

People's Democratic Republic of Algeria  
Ministry of Higher Education and Scientific Research  
Mohamed Boudiaf University of M'sila  
Faculty of Technology



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
جامعة المسيلة  
كلية التكنولوجيا

---

Département de Génie Mécanique

## MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

En vue de l'obtention du diplôme de :

### MASTER

En Génie Mécanique

**Option** : Construction mécanique

Présenté par :

**KHANOUS Hanine & MAIZ Idir**

### Thème

---

## EVALUATION DES PERFORMANCES D'UNE EOLIENNE A AXE HORIZONTAL

---

Devant le jury composé de :

NOM et Prénom	Grade	Qualité
BOUDILMI Issa	MCA	Président
ZERGANE Said	MCA	Encadreur
BELKHIRI Khellaf	MCB	Examineur

*Année Universitaire : 2021 / 2022*

N° d'ordre : GM/...../2022

## ملخص

الهدف الرئيسي من العمل المقدم، هو توصيف توربينات الرياح من خلال تحديد المنحنى  $P=f(U)$ ، لهذا الغرض، تم تطوير برنامج بلغة MATLAB من خلال إدخال خصائص توربينات الرياح و نظرية عنصر الشفرة (BEM) . من اجل تقييم عزم الدوران الذي تمارسه الشفرات على العمود، بعد ذلك، الطاقة المحررة. بقية العمل مقسم على ثلاثة فصول هو نظرة عامة على طاقة الرياح والرياح وعرض طريقة نظرية عنصر الشفرة.

الكلمات المفتاحية: BEM, الرياح، طاقة الرياح، NREL, توربينات الرياح، توربينات الرياح.

## Résumé

L'objectif principale du travail présenté, est la caractérisation de la turbine éolienne par la détermination de la courbe  $P=f(U)$ , à cet effet, un programme sous MATLAB a été développé en introduisant les caractéristiques de l'aérogénérateur NREL et la théorie de l'élément de pale (BEM) pour évaluer le couple exercé par les pales sur l'arbre, ensuite, la puissance développée. Le reste du travail réparti sur trois chapitres est un survol sur l'énergie éolienne, le vent et la présentation de la méthode de la théorie de l'élément de pale.

**Mots clés :** BEM, Le vent, Energie éolienne, NREL, Turbine éolienne, Aérogénérateur.

## Abstract

The principale objective of the work presented, is the characterization of the wind turbine by the determination of the curve  $P = f (U)$ , for this purpose, a program under MATLAB was developed by introducing the characteristics of the wind turbine NREL and the theory of the blade element (BEM) to evaluate the torque exerted by the blades on the shaft, then, the power developed. The rest of the work spread over three chapters is an overview of wind energy, wind and the presentation of the method of the theory of the blade element.

## *Remerciements*

Au terme de ce travail. Nous tenons à remercier en premier ALLAH le tout puissant miséricordieux qui nous a donné le courage et la force l'élaboration et la concrétisation de ce modeste travail.

Je remercie également notre encadreur monsieur « Zergane Said » qui de par sa clairvoyance, son vaste savoir et sa disponibilité, nous a offert le meilleur encadrement possible.

Nos remerciements aux membres de jury qui ont accepté de juger ce travail.

Je remercie ensuite mes parents surtout ma maman

Enfin à toutes personnes qui ont contribuées et participées de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Merci



## ***Mes Dédicaces***

Je dédie ce mémoire

A ma mère, qui a œuvré pour ma réussite, de par son amour, son soutien, tous les sacrifices consentis et ses précieux conseils, pour tout son assistance et sa présence dans ma vie, l'expression de mes sentiments et de mon éternelle gratitude.

A mon cher père, à qui j'exprime ma sincère et éternelle gratitude pour son attention, son soutien, pour m'aider à avancer dans la vie. Puisse dieu faire en sorte que ce travail porte son fruit.

A mes chers frères, Sofiane et Mohamed et Koussai

A ma seule sœur Soulef

A tous mes proches

A ma meilleure amie Manel Belouadah

## *Liste des figures*

### **Chapitre 01**

Figure.I.1. Turbine éolienne.....	02
Figure.I.2. Conversion de l'énergie éolienne.....	05
Figure.I.3. Eolienne à vitesse fixe à base de la machine asynchrone.....	06
Figure.I.4. Eolienne à vitesse variable à base MAS.....	07
Figure.I.5. Eolienne à axe vertical.....	09
Figure.I.6. Schéma d'une éolienne à axe horizontal.....	10
Figure.I.7. Composants d'une éolienne.....	12
Figure.I.8. Caractéristique puissance vitesse typique d'une éolienne de grande puissance.....	13
Figure.I.9. Système par décrochage aérodynamique.....	14
Figure.I.10. Influence de l'angle de calage sur le coefficient de puissance.....	15
Figure.I.11. Système par effacement du rotor.....	15

### **Chapitre 02**

Figure.II.1. Vue de profil d'une pale d'éolienne.....	17
Figure.II.2. Ecoulement du vent.....	17
Figure.II.3. Traînée et portance dans une éolienne.....	22
Figure.II.4. Vitesses agissantes sur un profil de pale.....	21
Figure.II.5. Différence de pression entre l'amont et l'aval de l'éolienne.....	22
Figure.II.6. Bilan des forces agissantes sur un profil.....	24
Figure.II.7. Discrétisation de la pale en éléments $dr$ .....	26

### **Chapitre 03**

Figure.III.1. Organigramme de calcul.....	33
Figure.III.2. Courbe caractéristique de puissance de la turbine NRELL.....	34

## *Liste des tableaux*

### **Chapitre I**

Tableau I.1. Classification des turbines éoliennes.....	07
---	----

### **Chapitre III**

Tableau III.1. Conditions d'opération de la turbine NREL.....	29
---	----

Tableau III.2. Géométrie de la turbine NREL.....	29
--	----

Tableau III.3. Valeurs du facteur d'inductions axiales correspondantes.....	30
---	----

Tableau III.4. Les données aérodynamiques de la turbine NREL.....	31
---	----

## **Sommaire**

Introduction générale

### **Chapitre I : Turbine éolienne**

Introduction .....	01
I.1. Histoire, généralités .....	01
I.2. Turbine éolienne .....	02
I.3. Le vent .....	02
I.4. Utilisateur du vent .....	03
I.5. Énergie éolienne .....	03
I.6. Application des éoliennes .....	04
I.6.1. Systèmes Isolés .....	04
I.6.2. Systèmes Hybrides .....	04
I.6.3. Systèmes Liés au Réseau .....	05
I.7. Conversion de l'énergie éolienne .....	05
I.7.1. Éoliennes à vitesse fixe .....	06
I.7.2. Éoliennes à vitesse variable .....	06
I.8. Types d'éoliennes .....	07
I.8.1. Les raisons pour choisir une grande éolienne .....	07
I.8.2. Les raisons pour choisir une éolienne plus petite .....	07
I.9. Eolienne à axe vertical et axe horizontal.....	08
I.9.1. Éolienne à axe vertical .....	08
I.9.2. Éolienne à axe horizontal .....	09
I.10. Composants d'une éolienne moderne .....	11
I.11. Régulation mécanique de la puissance d'une éolienne .....	12
I.11.1 Système Pitch control .....	13
I.12. Système de régulation de la vitesse de rotation de l'aérogénérateur .....	13
I.12. 1 Système par décrochage aérodynamique .....	14
I.12.2. Système par orientation des pales .....	14

I.12.3 Système par effacement total ou partiel du rotor .....	15
---	----

## ***Chapitre II : Couples des forces aérodynamiques d'une éolienne***

Introduction .....	16
II.1. Données aérodynamiques .....	17
II.1.1. Puissance dynamique de l'air $P_a$ .....	17
II.2. Forces aérodynamiques appliquées $F$ sur un profil aérodynamique .....	18
II.2.1. Profils aérodynamiques .....	19
II.2.2. La portance et la traînée .....	19
II.3. Aérodynamique d'une éolienne à axe horizontal .....	20
II.3.1. Vitesses agissantes .....	20
II.4. Théories de quantité de mouvement et de l'élément de pale .....	22
II.4.1. Théorie de quantité de mouvement .....	22
II.4.2. Théorie de l'élément de pale .....	23
II.2.3 Méthode BEM .....	25
II.2.4. Calcul de la puissance .....	26

## ***Chapitre III : Courbe de puissance***

Introduction.....	28
III.1. La turbine NREL.....	28
III.1.1. Calcul du facteur d'induction axiale correspond.....	30
III.1.2. Modélisation des coefficients de portance et de traînée .....	31
III.2. Organigramme du code de calcul de la puissance.....	32
III.3. Puissance d'une turbine éolienne .....	33
Conclusion générale .....	35
Bibliographie.....	36

## ***Introduction générale***

Le travail présenté dans ce projet de fin d'étude, est une évaluation de la puissance produite d'une éolienne à axe horizontal en utilisant les données aérodynamiques et géométriques de la turbine NREL.

