

République Algérienne Démocratiques et Populaire
Ministère de l'Enseignements Supérieur
et de la Recherche Scientifique
Université Djillali Liabes de Sidi Bel Abbas
Faculté de Technologie
Département de Génie Mécanique



الجمهورية الجزائرية
الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي و البحث
العلمي
جامعة جيلالي ليايس -
سيديلعباس
كلية التكنولوجيا

Polycopié pédagogique

L'Energie Eolienne

Cours destiné aux étudiants :

Filière : Energies renouvelables

Option : Energie Renouvelable en mécanique

Parcours : Master

Semestre : S2

Unité d'enseignement : UEF 1.2.2

Cours présenté par :

Dr. BENAMARA Nabil

Année universitaire 2021/2022

L'Énergie Éolienne



Avant-propos

Ce polycopié fait l'objet d'un complément de cours & travaux dirigés pour le module « L'Énergie Éolienne », et il est destiné aux étudiants de master énergétique et énergie renouvelable en mécanique ainsi que toutes spécialités ayant une relation avec les énergies propres. L'accent est mis sur le calcul et le dimensionnement des machines Aéro-électriques. Ce manuel fournit aux étudiants des notions scientifiques et technologiques dans le domaine des énergies propres inépuisables et cela par l'acquisition des informations utiles à la fabrication et la maintenance des Aérogénérateurs. Les sources de la plupart des documents présentés sont données dans la section de référence pour le bénéfice des étudiants qui souhaitent s'approfondir d'avantage.

Ce document est composé de quatre grands chapitres suivant le canevas prescrit par le ministre de l'enseignement Supérieur et de la recherche scientifique, et qui sont représentés comme suite:

Le chapitre 1 présente le principe de fonctionnement et la classification des Aérogénérateurs. Le chapitre 2 est consacré au calcul des éléments les plus importants d'une éolienne: les pales et ses formes profilées. Le chapitre 3 présente en détail la théorie des pales sur lesquels sont effectués les calculs de dimensionnement et la quantification de l'énergie électrique produite. Le dernier chapitre est consacré à la météo et le potentiel énergétique du site, c'est à dire, elle offre une variété de méthodes pour estimer l'énergie qui pourrait être "récolté" chaque année en connaissant les statistiques du vent du site.

A travers ce modeste document, je souhaite que les étudiants quelques soient leurs disciplines acquièrent une compréhension profonde de l'énergie éolienne.

Chapitre I

TECHNOLOGIES DES EOLIENNES

I.1.	Introduction.....	3
I.2.	Contexte historique.....	3
I.3.	Définition de l'énergie éolienne.....	3
I.4.	Différents types d'aérogénérateurs.....	4
I.4.1	Axe vertical (VAWT).....	4
I.4.2	Axe horizontal (HAWT).....	6
I.5.	Composantes d'une éolienne.....	6
I.5.1	La nacelle.....	7
I.5.2	La tour.....	8
I.5.3	Le rotor.....	9
I.5.4	Le multiplicateur.....	9
I.5.5	La génératrice.....	9
I.5.6	Les pales d'éolienne.....	10
I.6.	Dimensionnement.....	11
I.7.	Régulation mécanique de la puissance d'une éolienne.....	12
I.8.	Avantages et désavantages de l'énergie éolienne.....	12
I.9.	La vitesse spécifique.....	13
I.10.	Couple mécanique produit par l'éolienne.....	14
I.11.	Rendement des composants d'une éolienne.....	14

I.1. Introduction

L'utilisation des systèmes éoliens pour la production d'électricité est une solution pour satisfaire les besoins en électricité dans leur site isolé est assez bien venté. De tels systèmes présentent plusieurs avantages du fait de sa flexibilité et sa fiabilité. Il existe deux types d'éoliennes modernes : les éoliennes à axe horizontal et à axe vertical. Les plus utilisées sont celles à axe horizontal [1].

I.2. Contexte historique

Très tôt, dans l'histoire des techniques [2], le vent a été exploité afin d'en extraire de l'énergie mécanique : pour la propulsion des navires dès l'antiquité (3000 ans Av. JC), pour les moulins (à céréales, olives), le pompage ou, au Moyen Age, pour l'industrie (forges...).

La conversion de l'énergie du vent en énergie mécanique est en effet relativement aisée, il faut « seulement » disposer d'un potentiel satisfaisant et résister aux caprices des vents excessifs. Parallèlement, les progrès technologiques, tant dans les domaines de l'électrotechnique, de l'électronique que dans celui des matériaux, font que l'on peut désormais disposer de machines aux performances étonnantes en terme de puissance produite, tout en limitant les impacts sur l'environnement [3].

Dans les sites isolés, la rentabilité étant plus facile à obtenir, des petites éoliennes dans la gamme de quelques 100 W à quelques 10 kW sont commercialisées depuis plus longtemps. La baisse des coûts des cellules photovoltaïques permet aujourd'hui de construire des systèmes hybrides éoliens et photovoltaïques qui profitent de la fréquente complémentarité vent-soleil (réduction des coûts des batteries de stockage nécessaires en site isolé) [2].

Ainsi l'histoire de l'énergie éolienne a pour une grande partie été influencée par des facteurs extérieurs, tels l'apparition de la machine à vapeur, la distribution généralisée d'électricité, la crise énergétique de 1973. Enfin plus récemment, les accords de Kyoto devraient être le moteur principal du développement des éoliennes [4].

I.3. Définition de l'énergie éolienne

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent (fluide en mouvement) en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice [5].

Le principe de la conversion éolienne est illustré par la figure (I.1).l'ensemble de la chaîne de conversion fait appel à des domaines très divers et pose des problèmes aérodynamiques, mécanique, électrique ou d'automatique.

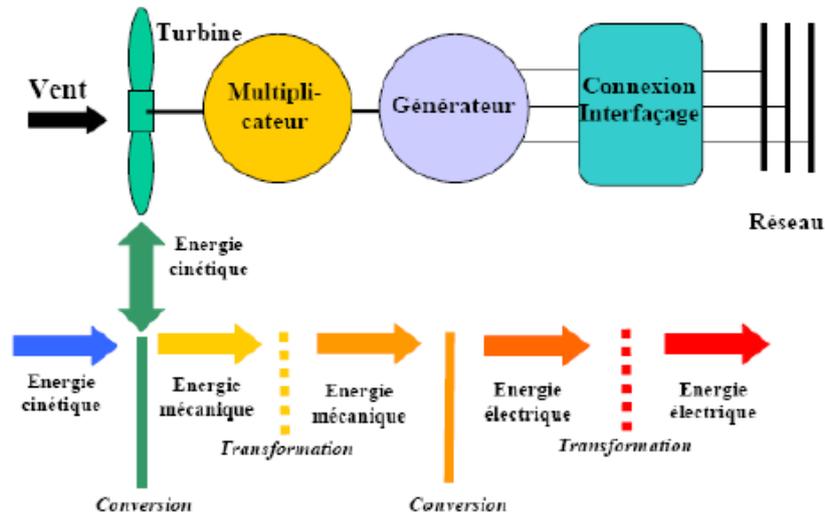


Figure I.1 : Conversion de l'énergie cinétique du vent [5].

I.4. Différents types d'aérogénérateurs

Les solutions techniques permettant de recueillir l'énergie du vent sont très variées. Deux familles de voilures existent : les aérogénérateurs à axe vertical (VAWT) et à axe horizontal (HAWT). Le graphique de la Figure I.2 donne une vue sur les coefficients de puissance C_p habituels en fonction de la vitesse spécifique, λ pour différents types d'éoliennes.

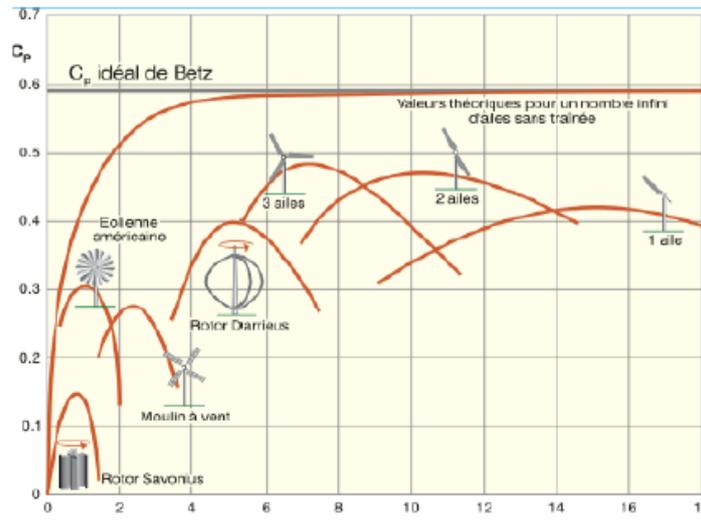


Figure I.2 : Courbes caractéristiques des aérogénérateurs [7].

I.4.1 Axe vertical (VAWT)

Les éoliennes à axe vertical (Figure I.3, Figure I.4) ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité paradoxalement en contradiction avec le traditionnel moulin à vent à axe horizontal. Elles possèdent l'avantage d'avoir les organes de commande et le générateur au niveau du sol donc facilement accessibles [8].

Avantages [2]: machinerie au sol, pas besoin d'orientation en fonction de la direction du vent, fort couple de démarrage, construction simple (Savonius), tourne à faible vitesse (donc peu bruyante).

Inconvénients [2]: guidages mécaniques, notamment le palier bas qui doit supporter le poids de l'ensemble de la turbine.

Il existe principalement trois technologies Vawt (Vertical Axis Wind turbine) : les turbines Darrieus classique ou à pales droites (H-type) et la turbine de type Savonius [5,6], comme montré à la Figure I.3 et la Figure I.4. Toutes ces voilures sont à deux ou plusieurs pales.

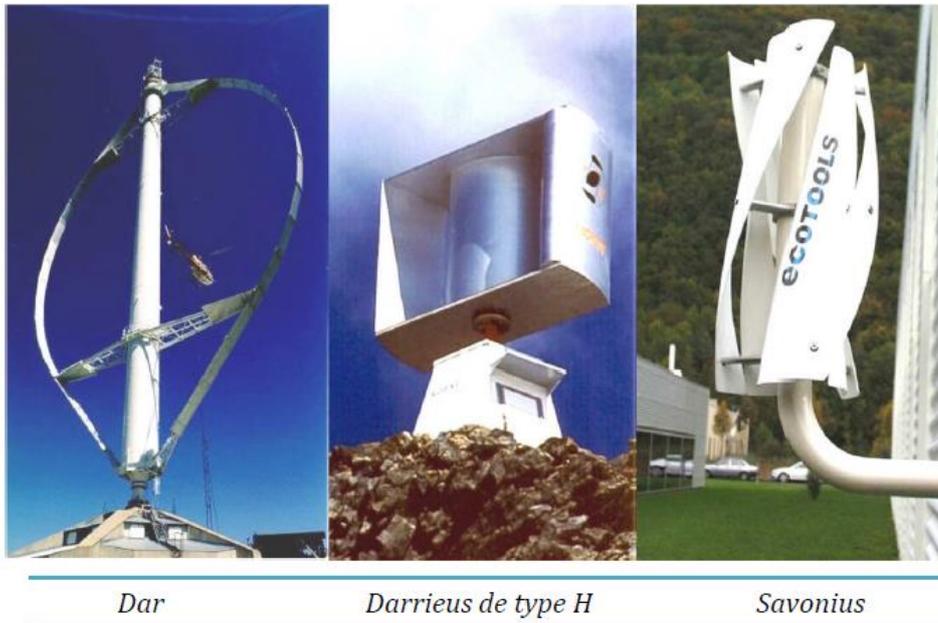


Figure I.3 : Exemples des constructions VAWT [6]

Figure I.4 : Exemples des constructions Darrieus (Darrieus de type H) et Savonius [6]

Les éoliennes à variation cyclique d'incidence [7] dont la structure la plus répandue est celle de Darrieus (ingénieur français qui déposa le brevet au début des années 30). Leur fonctionnement est basé sur le fait qu'un profil placé dans un écoulement d'air selon différents angles (Figure I.4) est soumis à des forces de direction et d'intensité variables. La résultante de ces forces génère alors un couple moteur entraînant la rotation du dispositif. Ces forces sont créées par la combinaison de la vitesse propre de déplacement du profil et de la vitesse du vent.

Même si quelques grands projets industriels ont été réalisés, les éoliennes à axe vertical restent toutefois marginales et peu utilisées voire actuellement abandonnées. En effet la présence du capteur d'énergie près du sol l'expose aux turbulences et au gradient de vent ce qui réduit son efficacité. Elles sont de plus exposées à des problèmes d'aéroélasticité dus aux fortes contraintes qu'elles subissent. Enfin la surface qu'elles occupent au sol est très importante pour les puissances élevées.

I.4.2 Axe horizontal (HAWT)

La technologie largement dominante aujourd'hui [7] est à axe horizontal à turbine tripale, parfois bipale et à rotor face au vent.

Les avantages de tels dispositifs sont une réduction du diamètre de la turbine ainsi que du bruit acoustique. Des grandes puissances sont envisagées, de l'ordre de 600 kW à plusieurs MW (notamment avec le constructeur Vortec mais également avec société française CITA), mais n'ont pas encore vu le jour.

La turbine peut se trouver à l'avant de la nacelle ou à l'arrière : au vent (amont ou upwind) ou sous le vent (aval ou downwind) (Figure I.5). L'avantage des dispositifs sous le vent est qu'ils se positionnent automatiquement face au vent ce qui permet, notamment pour les fortes puissances d'éviter le système mécanique d'orientation, complexe, lourd et coûteux.

L'inconvénient majeur réside dans une fatigue accrue due aux fréquentes oscillations liées aux changements de direction du vent. Le procédé « sous le vent » reste peu utilisé comparativement à celui « au vent ».

La réduction du nombre de pales permet théoriquement de réduire le coût mais cela dépend de la régularité du couple. Le coefficient C_p est également sensiblement plus faible, environ 5% entre une tripale et une bipale. Des machines monopales ont même été construites mais il semble qu'aucune ne soit actuellement commercialisée.

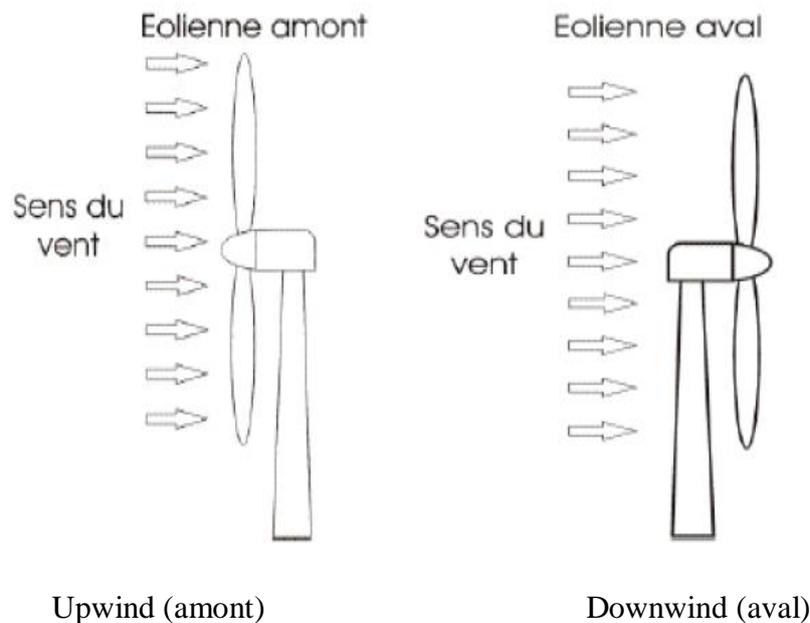


Figure I.5: Type de montage de la voilure [5]

I.5. Composantes d'une éolienne

Une installation est généralement constituée d'une éolienne, d'une tour avec de solides fondations et d'un ensemble d'équipements électriques pour le stockage de l'énergie produite ou pour gérer la connexion avec le réseau électrique local. La figure (I.6) présente les composantes d'une éolienne.

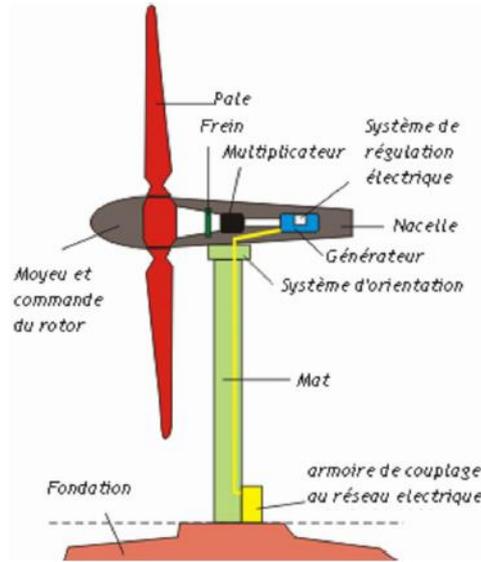
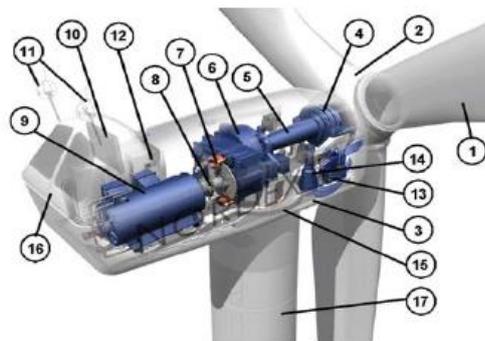


Figure I.6: Composante d'une éolienne de forte puissance [9]

L'éolienne est pour sa part, composée d'un rotor bi ou tri pale, bien souvent à axe horizontal, d'une génératrice à courant continu ou d'un alternateur et d'une nacelle qui permet de fixer et supporter le rotor et la génératrice figure I.7.



- | | | |
|------------------------------|-------------------------------------|--|
| 1: pales. | 7: frein à disque. | 13: centrale hydraulique. |
| 2: moyeu rotor. | 8: accouplement. | 14: mécanisme. |
| 3: nacelle. | 9: génératrice. | 15: paliers du système d'orientation équipés d'un frein à disque |
| 4: cardan | 10: radiateur de refroidissement... | 16: capot. |
| 5: transmission. | 11: centrale de mesures du vent | 17: mât. |
| 6: multiplicateur de vitesse | 12: contrôle | |

Figure I.7: Constitution d'une Eolienne

I.5.1 La nacelle

Regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique : arbres primaire et secondaire, multiplicateur, Le frein à disque, différent du frein aérodynamique, qui permet d'arrêter le système en cas de surcharge. Le générateur qui est généralement une machine synchrone ou asynchrone et les systèmes hydrauliques ou électriques d'orientation des pales (frein aérodynamique) et de la nacelle (nécessaire pour garder la surface balayée par l'aérogénérateur perpendiculaire à la direction du vent). A cela viennent s'ajouter, le système de refroidissement par air ou par eau, un anémomètre et le système électronique de gestion de l'éolienne.



Figure I.8 : La nacelle d'une éolienne à axe horizontal.

