démarre à une vitesse du vent supérieure ou égale à 2,5 m/s. Par contre, celle à axe vertical nécessite une vitesse qui avoisine 3,3 m/s.
- b) L'augmentation de la puissance de l'éolienne à axe horizontal en fonction de la vitesse du vent est plus rapide que celle à axe vertical. Par

Exemple, pour une vitesse du vent de 4 m/s la puissance produite par l'éolienne à axe horizontal est égale à 200 W tandis que celle délivrée par l'éolienne à axe vertical produit 100 W.

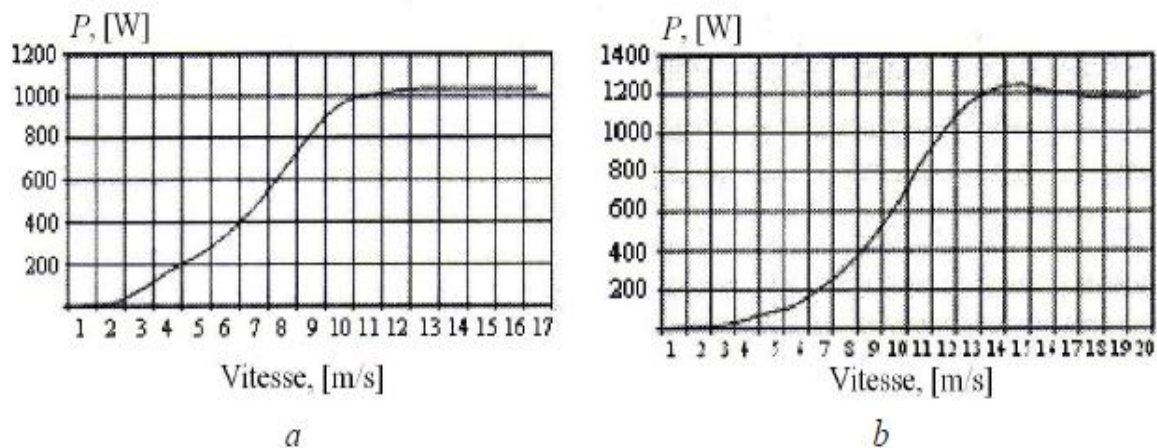


Fig. 13 – Courbes de puissance des éoliennes traitées: *a* – éolienne à axe horizontal; *b* – éolienne à axe vertical.

- c) Le coefficient de performance de l'éolienne à axe horizontal est égal à 0,593. Celui de l'éolienne à axe vertical avoisine 0,3.
- d) L'éolienne à axe horizontal de diamètre 3 m et de hauteur 6 m occupe plus d'espace que celle à axe vertical, qui est caractérisée par un diamètre de 1,35 m et d'une hauteur de 2,2 m. En général, plus la hauteur de l'éolienne est grande, plus sa production est élevée. Mais cet avantage est limité dans les zones urbaines par des lois à respecter.
- e) Le rendement de l'éolienne à axe horizontal est supérieur à celui de l'éolienne à axe vertical,

- f) L'éolienne a axe horizontal est plus solide et sa fabrication coute moins cher que celle a axe vertical.
- g) L'éolienne a axe vertical possède l'avantage d'avoir les organes de commande et le générateur au niveau du sol donc facilement accessibles.

A noter que les éoliennes a axe vertical sont de conception plus complexe que les éoliennes a axe horizontal mais s'adaptent plus facilement a des zones de vent irrégulier alors que les éoliennes a axe horizontal doivent être équipées d'un système d'orientation par gouverne qui assure une orientation face au vent. En plus, les éoliennes a axe vertical ne connaissent pas les limites dues a la taille des pales et a la vitesse des vents, elles peuvent donc être beaucoup plus adaptées et performantes dans les zones de vents extrêmes.

Conclusions

Une éolienne est un dispositif qui transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique puis, éventuellement, en énergie électrique. Il existe deux types d'éoliennes : les éoliennes à axe horizontal et les éoliennes à axe vertical.

Dans ce mini projet, une représentation détaillée de chaque type d'éolienne a été effectuée. Cette représentation est suivie par une étude comparative entre deux éoliennes de même puissance, l'une à axe horizontal et l'autre à axe vertical. Cette étude montre que du point de vue efficacité, l'éolienne à axe horizontal est plus efficace que l'éolienne à axe vertical. Elle peut être utilisée pour la production de l'électricité à grande échelle. Alors que du point de vue esthétique, espace et maintenance, l'éolienne à axe vertical est plus favorable, mais reste limitée pour l'usage domestique.

[1] Publicat de Universitatea Tehnică „Gheorghe Asachi” din Iasi Tomul LVII (LXI), Fasc. 5, 2011 "ÉTUDE COMPARATIVE ENTRE ÉOLIENNE À AXE HORIZONTAL ET ÉOLIENNE À AXE VERTICAL" PAR *NASR SARAH et MOUBAYED NAZIH*

[2]TP centrale eolienne UPMC Université Pierre et Marie Curie Master Science de l'Ingénieur.

[3] PRESENTE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER ENERGETIQUE ET ENVIRONNEMENT "Conception et simulation du comportement d'une éolienne à des variations de certains paramètres" FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIORAT DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA.

[4] Mémoire de Fin de cycle En vue de l'obtention d'un diplôme de MASTER en Electromécanique Spécialité : Electromécanique "Etude d'une éolienne de petite puissance à base d'une machine synchrone à aimants permanents" Université Abderrahmane Mira de Bejaia Faculté de Technologie Département Génie Electrique.