Le travail effectué dans ce mémoire est structuré de la façon suivante :

- Le premier chapitre : est une rétrospective générale des éoliennes ; historique, définition, différents types et principe de fonctionnement de l'aérogénérateur.
- Le deuxième chapitre : est porté sur l'étude aérodynamique des profils de la pale, nous a permis à déterminer les paramètres aérodynamiques donnant la poussée exercée sur le profil, d'une pale, ainsi que, le et développement des équations définissant de ces paramètres
- Le troisième chapitre : est une application directe de la méthode de l'élément de pale dans u programme informatique pour calculer la puissance correspondante à la vitesse du vert

# ***Chapitre 1***

## ***Turbine éolienne***

### **Introduction**

Le développement et l'exploitation des énergies renouvelables a connu une forte croissance ces dernières années. Parmi ces sources d'énergies, les générateurs éoliens occupent une place particulière. En effet d'une part, l'énergie éolienne est appelée à se développer fortement dans de nombreuses régions, et d'autre part, cette énergie très fluctuante, du fait d'importantes variations de la vitesse du vent, peut affecter significativement la qualité de la tension et du courant dans le réseau où elle est injectée.

### **I.1. Histoire, généralités**

Depuis longtemps, les hommes ont compris l'intérêt de l'utilisation du vent. C'est ainsi que cette source d'énergie renouvelable a été utilisée à divers usages. La première utilisation connue remonte à l'antiquité avec les galères, qui sont des bateaux à voile. Plus tard, vers l'an 600, on a commencé à utiliser des moulins à vent, qui produisent de l'énergie mécanique à partir du vent. Les moulins à vent sont les ancêtres des éoliennes modernes servent à produire de l'énergie électrique.

Les premières éoliennes étaient utilisées dans des endroits reculés et non-connectés à un réseau électrique. L'énergie ne pouvait pas être stockée, et par conséquent sans vent il n'y avait plus d'électricité. Mais le développement de maîtrises du stockage d'énergie par batteries a permis une utilisation plus étendue et plus performante des

éoliennes. De plus, depuis les années 1990, des recherches ont rendu possible la création de puissants aérogénérateurs de plus de 1 MW.

Aujourd'hui les éoliennes sont utilisées dans plusieurs pays du monde et servent à produire du courant électrique alternatif, comme les centrales nucléaires, les barrages hydro-électriques... cependant, les éoliennes produisent seulement 1% de la production de l'électricité dans le monde.

## I.2. Turbine éolienne

Une éolienne est une machine qui transforme l'énergie cinétique du vent (énergie éolienne) en électricité (Fig. I.1). On peut également parler d'aérogénérateur. Le lieu où plusieurs éoliennes sont rassemblées est appelé parc ou ferme éolienne.



Fig. I.1 Turbine éolienne

## I.3. Le vent

Le vent est un mouvement d'une masse d'air qui se trouve à la surface de n'importe quelle planète disposant d'une atmosphère. Ces mouvements de masses d'air sont provoqués par deux phénomènes se produisant simultanément un réchauffement inégalement réparti de la surface de la planète par l'énergie solaire et la rotation de la planète.

---

Les vents sont généralement classifiés selon leur ampleur spatiale, leur vitesse, leur localisation géographique, le type de force qui les génère et leurs effets. La vitesse du vent est mesurée avec un anémomètre mais peut être estimée par une manche à air, un drapeau, etc.

Les vents sont généralement classifiés selon leur ampleur spatiale, leur vitesse (ex : échelle de Beaufort), leur localisation géographique, le type de force qui les produit et leurs effets. La vitesse du vent est mesurée avec un anémomètre mais peut être estimée par une manche à air, un drapeau, etc. Les vents les plus violents actuellement connus ont lieu sur Neptune et sur Saturne.

Le vent est l'acteur principal de l'oxygénation des océans ainsi que des lacs de haute montagne, par agitation et mise en mouvement de leurs surfaces. Il permet le déplacement de nombreux agents organiques et minéraux et d'expliquer la formation de certaines roches sédimentaires. Il influence le déplacement des populations d'insectes volants, la migration des oiseaux, il façonne la forme des plantes et participe à la reproduction de certains végétaux. L'érosion éolienne participe parfois à la morphologie du relief local (ex : congère de neige, dunes).

#### **I.4. Utilisation du vent**

Les vents sont une source d'énergie renouvelable, et ont été utilisés par l'Homme à travers les siècles à divers usages, comme les moulins à vent, la navigation à voile ou plus simplement le séchage. Différents sports utilisent le vent dont le char à voile, le cerf-volant, le vol à voile, la planche à voile et le kitesurf. Il sert également à aérer, assainir, rafraîchir les milieux urbains et les bâtiments. Le vent est une de nos plus anciennes sources d'énergie et une grande partie de toutes nos productions tire parti du vent ou lui est adapté. Aujourd'hui encore, il est un intense sujet de recherche car son potentiel d'utilisation demeure encore largement inutilisé tant via des éoliennes que des systèmes de pompe à chaleur ou pour assainir l'air urbain par une urbanisation raisonnée des villes en tenant compte du vent.

#### **I.5. Énergie éolienne**

L'énergie éolienne est l'énergie du vent, dont la force motrice (énergie cinétique) est utilisée dans le déplacement de voiliers et autres véhicules ou transformée au moyen

---

d'un dispositif aérogénérateur, comme une éolienne ou un moulin à vent, en une énergie diversement utilisable. L'énergie éolienne est une énergie renouvelable.

L'énergie éolienne est une source d'énergie intermittente qui n'est pas produite à la demande, mais selon les conditions météorologiques ; elle nécessite donc des installations de production ou de stockage en remplacement pendant ses périodes d'indisponibilité. Celles-ci peuvent être prévues avec une assez bonne précision.

La part de l'éolien dans la production mondiale d'électricité atteignait 5,3 % en 2019 et est estimée à 5,9 % en 2020. Les principaux pays producteurs sont la chine (29,6 % du total mondial en 2020), les États-Unis (21,5 %) et l'Allemagne (8,2 %).

## **I.6. Application des éoliennes**

Un système éolien peut être utilisé en trois applications distinctes :

- Systèmes isolés
- Systèmes hybrides
- Systèmes reliés au réseau

### **I.6.1. Systèmes Isolés**

L'énergie éolienne est aussi utilisée pour fournir de l'énergie à des sites isolés, par exemple pour produire de l'électricité dans les îles, pour le pompage de l'eau dans des champs, ou encore pour alimenter en électricité des voiliers, des phares et des balises.

Les systèmes isolés en général utilisent quelques formes de stockage d'énergie. Ce stockage peut être fait par des batteries : il faut alors un dispositif pour contrôler la charge et la décharge de la batterie. Le contrôleur de charge a comme principal objectif d'éviter qu'il y ait des dommages au système de batterie par des surcharges ou décharges profondes. Pour l'alimentation d'équipement qui opère avec un réseau alternatif, il est nécessaire d'utiliser un onduleur.

### **I.6.2. Systèmes Hybrides**

Les systèmes hybrides sont ceux qui présentent plus d'une source d'énergie comme par exemple, turbines éoliennes, génératrice Diesel, modules photovoltaïques, entre autres. L'utilisation de plusieurs formes de génération d'énergie électrique augmente la complexité du système et exige l'optimisation de l'utilisation de chacune des

sources. Dans ces systèmes, il faut réaliser un contrôle de toutes les sources pour maximiser la livraison de l'énergie à l'utilisateur, [16].

### I.6.3. Systèmes Liés au Réseau

Plus de 95% de la capacité mondiale d'énergie éolienne est raccordée à des grands réseaux de puissance [17]. Ceci s'explique par les nombreux avantages du fonctionnement des centrales éoliennes sur les réseaux :

- La puissance des turbines éoliennes ne doit pas être nécessairement commandée en fonction de la demande instantanée d'un client spécifique,
- Le manque de puissance délivrée par les éoliennes est compensé par les centrales conventionnelles, ainsi le fonctionnement des turbines éoliennes connectées aux réseaux est techniquement moins complexe que son application individuelle isolée.

### I.7. Conversion de l'énergie éolienne

Une éolienne est une machine permettant de transformer l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, elle-même convertie en électricité. Lorsque plusieurs éoliennes sont installées sur un même site, on parle de parc ou de ferme d'éoliennes. (Fig. I.2)

Dans cette section, la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique sera présentée. Les technologies d'éoliennes les plus couramment utilisées seront ensuite discutées en se focalisant sur celles utilisant la machine synchrone à aimants permanents.

Selon le mode de fonctionnement, il existe essentiellement deux technologies d'éoliennes, celles à vitesse fixe et l'autre à vitesse variable. La partie suivante décrit le fonctionnement de ces deux technologies et les différentes structures.