I.5.2 La tour

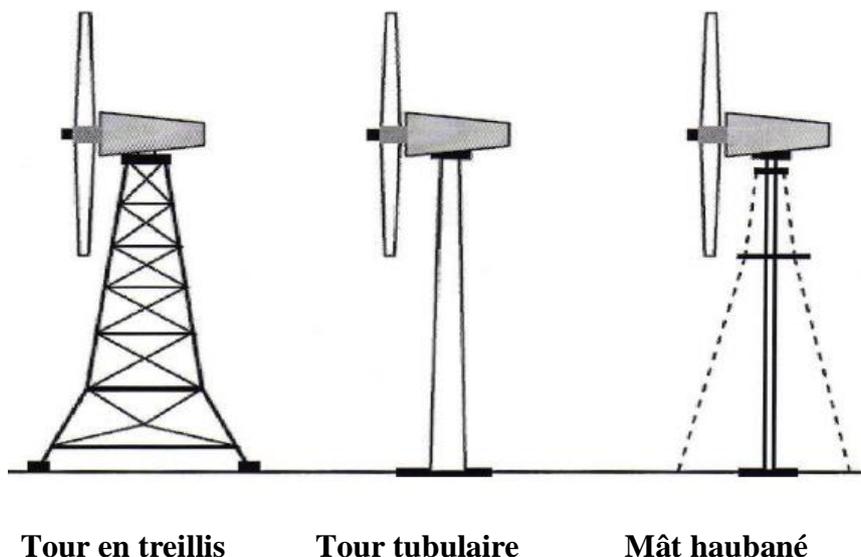
Son rôle est d'une part de supporter ensemble rotor et nacelle pour éviter que les pales ne touchent le sol, mais aussi de placer le rotor à une hauteur suffisante, de manière à sortir autant que possible le rotor du gradient de vent qui existe à proximité du sol, améliorant ainsi la captation de l'énergie. Certains constructeurs proposent ainsi différentes hauteurs de tour pour un même ensemble rotor et nacelle de manière à s'adapter au mieux à différents sites d'implantation (Figure I.9).

Trois grands types de tour peuvent se rencontrer:

□ **Tour mât haubané :** de construction simple et moins coûteuse mais s'adresse essentiellement aux machines de faible puissance. Une intervention au niveau de la nacelle nécessite en général de coucher le mât.

□ **Tour en treillis :** sont les moins chères, mais souvent mal acceptées et très peu utilisées. Son avantage essentiel est sa simplicité de construction, qui la rend attractive pour les pays en voie de développement. Pour des machines de grande taille, son aspect inesthétique devient un handicap certain

□ **Tour tubulaire :** est beaucoup plus élégant, mais le prix d'une telle tour peut atteindre trois ou quatre fois celui d'un pylône haubané.



Tour en treillis

Tour tubulaire

Mât haubané

Figure I.9 : Différents types de tours [10].

I.5.3 Le rotor

Formé par les pales assemblées dans leur moyeu. Pour les éoliennes destinées à la production d'électricité, le nombre de pales varie classiquement de 1 à 3.



Figure I.10 : Un rotor d'une éolienne à axe horizontal.

I.5.4 Le multiplicateur

Les rotors dont le diamètre est supérieur à 5 m ont des vitesses de rotation trop faibles pour pouvoir entraîner directement un alternateur classique. Il est donc indispensable pour ces machines d'interposer entre l'aéromoteur et l'alternateur un multiplicateur. 3 types de multiplicateurs peuvent être utilisés avec les aéromoteurs :

- Le plus simple est le multiplicateur à engrenages à un ou plusieurs trains de roues dentées cylindriques ; d'une réalisation économique il est tout de même encombrant pour un rapport de multiplication élevé.
- L'utilisation de trains planétaires permet de réaliser des multiplications élevées sous un encombrement réduit avec un bon rendement de transmission. Les axes d'entrée et de sortie sont colinéaires voire coaxiaux.
- Le réducteur à couple conique permet une disposition de l'arbre de sortie perpendiculaire à l'arbre d'entrée.

I.5.5 La génératrice

C'est un alternateur qui convertit l'énergie mécanique en énergie électrique. Les plus simples et robustes sont des générateurs à induction. Il existe plusieurs types de génératrices pour stabiliser la vitesse des moteurs: génératrices à basses vitesses de vent, l'autre pour les hautes vitesses génératrice auto-excitée.

Enfin, La nouvelle génératrice discoïde de Jeumont Industrie est une innovation majeure car elle réduit la taille, normalement imposante, de ces alternateurs multipôles. Toutefois, le courant produit doit passer par un onduleur de grande puissance. Il s'agit là aussi d'une technologie de pointe.

I.5.6 Les pales d'éolienne

Une pale d'éolienne extrait l'énergie cinétique du vent et la transforme, grâce à sa connexion avec le rotor, en mouvement de rotation. Le phénomène de portance aérodynamique est au cœur du principe de fonctionnement.

Les pales forment 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.

Cependant, il est bon de savoir que les pales déterminent grandement le rendement de l'éolienne et ces performances. Concevoir une pale revient à déterminer :

- La longueur de la pale : 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.

Pour les roues à marche lente, ayant une inertie importante, le diamètre reste limité à 8 m à cause de leur comportement lors de rafales de vent.

Pour les roues à marche rapide, la longueur des pales peut être grande, supérieure à 30m.

- La largeur de la pale: La largeur des pales intervient pour le couple de démarrages 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. La valeur du couple augmente si la largeur de pale augmente.

- Le profil aérodynamique de la pale : il est choisi en fonction de ses propriétés aérodynamiques telles que la portance et la traînée mais aussi selon le couple désiré et la vitesse spécifique de la pale. 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, 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).

- Le calage initial et le gauchissement de la pale : ils seront déterminés afin d'avoir tout au long de la pale un angle d'attaque optimum pour le régime de rotation du rotor correspondant à la vitesse du vent nominale. C'est à dire la vitesse de vent pour laquelle l'éolienne à le meilleur rendement.

- Les matériaux de fabrication de la pale : le choix des matériaux est une étape importante. En effet, le matériau détermine le procédé de fabrication, le coût, la durée de vie et la fiabilité des pales qui subissent beaucoup de contraintes en fatigue. Le matériau idéal doit être léger, résistant, homogène pour avoir des pales de même masse, facile à mettre en œuvre pour diminuer le coût, résistant à l'érosion et à la corrosion. Certains types de bois,

certaines métaux, mais aujourd'hui surtout des matériaux composites répondent aux critères requis.

- Nombre de pales: Le nombre de pales B , que l'éolienne possèdera influence aussi le design de la pale.

Le nombre de pale est déterminé en fonction de la vitesse spécifique λ , et du couple à fournir. Lorsque la vitesse spécifique est fixée, une valeur pour le nombre de pale est recommandée. Ainsi pour $4 < \lambda < 10$ le nombre de pale recommandé se situe entre 1 et 3 inclusivement (Figure I.11).

- Les éoliennes à marche lente ont en général entre 20 et 40 ailettes et ont un couple de démarrage proportionnel au nombre de pales et au diamètre ; leur rendement par rapport à la limite de Betz est faible car leur vitesse en bout de pale est limitée.
- Les éoliennes à marche rapide sont généralement bipales ou tripales. La roue bipale est la plus économique et la plus simple mais elle est génératrice de vibrations qui peuvent être importantes. La roue tripale présente moins de risques de vibrations, d'où fatigue et bruit plus faibles, mais elle est plus compliquée et plus lourde.

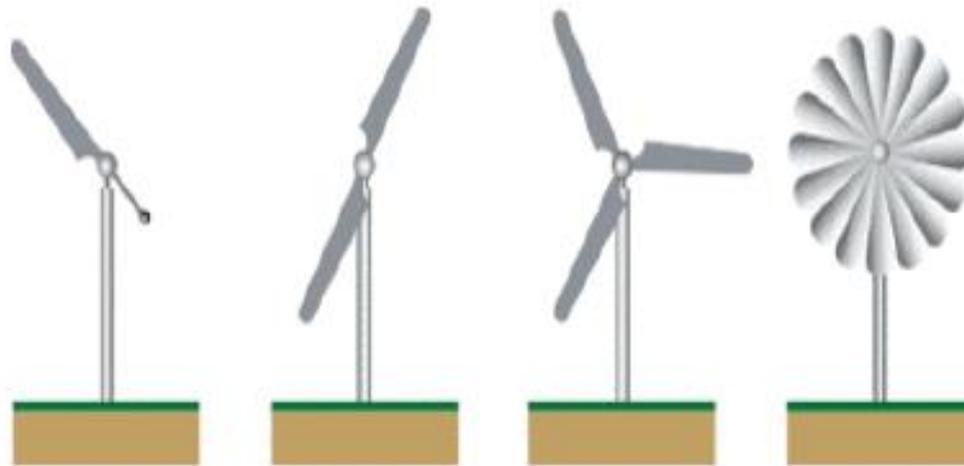


Figure I.11: Classification des éoliennes à axe horizontal selon le nombre de pales.

I.6. Dimensionnement

La pale d'une éolienne [9] est en réalité le véritable capteur de l'énergie présente dans le vent. De ses performances dépend la production d'énergie de l'installation, puis par conséquent l'intérêt économique de la machine.

La conception d'une pale doit faire appel à un compromis délicat entre le rendement aérodynamique, la légèreté, la résistance statique, les conditions de vent (vitesses, taux de turbulence) influent sur la conception (charges extrêmes, tenue en fatigue).

On s'aperçoit donc aisément que la conception d'une pale est en fait un procédé itératif avec de nombreux paramètres et de nombreuses contraintes. Il est indéniable que l'apparition de logiciels de calcul évolués associés à des optimisations facilite grandement la tâche du concepteur.

I.7. Régulation mécanique de la puissance d'une éolienne

Pour des vitesses de vents supérieures à la vitesse de vent nominale V_n , la turbine éolienne doit modifier ses paramètres aérodynamiques afin d'éviter les surcharges mécaniques (turbines, mât et structure), de sorte que la puissance récupérée par la turbine ne dépasse pas la puissance nominale P_n pour laquelle l'éolienne a été conçue. Il y a d'autres grandeurs dimensionnantes : V_d la vitesse du vent à partir de laquelle l'éolienne commence à fournir de l'énergie et V_c la vitesse maximale de vent au-delà de laquelle l'éolienne doit être stoppée pour des raisons de sûreté de fonctionnement.

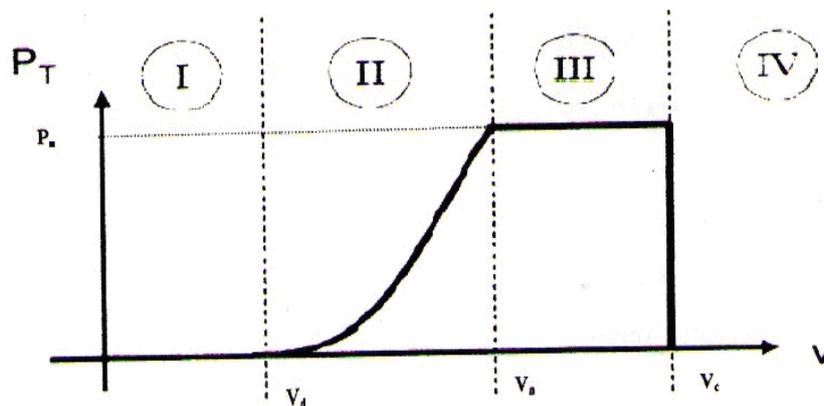


Figure I.12 : Diagrammes de la puissance utile sur l'arbre en fonction de la vitesse du vent

Ainsi la caractéristique de puissance en fonction de la vitesse du vent comporte quatre zones :

- la zone I, où $P_{\text{turbine}} = 0$ (la turbine ne fournit pas de puissance) ;
- la zone II, dans laquelle la puissance fournie sur l'arbre dépend de la vitesse du vent ;
- la zone III, 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 IV, dans laquelle le système de sûreté du fonctionnement arrête la rotation et le transfert de l'énergie.

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 :

1. 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 III de vitesses ;

2. 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).

I.8. Avantages et désavantages 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.

❖ **Les avantages**

- L'énergie éolienne est avant tout une énergie qui respecte l'environnement.
- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable, c'est-à-dire que contrairement aux énergies fossiles.
- L'énergie éolienne n'est plus non plus une énergie à risque comme l'est l'énergie nucléaire et ne produit évidemment pas de déchets radioactifs donc on connaît la durée de vie.
- L'exploitation de l'énergie éolienne n'est pas un procédé continu puisque les éoliennes en fonctionnement peuvent facilement être arrêtées.
- Les parcs éoliens se démontent facilement.

L'énergie éolienne a d'autre part des atouts économiques certains :

- C'est une source d'énergie locale qui répond aux besoins locaux en énergie, C'est l'énergie la moins chère entre les énergies renouvelables.
- 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.
- Enfin, ce type d'énergie est facilement intégré dans un système électrique existant déjà.
- L'énergie éolienne crée plus d'emplois par unité d'électricité produite que n'importe quelles sources d'énergie traditionnelle.

❖ **Les inconvénients**

Même s'ils ne sont pas nombreux, l'éolien a des certains inconvénients :

- L'impact visuel. ça reste néanmoins un thème subjectif.
- Le bruit: le bruit mécanique qui a pratiquement disparu grâce aux progrès réalisés au niveau du multiplicateur. Le bruit aérodynamique quant à lui est lié à la vitesse de rotation du rotor, et celle-ci évitent les aérogénérateurs.
- La qualité de la puissance électrique : La source d'énergie éolienne étant stochastiques, 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.9. La vitesse spécifique

La vitesse spécifique ou le paramètre de rapidité noté λ est le rapport entre la vitesse de l'extrémité des pales et la vitesse du vent. Les machines peuvent être classées en fonction de ce paramètre

- Si λ inférieur à 3, l'éolienne est dite lente.
- Si λ supérieur à 3, l'éolienne est dite rapide.

D'où :

$$\lambda = \frac{U}{V} = \frac{R\omega}{V} \quad (\text{I.1})$$

- λ : Vitesse spécifique (sans unité)
- U : Vitesse de l'extrémité des pales
- V : Vitesse du vent en (m/s)
- R : longueur des pales ou rayon de la turbine en (m)
- $\omega = 2.\pi.f$: la vitesse angulaire de rotor en (rad /s)

I.10. Couple mécanique produit par l'éolienne

$$P = C. \omega \quad (I.2)$$

- C : Couple mécanique produit par l'éolienne (en N.m)
- P : Puissance mécanique (en watt)
- ω : Vitesse angulaire (en rad/s)

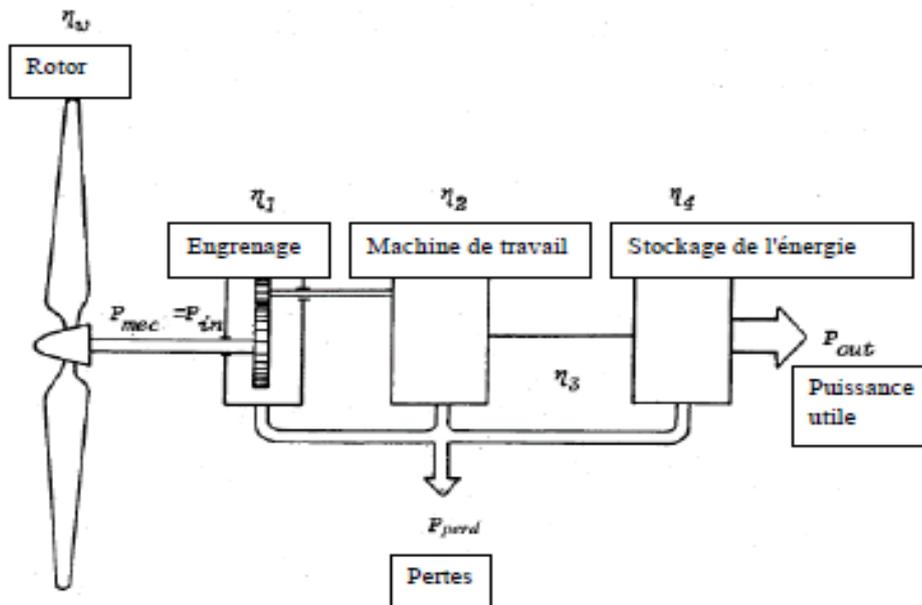
I.11. Rendement des composants d'une éolienne

L'énergie fournie par l'aérogénérateur étant toujours transformer, cette limite est donc affectée par tous les rendements propres aux différentes transformations [10].

- Hélice: $0.20 < \eta < 0.85$
- Le multiplicateur ou le réducteur: $0.7 < \eta < 0.98$
- L'alternateur ou la génératrice continue: $0.20 < \eta < 0.85$
- Le transformateur: $0.85 < \eta < 0.98$
- Le redresseur: $0.9 < \eta < 0.98$
- Les batteries: $0.7 < \eta < 0.8$
- Les pertes de ligne: $0.9 < \eta < 0.99$

Les rendements de chaque élément varient avec le régime de fonctionnement lié à la vitesse de rotation de l'hélice, ce qui est en dehors du régime nominal diminue encore le rendement global du dispositif, actuellement on y presque à la limite de Betz.