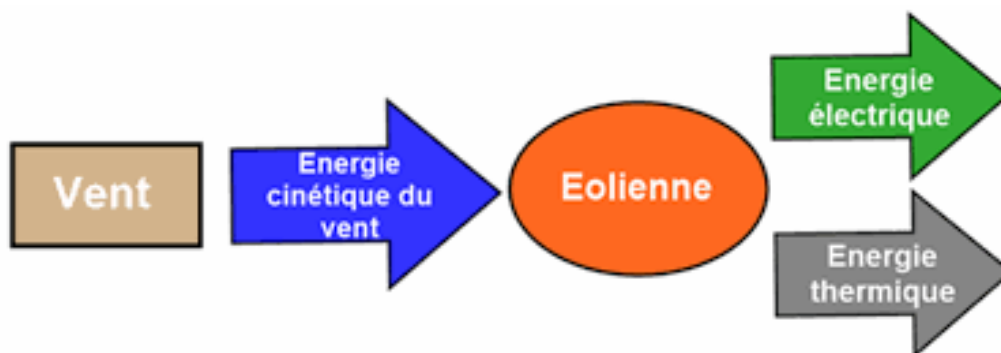


Fig. I.2 Conversion de l'énergie éolienne

### I.7.1. Éoliennes à vitesse fixe

Les éoliennes à vitesse fixe sont les premières à avoir été développées. Dans cette technologie, le générateur (généralement une machine asynchrone à cage d'écureuil) est directement couplé au réseau sans dispositif d'électronique de puissance, ce qui rend ce système simple et ayant un faible coût. Cependant, ces éoliennes sont souvent associées à une batterie de condensateurs de compensation de la puissance réactive et un multiplicateur de vitesse. La vitesse mécanique est imposée par la fréquence du réseau et par le nombre de paires de pôles du générateur, (Fig. I.3)

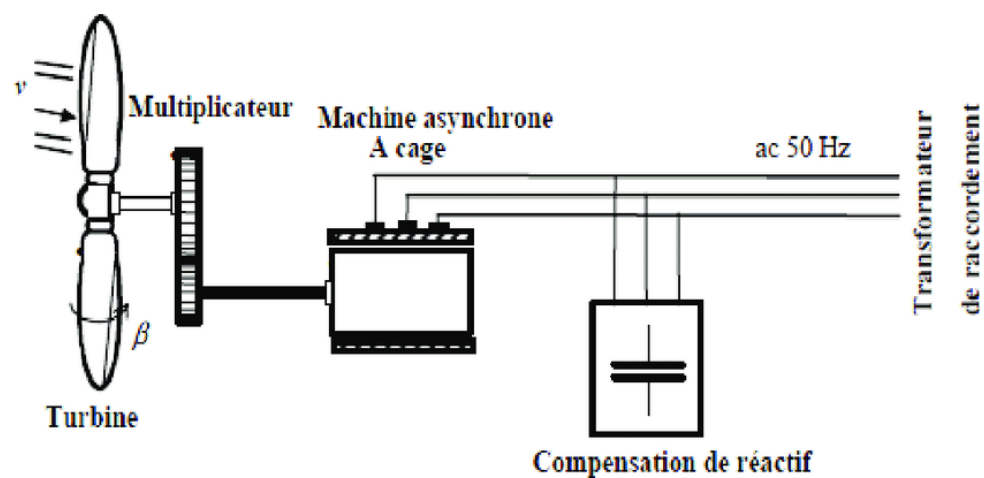


Fig. I.3 éolienne à vitesse fixe à base de la machine asynchrone

### I.7.2. Éoliennes à vitesse variable

Le fonctionnement à vitesse variable des éoliennes est devenu possible grâce au développement des convertisseurs statiques et de leurs dispositifs de commande. (Fig. I.4), représente la caractéristique générale de la puissance convertie par une turbine éolienne en fonction de sa vitesse.

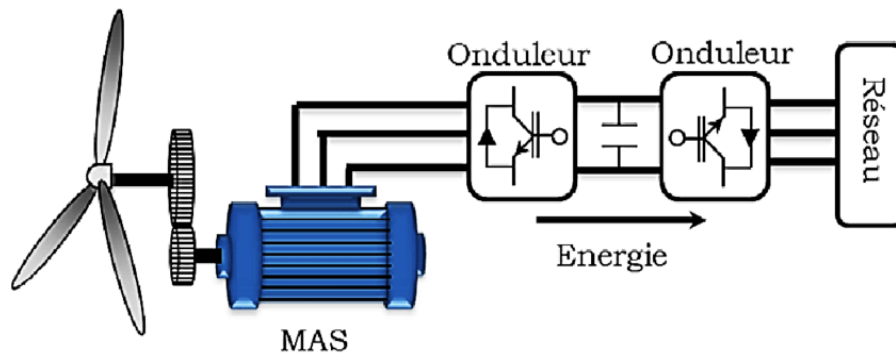


Fig. I.4 éolienne à vitesse variable à base MAS

## I.8. Types d'éoliennes

Les solutions techniques permettant de recueillir l'énergie du vent sont très variées. Le tableau I.1 présente une classification des turbines éoliennes.

Tableau I.1 Classification des turbines éoliennes

Echelle	Diamètre de l'hélice	Puissance délivrée
Petite	Moins de 12 m	Moins de 40 KW
Moyenne	12 m à 45 m	De 40 KW à 1 MW
Grande	46 m et plus	1 MW et plus

### I.8.1. Les raisons pour choisir une grande éolienne

- le principe des économies d'échelle vaut évidemment également pour les éoliennes. Ainsi une grande éolienne produit normalement de l'électricité à un moindre coût qu'une petite. La raison pour cela est que les coûts de fondations, de construction, de raccordement au réseau et d'autres composants de l'éolienne (le système contrôle-commande) sont plus ou moins les mêmes, quel que soit la taille de l'éolienne.

- Les grandes éoliennes sont particulièrement appropriées à l'installation en mer. Le coût des fondations n'augmente pas proportionnellement avec la taille de l'éolienne, et les coûts d'entretien sont dans une large mesure indépendante de la taille.

### I.8.2. Les raisons pour choisir une éolienne plus petite

- La production d'électricité est moins fluctuante dans un parc éolien composé de plusieurs petites éoliennes, étant donné que les variations du vent sont aléatoires,

ayant donc tendance à s'annuler. Et en plus, comme déjà mentionné, le choix d'éoliennes plutôt petites peut se révéler avantageux dans un réseau électrique faible.

- Les couts liés à l'usage de très grandes grues et à la construction de chemins suffisamment robustes pour supporter le transport des composants de l'éolienne constituent un autre facteur qui, dans certains endroits, rend plus économique le choix de petites éoliennes.

- Il arrive que le réseau électrique local soit trop faible pour supporter la production électrique d'une grande éolienne.

C'est souvent le cas dans les parties les plus extérieures du réseau ou la densité de la population et les besoins en électricité est très basse. Avec plusieurs éoliennes d'une moindre puissance, on assure la répartition du risque en cas de défaillance temporaire d'une éolienne

On distingue aussi le « grand éolien » qui concerne les machines de plus de 250 KW, de l'éolien de moyenne puissance (entre 36 KW et 250 KW) et du petit éolien (inférieur à 36 KW)

## **I.9. Eolienne à axe vertical et à axe horizontale**

Il existe deux grandes familles d'éolienne selon l'axe de rotation.

### **I.9.1. Éolienne à axe vertical**

Les éoliennes à axe vertical (Fig. I.5) ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité paradoxalement en contradiction avec le traditionnel moulin à vent à axe horizontal. Elle possède l'avantage d'avoir les organes de commande et le générateur au niveau du sol donc facilement accessibles et s'agit d'une maison moderne et dont les avantages sont : faible impact visuel, pratiquement pas de bruit et très grande tolérance aux vents forts.

Il existe des systèmes grâce auxquels les ailes se décalent plus ou moins pour augmenter l'étendue des vitesses d'action. Si la vitesse du vent est basse, les ailes sont complètement déployées, si la vitesse est trop forte, les ailes sont complètement fermées et l'éolienne forme un cylindre.

Même si quelques grands projets industriels ont été réalisés, les éoliennes à axe vertical restent toutefois marginales et peu utilisées voire actuellement abandonnées. Selon les avantages théoriques d'une machine à axe vertical sont les suivantes :

- ✓ Elle vous permet de placer la génératrice, le multiplicateur, à terre et vous n'avez pas besoin de munir la machine d'une tour.
- ✓ Un mécanisme d'orientation n'est pas nécessaire pour orienter le rotor dans la direction du vent.

Les inconvénients principaux sont les suivants :

- ✓ L'efficacité globale des éoliennes à axe vertical n'est pas impressionnante.
- ✓ L'éolienne ne démarre pas automatiquement. Cependant, ceci ne constitue qu'un inconvénient mineur dans le cas d'une éolienne raccordée au réseau, étant donné qu'il est alors possible d'utiliser la génératrice comme un moteur absorbant du courant du réseau pour démarrer l'éolienne.