❖ **Calcul du rendement d'une éolienne**



Rendement Aérodynamique

$$\eta_{fa} = \frac{\text{Puissance sur l'axe}}{\text{Puissance Aérodynamique}}$$

Rendement mécanique

$$\eta_m = \frac{\text{Puissance mécanique}}{\text{Puissance sur l'axe}}$$

Rendement électrique

$$\eta_{ae} = \frac{\text{Puissance électrique}}{\text{Puissance mécanique}}$$

Rendement global

$$\eta_{fg} = \frac{\text{Puissance électrique}}{\text{Puissance du vent } \left(\frac{1}{2} \rho A v^3\right)}$$

Références bibliographiques

- [1] S. Lazaar, mémoire de Magister « Contribution à l'étude d'une station éolienne pour la production de l'électricité. Application aux sites de Tlemcen, Djelfa et Ghardaïa » Université Abou Bekr Belkaïd de Tlemcen, Unité de Recherche Matériaux et Energies Renouvelable URMER Tlemcen.2009.
- [2] B. Multon, O. Gergaud, H. Ben ahmed, «Etat de l'art dans les aérogénérateurs électriques », Extrait du rapport de synthèse ECRIN « L'Electronique de Puissance Vecteur d'Optimisation Pour les Energies Renouvelables », paru mai en 2002.
- [3] P. Leconte, M. Rapin et E. Szechenyi, Techniques de l'Ingénieur, traité Génie mécanique, Réf : BM 4 640.
- [4] M. Ben medjahed, « Gisement éolien de la région côtière de Béni Saf Et son impact sur l'environnement », mémoire de Magister, Université Abou Bekr Belkaïd Tlemcen, Unité de Recherche Matériaux et Energies Renouvelable URMER Tlemcen. 2008.
- [5] A. Mirecki. Thèse Doctorat (Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance) de l'institut national polytechnique de Toulouse (2005).
- [6] <http://www.windpower.org/fr/core.htrn>.
- [7] World Energy Council. <http://www.worldenergy.org>
- [8] T. Philippe, Th. Claude, projet technologique (étude d'une éolienne) université de Québec. (2007). TCH-090-095
- [9] Kerikeb Mohamed, Thème : Modélisation, Simulation et Commande d'une Eolienne Contrarotative. Mémoire de MAGISTER U. Skikda, *Année universitaire 2011/2012*
- [10] Sadi Oufela Aissa, intitulé : Evaluation de la puissance aérodynamique d'une éolienne a axe Horizontal, Mémoire de master université de T i z i O u o u

Chapitre 2

DESCRIPTION AERODYNAMIQUE D'UNE PALE EOLIENNE

II.1.	Géométrie d'une pale d'éolienne	17
II.1.1.	Définition des angles.....	17
II.1.2.	Résistance de l'air	17
II.1.2.1	Forme du corps	18
II.1.2.2.	Types de profils	18
II. 2.	Caractéristique aérodynamique d'une pale d'éolienne.....	19
II.2.1.	Action de l'air sur l'aile en mouvement.....	19
II.2.2.	Variation de C_x et C_z en fonction de l'angle d'incidence	21
II.3.	Etude de polaire d'Eiffel	22
II.4.	Détermination du profile de série « NACA » d'une pale	23
II.4.1.	Série NACA 04 chiffres.....	23
II.5.	Profils de NREL.....	24

II.1. Géométrie d'une pale d'éolienne

L'élément le plus important dans une machine éolienne rapide ou lente est la pale, l'étude de la pale amène à l'étude des profils qui correspond à une section transversale de la pale, tout d'abord on commence par donner quelque définition concernant un profil sur le schéma suivant [1]:

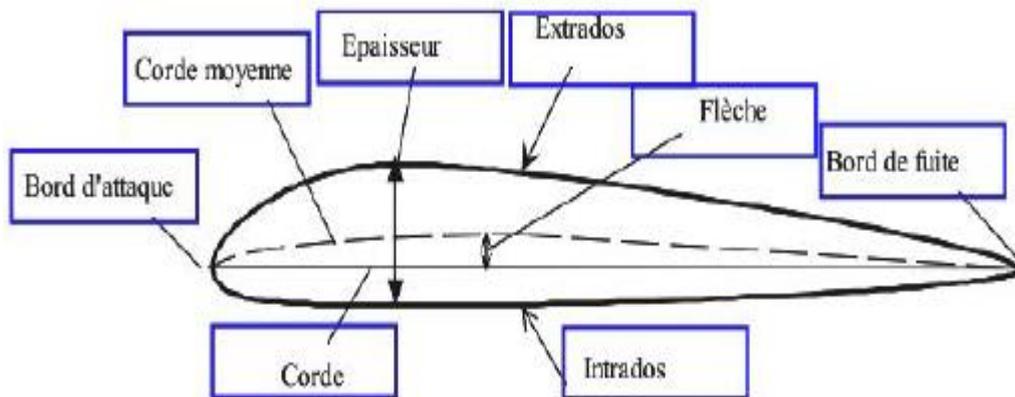


Figure II.1 : Profil aérodynamique d'une pale.

II.1.1. Définition des angles

\vec{U} : vitesse de rotation des pales :

$$U = \omega \cdot R \quad (\text{II.1})$$

\vec{V} : vitesse du vent

\vec{W} : vitesse relative.

$$\vec{W} = \vec{V} - \vec{U} \quad (\text{II.2})$$

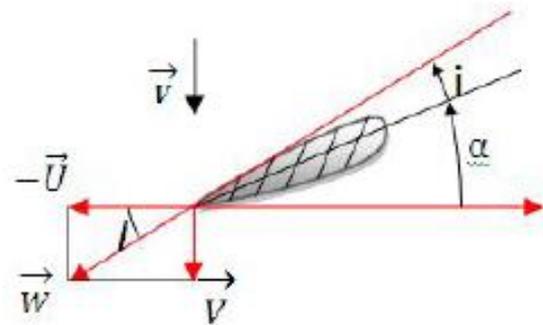


Figure II.2: Champ de vitesse du vent.

- Angle d'incidence (i) : l'angle formé par la corde et la vitesse relative W .
- Angle de calage (α) : l'angle formé par la corde et le plan de rotation des pales.
- Angle d'inclinaison (I) : l'angle formé par la vitesse relative W et le plan de rotation des pales.

II.1.2. Résistance de l'air :

Chaque corps en mouvement dans l'air est soumis de la part de celui-ci à une résistance qui tend à s'opposer à ce mouvement. Cette résistance a son origine dans les propriétés de l'air, mais dépend aussi des caractéristiques du corps concerné (surface, forme...).

II.1.2.1 Forme du corps

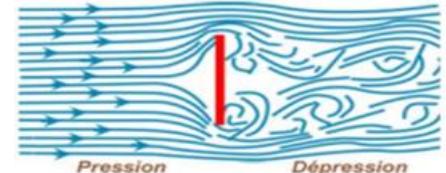
En installant un appareil (dynamomètre) relié à la plaque, on peut mesurer la force de pression exercée par l'air et quels sont les facteurs qui vont la faire.

Écoulement de l'air sur un disque plat de faible épaisseur disposé parallèlement aux filets d'air est le siège d'une résistance minimale due simplement au frottement de l'air sur les deux parois de la plaque.



Résistance quasi nulle

En mettant un disque plat perpendiculaire au flux d'air d'une soufflerie, nous constatons que l'écoulement de l'air peine à contourner l'obstacle et qu'il se forme une surpression à l'avant et une dépression à l'arrière avec effet tourbillonnaire



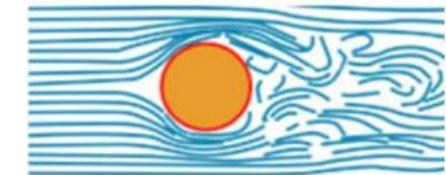
Résistance 100 %

En ajoutant une demi-sphère à l'avant du disque nous constatons que l'air contourne mieux l'objet, la surpression diminue mais il subsiste toujours une dépression et une zone tourbillonnaire à l'arrière.



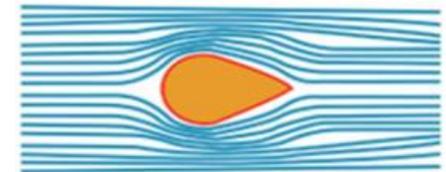
Résistance 75 %

Si on complète cette demi-sphère pour former une sphère complète, l'écoulement est amélioré, le zone tourbillonnaire arrière est réduite, mais pas complètement résorbée



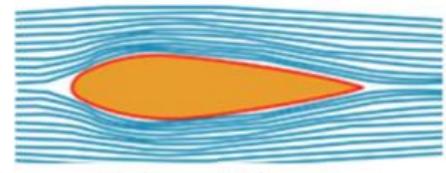
Résistance 50 %

En étirant la partie arrière de la sphère pour obtenir sensiblement la forme d'un œuf, on constate que les filets d'air se rejoignent à l'arrière sans créer de tourbillons. On obtient ainsi un corps fuselé



Résistance 15 %

Un corps fuselé "pointu" à l'arrière (bord de fuite), crée une circulation. Théorie de la circulation ou de Kutta & Jukowski



Résistance 5 %

II. 1.3. Types de profils

Les profils de pales sont classés selon la forme respective de l'intrados et de l'extrados:

Le profil convexe porte bien même à faible incidence mais il est légèrement instable. Il est surtout utilisé en aviation générale.

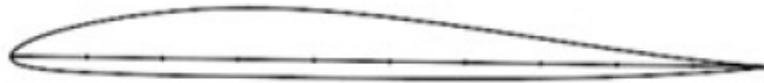


Figure II.3 : Profil convexe.

Le profil biconvexe dissymétrique porte bien également, même à incidence nulle et est très stable. Il est très utilisé dans l'aviation de loisir.



Figure II.4: Profil biconvexe dissymétrique.

Le profile cambré ou creux est très porteur mais il est aussi instable, lorsque l'incidence augmente, il cherche à cabrer.



Figure II.5: Profil cambré au creux.

II. 2. Caractéristique aérodynamique d'une pale d'éolienne :

II. 2.1. Action de l'air sur l'aile en mouvement :

On considère une pale en mouvement par rapport à l'air. L'expérience montre que dans le cas où la pale est disposée comme indiquée sur la figure II.6 par rapport au vecteur \vec{V} , il y a une surpression sur l'intrados et une dépression à l'extrados [1,2].

Pour représenter l'action de l'air en chaque point du profile ; on porte habituellement sur des vecteurs perpendiculaires au profil et de module proportionnelle à la pression localement comme illustré sur la figure suivante :

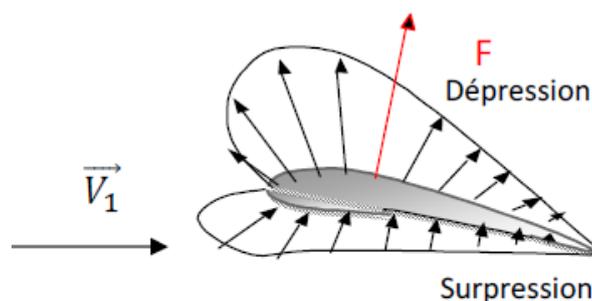


Figure II.6: Pressions générées par le mouvement du vent autour d'une section de la pale.

$$C_p = \frac{P - P_0}{\rho_0 V_0^2} \quad (\text{II.3})$$

- C_p : coefficient de pression
- p : désignant la pression statique à la paroi au pied de la perpendiculaire.
- P_0 , ρ_0 et V_0 : Les conditions à l'infini.

L'action de l'air sur le corps se traduit par une force résultante F généralement oblique par rapport à la direction de la vitesse relative W . Cette force s'appelle action aérodynamique totale ou plus simplement résistance de l'air [2].

Elle a pour expression:

$$F^* = \frac{1}{2} \rho C_T W^2 S \quad (\text{II.4})$$

- ρ : Etant la masse spécifique de l'air, C_T un coefficient sans dimension appelé coefficient aérodynamique total,
- S : La surface caractéristique du corps, égale au produit de la longueur de la corde par la longueur.
- W : La vitesse relative qui est la vitesse de déplacement du vent observée par la pale.

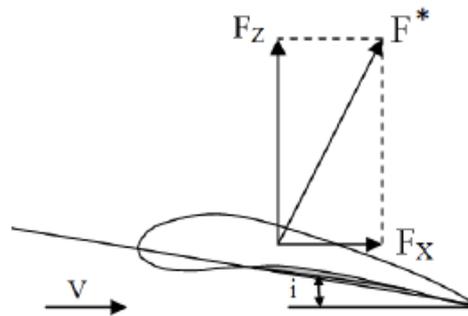


Figure II.7: Les composantes de la force aérodynamique.

- F^* : force aérodynamique totale
- F_z : force de portance
- F_x : force de traînée.

➤ **La force de portance** : est une force perpendiculaire au déplacement du fluide. Elle est créée par une surpression au niveau de l'intrados et par l'aspiration dans la zone de dépression formée sur le dessus du profil destinée à cet effet, elle est définie par [2]:

$$F_z = \frac{1}{2} \rho C_z W^2 S \quad (\text{II.5})$$

➤ **La force de traînée** : est la force de résistance qu'exerce un profil lorsque le fluide ou l'objet est en mouvement l'un par rapport à l'autre, cette force est parallèle à la trajectoire du fluide, elle est dirigée dans le sens du mouvement du fluide et elle s'oppose à l'avancement de l'objet, elle est définie par [2]:

$$F_x = \frac{1}{2} \rho C_x W^2 S \quad (II.6)$$

Les coefficients de portance C_z et de traînée C_x sont déterminés expérimentalement en soufflerie.

D'après le théorème de Pythagore on a :

$$F^*^2 = F_z^2 + F_x^2 \quad (II.7)$$

On définit aussi le moment aérodynamique résultant par [8]:

$$M = F^* \cdot l = \frac{1}{2} \rho C_m W^2 S \quad (II.8)$$

- M : moment de la résultante aérodynamique par rapport au bord d'attaque.
- l : Largeur du profil.

La position (X) du centre de pression par rapport au bord d'attaque est définie par [2]:

$$C_e = X/l = C_m/C_z \quad (II.9)$$

II.2.2. Variation de C_x et C_z en fonction de l'angle d'incidence

Les valeurs des coefficients adimensionnels C_x et C_z dépendent de l'angle d'incidence i et sont déterminés expérimentalement en soufflerie.

La figure II.8 relative à un profil d'aile d'avion montre que C_x passe par un minimum et la courbe C_z admet un maximum et un minimum. Ce maximum et ce minimum de C_z correspondent en fait tous les deux à des maximums de portance.

- Le minimum de la courbe correspond à la portance maximale pour des incidences négatives (vol sur le dos).
- Le maximum se rapporte à la portance maximale pour les incidences positives (Vol normal) [1,3].

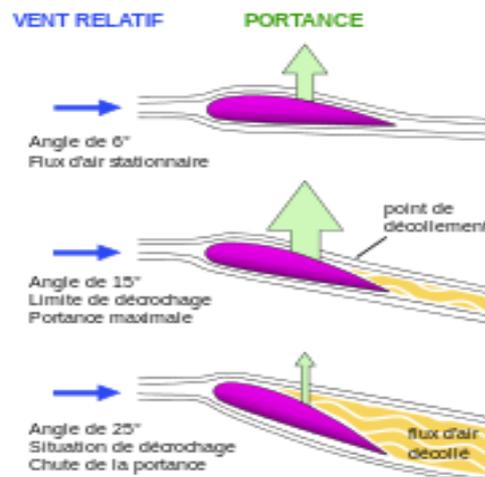
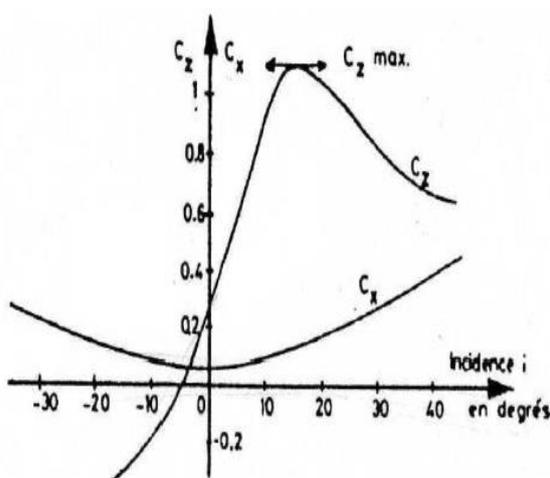


Figure II.8 : Variation des coefficients aérodynamique

II.3. Etude de polaire d'Eiffel

Afin de pouvoir déterminer aisément les caractéristiques d'un profil et choisir sans surprise le plus adapté entre plusieurs modèles, ou afin de déterminer les dimensions que l'on donnera à une aile une fois le profil choisi, on utilise une courbe appelée polaire du profil.

En pratique on en utilise deux types :

- La polaire de type *Eiffel* (que l'on doit à *Gustave Eiffel*) : elle représente C_z en fonction de C_x , en pratique, on trace plutôt $100 * C_z$ en fonction de $100 * C_x$ en raison des faibles valeurs des coefficients aérodynamiques.
- La polaire des vitesses : elle représente V_z (vitesse verticale) en fonction de V_x (vitesse horizontale) dans le cas d'un vol plané. Elle est surtout utile pour la conception des ailes de planeurs ou parapentes.

L'allure de ce type de polaire est celle donnée ci-dessous. Elle évolue selon la forme du profil mais conserve toujours une allure globale similaire. Grâce à elle on détermine quelques caractéristiques essentielles du profil.

Elle s'obtient à l'aide de mesures effectuées en soufflerie : on place le profil dans une veine d'air de vitesse d'écoulement donné et pour différentes valeurs de l'incidence on mesure la portance et la traînée du profil, on en déduit alors les valeurs de C_x et C_z . En général on indique sur les points de la polaire l'incidence à laquelle elles correspondent [1, 3].

- Les points caractéristiques de la polaire sont les suivants :

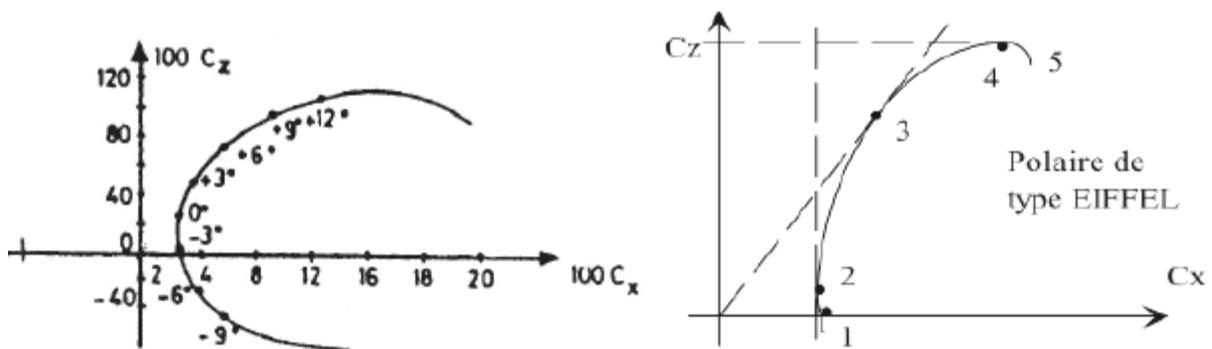


Figure II.9: Polaire d'Eiffel d'un profil

- 1: le point de portance nulle (à faible incidence)
- 2: le point de C_x mini (traînée minimale du profil; incidence faible)
- 3: le point de finesse f max (incidence assez faible)

$$f = \frac{C_z}{C_x} = \frac{F_z}{F_x} \quad (\text{II.10})$$

- 4: le point de C_z max (portance maximale; incidence proche du décrochage; traînée importante)
- 5: zone de décrochage du profile; C_z chute.

Le point de finesse max est important, il représente l'incidence de vol permettant d'effectuer la distance la plus longue possible en vol plané sans vent. La finesse peut se définir de plusieurs façons :

C'est à la fois le rapport :

- du coefficient de portance C_z sur le coefficient de traînée C_x
- de la portance F_z sur la traînée F_x
- de la distance parcourue D sur l'altitude perdue.
- le point de repère sur la polaire en prenant la tangente à la courbe passant par l'origine du repère [1, 3].

II.4. Détermination du profile de série « NACA » d'une pale

Les sections de séries « NACA » 4 ou 5 chiffres sont obtenues par des équations analytiques de la ligne centrale du profile (*camber*) et de l'épaisseur de la section le long de la largeur.

A partir de 1930; NACA a trouvé qu'il y'a similitude entre les profils, en effet, deux paramètres importants gouvernent leurs formes ; la tangente de la ligne médiane (*camber*) et la distribution de l'épaisseur en haut et en bas de cette ligne.

Un ensemble d'équations, sont proposées incluant ces deux paramètres pour générer toute la famille en relation avec ces profils.

D'autre modifiant sont apportés mais il reste que ces deux valeurs géométrique restent essentielles en cas de la détermination de ces profils [4].

II. 4.1.Série NACA 04 chiffres

- Le premier chiffre: spécifie le camber max en pourcentage de la largeur
- Le seconde chiffre: indique la position du camber max en dixième (x10) de la Largeur « l ».
- Les deux derniers chiffres: donnent l'épaisseur max de la pale en pourcentage de la corde [4].

Exemple :

Soit le profil à quatre chiffres NACA 2415, on peut identifier à partir des chiffres donnés :

- l : largeur de la corde.
- Épaisseur max (t_i): 15% de la largeur (24**15**)
- Cambrure max (cm): 2% (2**4**15)
- Position du camber max (cm), (pi): 40% de l ou $0.4 l$ (24**1**5).