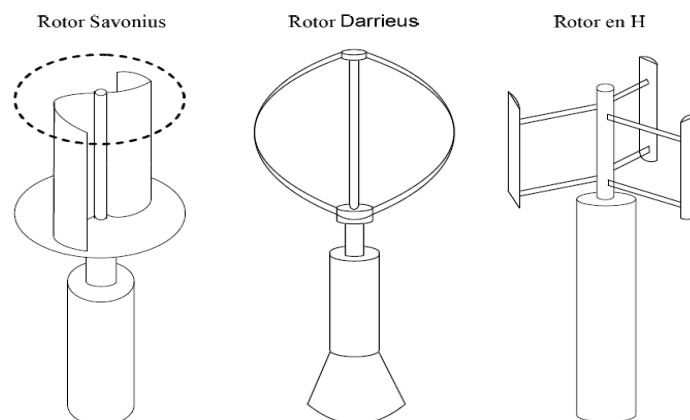


Fig. I.5 Eolienne à axe vertical

### I.9.2. Éolienne à axe horizontal

Les éoliennes axe horizontal (Fig. I.6) sont basées sur la technologie ancestrale des moulins à vent. Elles sont constituées de plusieurs pales profilées aérodynamiquement à la manière des ailes d'avion. Dans ce cas, la portance n'est pas utilisée pour maintenir un avion en vol mais pour générer un couple moteur entraînant la rotation. Le nombre de pales utilisé pour la production d'électricité varie classiquement entre 1 et 3, le rotor tripale étant le plus utilisé pour la production compromise entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien.

Ce type d'éolienne a pris le dessus sur celles à axe vertical car elles représentent un coût moins important, elles sont moins exposées aux contraintes mécaniques et la position du récepteur à plusieurs dizaines de mètres du sol privilégie l'efficacité. Notons cependant que certains travaux défendent la viabilité du rotor vertical et réalisant des études multicritères. Les concepts abordés dans la suite de cette étude se limiteront uniquement au cas des éoliennes à axe horizontal.

Aujourd'hui, pratiquement les seules éoliennes commerciales sont à axe horizontales. Les plus grandes éoliennes mesurent jusqu'à 180 m en bout de pale avec un moyeu à 120 m pour une puissance de 6 MW. Les éoliennes à axe vertical ont été prometteuses dans les années 80 et au début des années 90, mais leur faible rendement aérodynamique ainsi que les fluctuations élevées de la puissance électrique générée les ont écartées du marché.

Dans ce contexte, quelques notions principales au sujet de la technologie éolienne ont été données comme les méthodes de description du gisement éolien, des exemples d'architectures, les génératrices utilisées, etc. Nos travaux portent sur un système éolien de petite puissance dédié à un site perturbé comme le milieu urbain, des exemples de réalisations pratique et industrielle de cette catégorie sont proposés. La turbine à axe vertical de type savonreuse qui semble être particulièrement adaptée est alors étudiée du point de vue de son rendement en collaboration avec l'institut de mécanique des fluides de Toulouse donnant des indices sur les différents perfectionnements du rendement possibles.

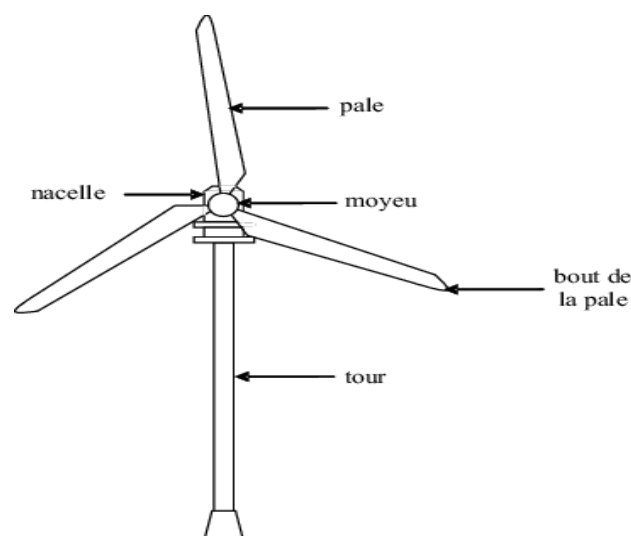


Fig. I.6 Schéma d'une éolienne à axe horizontal

## I.10. Composants d'une éolienne moderne

Il existe plusieurs configurations possibles d'aérogénérateurs qui peuvent avoir des différences importantes. Néanmoins, une éolienne moderne à axe horizontal est la plus répandue dans les installations éoliennes, elle est généralement constituée des composants suivants (Fig. I.7) :

- **Le rotor** : partie rotative de l'éolienne placée en hauteur afin de capter des vents forts et réguliers. Il est composé de pales (en général 3) en matériau composite qui sont mises en mouvement par l'énergie cinétique du vent. Reliées par un moyeu, ces dernières peuvent en moyenne mesurer chacune 25 à 60 m de long et tourner à une vitesse de 5 à 25 tours minute.
- **La nacelle** : structure soutenue par le mât abritant les différents éléments mécaniques. On distingue les éoliennes à entraînement direct de celles équipées de train d'engrenages (multiplicateur/réducteur) selon le type d'alternateur utilisé. Les alternateurs classiques requièrent une adaptation de la vitesse de rotation par rapport au mouvement initial du rotor.
- **La tour ou le mât d'une éolienne** : composée du mât, du système de commande électrique et du transformateur. Généralement de forme conique, le mât supporte la nacelle. Il mesure entre 50 et 130 m de haut et a un diamètre à son pied compris entre 4 et 7 m. Une ouverture en bas du mât permet d'accéder aux différents équipements de l'éolienne parmi lesquels le transformateur qui permet d'augmenter la tension de l'électricité produite afin de l'injecter sur le réseau.
- **La base** : souvent circulaire et en béton armé dans le cas des éoliennes terrestres, qui permet de maintenir la structure globale.
- **La partie électrique d'une éolienne** : dans les éoliennes destinées à produire de l'électricité, l'hélice fait tourner un générateur électrique situé en haut de la tour, dans le prolongement de l'axe de l'hélice de l'éolienne. Entre l'hélice et le générateur électrique de l'éolienne se trouve en général un multiplicateur de vitesse, car l'hélice de l'éolienne tourne à des vitesses d'environ 100 à 650 tours/min alors qu'un générateur électrique doit être entraîné à environ 1500 à 3000 tours/min.

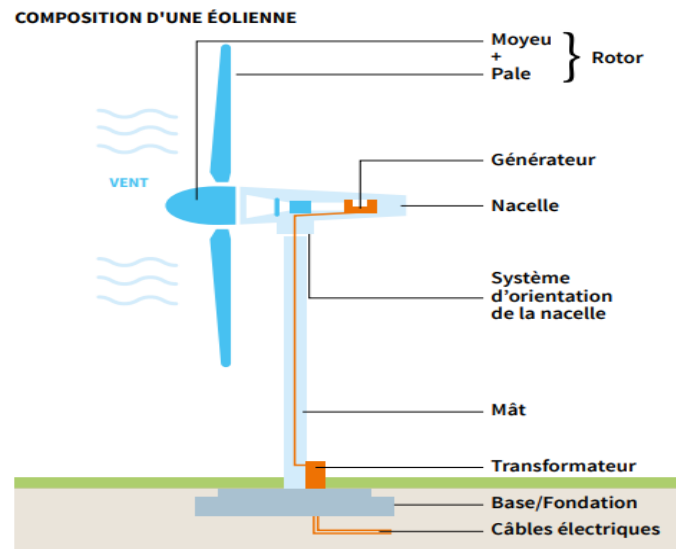


Fig. I.7 Composants d'une éolienne moderne

### I.11. Régulation mécanique de la puissance d'une éolienne

L'objectif de cette régulation est double, d'une part de protéger l'éolienne contre le vent fort et d'autre part de délimiter la puissance. En effet, la turbine éolienne est dimensionnée pour fournir une puissance nominale  $P_n$  à une vitesse de vent nominale  $V_n$  au-delà de cette vitesse, les paramètres de la turbine doivent évoluer afin de fournir la puissance nominale et de ne pas produire au-delà d'une vitesse maximale  $V_{\max}$  qui pourrait endommager la turbine. La caractéristique Puissance-vitesse d'une éolienne peut se décomposer en quatre zones (Fig. I.8) :  $P_n$ ,  $V_{\max}$ ,  $V$

**Zone 1** : C'est la zone de démarrage de la machine, la puissance électrique est assez faible et la vitesse mécanique atteint presque 70% du synchronisme

**Zone 2** : Lorsque la vitesse de la génératrice atteint une valeur seuil, un algorithme de commande permettant l'extraction de la puissance maximale du vent est appliqué. Pour extraire le maximum de la puissance, l'angle de la pale est maintenu constant à sa valeur minimale, c'est à dire.  $\beta=2^\circ$

**Zone 3** : Au-delà, l'éolienne fonctionne à vitesse constante. Dans cette zone, la puissance de la génératrice atteint des valeurs plus importantes, jusqu'à 90% de la puissance nominale.