II.5.Profils de NREL

Ces profils sont développés à l'institut américain des énergies renouvelables (NREL). Ils sont destinés spécialement pour la conception des pales des éoliennes à axe horizontal (Fig.II.10), et prennent la désignation « S » et sont adoptés pour chaque catégorie de contrôle comme présenté dans le tableau suivant (Tab.II.1), [5, 6] :

Tableau. II.1. Les types des profils de NREL [5].

Diamètre	Type de contrôle	Épaisseur de profil	Cops de pale	Bout de pale	Pied de pale
3-10 m	Vitesse variable Calage variable	épais	-	S822	S823
10-20 m	Vitesse variable Calage variable	mince	S802	S802/S803	S804
10-20 m	Décrochage contrôlé	Mince	S805/S805A	S806/S806A	S807/S808
10- 20 m	Décrochage contrôlé	Épais	S819	S820	S821
20-30 m	Décrochage contrôlé	Épais	S809	S810	S811
20-30 m	Décrochage contrôlé	Épais	S812	S813	S814
20-40 m	Vitesse variable Calage variable	-	S825	S826	S814/S815
30-50 m	Décrochage contrôlé	Épais	S816	S817	S818
40-50 m	Décrochage contrôlé	Épais	S827	S828	S818
40-50 m	Vitesse variable Calage variable	Épais	S830	S831/S832	S818

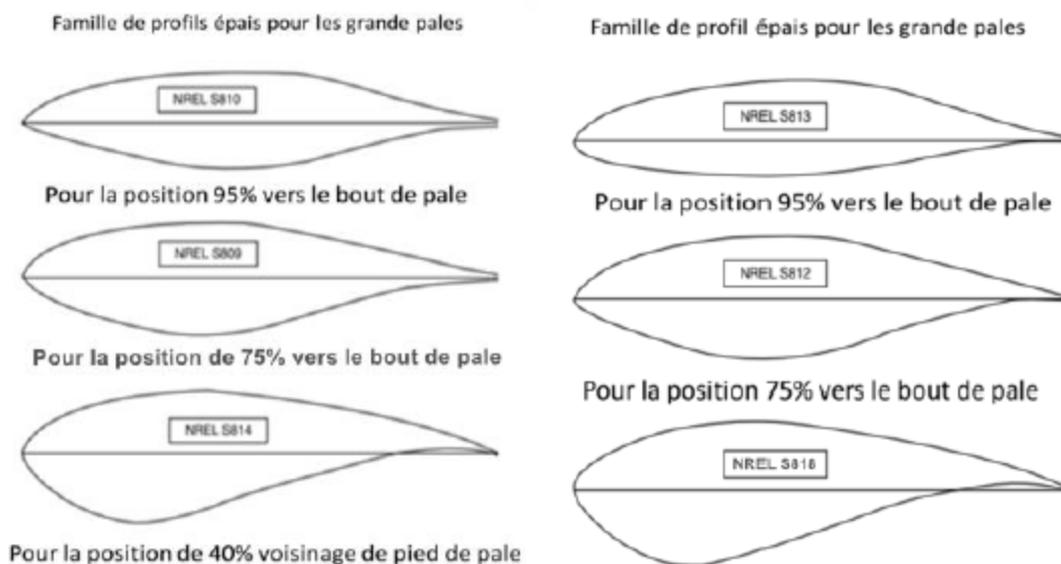
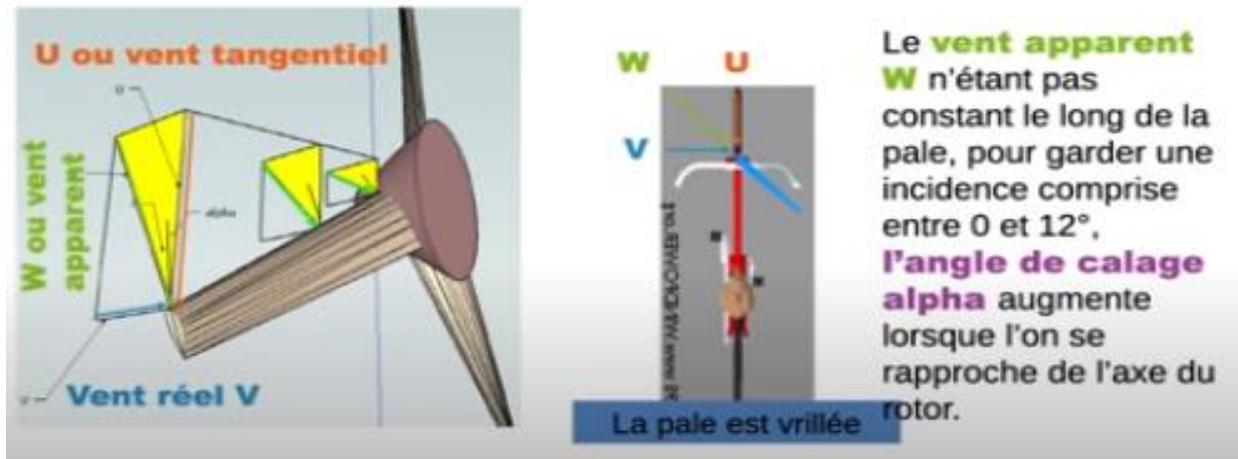


Figure II.9: Les profils de pale Type NREL [5].

AÉRODYNAMIQUE DE LA PALE



Références bibliographiques

- [1] T. Goyne, Y. Plays, P. Lepourry, and J. Besse, Initiation à l'aéronautique, 6^{ème} ed.:Cepadues, Collection Fact, 2010 .
- [2] C. N. EBEY, "Etude d'une éolienne lente pour l'entrainement d'une pompe à piston simple effet ", Université Kinshasa, 2005.
- [3] G. Klopstein, Mécanique du Vol Tome II: Cepadues, Collection Sfact, 2008.
- [4] L. Bouchaour, "Etude d'un écoulement incompressible autour d'un profil tournant," Univ.Mentouri Constantine, 2011.
- [5] T. Burton, N. Jenkins, D. Sharpe, and E.A Bossanyi, Wind Energy Handbook, 2ed, Wiley, 2011.
- [6] J. F. Manwell, J. G. McGowan, and A. L. Rogers, Wind energy explained, 2ed Wiley, 2009.

Chapitre

AERODYNAMIQUE DES EOLIENNES A AXE HORIZONTAL

III.1.	Théorie simplifiée de Betz.....	27
III.2.	Définition de l'action du moteur éolien sur l'air	28
III.2.2.	Définition de la vitesse au niveau du moteur éolien	29
III.2.3.	La puissance maximale absorbée par le moteur éolien.....	29
III.3.	Théories tourbillonnaires.....	31
III.3.1.	Théorie de Froude-Rankine (<i>perte axiale</i>).....	31
III.3.2.	Théorie de Glauert (<i>perte axiale -radiale</i>).....	34
III.3.2.1.	Détermination de la poussé axiale et du moment moteur.....	36
III.3.2.2.	Détermination de la puissance utile et du coefficient de puissance	38
III.4.	Théorie de l'élément de pale	39
III.5	Corrections de Prandtl et de Glauert.....	41

III.1. Théorie simplifiée de Betz

- En 1926, le scientifique Betz a établi le premier modèle général d'un aérogénérateur [4, 5].
- Ce modèle est utilisé pour déterminer la puissance d'un rotor d'une turbine idéale, et cela par le calcul de la poussée du vent sur le rotor et de l'effet du rotor sur le champ du vent local(Fig.III.1).
- Le modèle d'une éolienne à axe horizontal est connu par «le modèle de disque» dans lequel le rotor est supposé comme un disque homogène qui extrait l'énergie du vent. La théorie du disque est basée sur une théorie dynamique linéaire développée depuis plus de 100 ans pour prédire la performance d'hélice de navire [2].

La théorie de l'action sur le disque idéal est basée sur les hypothèses suivantes :

- Le flux du fluide est régulier, Homogène, incompressible.
- Pas de traînée de frottement.
- L'augmentation de la pression ou de la poussée par unité de surface est constante sur tout le disque.
- La composante de rotation de la vitesse dans le sillage est nulle.
- Il y'a une continuité de la vitesse à travers le disque.
- Un nombre infini de lames.

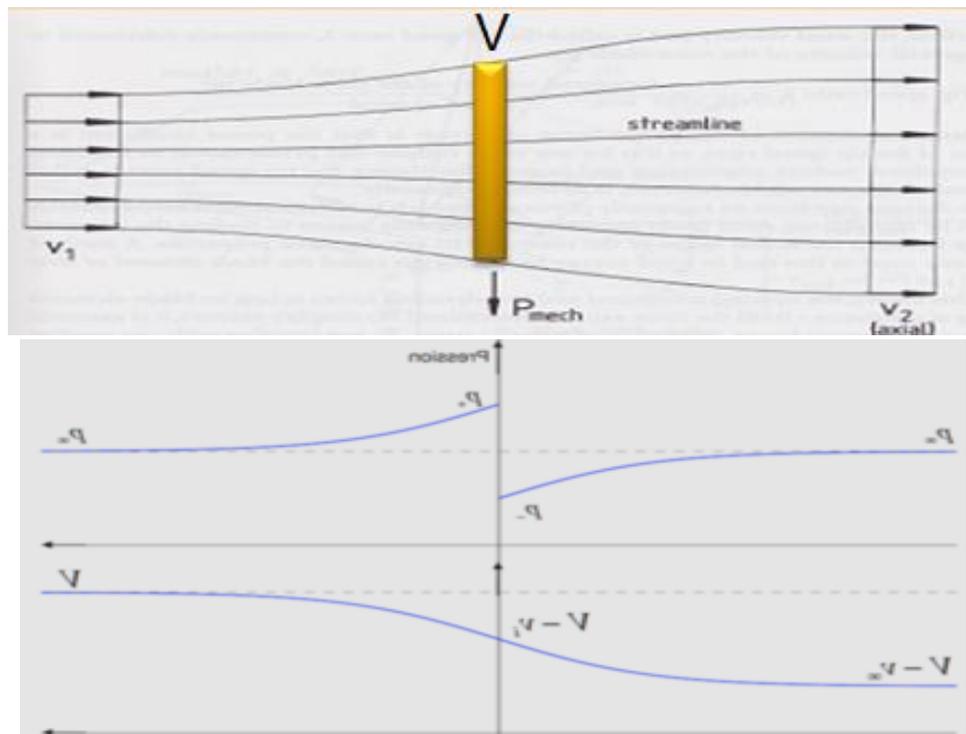


Figure III.1: Modèle disque avec une veine de fluide le traversant.

- V_1 : La vitesse en amont du disque.
- V_2 : La vitesse en aval du disque.
- V : La vitesse de l'air à la traversée de l'aéromoteur.

- S_1 : section en amont.
- S_2 : sections en aval.

La production d'énergie ne peut se faire qu'au préjudice de l'énergie cinétique contenu dans le vent. Pour déterminer les variations à travers le disque on applique les lois fondamentales de la mécanique suivantes [1, 4] :

- Loi de conservation de la masse.
- Loi de variation de la quantité de mouvement.
- Loi de variation d'énergie cinétique.

Pour un écoulement d'air incompressible et permanent, la loi de conservation de masse s'écrit :

$$S_1 V_1 = SV = S_2 V_2 = \dot{m} \quad (\text{III.1})$$

Ou \dot{m} est le débit.

III.2. Définition de l'action du moteur éolien sur l'air

Le passage de l'air à travers le disque d'aérogénérateur crée une force de pression sur le disque, d'après le théorème d'Euler la force F , exercée par le moteur éolien sur l'air en mouvement, est dirigée dans le sens opposé du vent, et égale en valeur absolue à la variation de la quantité de mouvement (Loi de variation de la quantité de mouvement Q_m) [4, 5] :

$$F = \Delta Q_m / \Delta t \quad (\text{III.2})$$

D'autre part :

$$\Delta Q_m = \dot{m} V_1 - \dot{m} V_2 \quad (\text{III.3})$$

Donc la force de poussée axiale devient :

$$F = \Delta Q_m = \dot{m} V_1 - \dot{m} V_2 \quad (\text{III.4})$$

$$F = \dot{m} (V_1 - V_2) \quad (\text{III.5})$$

$$\dot{m} = \rho SV$$

$$F = \rho SV(V_1 - V_2) \quad (\text{III.6})$$

Évaluons la puissance absorbée par l'éolienne, c'est-à-dire dû à la force

$$P = FV = \rho SV(V_1 - V_2)V \quad (\text{III.7})$$

$$P = FV = \rho SV^2(V_1 - V_2) \quad (\text{III.8})$$

III.2.2. Définition de la vitesse au niveau du moteur éolien

D'après la loi de conservation de l'énergie, la variation de l'énergie cinétique de la masse autour du système est [10]:

$$Ec_1 = Ec + Ec_2 \quad (III.9)$$

- Ec_1 : Énergie cinétique à l'amont.
- Ec : Puissance du moteur éolien ou l'énergie cinétique transformée.
- Ec_2 : Énergie cinétique à l'aval.

Remarque : la puissance $P=Ec/t$ comme $Ec= \frac{1}{2} mV_1^2$ donc $P= \frac{1}{2} (m/t)V_1^2 = \frac{1}{2} \dot{m}V_1^2$

Ce qui donne :

$$P = Ec_1 - Ec_2 = \frac{1}{2} \dot{m}V_1^2 - \frac{1}{2} \dot{m}V_2^2 \quad (III.10)$$

$$\dot{m} = \rho S V \quad (III.11)$$

$$P = \frac{1}{2} \rho S V (V_1^2 - V_2^2) \quad (III.12)$$

La puissance incidente du vent non perturbé : Ec_1 : Énergie cinétique à l'amont.

$$P_0 = \frac{1}{2} \rho S (V_1^3)$$

Par égalisation de (III.7) et (III.12) on obtient :

$$\rho S V^2 (V_1 - V_2) = \frac{1}{2} \rho S V (V_1^2 - V_2^2) \quad (III.13)$$

$$\rho S V^2 (V_1 - V_2) = \frac{1}{2} \rho S V (V_1 + V_2)(V_1 - V_2) \quad (III.14)$$

$$V = \frac{V_1 + V_2}{2} \quad (III.15)$$

Remplaçant l'équation trouvée dans les équations (III.6) et (III.7) :

$$F = \frac{1}{2} \rho S (V_1^2 - V_2^2) \quad (III.16)$$

$$P = \frac{1}{4} \rho S (V_1 + V_2)(V_1^2 - V_2^2) \quad (III.17)$$

III.2.3. La puissance maximale absorbée par le moteur éolien

Étudions la variation de la puissance absorbée par le moteur éolien (équation III.17), on suppose que la vitesse V_1 du vent en amont est constante, et on dérive par rapport à V_2 :

$$\frac{dP}{dV_2} = \frac{1}{4} \rho S [V_1^2 - 2V_1V_2 - 3V_2^2] \quad (III.18)$$

Le maximum de la fonction P correspond à la condition suivante :

$$\frac{dP}{dV_2} = 0 \quad \Rightarrow \quad V_1^2 - 2V_1V_2 - 3V_2^2 = 0 \quad (III.19)$$

Équation de 2^{ème} degrés admettant deux solutions qui sont :

$V_2 = -V_1$ qui n'a aucun sens physique, donc la solution acceptable est :

$V_2 = V_1/3$ Rapportant cette valeur dans l'équation (III.17), on obtient :

$$P_{max} = \frac{1}{4} \rho S (V_1 + \frac{V_1}{3}) (V^2 - (\frac{V_1}{3})^2) \quad (III.20)$$

Ou
$$P = \frac{8}{27} \rho S V_1^3 \quad (III.21)$$

$$V_{max} = \frac{V_1 + \frac{V_1}{3}}{2} = \frac{4V_1}{3 \cdot 2} = \frac{2V_1}{3} \quad (III.22)$$

De l'équation (III.1) on a
$$S_1 V_1 = S V = S_2 V_2 \quad (III.23)$$

$$S V_{max} = S \frac{2V_1}{3} = S_1 V_1 \rightarrow S_1 = \frac{2}{3} S \text{ et } S = \frac{3}{2} S_1 \quad (III.24)$$

Injectant l'équation (III.24) dans l'équation (III.21), la puissance maximale devient :

$$P_{max} = \frac{16}{27} (\frac{1}{2} \rho \frac{3}{2} S_1 V_1^3) \quad (III.25)$$

$$P_{max} = \frac{8}{9} (\frac{1}{2} \rho S_1 V_1^3) \quad (III.26)$$

Sous cette forme, la formule de *Betz* montre que l'énergie maximale susceptible d'être recueillie par un moteur éolien ne peut dépasser en aucun cas les 8/9 de l'énergie cinétique de la masse d'air qui le traverse.

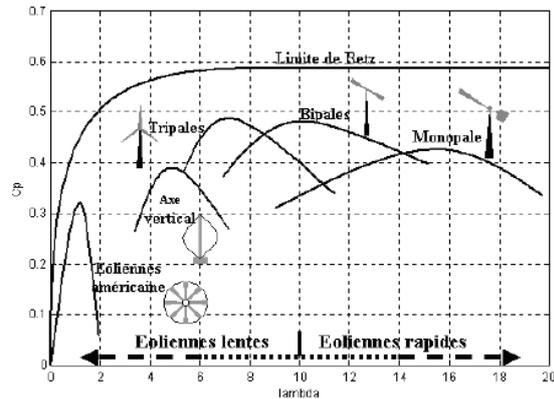
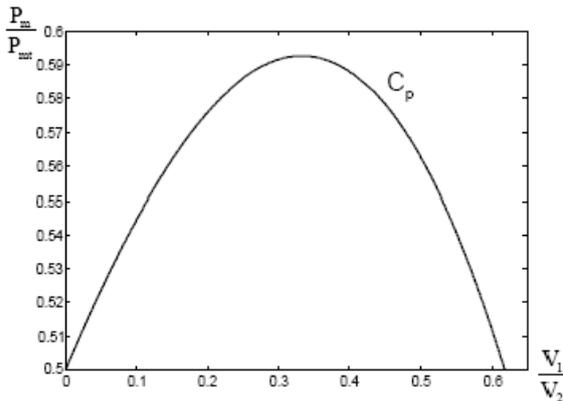


Figure. III.2: Coefficient de puissance. Figure.III.3 : Coefficient de puissance pour différents types d'éoliennes.

En réalité, la puissance des aéromoteurs les plus perfectionnés ne dépasse pas, en général, 60 à 70% de la puissance maximale calculée par la formule de *Betz* (III.17) [10].

La variation de la pression à travers le disque est donnée par :

$$\Delta P = \frac{F}{S} = \frac{\frac{1}{2} \rho V (V_1^2 - V_2^2)}{S} \quad (III.27)$$

$$\Delta P = \frac{F}{S} = \frac{\rho V (V_1^2 - V_2^2)}{2S} \quad (III.28)$$

III.3. Théories tourbillonnaires

III.3.1. Théorie de Froude-Rankine (*perte axiale*)

La théorie de *Froude* est une variante de la théorie générale de *Betz* qui considère la présence de pertes axiales. Elle utilise les équations de variation de la quantité de mouvement pour évaluer les performances d'une hélice, cette dernière est considérée comme étant un disque uniformément chargé et ayant un nombre infini de pales. Les vitesses axiales induites peuvent ainsi être évaluées [3,4], les hypothèses considérées sont :

- La rotation de l'écoulement est négligeable.
- Le fluide est incompressible.
- L'écoulement à l'extérieur de la veine traversant le disque est non perturbé.
- La pression à l'infini en amont et en aval est égale à la pression statique de l'écoulement
- L'air passe à travers le rotor sans frottement.