**Zone 4** : Arrivée à la puissance nominale  $P_{nom}$ , une limitation de la puissance générée est effectuée à l'aide d'un système d'orientation des pales : pitch control [38][39]. Pour

contrôler la puissance aérodynamique capturée et la limiter lorsque la vitesse du vent est très élevée, on peut utiliser l'une des deux techniques de contrôle connues surtout dans les grandes turbines sous les noms de "Pitch Control" et "Stall Control".

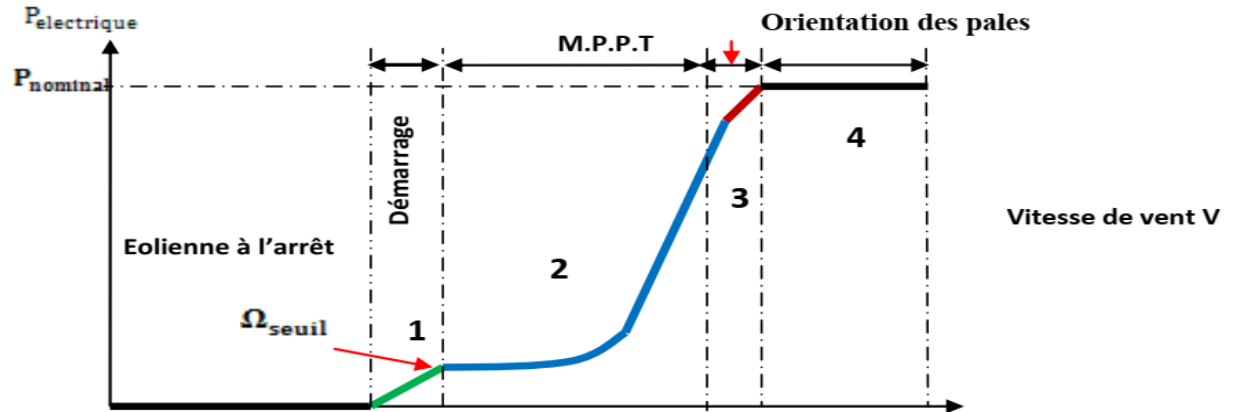


Fig. I.8 Caractéristique puissance vitesse typique d'une éolienne de grande puissance

### I.11.1. Le Pitch Control

Le système d'orientation des pales sert essentiellement à contrôler la puissance mécanique générée par la turbine pour les faibles et fortes vitesses du vent. Pour un tel système, la pale est tournée par un dispositif de commande appelé (pitch control). C'est un contrôle par variation de l'angle de calage des pales (pas des pales) autour de leur axe longitudinal en fonction de la vitesse du vent et de la puissance active à extraire. En agissant par le Pitch Control, le coefficient de puissance ne varie plus en fonction de la vitesse du vent à vitesse de rotation constante, ce qui va permettre de maintenir la puissance constante dans la zone 4 à sa valeur maximale. On peut noter que pour modifier l'angle de calage dans le Pitch Control dans un système de régulation automatique de vitesse de rotation on a besoin d'un régulateur électronique avec des masselottes centrifuges ou d'un régulateur électronique[40].

### I.12. Système de régulation de la vitesse de rotation de l'aérogénérateur

On régule la vitesse de rotation de l'éolienne pour deux raisons principales

- Diminuer les contraintes mécaniques imposées sur la turbine et éviter sa destruction, lors de sa rotation pour des vitesses du vent plus élevées.
- Maintenir une puissance constante, du fait que la majorité des aérogénérateurs sont connectés au réseau électrique et nécessitent une vitesse de rotation constante, pour la cohérence de fréquence avec le réseau.

Les systèmes de régulation de vitesse, peuvent être agités de façons différentes et plus ou moins fines avec un degré d'automatisation nul ou intégral.

### I.12.1. Système par décrochage aérodynamique

C'est le système le plus simple et le moins coûteux, il utilise le phénomène de décrochage aérodynamique. Par l'augmentation de l'angle d'attaque ou incidence à des vitesses du vent, qui dépassent les valeurs nominales. La traînée augmente considérablement alors que la portance diminue, par conséquent le profil de la pale n'est plus optimal, ce qui entraîne une turbulence à la surface de la pale et une baisse du coefficient de puissance, par la suite une décroissance du couple capté par chacune des pales. Ceci empêche alors une augmentation de la vitesse de rotation, et maintient la puissance produite à une valeur constante. Ce qui permet une adéquation avec le réseau électrique existant. Ce mode de régulation charge l'aérogénérateur de forces de fatigues supplémentaires (Fig. I.9)

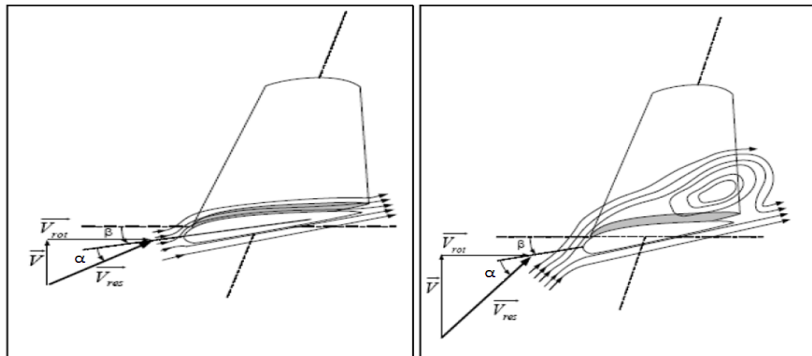


Fig. I.19 Système par décrochage aérodynamique

### I.12.2. Système par orientation des pales (Pitch control)

Les pales sont conçues de façon à maintenir une vitesse de rotation constante, à partir d'une vitesse du vent. Ce système permet d'augmenter l'angle de calage  $\beta$ , ce qui diminue l'angle d'incidence et c'est ainsi, le coefficient de puissance diminue également (Fig. I.10)

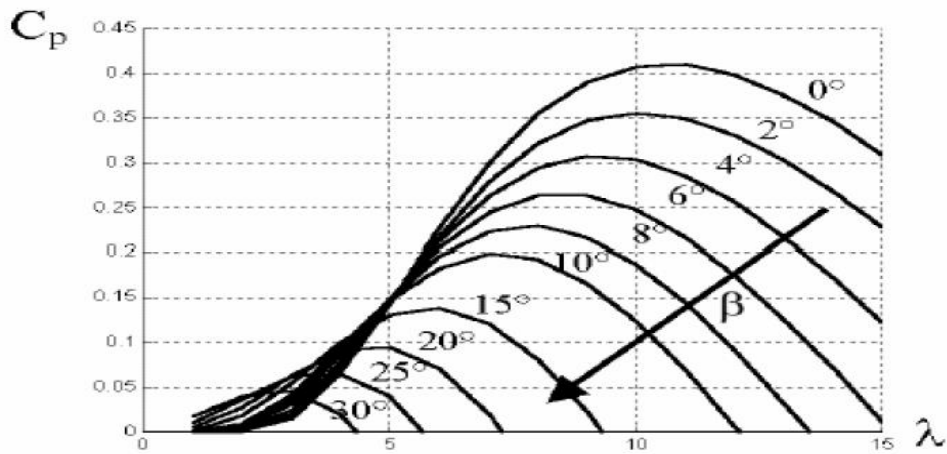


Fig. I.10 Influence de l'angle de calage sur le coefficient de puissance

### I.12.3. Système par effacement total ou partiel du rotor

C'est la diminution de la surface affectée par le vent, alors la masse d'air traversant la surface frontale de la turbine, diminue également. Le rotor est pivoté avec un système (Fig. I.11)

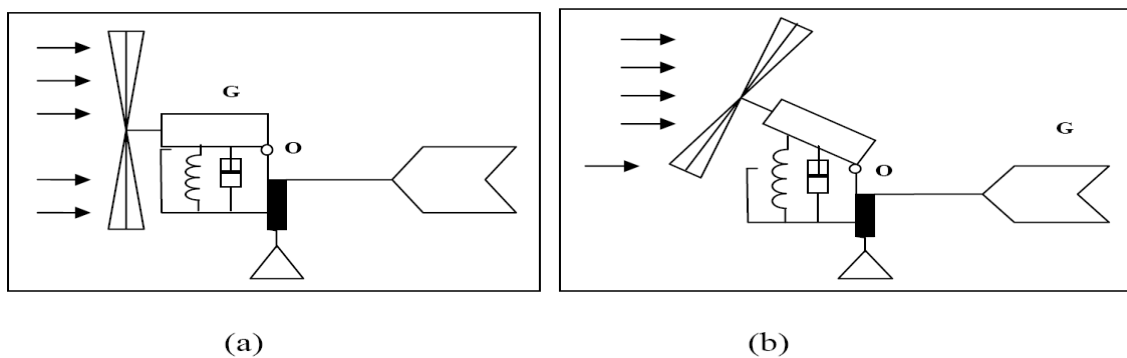


Fig. I.11 Système par effacement du rotor

## ***Chapitre 2***

# ***Couples des forces aérodynamiques d'une éolienne***

### **Introduction**

La conception d'une éolienne repose essentiellement sur la modélisation aérodynamique ; puisque cette machine utilise des pales caractérisées par une géométrie spéciale. Le dimensionnement de cette forme géométrique a un grand impact sur son rendement énergétique et par conséquent sur sa rentabilité économique. Pour les petites éoliennes, où le coût du kilowatt reste encore élevé et le site d'implantation est généralement imposé, la modélisation aérodynamique prend une importance particulière. Cette modélisation a pour objectif de déterminer les paramètres géométriques optimaux de la pale (permettant de capter une puissance maximale), de calculer les efforts aérodynamiques ainsi que la puissance extraite.