Le disque agit comme un frein opposant une force F au courant de fluide. Cette force peut être considérée comme le résultat de la différence de pression entre l'amont et l'aval du disque.

L'équation de continuité nous dit que pour conserver un même débit, la vitesse doit diminuer lorsque la section augmente, par conséquent la veine de fluide traversant le disque, voit donc sa section augmentée par le freinage du fluide.

Observons notre hélice dans un volume de contrôle plus grand que la veine traversant l'hélice, nous constatons que l'élargissement de la veine ne peut se faire que si un certain volume de fluide est évacué du volume de contrôle [3,4].

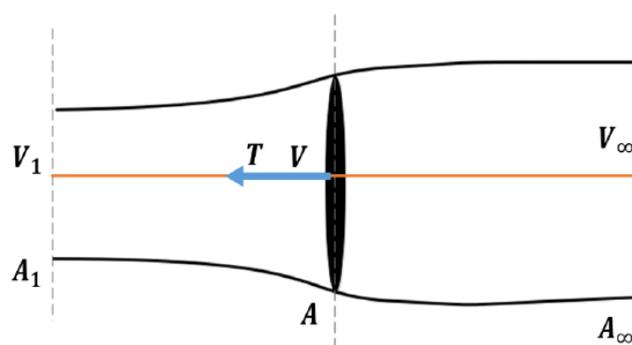


Figure III.4 : Ecoulement axial de l'air.

V_1 est la vitesse en amont du disque, V_∞ est la vitesse en aval du disque, V est la vitesse de l'air à la traversée de l'aéromoteur, A_1 est section en amont, A est la section au niveau de disque, et A_∞ est sections en aval.

$$A_1 V_1 = A V = A_\infty V_\infty = Q$$

Où Q est le débit.

Aussi en appliquant le théorème de la variation de la quantité de mouvement, la force axiale

du vent sur le rotor est donnée par l'expression suivante :

$$F = \dot{m}(V_1 - V_2) = \rho S V (V_1 - V_\infty) \quad (\text{III.28})$$

Appliquant l'équation de Bernoulli en amont du rotor [4].

$$P_0 + \frac{1}{2} \rho V_1^2 = P + \frac{1}{2} \rho V^2 \quad (\text{III.29})$$

Et en aval du rotor :

$$P_0 + \frac{1}{2} \rho V_\infty^2 = P' + \frac{1}{2} \rho V^2 \quad (\text{III.30})$$

En combinant (III.29) et (III.30), on obtient :

$$P - P' = \frac{1}{2} \rho (V_1^2 - V_\infty^2) \quad (\text{III.31})$$

Sachant que :

$$F = S (P - P') \quad (\text{III.32})$$

$$F = \frac{1}{2} \rho S (V_1^2 - V_\infty^2) \quad (\text{III.33})$$

Les deux équations (III.28) et (III.33) permettent d'écrire :

$$V = \frac{(V_1 - V_\infty)}{2} \quad (\text{III.34})$$

La vitesse de l'écoulement de l'air à travers le rotor est la même que celle trouvée par la théorie de Betz.

La puissance extraite du vent est :

$$P = FV = \frac{1}{2} \rho S V (V_1^2 - V_\infty^2) \quad (\text{III.35})$$

Le coefficient de puissance C_p est défini comme étant le rapport entre la puissance disponible du vent et la puissance extraite [4]:

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho S V_1^2} \quad (\text{III.36})$$

Alors, la vitesse du vent au niveau du disque du rotor est la moyenne de la vitesse du vent en amont et en aval [5].

Selon, la figure III.5, Au niveau du disque du rotor le changement brutal de la pression poussé les taux de particule d'air d'inverser axialement leur mouvement avec une vitesse induite axiale, alors, si l'on définit le facteur d'induction axial a , comme la diminution fractionnée de la vitesse du vent au plan du rotor, ce facteur est égal [1, 3] :

$$a = \frac{V_1 - V}{V_1} \quad (\text{III.37})$$

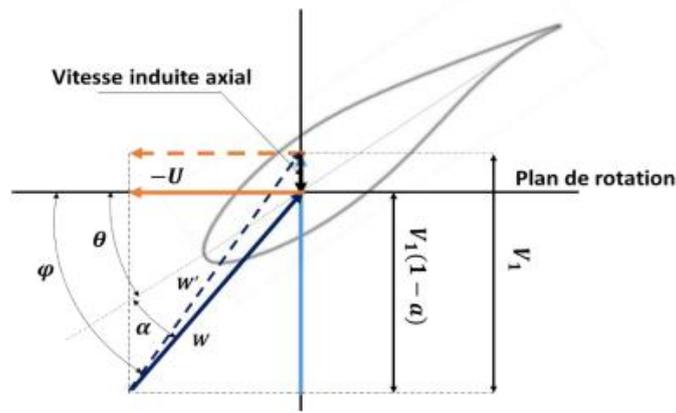


Figure III.5 : Champ de vitesses au niveau de disque (perte axiale).

Donc
$$V = (1 - a)V_1 \tag{III.38}$$

De plus on a :
$$V = \frac{V_1 - V_\infty}{2} \tag{III.39}$$

Ce qui donne :
$$V_\infty = (1 - 2a)V_1 \tag{III.40}$$

Et l'angle d'écoulement devient :

$$\text{Cotg}(\varphi) = \frac{U}{V} = \frac{U}{(1-a)V_1} \tag{III.41}$$

En substituant dans les formules de la force et de la puissance, elles deviennent :

$$F = \frac{1}{2} \rho S V_1^2 4a(1 - a) \tag{III.42}$$

$$P = \frac{1}{2} \rho S V_1^3 4a(1 - a)^2 \tag{III.43}$$

Et l'expression de C_p devient :

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho S V_1^3} \tag{III.44}$$

$$C_p = 4a(1 - a)^2 \tag{III.45}$$

La valeur maximale théorique du coefficient de puissance, connue sous le nom de limite de *Betz*, peut être obtenue en calculant la dérivée de C_p par rapport à a :

$$\frac{\partial C_p}{\partial a} = 4(1 - 3a^2) = 0 \tag{III.46}$$

Ce qui donne :

$$a = 1/3 \tag{III.47}$$

Et

$$C_p = \frac{16}{27} = 0.59259 \quad (\text{III.48})$$

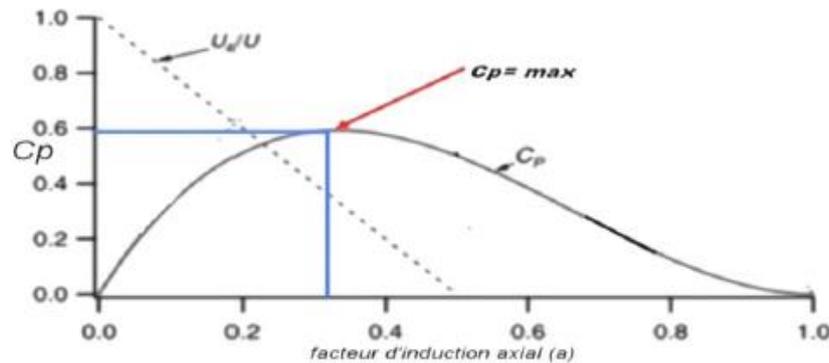


Figure III.6 : Influence du facteur d'induction axial sur le coefficient de puissance [4].

Le rendement maximal pour une éolienne idéale est approximativement 59,3 %. Dans la pratique, ce rendement n'est jamais atteint à cause des effets suivants [3,4] :

- L'écoulement de l'air a une composante rotative due à la rotation du rotor.
- La force de traînée n'est jamais nulle à cause des frottements.
- L'hélice contient un nombre fini de pales.

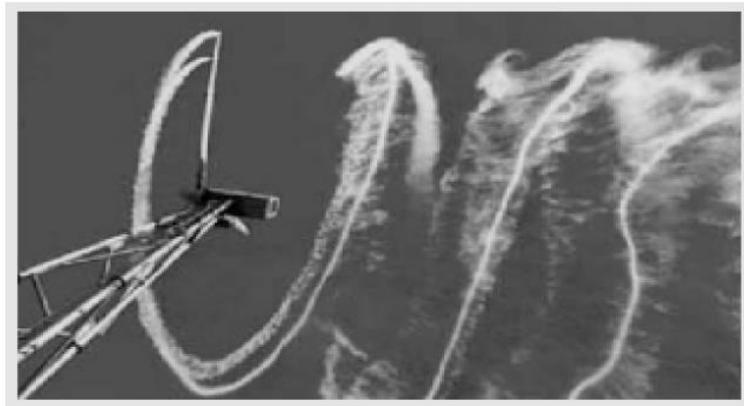


Figure III.7 : Effet rotatif de l'air

Ce modèle simple unidimensionnel ne décrit pas l'écoulement rotatif de l'air, cependant il permet de définir certains concepts fondamentaux dans le fonctionnement des éoliennes [4].

Finalement pour un meilleur rendement d'une éolienne le facteur d'induction axial doit être égal ou proche de la valeur 1/3.

III.3.2. Théorie de Glauert (*perte axiale -radiale*)

Le passage de l'air à travers une hélice tournante crée un système tourbillonnaire qui a une influence sur le rendement du moteur éolien, ce système est constitué par [10]:

- Des tourbillons attachés aux pales résultant de la rotation de l'aire autour de la pale sous l'effet d'une surpression à l'intrados et d'une dépression à l'extrados du profil de la pale.
- Des tourbillons détachés des pales formant deux tourbillons marginaux prenant naissance l'un près de l'axe de rotation de l'hélice et l'autre à l'extrémité de la pale, le premier enroulé par des spires autour de l'axe de l'éolienne et le second enveloppe l'hélice.

L'effet total du système tourbillonnaire se résume dans un champ de vitesse appelée vitesse induite et qui a une influence sur la vitesse relative déterminée par la théorie simplifiée Betz.

En 1935, Glauert modélise le problème tourbillonnaire par un modèle de système électrique équivalent (Fig.III.8), qui permet de calculer la vitesse induite d'une manière simple, par la détermination des champs magnétiques créés par des conducteurs et par l'application du théorème d'Ampère et Boit-Savart [3 ,5].

Glauert a noté que, au plan de disque du rotor, la vitesse angulaire de l'air par rapport à la pale augmente de Ω à $\Omega + \omega$, alors que la composante axiale de la vitesse reste constante et doublé derrière du rotor (Fig.III.9) [1, 4].

Glauert résume la variation de la vitesse du vent au sillage du rotor éolien dans le facteur d'induction tangentiel a' , qui peut s'écrire :

$$a' = \omega / 2\Omega \quad (III.49)$$

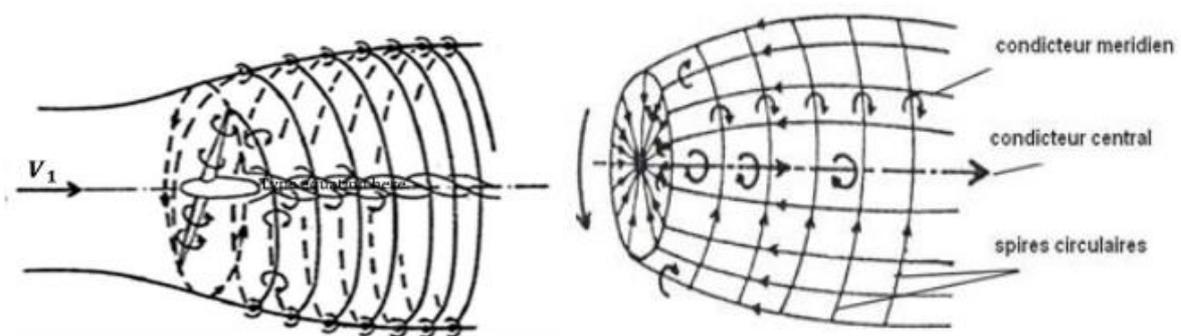


Figure III.8 : Modèle électromagnétique du phénomène de la turbulence [5]

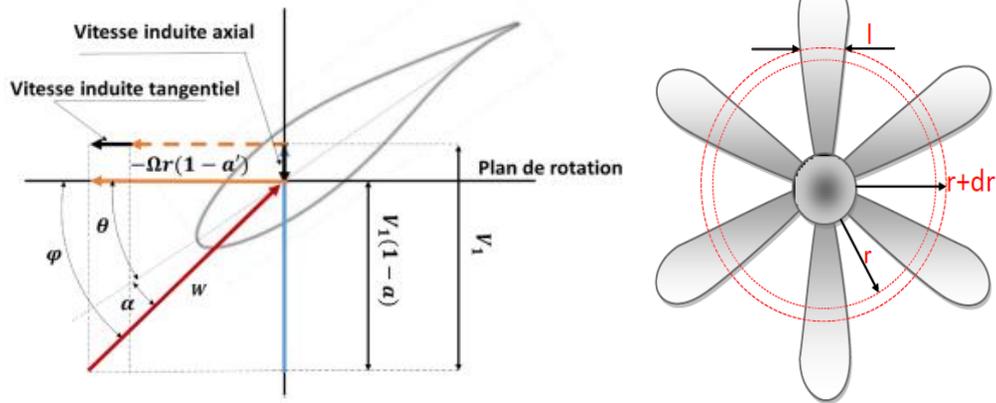


Figure III.9 : Champ des vitesses au niveau de disque (pertes axiales-radiales).

Où ω est la vitesse angulaire induite, et Ω la vitesse angulaire des pales, et la vitesse tangentielle de rotation de l'air devient :

$$U = \left(\Omega + \frac{1}{2} \omega \right) r = (\Omega + a' \Omega) \tag{III.50}$$

$$U = (1 + a') \Omega r \tag{III.51}$$

Et la vitesse relative devient :

$$W = \frac{V}{\sin \varphi} = \frac{(1-a)V_1}{\sin \varphi} = \frac{U}{\cos \varphi} = \frac{(1+a')\Omega r}{\cos \varphi} \tag{III.52}$$

Remarque : démonstration de la valeur de la vitesse angulaire

Pour pouvoir calculer la puissance et le couple (P et Q), il faut déterminer ω . Pour cela on introduit le facteur d'interférence tangentielle a' , défini comme suit :

$$\omega = a' \Omega \tag{21}$$

Puisque l'écoulement de l'air en amont, loin du rotor est purement axial, on a : $\omega_0 = 0$.

En appliquant la loi de conservation du moment cinétique entre la section 0 et la section 1, située juste avant le plan du rotor, on obtient :

$$\omega_0 r_0^2 = \omega_1 r_1^2 \tag{22}$$

Cela implique que : $\omega_1 = 0$.

On peut conclure que la vitesse angulaire de l'écoulement de l'air subit une discontinuité au niveau du plan du rotor, cela est dû au couple exercé sur le rotor.

La valeur de la vitesse angulaire de l'air au niveau du plan du rotor est la moyenne de celles situées juste avant et derrière le rotor [4] :

$$\omega = \frac{\omega_1 + \omega_2}{2} \tag{23}$$

Donc :

$$\omega_2 = 2 \Omega a' \tag{24}$$

III.3.2.1. Détermination de la poussé axiale et du moment moteur

L'analyse élémentaire par l'application de théorème d'Euler donne la nouvelle expression de la poussé axiale suivante :

$$dT = \frac{1}{2} \rho (V_1^2 - V_\infty^2) dA \quad (\text{III.53})$$

Ou la surface annulaire définie par :

$$dA = 2\pi r dr \quad (\text{III.54})$$

Alors par substitution de V_∞ et la surface dA , l'expression de poussé devient [1] :

$$dT = 4\pi r V_1^2 a(1-a) dr \quad (\text{III.55})$$

D'autre part le moment moteur est égal à la variation du moment cinétique L [1.4] :

$$Q = \frac{dL}{dt} \quad (\text{III.56})$$

Ou le moment cinétique L est égal :

$$L = I_n \omega \quad (\text{III.57})$$

Et le moment cinétique I_n est égal :

$$I_n = \dot{m} r^2 \quad (\text{III.58})$$

$$Q = \frac{dL}{dt} = \frac{d\dot{m}}{dt} \omega r^2$$

$$dQ = d\dot{m} \omega r^2$$

$$d\dot{m} = \rho 2\pi r V_\infty dr$$

Alors l'expression du moment élémentaire moteur devient :

$$dQ = 2\pi \rho r^3 V_\infty \omega dr \quad (\text{III.59})$$

On substitue ω et V_∞ dans l'expression du moment au sillage, on obtient :

$$dQ = 4a'(1-a)\rho\pi\Omega r^3 V_1 dr \quad (\text{III.60})$$

Cette équation donne le moment élémentaire agissant sur l'éolienne.

III.3.2.2. Détermination de la puissance utile et du coefficient de puissance

La puissance totale du rotor éolien est la somme de la contribution de chaque élément de pale, qui est donné par la formule suivante [4] :

$$dP = dQ\Omega \quad (\text{III.61})$$

Par la substitution de l'expression du moment élémentaire dans l'expression de puissance élémentaire devient :

$$dP = 4a'(1-a)\rho\pi\Omega^2r^3V_1dr \quad (\text{III.62})$$

On définit le terme du rapport de vitesses global par [1] :

$$\lambda = \frac{\Omega R}{V_1} \quad (\text{III.63})$$

En terme local, il est défini comme suite :

$$\lambda_r = \frac{\Omega r}{V_1} = \lambda \frac{r}{R} \quad (\text{III.64})$$

En introduisant le rapport de vitesses local dans l'expression de puissance élémentaire, on obtient :

$$dP = \frac{1}{2}\rho\pi R^3V_1^3\left[\frac{8}{\lambda^2}a'(1-a)\lambda_r^3\right]d\lambda_r \quad (\text{III.65})$$

Alors le coefficient de puissance élémentaire devient :

$$Cp = \frac{dP}{P_1} = \frac{\frac{1}{2}\rho\pi R^3V_1^3\left[\frac{8}{\lambda^2}a'(1-a)\lambda_r^3\right]d\lambda_r}{\frac{1}{2}\rho\pi R^3V_1^3} \quad (\text{III.66})$$

Où P_1 est la puissance initiale du vent, alors le coefficient de puissance global est [4] :

$$Cp = \frac{8}{\lambda^2} \int_0^\lambda a'(1-a)\lambda_r^3 d\lambda_r \quad (\text{III.67})$$

Ce dernier résultat montre que le coefficient de puissance donné par la théorie de *Glauert* est le même que celui donné par la théorie de Froude avec une valeur de coefficient d'inductions tangentiel a' :

$$a' = \frac{(1-a)}{\lambda_r^2} \quad (\text{III.68})$$

III.4. Théorie de l'élément de pale (théorie simplifiée)

➤ Calcul de la puissance d'une éolienne par approche aérodynamique

La circulation de l'air au niveau d'une hélice crée des efforts aérodynamiques, l'un suivant la direction de la vitesse relative du vent et l'autre lui est perpendiculaire. La première est la traînée, le second est la portance. Elles sont définies par les équations [8]:

• La traînée :
$$dF_x = \frac{1}{2} \rho C_x w^2 l dr \quad (III.69)$$

• La portance :
$$dF_z = \frac{1}{2} \rho C_z w^2 l dr \quad (III.70)$$

C_x et C_z sont des coefficients aérodynamiques, ils sont déterminés expérimentalement.

• dF^* : est la résultante des deux forces donc :
$$dF^* = \frac{dF_z}{\cos \epsilon} \quad (III.71)$$

Pour évaluer les efforts axial, tangentiel et le couple moteur, nous étudions un élément de pale compris entre r et $r + dr$ par les considérations des actions aérodynamiques et par les théories de la mécanique générale [10].

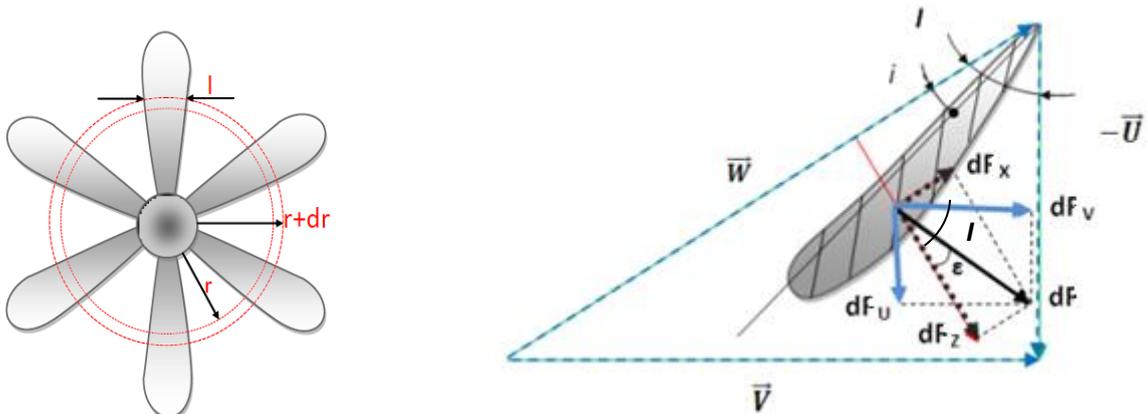


Figure III.10: Actions des forces aérodynamiques

- La projection de dF_x et dF_z sur l'axe d'éolienne donne :

$$dF_v^* = (dF_z \cos I - dF_x \sin I) = \frac{1}{2} \rho w^2 l dr (C_z \cos I + C_x \sin I) \quad (III.72)$$

- La projection de dF_x et dF_z sur le plan de rotation des pales donne :

$$dF_u^* = (dF_z \sin I - dF_x \cos I) = \frac{1}{2} \rho w^2 l dr (C_z \sin I - C_x \cos I) \quad (III.73)$$

- Le couple élémentaire sur l'élément de pale

$$dM = dF_u \times r = (dF_z \sin I - dF_x \cos I) \times r$$

$$dM = dF_u \times r = \frac{1}{2} \rho w^2 l dr (C_z \sin I - C_x \cos I) \times r$$

$$M = B \int dM = B \int \frac{1}{2} \rho w^2 l dr (C_z \sin I - C_x \cos I) \times r$$

B : nombre de pales

- Pour évaluer l'intégrale on divise la pale en n éléments d'épaisseur Δr

$$M = B \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} \rho w^2 l dr (C_z \sin I - C_x \cos I) \times \Delta r$$

- La puissance élémentaire sur l'élément de pale

$$dP = dM \times \Omega = \frac{1}{2} \rho w^2 l dr (C_z \sin I - C_x \cos I) \times r \Omega$$

$$P = B \int dP = B \int \frac{1}{2} \rho w^2 l dr (C_z \sin I - C_x \cos I) \times r \Omega$$

- Pour évaluer l'intégrale on divise la pale en n éléments d'épaisseur Δr

$$P = \Omega B \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} \rho w^2 l dr (C_z \sin I - C_x \cos I) \times \Delta r$$

➤ Détermination de la répartition de la corde

En se référant à la figure III.71, on peut écrire que :

$$dF = \frac{dF_z}{\cos \varepsilon} \quad , \quad W = \frac{v}{\sin I}$$

$$tg \varepsilon = \frac{dF_x}{dF_z} = \frac{C_x}{C_z} \quad (\text{III.74})$$

$$dF^* = \frac{1}{2} \rho w^2 C_z \frac{l dr}{\cos \varepsilon}$$

$$dF^*_V = \frac{1}{2} \rho w^2 l C_z \frac{\cos(I-\varepsilon)}{\cos \varepsilon} dr \quad (\text{III.75})$$

$$dF^*_U = \frac{1}{2} \rho w^2 l C_z \frac{\sin(I-\varepsilon)}{\cos \varepsilon} dr \quad (\text{III.76})$$

A partir de ce qui a précédé, on peut établir que la contribution de l'élément de la pale dans la poussée axiale et dans le moment de rotation est:

$$dF = B dF^*_V = \frac{1}{2} \rho w^2 B l C_z \frac{\cos(I-\varepsilon)}{\cos \varepsilon} dr \quad (\text{III.77})$$

$$dM = r B dF^*_U = \frac{1}{2} \rho w^2 r B l C_z \frac{\sin(I-\varepsilon)}{\cos \varepsilon} dr \quad (\text{III.78})$$

- B : nombre de pales
- ε : est l'angle compris entre l'effort résultant et l'effort de portance, généralement il est faible avec $\varepsilon = 0.05$

$$W = \frac{V}{\sin l} \Rightarrow W^2 = \frac{V^2}{\sin^2 l}$$

D'après la théorie de Betz la poussée axiale (force aérodynamique) totale sur l'ensemble de l'éolienne est : $F = \frac{1}{2} \rho s (V_1^2 - V_2^2)$ et la vitesse du vent qui traverse les pales d'éolienne par : $V = \frac{V_1 + V_2}{2}$

La puissance est maximal pour $V_2 = \frac{V_1}{3}$ donc $V = \frac{2V_1}{3} \Rightarrow V_1 = \frac{3}{2} V$ remplaçant dans la formule de F nous obtiendront :

$$F = \frac{4}{9} \rho S V_1^2$$

Remplaçant V_1 par sa valeur : $F = \rho S V^2$ poussée à travers l'éolienne la contribution de :

$$dF = \rho dS V^2 \text{ et } S = \pi r^2 \Rightarrow dS = 2\pi r dr$$

donc :

$$dF = 2\pi \rho V^2 r dr$$

$$2\pi \rho V^2 r dr = \frac{1}{2} \rho B C_z \frac{V^2 \cos(l-\epsilon)}{\sin^2 l} l dr$$

$$B l C_z = 4\pi r \frac{\sin^2 l \cos \epsilon}{\cos(l-\epsilon)}$$

Après élimination

$$\cos(l-\epsilon) = \cos l \cos \epsilon + \sin l \sin \epsilon$$

$$C_z B l = 4\pi r \frac{\tan^2 l \cos l}{1 + \tan \epsilon \tan l}$$

D'après la théorie de Betz, la vitesse à la traversée de l'éolienne $V = \frac{V_1 + V_2}{2}$ et

$$V_2 = \frac{V_1}{3} \text{ et } V = \frac{2V_1}{3} \Rightarrow V_1 = \frac{3}{2} V$$

$$\tan l = \frac{V}{U} \Rightarrow \cot l = \frac{U}{V} = \frac{\omega r}{V} = \frac{\omega r}{\frac{2V_1}{3}} = \frac{3\omega r}{2V_1} = \frac{3}{2} \lambda$$

$$\begin{aligned} \tan l &= \frac{1}{\cot l} = \frac{2}{3\lambda} \\ \cos^2 l + \sin^2 l &= 1 \\ \cos^2 l + \tan^2 l \cos^2 l &= 1 \\ \cos l &= \frac{1}{\sqrt{1 + \tan^2 l}} \end{aligned}$$

Remplaçant ces valeurs dans l'équation on obtient

$$C_z B l = \frac{16\pi}{9} \frac{r}{\lambda \sqrt{\lambda^2 + \frac{4}{9} (1 + \frac{2}{3\lambda} \tan \epsilon)}}$$

Dans les conditions normale d'utilisation, la valeur de $tg\epsilon = \frac{dR_x}{dR_z} = \frac{C_x}{C_z}$ est en général, extrêmement faible qu'on peut la négliger alors :

$$C_z B l = \frac{16\pi}{9} \frac{r}{\lambda \sqrt{\lambda^2 + \frac{4}{9}}}$$

La vitesse spécifique λ à distance r est $\lambda = \frac{\omega r}{V_1} \Rightarrow V_1 = \frac{\omega r}{\lambda}$

La vitesse spécifique λ_0 à distance R est $\lambda_0 = \frac{\omega R}{V_1} \Rightarrow V_1 = \frac{\omega R}{\lambda_0}$

Donc $\lambda = \lambda_0 \frac{r}{R}$

$$C_z B l = \frac{16\pi}{9} \frac{R}{\lambda_0 \sqrt{\lambda_0^2 \left(\frac{r}{R}\right)^2 + \frac{4}{9}}} \quad \text{la largeur de la pale} \quad (III.79)$$

On déduit de cette relation

$$l = \frac{16\pi}{9 C_z B} \frac{R}{\lambda_0 \sqrt{\lambda_0^2 \left(\frac{r}{R}\right)^2 + \frac{4}{9}}} \quad (III.80)$$

Variation de la corde « l » en fonction de r

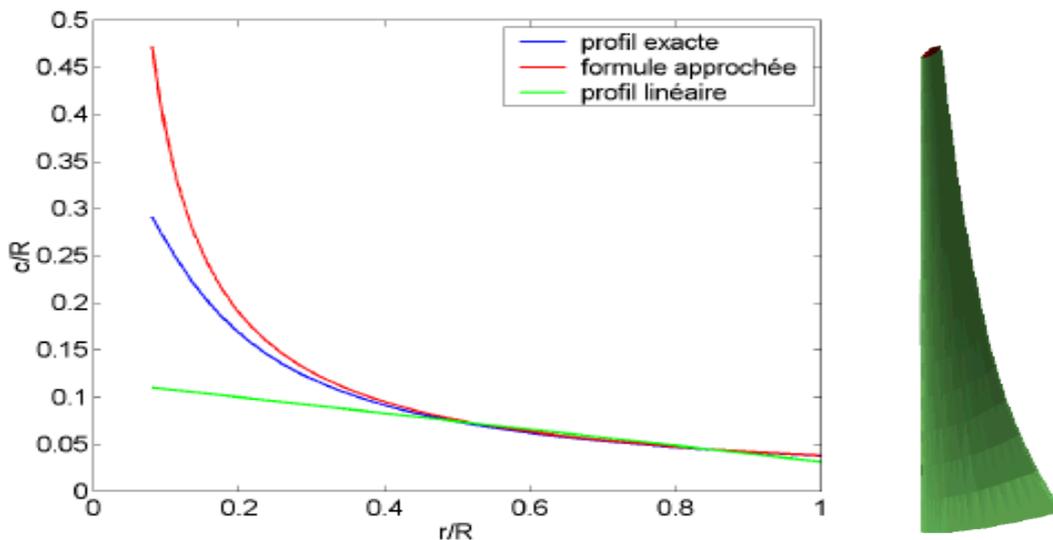


Figure III.11 : Répartition de la corde le long du rayon de la pale d'une éolienne.

III.5 Corrections de Prandtl et de Glauret

III.5.1 Correction de Prandtl

Cette correction permet la prise en compte des effets 3D en bout de pale (associes au nombre de pales). Ceci a pour conséquence de modifier la vorticité dans le sillage du rotor. Prandtl a donc défini un facteur correctif f pour la poussée et le couple élémentaire :

$$dF = 4\pi r \rho V_1^2 a(1-a)f dr \quad dM = 4\pi r \omega V_1 a'(1-a)r^3 f dr \quad (\text{III.81})$$

O  f (facteur de réduction de la circulation) a pour expression $f = \frac{2}{\pi} \cos^{-1}(e^{-m})$, avec $m = \frac{B}{2} \frac{R-r}{r \sin \phi}$ ceci conduit aux expressions corrigées pour les facteurs a et a' :

$$a = \frac{1}{\frac{4f \sin^2 \phi}{\sigma C_N} + 1} \quad a' = \frac{1}{\frac{4f \sin \phi \cos \phi}{\sigma C_r} - 1} \quad (\text{III.82})$$

Correction de Glauret

Lorsque le facteur d'interférence axial a devient plus grand qu'approximativement 0.4, l'application du théorème d'Euler tombe en défaut. Des relations empiriques ont été établies pour approcher les mesures expérimentales, parmi les quelles :

$$C_F = \frac{dF}{\frac{1}{2} \rho V_1^2 2\pi r dr} = \begin{cases} 4a(1-a)f & a \leq \frac{1}{3} \\ 4a(1 - (1/4)(5 - 3a)a)f & a > \frac{1}{3} \end{cases} \quad (\text{III.83})$$

Ou encore :

$$C_F = \frac{dF}{\frac{1}{2} \rho V_1^2 2\pi r dr} = \begin{cases} 4a(1-a)f & , a \leq a_c \\ 4(a_c^2 + (1 - 2a_c)a)f & , a > a_c \end{cases} \quad (\text{III.84})$$

a_c vaut approximativement 0.2. A ces expressions, correspond une relation modifiée pour le coefficient a .

Dimensionnement optimal des pales pour une puissance maximale

La conception d'une forme optimale de la pale d'une hélice implique que la relation $a' = \frac{1-3a}{4a-1}$ correspondant à une puissance maximale soit satisfaite. On peut faire l'hypothèse de négliger les frottements en prenant $C_x=0$. Les expressions de a et a' deviennent :

$$a = \frac{1}{\frac{4 \sin^2 \phi}{\sigma C_z \cos \phi} + 1} \quad a' = \frac{1}{\frac{4 \cos \phi}{\sigma C_z} - 1} \quad (\text{III.85})$$

En utilisant la relation reliant les deux facteurs d'interférences a et a' , on obtient une seconde relation exprimant le facteur a :

$$a = \frac{4 \cos \phi}{\sigma C_z + 12 \cos \phi} \quad (\text{III.86})$$

L'égalité des deux expressions de a donne une équation quadratique, dont l'inconnue est le terme σC_z :

$$(\sigma C_z)^2 + 8 \cos \phi \sigma C_z - 16 \sin^2 \phi = 0 \quad (\text{III.87})$$

Dont la racine acceptable est $\sigma C_z = 4(1 - \cos\phi)$. Ceci donne l'expression optimale de la corde le long de la pale :

$$l(r) = \frac{8\pi r}{BC_z} (1 - \cos\phi) \quad (\text{III.88})$$

Si on reprend la relation donnant l'angle ϕ , $\tan\phi = \frac{(1-a)V_1}{(1+a')\omega r} = \frac{(1-a)}{(1+a')\lambda}$, et en substituant a' , nous obtenons :

$$\lambda = \frac{(4a-1)(1-a)}{a} \frac{1}{\tan\phi} \quad (\text{III.89})$$

En remplaçant a par sa valeur et après quelques simplifications, on aboutit finalement à la loi de vrillage optimale :

$$\phi = \frac{2}{3} \tan^{-1} \frac{1}{\lambda r} \quad \theta = \phi - \alpha_{opt} \quad (\text{III.90})$$

Où α_{opt} est l'angle d'incidence optimale, qui donne $(C_z/C_x)_{max}$

References bibliographies

- [1] J.F. Manwell, J.G. McGowan, A.L. Rogers, Wind energy explained, 2ed, Wiley, 2009.
- [2] W.F. Durand, Aerodynamic Theory, Julius Springer, Berlin, 1936.
- [3] H. Glauert, The elements of airfoil and airscrew theory, 2ed, Cambridge University Press, 1926.
- [4] T. Burton, N. Jenkins, D. Sharpe, E.A. Bossanyi, Wind energy handbook, 2ed, 2012.
- [5] D. L. Gourières, Les éoliennes Théorie, conception et calcul pratique, 2ed, Moulin Cadiou, 2008.
- [6] E.R. Wilson, P.B.S Lissaman, Applied aerodynamics of wind-power machines, Oregon State University, 1976.

Chapitre

ANALYSE DE POTENTIEL ÈOLIEN EN ALGERIE

V.I.	Introduction.....	47
VI.1.	Origine du vent	47
VI.2.	Vitesse et direction du vent	47
VI.3.	Variations de la vitesse du vent	49
VI.3.1.	Variation cyclique	49
VI.3.2.	Variation journalière.....	49
VI.3.3.	Les variations du vent en fonction de l'altitude	49
VI.4.	Choix du site pour l'implantation des éoliennes	50
VI.5.	Densité de vitesse de vent (probabilité de Weibull)	51
VI.6.	La rose.....	52
VI.7.	Estimation de l'énergie générée.....	52
VI.8.	Potentiel du vent en Algérie	53

V.I. Introduction

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

VI.1. Origine du vent

- L'énergie du vent vient du soleil. Entre les deux pôles et l'équateur, le soleil réchauffe le globe terrestre de manières fort inégales. Par conséquent il y a naissance des écarts de température qui provoquent des différences de densité des masses de l'air qui se traduisent par des variations de pression atmosphérique. Ainsi il se crée un vaste mouvement des masses d'air des zones de haute pression vers les zones de basse pression. C'est ce mouvement qui constitue le phénomène général des vents à la surface de la planète [1].
- De ce qui précède, nous définissons le vent comme étant une masse d'air en mouvement qui transforme l'énergie thermique qu'elle reçoit du rayonnement solaire en énergie cinétique.
- Deux paramètres essentiels caractérisent le vent. Il s'agit de sa vitesse dont l'énergie qu'est fournie dépend fortement et sa direction.

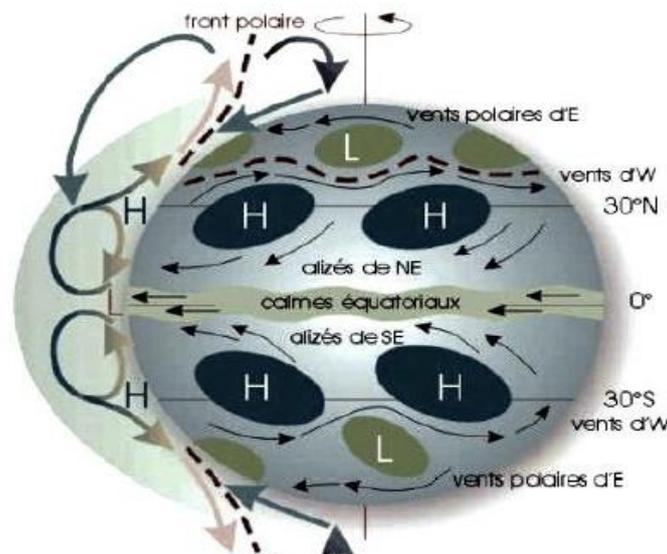


Figure IV.1 : Mouvement du vent autour de la terre

VI.2. Vitesse et direction du vent

La terre tourne autour de son axe, à la présence des océans et des continents et des reliefs respectifs, d'où la grande variété des vents dominants caractérisent les diverses régions et climats du globe terrestre, selon les latitudes et longitudes [1].