Des calculs très poussés doivent être menés dans le but de déterminer ces paramètres à savoir la longueur de la corde entre le bord d'attaque et le bord de fuite, l'angle de vrillage ainsi que l'épaisseur à chaque station de la pale (Fig. II.1).

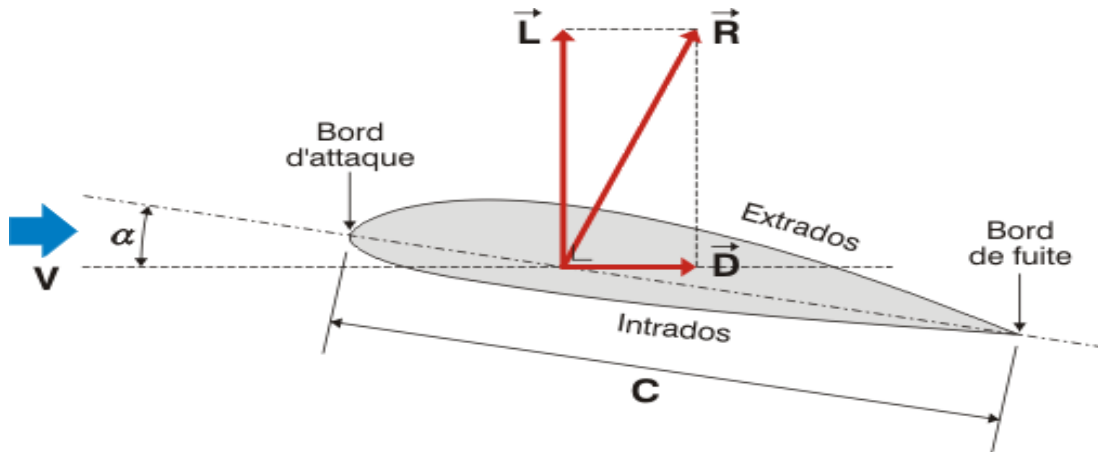


Fig. II.1 Vue de profil d'une pale d'éolienne

## II.1. Données aérodynamiques

L'écoulement du vent avec une vitesse  $V$  à travers une surface donnée  $S$

(Fig. II.1), se traduit par une énergie cinétique de la masse d'air, une différence de pression, des forces agissantes et une puissance dynamique.

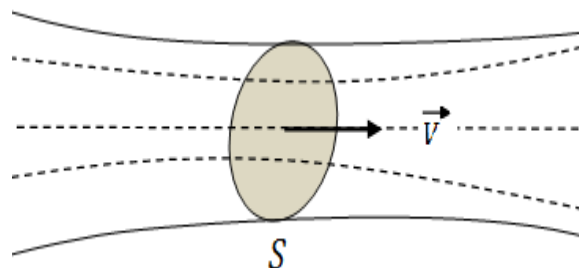


Fig. II.2 Ecoulement du vent

### II.1.1. Puissance dynamique de l'air $P_a$

Tout d'abord considérons l'énergie cinétique du vent,  $E_c$ , que l'on sait par définition égale à :

$$E_c = \frac{1}{2} \times m \times V^2 \quad (II.1)$$

Où  $m$  et  $V$  représentent la masse et la vitesse d'air débitée respectivement.

Durant le temps  $t$ , à travers une surface  $S$  ; de la sorte on peut écrire que :

$$E_c = \frac{1}{2} \times (S \times V \times t \times \rho) V^2 \quad (II.2)$$

$\rho$  étant la masse volumique de l'air. L'vient donc :

$$E_c = \frac{\rho \times s \times T \times V^3}{2} \quad (\text{II.3})$$

On en déduit la valeur de la puissance  $P_a$  prise comme rapport de l'énergie par le temps :

$$P_a = \frac{E_c}{t} \quad (\text{II.4})$$

$$P_a = \frac{\rho \times s \times V^3}{2} \quad (\text{II.5})$$

Pression dynamique  $P_r$  de l'air présente le rapport de force normale exercée  $F$  sur une surface élémentaire uniforme

$$P_r = \frac{F}{S} \quad (\text{II.6})$$

Le travail élémentaire  $dW$  de la force  $F$  est :

$$dW = F \times dL \quad (\text{II.7})$$

Il peut s'écrire aussi

$$dw = p_a \times dt \quad (\text{II.8})$$

On peut donc écrire

$$F = P_r \times S = \frac{dw}{dl} = \frac{P_a \times dt}{dl} \quad (\text{II.9})$$

On en déduit :

$$p_r = \frac{p_a \times dt}{S \times dl} = \frac{P_a}{S \times V} \quad (\text{II.10})$$

D'où, l'expression de la pression dynamique

$$p_r = \frac{1}{2} \rho v^2 \quad (\text{II.11})$$

## II.2. Forces aérodynamiques appliquées $F$ sur un profil aérodynamique

La force aérodynamique exercée sur un corps solide quelconque est le produit de la pression dynamique par la surface, affecté d'un coefficient de forme  $k$  dépendant du la

forme géométrique de l'obstacle.

$$F = K \times P_r \times S = \frac{1}{2} K \times \rho \times S \times V^2 \quad (\text{II.12})$$

### II.2.1. Profils aérodynamiques

En général, La force aérodynamique appliquée sur un profil dépend de la géométrie de ce dernier et la vitesse de l'écoulement, cette force peut être décomposée en deux forces (Fig. II.3).

- Force résistante de traînée  $T$  (Drag), de sens opposé au déplacement du profil
- Force de portance  $P$  (Lift), normale au déplacement du profil.

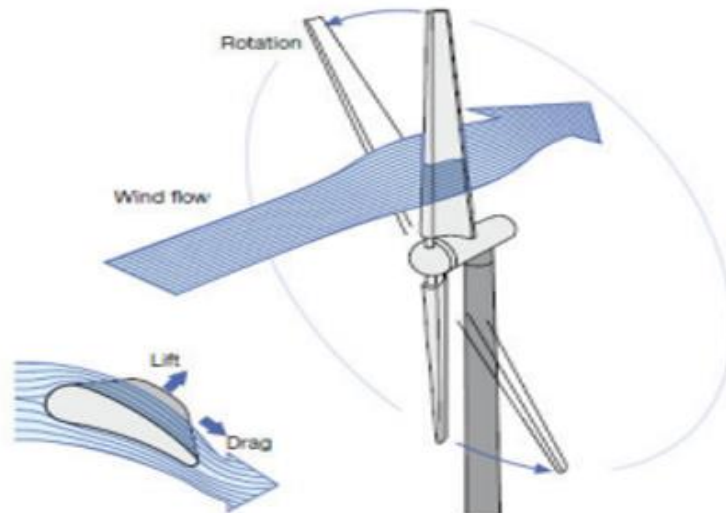


Fig. II.3 Traînée et portance dans une éolienne

### II.2.2. La portance et la traînée

Pour un profil d'une pale d'une éolienne à axe horizontal, la corde est une ligne passant par le centre de poussée  $C$  ou s'applique la résultante  $R$  de l'action du vent. On peut aussi définir autrement la corde, comme le segment joignant dans la section d'un profil les points les plus éloignés des bords d'attaque et de fuite. L'angle de la corde et de vent incident est dit angle d'incidence  $i$  (Fig. II.1). Le point d'application de la résultante aérodynamique  $R$  est situé environ au  $\frac{1}{4}$  avant de la corde en régime subsonique. Les composantes de portance et de traînée de la Force aérodynamique s'expriment à l'aide

des coefficients de portance et de traînée  $c_z$  et  $c_x$  respectivement :

- La force de portance  $F_p$

$$F_p = c_z \times \frac{1}{2} \times \rho \times V^2 \times S \quad (\text{II.13})$$

- La force de traînée  $F_T$

$$F_T = c_x \times \frac{1}{2} \times \rho \times V^2 \times S \quad (\text{II.14})$$

### II.3. Aérodynamique d'une éolienne à axe horizontal

Pour une turbine à axe horizontal, la modélisation des performances de l'éolienne est basée sur le modèle de tube de Betz. La puissance développée d'une seule turbine est basée sur la poussée que subissent les pales de cette dernière. Quant à la vitesse de l'écoulement du vent, elle se présente comme la principale génératrice des forces aérodynamiques sur le profil de l'éolienne qui sera entraîné en une vitesse de rotation, ensuite, la rotation de la génératrice dans la nacelle et la génération d'un courant électrique. Il est noté que quel que soit l'approche adoptée, il est très important d'admettre que l'écoulement du vent est incompressible.