Ajoutons à ce qui est dit au point précédent que le vent est le paramètre représentatif des mouvements de l'air. La direction et la vitesse du vent sont des grandeurs mesurables dont la connaissance est nécessaire à l'étude cinématique et dynamique des masses d'air.

La direction du vent indique d'où souffle le vent et se détermine à l'aide d'une girouette ou d'une manche à air. Un « vent Sud-Ouest » signifie que l'air est en mouvement du Sud-Ouest vers le Nord-Est.

La vitesse quant à elle, est mesurée à l'aide d'un anémomètre. La vitesse du vent s'exprime en mètre par seconde (m/s), en kilomètre par heure (Km/h) ou en noeud(kt).
Equivalence: 1 m/s = 3.6 km/h et 1 m/s \approx 2 noeuds.

Les mesures de la vitesse du vent se font dans la quasi-totalité des cas dans les stations météorologiques en fixant l'anémomètre au sommet d'un pylône. Afin d'éviter les turbulences causées par divers obstacles (arbre, bâtiment, ...) on préfère fixer l'anémomètre à 10 mètres au-dessus du sol.

Une fois le capteur (anémomètre) fixé, on mesure la vitesse instantanée (moyenne sur une durée de 0.5 sec.). La vitesse instantanée fluctue au gré des tourbillons générés par la turbulence de l'air et c'est pourquoi on note la vitesse maximale instantanée observée au cours de 10 minutes qui précèdent l'heure d'observation, de même que les maxima observés pendant l'heure ou la journée [1].

Les vents sont divisés en 17 catégories en fonction de leur vitesse et des effets qu'ils génèrent sur l'Etat de la mer [1], suivant une échelle appelée « *ECHELLE DE BEAUFORT* ». Sur des cartes météorologiques la direction et la vitesse du vent sont représentées par des symboles appropriés. Le tableau ci-dessous donne les 17 catégories du vent en échelle de Beaufort.

Tableau. IV.1 : les catégories du vent

Degré Beaufort	Vitesse du vent		Description générale	Pression sur la surface plane $p = 0.13 v^2$ [daN/m ²]
	Noeuds	m/s		
0	1	0/0,4	Calme	
1	1/3	0,5/1,5	Très légère brise	0,13 (1m/s)
2	4/6	1,6/3,4	Très légère brise	0,8 (2,5m/s)
3	7/10	3,5/5,5	Petite brise	3,2 (5m/s)
4	11/16	5,5/8	Jolie brise	6,4 (7m/s)
5	17/21	8,1/10,9	Bonne brise	13 (10m/s)
6	22/27	11,4/13,9	Vent frais	22 (13m/s)
7	28/33	14,1/16,9	Grand frais	33 (16m/s)
8	34/40	17,4/20,4	Coup de vent	52 (20m/s)
9	41/47	20,5/23,9	Fort coup de vent	69 (23m/s)
10	48/55	24,4/28	Tempête	95 (27m/s)
11	56/63	28,4/32,5	Violence tempête	117 (30m/s)
12	64/73	32,6/35,9	Ouragan	160 (35m/s)
13	72/80	36,9/40,4		208 (40m/s)
14	81/89	40,1/45,4		265 (45m/s)
15	90/99	45,1/50		325 (50m/s)
16	100/108	50,1/54		365 (54m/s)
17	109/118	54,1/60	cyclone	470 (60m/s)

VI.3. Variations de la vitesse du vent

VI.3.1. Variation cyclique

La vitesse et la direction du vent varient au cours de l'année, une variation due par le fait que la position des aires cycloniques et anticycloniques est liée à la position du soleil par rapport à l'équateur [1].

VI.3.2. Variation journalière

Les vents subissent des fluctuations journalières qui sont dues à des effets convectifs qui s'expliquent par l'échauffement du sol qui est plus rapide que celui des mers. Hormis les variations journalières, nous retiendrons que dans les laps de temps la direction du vent peut varier de 20° et la vitesse de 3 m/s et même davantage [1].

VI.3.3. Les variations du vent en fonction de l'altitude

L'augmentation de la vitesse du vent au fur et à mesure que l'on s'élève au-dessus du sol, est un phénomène bien connu. Ainsi de 2 m/s à 20 m d'altitude à paris, la vitesse du vent atteint 7 à 8 m/s à 300 m d'altitude. La réduction de vitesse au voisinage du sol est due au freinage de l'air par la végétation, les habitations et les obstacles de toutes sortes.

Les relevés météorologiques montrent que l'accroissement relatif de la vitesse du vent avec l'altitude par rapport au sol varie d'un point à un autre. Différents auteurs ont proposé pour représenter la loi de variation de la vitesse du vent l'expression suivante:

$$\frac{v'}{v_0} = \left(\frac{h}{h_0}\right)^n \quad (\text{VI.1})$$

v_0 : la vitesse observée à la hauteur h_0 .

v' : vitesse observée à la hauteur h .

Généralement, on prend pour h_0 la valeur 10m, n est un coefficient qui caractérise le terrain comme dans le tableau ci-dessous, il varie de 0,08 à 0,4 (les valeurs les plus faibles correspondent généralement aux régions venteées et les plus fortes aux zones de faible intensité).

Tableau VI.2: Les paramètres des sites donnant l'évolution de la vitesse du vent.

Nature du terrain	Inégalité du sol h_0 en cm	Exposant n
Plat : neige, glace, mer, herbes courtes	0 à 20	0.08 à 0.12
Peu accidenté : champs et pâturages, cultures	20 à 200	0.13 à 0.16
Accidenté : bois, zones habitées	1000 à 1500	0.20 à 0.23
Très accidenté : villes	1000 à 4000	0.25 à 0.4

L'énergie susceptible d'être extraite est proportionnelle au cube de la vitesse. Il en résulte que le rapport des énergies disponibles à h mètres et à h_0 mètres au-dessus du sol, s'élève à :

$$\frac{E}{E_0} = \left(\frac{h}{h_0}\right)^{3n} \quad (\text{VI.2})$$

Avec $0,30 < 3n < 1,20$

Les sites les plus intéressants pour la récupération d'énergie éolienne sont les sites peu ou pas accidentés pour lesquels l'exposant n est faible. On bénéficie dans ce cas des vitesses de vent près du sol élevées et une variation de la vitesse du vent avec l'altitude faible (les vitesses du vent en haut et en bas de la machine sont sensiblement les mêmes), ce qui a pour conséquence de diminuer les contraintes cycliques sur les pales du moteur éolien (d'autant plus important lorsque le diamètre de l'hélice est grand).

On aura donc intérêt pour recueillir le maximum de puissance à placer le moteur éolien le plus haut possible par rapport au sol, au sommet d'une tour, par exemple et au moins à 6 mètre de hauteur pour les sites les plus favorables.

Il y aura lieu d'effectuer un calcul économique, le prix du support de l'installation croissant avec la hauteur dans des proportions non négligeables.

Dans tous les cas afin d'éviter des déboires, on aura intérêt étant donné la variabilité du coefficient n d'un point à un autre, à effectuer les mesures aux emplacements susceptibles d'être retenus pour l'implantation du groupe éolien [1].

VI.4. Choix du site pour l'implantation des éoliennes

Pour qu'une éolienne produise il faut vérifier :

Le vent: les études du vent sont indispensables pour des projets de grandes éoliennes, elles sont cependant beaucoup plus chères et plus longues que pour un projet de petite éolienne.

La carte du vent: la carte des vents donne une extrapolation incertaine. Souvent on utilise l'intuition qui est en général un bon indicateur du potentiel éolien (Si nous pensons qu'il y a du vent, c'est probablement vrai).

Un autre critère ou paramètre utile et pertinent est de savoir s'il y a d'autres éoliennes dans le secteur ou des moulins à vent y étaient installés.

On considère pour qu'un emplacement soit exploitable qu'il faudrait disposer d'une vitesse annuelle de 4m/s.

Pour le choix du site, l'étude prend en compte les paramètres suivants : obstacle, relief et l'effet du sol et des voisins.

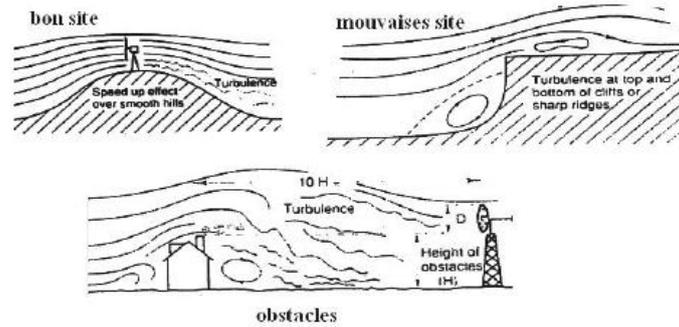


Figure.VI.2 : Catégories des sites d’implantation des éoliennes.

VI.5. Densité de vitesse de vent (probabilité de Weibull)

La probabilité de Weibull est un modèle le plus utilisé pour exprimer la distribution de la vitesse du vent d’un site. Ce modèle est de forme d’une fonction exponentielle de deux paramètres. Un paramètre d’échelle c (m/s) qui représente la moyenne de la vitesse du vent au site. L’autre paramètre est adimensionnel nommé paramètre de forme (k). Ce paramètre représente la nature de la distribution. Généralement le modèle est présenté par la relation suivante [2] :

$$f(V) = \frac{k}{c} \cdot \left(\frac{V}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{V}{c}\right)^k\right] \tag{VI.3}$$

$$F(V) = \int_0^{+\infty} f(V) dV = 1 - \exp\left[-\left(\frac{V}{c}\right)^k\right] \tag{VI.4}$$

Où (m/s) est la vitesse du vent observant, k le paramètre de forme, et c (m/s), le paramètre d’échelle. Les valeurs de k varient de 1,5 à 3,0 pour la plupart des conditions de vent.

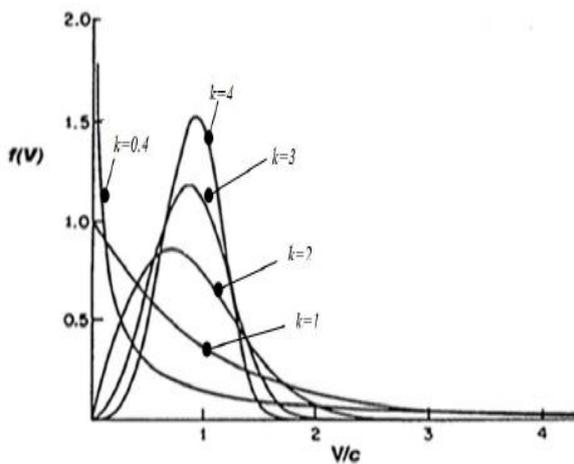


Figure VI.3 : Influence des valeurs du paramètre k sur la forme des distributions

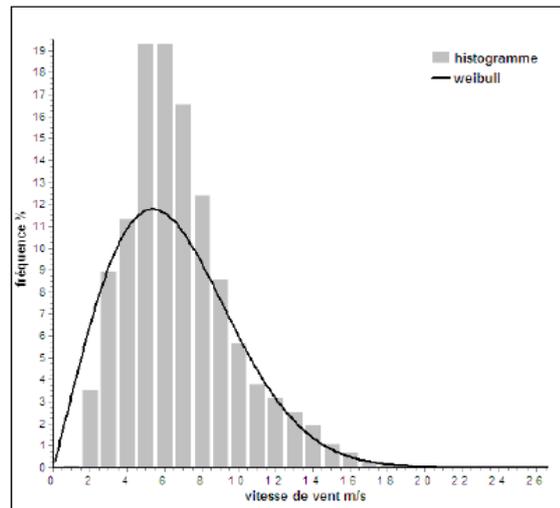


Figure VI.4 : Histogramme des fréquences et la courbe de Weibull pour Adrar.

VI.6. La rose

La figure (VI.5) représente la rose du vent annuelle de la région de Skikda dans la période (1990-2007) elle montre la direction des vents dominants sud-sud, et la seconde direction dominante est le Nord-Sud, tandis que d'autres directions sont négligées. Toutes les directions ont une faible vitesse variant entre 1 et 6 [m/s].

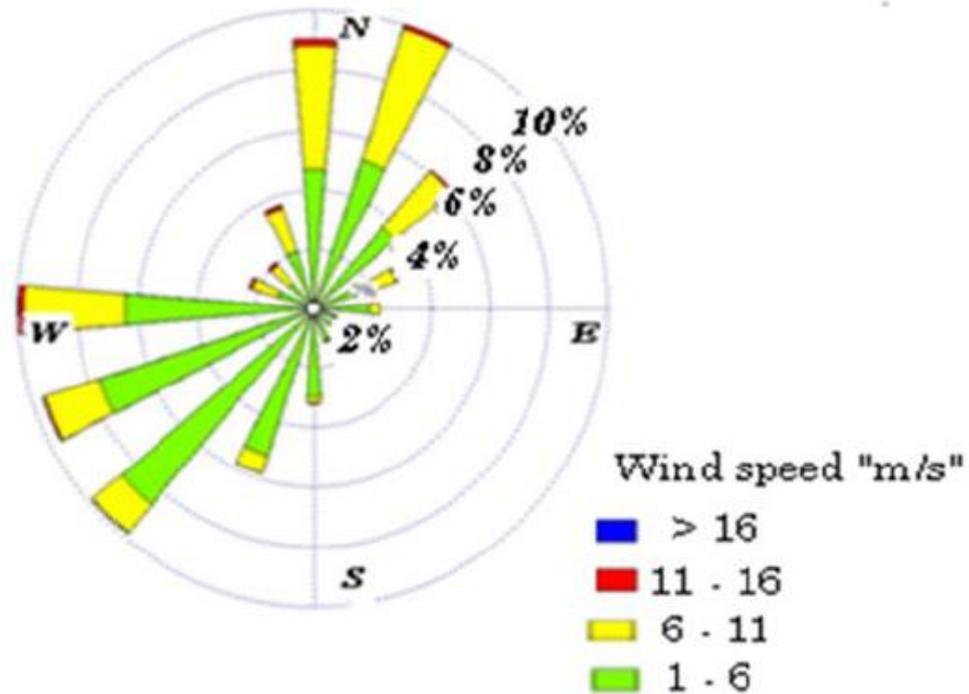


Figure VI.5 : Rose du vent dans la région de Skikda en Algérie [3].

VI.7. Estimation de l'énergie générée

Pour estimer l'énergie générée par une éolienne nous utilisons la méthode histogramme [4]. Où l'on effectue superposition de la courbe de réponse énergétique en KW, de l'historgramme de fréquences d'occurrence des classes de vent en %heures par mois et l'on multiplie terme à terme. Nous obtenons ainsi l'énergie générée en KWh.

$$E = \sum_{i=1}^n P_i(V_i) f_i(V_i) * N \tag{VI.5}$$

- N : nombre d'heurs par année (24*365=8760haur/an)
- P(V_i) : la puissance effective de l'éolienne à une vitesse V_i.
- f(V_i) : la probabilité à une vitesse V_i.
- n : nombre d'intervalle

N=8760 H/an

$$P_{vent} = \frac{1}{2} \rho . V^3 . \pi . R^2$$

Tableau VI.3: Estimation de l'énergie générée pendant une année.

vitesse (m/s)	puissance (kW)	énergie (MWh)
4	35	6,3
5	175	42,8
6	352	109,7
7	580	218,7
8	875	382,5
9	1261	617,1
10	1686	895,2
11	2087	1168,9
12	2399	1380,8
13	2500	1442,5
14	2500	1412,0
15	2500	1350,6
16	2500	1262,8
17	2500	1154,6
18	2500	1032,4
19	2500	902,9
20	2500	772,2
21	2500	645,9
22	2500	528,3
23	2500	422,4
24	2500	330,1
25	2500	252,2
l'énergie générée total		16330,8

VI.8. Potentiel du vent en Algérie

Les cartes des vents de l'Algérie, estimées à 10 m du sol et à 25 m du sol sont présentées sur les deux figures suivantes. Les vitesses moyennes annuelles obtenues varient de 2 à 6.5 m/s. On remarque que la majorité du territoire se trouve classé dans la gamme de vitesses allant de 3 à 4 m/s, (région des Hauts Plateaux et le Sahara). Les vitesses du vent augmentent et sont maximales dans les régions situées au centre du grand Sahara (Adrar, In Salah et Timimoune) [5].

On distingue plusieurs microclimats, à savoir autour d'Oran, Tiaret, In Aménas, ainsi que les environs de Biskra, où les vitesses de vent enregistrées sont supérieures 4 m/s. Enfin, la côte Ouest de la méditerranéenne, le Hoggar, ainsi que la région de Béni-Abbes présentent les vitesses moyennes annuelles les plus faibles (< 3 m/s) [5].

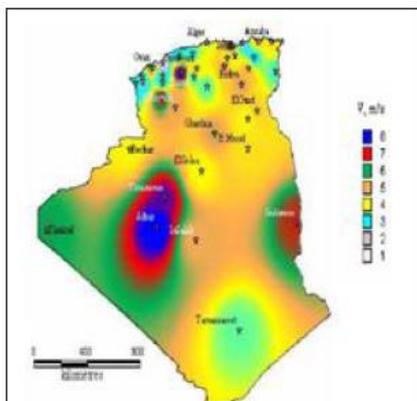


Figure VI.6: Atlas de la vitesse moyenne du vent de l'Algérie estimé à 25 m d'altitude du sol

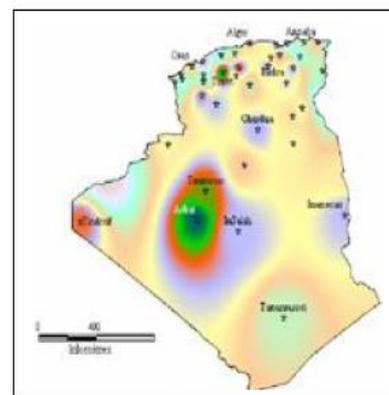


Figure VI.7: Atlas de la vitesse moyenne du vent de l'Algérie estimé à 10 m d'altitude du sol

Tableau VI.4: Vitesses du vent dans l'Algérie

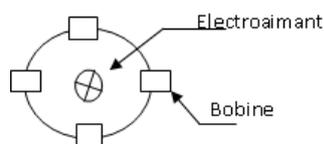
N°	Nom	Longitude (deg)	Latitude (deg)	Rugosité (m)	V (m/s)
1	Adrar *	0.28	27.82	0.01	5.9
2	Alger	3.25	36.72	0.01	3.2
3	Annaba *	7.82	36.82	0.01	2.4
4	Batna *	6.18	35.55	0.01	4.2
5	Béchar *	-2.23	31.62	0.03	3.6
6	Béjaia *	5.6	36.72	0.03	4.2
7	Beni Abbès	-2.10	30.08	/	1.7
8	Ben Saf *	-1.35	35.3	0.02	2.8
9	Biskra *	5.73	34.8	0.02	4.1
10	Bordj Bou Arreridj	4.67	36.07	0.01	3.4
11	Chlef	1.33	36.10	0.01	2.8
12	Constantine	6.62	36.10	0.01	2.6
13	Djanet	9.28	24.33	/	2.3
14	Djelfa	3.25	34.68	0.08	2.7
15	El Bayadh	1.00	33.67	0.01	3.9
16	El Goléa	2.87	30.57	/	3.0
17	El Kheiter *	4.70	34.15	0.08	4.6
18	El Oued	6.78	33.50	0.01	3.7
19	Ghardaia *	3.80	32.40	0.03	4.6
20	Guelma	7.43	36.47	/	1.8
21	Hassi Messaoud *	6.15	31.67	0.00	4.1
22	In Amenas	9.63	28.05	/	4.3
23	In Oussera	2.52	35.55	0.08	3.0
24	In Salah	2.47	27.20	/	4.4
25	In Sefra	-0.60	32.75	/	3.0
26	Ksar El Chellala	2.32	35.17	0.08	3.4
27	Maghnia *	-1.78	34.82	0.01	2.7
28	Mascara	0.15	35.22	0.05	2.4
29	Mechria	-0.27	33.55	/	3.8
30	Miliana	2.23	36.30	0.5	2.6
31	Mostaganem *	0.12	35.83	0.01	1.0
32	M Sila *	4.50	35.67	0.03	4.1
33	Oran	-0.62	35.63	0.01	4.1
34	Oum El Bouaghi	7.11	35.87	/	2.1
35	Saida *	0.15	34.87	0.01	2.6
36	Sétif	5.25	36.18	0.01	3.1
37	Skikda	6.90	36.88	0.01	2.9
38	Tamanrasset *	5.52	22.78	0.10	2.9
39	Tébessa	8.12	35.42	0.03	2.8
40	Tiaret	1.47	35.37	0.02	4.7
41	Timimoun *	0.28	29.25	0.01	5.1
42	Tindouf *	-8.10	27.67	0.00	4.6
43	Tlemcen	-1.28	34.95	0.01	2.3
44	Touggourt *	6.13	33.12	0.04	3.3

En fin, la région centrale de l'Algérie est caractérisée par des vitesses de vent variant de 3 à 4 m/s, et augmente au fur et à mesure que l'on descend vers le sud-ouest, le maximum est obtenu pour la région d'Adrar avec une valeur moyenne de 5.9 m/s. Cependant, on notera l'existence de plusieurs microclimats où la vitesse excède les 5 m/s comme dans les régions de Tiaret, Tindouf et Oran [5].