#### II.3.1. Vitesses agissantes

Les pales sont les éléments principaux de capture de l'énergie cinétique du vent dans la turbine éolienne, ils ont souvent des sections de formes aérodynamiques, pour convertir efficacement l'énergie cinétique du vent en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice. La vitesse du vent varie tout au long de la pale, elle est plus importante en bout qu'au centre de celle-ci. Pour que la pale fonctionne dans des conditions similaires et efficaces, elle est vrillée vers dans leur longueur et s'affine vers l'extérieur.

Ainsi, l'angle d'attaque est plus important en pied de la pale qu'en extrémité. Par l'action du vent à une vitesse  $U_0$  sur les pales profilées, un couple moteur génère la rotation de l'arbre qui entraîne la génératrice.

Sur la (fig.II.4) on présente les vitesses agissantes sur un profil d'une pale en rotation

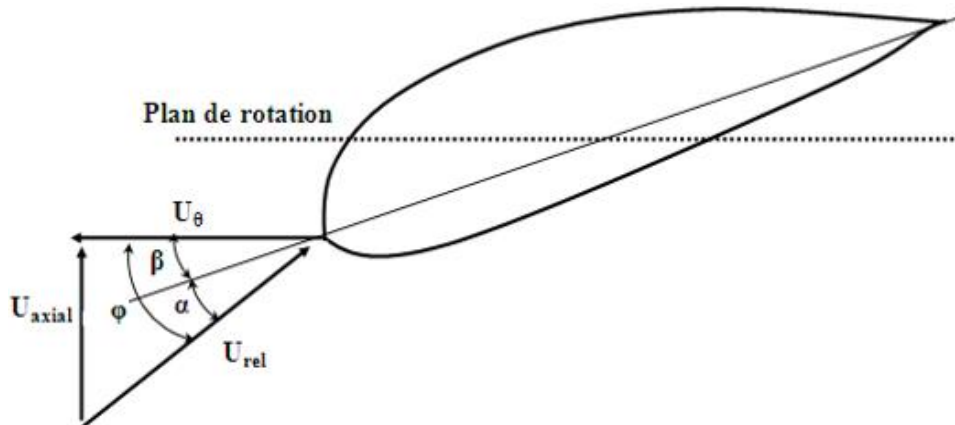


Fig. II.4 Vitesses agissantes sur un profil de pale

$U_{re}$  la vitesse relative du vent déterminée par :

$$U_{rel} = \sqrt{U_{\phi}^2 + U_{axial}^2} \quad (\text{II.15})$$

$U_{axial}$  la vitesse axiale déterminée par :

$$U_{axial} = (1-a)U = U_{rel} \sin \varphi \quad (\text{II.16})$$

Où  $U$  est la vitesse du vent à l'infini amont

$U_n$  la vitesse tangentielle

$$U_{\phi} = (1+a')\Omega r = U_{rel} \cos \varphi \quad (\text{II.17})$$

Ou encore

$$\varphi = \arctan\left(\frac{U_{axial}}{U_{\phi}}\right) = \arctan\left(\frac{(1-a)U}{(1+a')\Omega r}\right) \quad (\text{II.18})$$

Où  $\Omega$  est la vitesse de rotation de l'éolienne. On admet que,  $\omega$  est la vitesse de rotation de l'air en aval de l'éolienne transmise par la rotation des pales.

On introduit alors le facteur du moment angulaire définie par la relation

$$a' = \frac{\omega}{2\Omega} \quad (\text{II.19})$$

D'où l'angle relatif peut se réécrire

$$\varphi = \arctan\left(\frac{1-a}{(1+a')\lambda_r}\right) \quad (\text{II.20})$$

On introduit un nouvel angle de première importance, l'angle de calage  $\beta$  ("pitch angle" en anglais). Il se définit comme étant l'angle entre le plan de rotation et la corde du profil. Contrairement à l'angle d'attaque, il ne dépend pas de conditions de l'écoulement. On définit également l'angle d'attaque  $\alpha$  (angle d'incidence) entre la corde du profil et la direction de la vitesse relative, et l'angle  $\phi$  (angle relatif) entre le plan de rotation et la direction de la vitesse relative.

D'où

$$\varphi = \alpha + \beta \quad (\text{II.21})$$

$$\beta = \theta_0 + \theta_t \quad (\text{II.22})$$

Où  $\theta_0$  et  $\theta_t$  représentent l'angle de calage en bout de pale et le vrillage

## II.4. Théories de quantité de mouvement et de l'élément de pale

### II.4.1. Théorie de quantité de mouvement

Entre l'amont et l'aval de l'éolienne, la vitesse du vent diminue à son passage sur le disque actuateur de section  $A$ , d'où une régénération d'une différence de pression (Fig.II.5) Soit  $\Omega$  la vitesse de rotation de l'éolienne et  $\Omega + \omega$  la vitesse du fluide à l'aval du rotor.

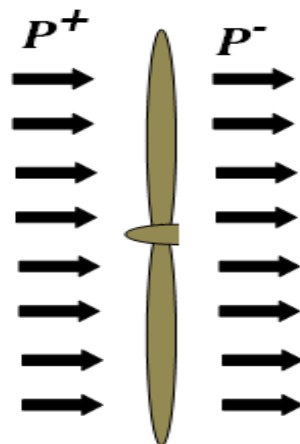


Fig. II.5 Différence de pression entre l'amont et l'aval de l'éolienne

La différence de pression  $\Delta P$  entre l'amont et l'aval proches du disque actuateur de la turbine éolienne est calculée par l'application de l'équation de Bernoulli comme suit:

$$\Delta P = P^+ - P^- = \frac{1}{2} \rho R^2 (\omega + \Omega)^2 - \frac{1}{2} \rho R^2 \omega^2 \quad (\text{II.23})$$

On aussi peut calculer la différence de pression en introduisant le facteur d'induction axiale et on obtient :

$$P^+ - P^- = \frac{1}{2} \rho r^2 \Omega^2 \cdot 4a'(1+a') \quad (\text{II.24})$$

La poussée axiale appliquée à un élément de la surface frontale de l'éolienne

$$dT = (P^+ - P^-) dA \quad (\text{II.25})$$

Avec l'élément de surface

$$dA = 2\pi r dr \quad (\text{II.26})$$

D'où on peut réécrire la poussée sous la forme :

$$dT = 4a'(1+a') \frac{1}{2} \Omega^2 r^2 \pi r dr \quad (\text{II.27})$$

et l'élément du couple  $dC$  appliqué à un élément de surface  $dA$  du disque actuateur de la turbine éolienne peut s'écrire sous la forme suivante :

$$dC = \rho U_{axial} dA \cdot r^2 \omega \quad (\text{II.28})$$

En incluant le facteur d'induction axiale et la vitesse axiale on aura

$$dC = 4a'(1-a) \frac{1}{2} \rho U r \Omega r \cdot 2\pi r dr \quad (\text{II.29})$$

Ces dernières relations ne nous permettent pas d'évaluer les performances de l'éolienne, il faut les combiner à d'autres expressions obtenues par la théorie de l'élément de pale.

#### II.4.2. Théorie de l'élément de pale

Cette théorie est basée sur la subdivision de la pale de l'éolienne suivant l'envergure, en élément de longueur  $dr$ . (fig.II.6) permet de dénombrer les forces aérodynamiques agissantes sur un profil, placé dans un écoulement sous un angle d'attaque  $\alpha$ , d'où on distingue deux types de forces, une force perpendiculaire à la

direction de l'écoulement, appelée la portance  $dF_l$ , et une force parallèle à la direction de l'écoulement, appelée force de traînée.