Générateur synchrone

- Principe de fonctionnement est basé sur la création d'une variation du flux magnétique par rotation des électroaimants (rotor) passant devant les forces des bobines fixes (stator) alimentées par le réseau.

Cette variation provoque la création d'un courant alternatif triphasé.



- Dans ce type de générateur la rotation du rotor doit être synchrone avec l'excitation des bobines.
- La vitesse de synchronisation du rotor dépend du nombre de pôles magnétiques. (vitesse de rotation du champ tournant)

N : vitesse de synchronisation P : nombres de pôles, f : fréquence du réseau
 $f=50\text{Hz}$

$$N_s = 60 * \frac{f}{p/2}$$

$$N_s = \frac{3000}{p/2} = \frac{6000}{p}$$

- Le glissement mesure l'écart relatif entre la vitesse de rotation de la machine et la vitesse de synchronisation

Référence bibliographique

- [1] C. N. EBEY, "Etude d'une éolienne lente pour l'entraînement d'une pompe à piston simple effet ", Université Kinshasa, 2005.
- [2] M, Saïdou , « *Etude du potentiel éolien du jet nocturne dans la zone sahélienne à partir des observations de radars profileurs de vent* » Thèse, l'Université Toulouse., France , 2010.
- [3] D. Khalfa, —Optimisation Des Perturbations Des Eoliennes Dans la Génération D'électricité Par Des Aérogénérateurs à Vitesse Variable, thèse Université Badji Mokhtar-Annaba, 2017.
- [4] B. Yousef, G. Aymeric Collecte, organisation, traitement, analyse de mesures éoliques et modélisation énergétique. Thèse doctorat; Université Tecnica Federico Santa Maria, UTFSM, Valparaso, Chili ; 2005.
- [5] N. K. Merzouk, "Carte des Vents de l'Algérie- Résultats Préliminaires -," Rev. Energ. Ren. : Valorisation, vol. 209-214, 1999.

Calcul des forces aérodynamiques

Exercice 01 :

Un avion de poids de 13344 (N) et d'une surface d'aile égale 27.87 (m^2), décolle à une vitesse de 30.4 (m/s).

Sachant que C_z et C_x varient avec α l'angle d'incidence.

$$C_z = 0.35 (1 + 0.2 \alpha)$$

$$C_x = 0.008 (1 + \alpha)$$

Déterminer :

- 1) l'angle α au décollage.
- 2) la puissance nécessaire au décollage.

$$\rho = 1.225 \text{ (kg/m}^3\text{)}$$

Exercice 02 :

Vol horizontal stabilisé

I. Représenter l'ensemble des forces s'exerçant sur un avion effectuant un vol horizontal à vitesse constante V_p , suivant une trajectoire rectiligne et horizontale.

En déduire la vitesse propre V_p de l'avion en fonction du coefficient de portance C_z , de la masse m de l'avion, de sa surface de voilure S , et de la masse volumique de l'air ρ .

II. On donne ci-dessous les valeurs de coefficients de portance C_z et de traînée C_x d'un avion léger en fonction de l'incidence α .

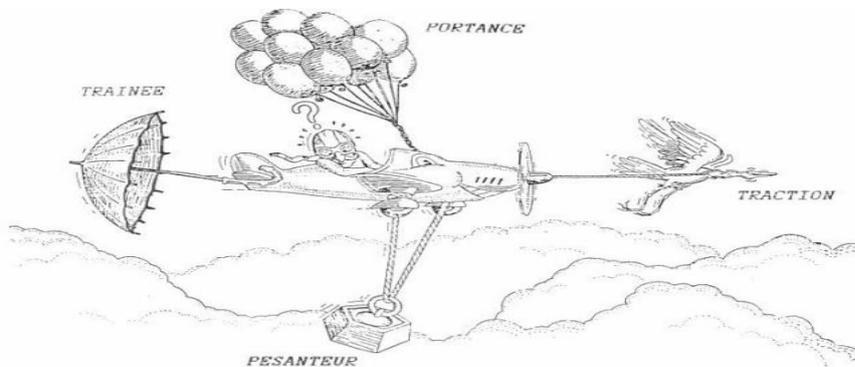
α (°)	-2	0	2	4	6	8	10	12	14	16	17	18
C_x	0.01	0.012	0.015	0.02	0.03	0.04	0.05	0.065	0.085	0.105	0.120	0.140
C_z	0	0.1	0.25	0.4	0.55	0.7	0.8	0.95	1.05	1.10	1.15	1.05

1. Tracer la polaire de l'avion (courbe C_z en fonction de C_x).
2. Indiquer sur la polaire les points de fonctionnement A, B, C, D et E suivants :

- A : portance nulle
- B : traînée minimale
- C : finesse maximale
- D : décrochage
- E : $\frac{C_x}{C_z^{3/2}}$ minimal.

3. Calculer la vitesse de décrochage en vol horizontal stabilisé.
4. A quelle vitesse propre l'avion doit-il voler pour avoir une finesse maximale ?

Données : $m = 1$ tonne , $S = 20m^2$, $\rho = 1.2 \text{ kg / m}^3$, $g = 10 \text{ ms}^{-2}$.



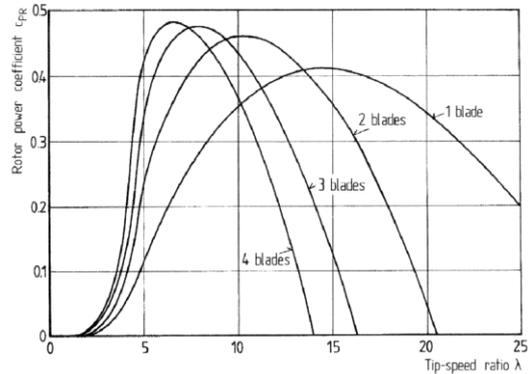
Calcul des puissances et des rendements

Exercice 01 :

Nous souhaitons dimensionner les pales d'une éolienne à vitesse fixe pour obtenir une puissance mécanique de 750kW pour une vitesse de vent de 13.8 m/s. On considère un coefficient de puissance C_p égal à 0.2. Quel sera la longueur de notre pale ou le rayon de la surface balayée par la turbine ?

Si le C_p est égal à 0.4 calculer la longueur de la pale et la vitesse de rotation pour une éolienne horizontale tripale

La densité de l'air est de 1.25 Kg/m^3 .



Exercice 02 :

Une éolienne a les caractéristiques suivantes :

- Diamètre de rotor : 100 m avec 3 pales,
- Coefficient d'efficacité $C_p = 0,44$.

1) Calculer la puissance captée par l'éolienne pour une vitesse de vent de 7 m/s puis pour une vitesse de vent de 10 m/s.

La masse volumique de l'air $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$.

2) Conclure. Quels paramètres faut-il prendre en compte lors du choix et de l'installation d'une éolienne ?

Exercice 03 :

On donne quelques paramètres d'une éolienne de **300kW**

Diamètre des pales : **28m**

Surface balayée par le rotor : **615m²**

Vitesse nominale du vent : **14 m/s**

Vitesse nominale de rotation du rotor : **43 tr/min**

Rapport du multiplicateur : **35**

La densité de l'air est de **1.225 Kg/m³**

1- Quel pourcentage de l'énergie du vent récupère t-on au point de fonctionnement nominal ?

2- De quel type d'éolienne s'agit-il : éolienne lente ou éolienne rapide ?

3- Quelle est la vitesse nominale N du rotor de la génératrice ?

Exercice 04 :

Calculer la puissance mécanique pour une vitesse du vent donnée

Données : puissance aérodynamique $P_a = 0.5 \rho C_p \pi R^2 V^3$

Avec : **$R=44\text{m}$** le rayon des pales

$V=11\text{m/s}$ le vitesse du vent

$\rho=1.224 \text{ Kg/m}^3$ la densité de l'air à 15°C

C_p : coefficient de performance, propre à chaque éolienne. Une expression empirique donnée :

$$C_p = [0,5 - 0,00167(\beta - 2)] \sin \left[\frac{\pi(\lambda + 0,1)}{13,5 - 0,3(\beta - 2)} \right] - 0,00184(\lambda - 3)(\beta - 2)$$

$\lambda = R\Omega_t/V = 5$ avec Ω_t la vitesse de la turbine, donc de l'axe des pales

$\beta = 2^\circ$ L'angle des pales

1- Calculer la puissance aérodynamique pour un vent de 11 m/s

2- En déduire le couple aérodynamique T_a

3- Exprimer le couple visqueux T_v connaissant le coefficient k de la boîte de vitesse et le coefficient visqueux f concernant les pertes par frottements **$k=70$ et $f=0,0071$** .

4- Calculer la puissance mécanique P_m .

Exercice 05 :

Un aérogénérateur dont les principales caractéristiques sont données par

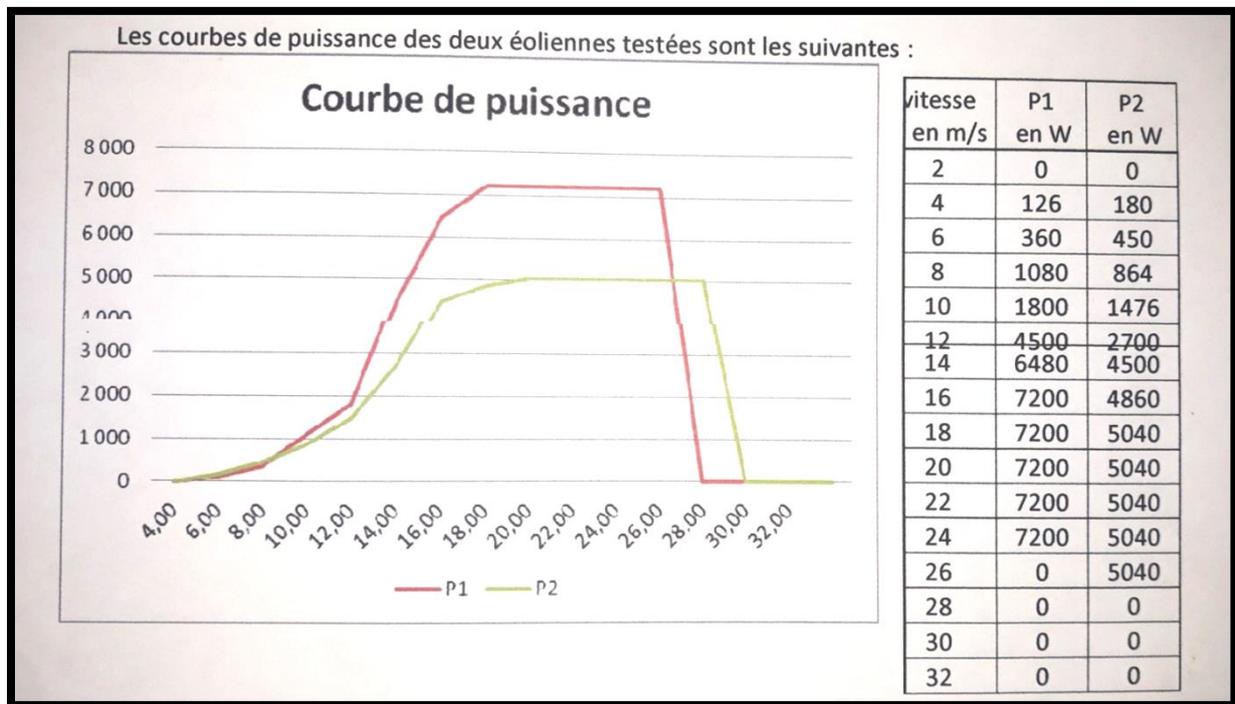
- Diamètre des pales : **28m**
- Vitesse de rotation du rotor : **44 tr/min**
- Rapport du multiplicateur : **34**
- Rendement électrique $\eta_{ele}=0.94$
- Est placé dans un vent de vitesse : **13m/s**

- 1/ quelle serait la valeur maximale de la puissance extraite par le rotor au vent
 - 2/ dans le cas idéal (Betz) si on désire augmenter la puissance extraite par le rotor au vent de 70%, quelle serait la valeur de la vitesse du vent dans ce cas.
Sachant que les pertes de puissance au niveau de rotor sont de 15% par rapport au cas idéal et considérant que les pertes de puissance au niveau du multiplicateur sont de 4%, déterminez :
 - 3/ le couple qui s'exerce sur l'arbre du rotor
 - 4/ le rendement global
 - 5/ le couple appliqué à l'arbre de la génératrice.
- On donne la masse volumique de l'air $\rho=1.225 \text{ Kg/m}^3$

Potentiel énergétique d'un site

Exercice 01 :

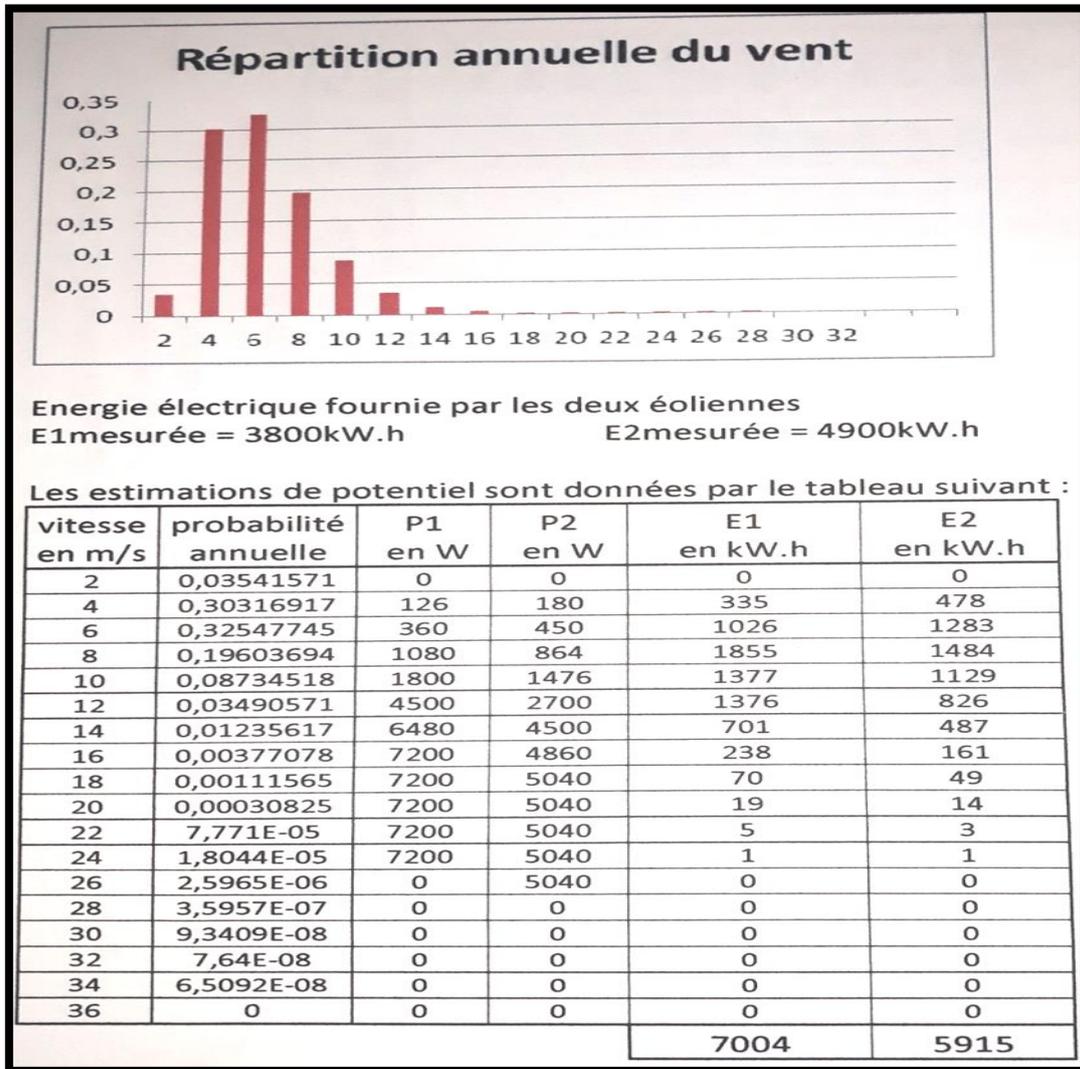
Deux éoliennes sont testées en soufflerie lors d'un essai en flux laminaire. La première est une éolienne à axe horizontal de 4 mètres de diamètre, la seconde est de type Darrius à rotor cylindrique vertical de 4 mètres de diamètre et 3 mètres de hauteur.



A- Calculer la valeur du C_p de chaque éolienne pour les deux vitesses de vent de 6 m/s et 16 m/s. On supposera que l'essai s'est fait à 20°C, la masse volumique de l'air étant de 1.225 kg/m³. Détailler le calcul en faisant apparaître l'énergie aérodynamique disponible pour chaque vitesse.

Exercice02 :

Les deux éoliennes sont ensuite installées sur le même site et on mesure pendant un an l'énergie produite par chaque éolienne ainsi que la répartition de vitesse du vent. On obtient les données suivantes :



- A. détaillez comment a été fait le calcul d'énergie dans le tableau ci-dessus.
- B. Commentez la différence entre potentiel calculé et énergie mesurée d'une part et en comparant les deux éoliennes d'autre part. Citez les causes possibles justifiant ces différences.