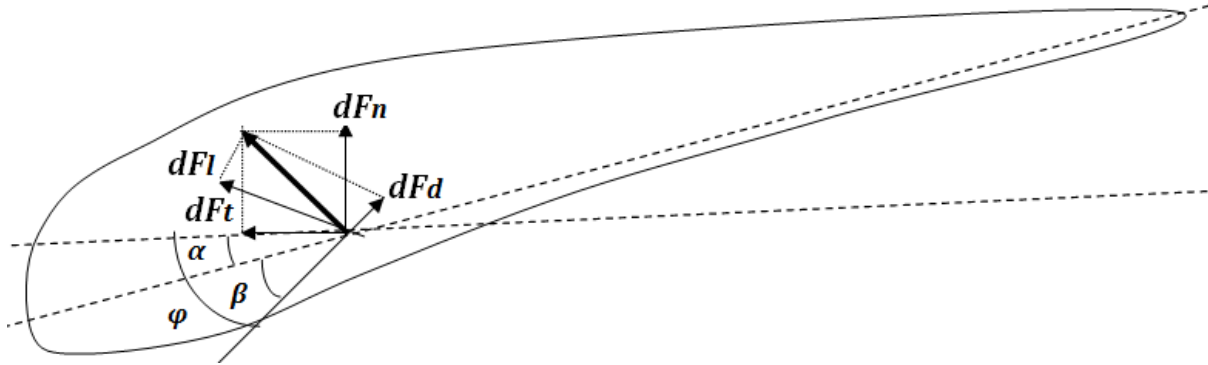


Fig.II.6 Bilan des forces agissantes sur un profil

On définit également pour des fins d'analyse de calcul, une force dans le plan de rotation de la pale dite force tangentielle  $dF_t$ , et une force perpendiculaire au plan de rotation de la pale, dite force normale  $dF_n$ .

Avec l'introduction des paramètres suivants :

- le nombre de pale par éolienne  $B$
- le facteur de solidité  $\sigma$

$$\sigma = \frac{Bc}{2\pi r} \quad (\text{II.30})$$

où  $c$  représente la corde de la pale au rayon  $r$

Les expressions de ces forces exercées sur une aile de corde  $c$  et de longueur  $l$  deviennent :

$$dF_l = \frac{1}{2} \rho U_{rel}^2 C_l c dr \quad (\text{II.31})$$

$$dF_d = \frac{1}{2} \rho U_{rel}^2 C_d c dr \quad (\text{II.32})$$

$$dF_t = dF_l \sin \varphi - dF_d \cos \varphi \quad (\text{II.33})$$

$$dF_n = dF_l \cos \varphi + dF_d \sin \varphi \quad (\text{II.34})$$

$C_l$  et  $C_d$ : les coefficients de portance et de traînée

Les expressions du couple  $C$  et de la poussée  $T$  sur un élément de pale  $dr$

$$dT = dF_l \cos \varphi + dF_d \sin \varphi \quad (\text{II.35})$$

$$dC = dF_L \sin \varphi - dF_d \cos \varphi \quad (\text{II.36})$$

Compte tenu du nombre de pales par éolienne  $B$  on aura

$$dT = B \cdot \frac{1}{2} \rho U_{rel}^2 (C_d \sin \varphi + C_l \cos \varphi) \quad (\text{II.37})$$

$$dC = B \cdot \frac{1}{2} \rho U_{rel}^2 (C_L \sin \varphi - C_d \cos \varphi) \quad (\text{II.38})$$

Autrement dit

$$dT = (1-a)^2 \cdot \frac{\rho C_l \cos \varphi}{\sin^2 \varphi} \left( 1 + \frac{C_d}{C_l} \tan \varphi \right) \cdot \frac{1}{2} \rho U^2 \cdot 2\pi r dr \quad (\text{II.39})$$

$$dC = (1+a')^2 \sigma \frac{C_l \sin \varphi}{\cos^2 \varphi} \left( 1 - \frac{C_d}{C_l} \tan \varphi \right) \frac{1}{2} \sigma r^2 \Omega^2 r^2 2\pi dr \quad (\text{II.40})$$

### II.2.3 Méthode BEM

Par la combinaison des relations (II.53) et (II.54), on obtient

$$\frac{4a}{1-a} = \frac{\rho C_l \cos \varphi}{\sin^2 \varphi} \left( 1 + \frac{C_d}{C_l} \tan \varphi \right) \quad (\text{II.41})$$

Et les relations (II.53) et (II.55) on obtient aussi

$$\frac{4a'}{1+a'} = \sigma \frac{C_l}{\cos \varphi} \left( 1 - \frac{C_d}{C_l \tan \varphi} \right) \quad (\text{II.42})$$

Ces deux dernières relations nous permettront de déterminer les performances d'une éolienne avec les inconnues, facteur d'induction axiale, facteur du moment angulaire pour aboutir à la courbe caractéristique de puissance. En se basant sur les hypothèses simplificatrices du modèle idéal de Betz on trouve :

$$a = \frac{\sigma C_l \cos \varphi}{4 \sin^2 \varphi + \sigma C_l \cos \varphi} \quad (\text{II.43})$$

$$a' = \frac{\sigma C_l}{4 \cos \varphi - \sigma C_l} \quad (\text{II.44})$$

Par les relations (II.57) et (II.58) on peut aboutir :

$$C_l = \frac{4 \sin \varphi (\cos \varphi - \lambda_r \sin \varphi)}{\sigma (\sin \varphi + \lambda_r \cos \varphi)} \quad (\text{II.45})$$

Notons qu'il y a des pertes en bout de pale, dues à l'écoulement autour des pales en rotation, donc les calculs de la puissance doivent être corrigés par l'introduction du facteur de correction dit de Prandtl  $F$  ayant pour expression [21]

$$F = \frac{2}{\pi} ar \cos \left[ \exp \left( -\frac{1}{2} B \frac{R-r}{r \sin \varphi} \right) \right] \quad (\text{II.46})$$

La relation (II.46) se corrige par l'introduction du coefficient de Prandtl  $F$  et s'écrit comme suit

$$C_l = \frac{F 4 \sin \varphi (\cos \varphi - \lambda_r \sin \varphi)}{\sigma (\sin \varphi + \lambda_r \cos \varphi)} \quad (\text{II.47})$$

#### II.2.4. Calcul de la puissance

La puissance aérodynamique disponible sur l'arbre, est calculée à l'aide du couple total  $C$ , qui est la somme des couples élémentaires exercés sur  $r$  variant de 0 à  $R$  (Fig.II.6) alors sur une pale le couple s'écrit

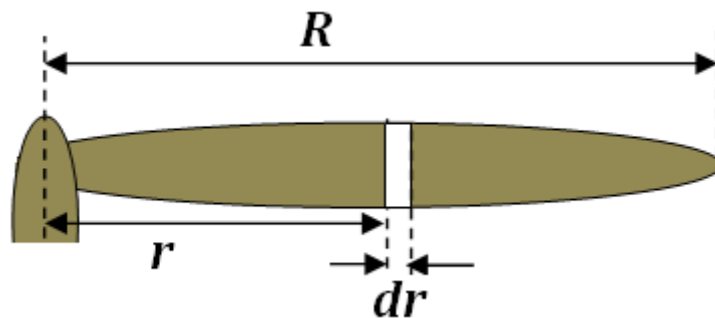


Fig. II.6 Discrétisation de la pale en éléments  $dr$

Le couple élémentaire  $dc$  correspond à un élément de rayon  $dr$  d'une pale d'une turbine éolienne peut ainsi s'écrire comme suit :

---

$$dC = (1 + a')^2 \frac{\sigma(C_l \sin \varphi - C_d \cos \varphi)}{\cos^2 \varphi} \rho \Omega^2 \pi r^4 dr \quad (\text{II.48})$$

Alors le couple total de la pale est :

$$C = \sum dC \quad (\text{II.49})$$

On peut conclure donc :

$$C = (1 + a')^2 \frac{\sigma(C_l \sin \varphi - C_d \cos \varphi)}{\cos^2 \varphi} \rho \Omega^2 \pi r^4 \sum dr \quad (\text{II.50})$$

## Chapitre III

### Courbe de puissance

#### Introduction

Pour déterminer la performance d'une éolienne à axe horizontal, il est nécessaire de tracer la courbe de puissance qui évalue la puissance développée par l'aérogénérateur pour une telle vitesse du vent. En utilisant la théorie de l'élément de pale et les données expérimentales des coefficients de portance et de traînée de la turbine NREL (National Renewable Energy Laboratory) comme exemple, la courbe caractéristique peut être facilement calculée à l'aide d'un programme mis au point sous MATLAB.

#### III.1. La turbine NREL

Le fonctionnement de l'aérogénérateur NREL dans des conditions réelles est fortement lié aux données et aux mesures initiées pour un programme d'expérimentation appelé "Unsteady Aerodynamics Experiment", a été initié en 1987 par NREL aux Etats unis [27], dans la soufflerie de la NASA pendant 10 ans sur un prototype de turbine éolienne. Le tableau III.1 mentionne les conditions d'opération de la turbine NREL.

Tableau III.1 Conditions d'opération de la turbine NREL

Vitesse de rotation (tr/min)	72
Longueur de la pale (m)	5.03
Nombre de pale	3
Angle de calage en bout de pale (degrés)	12
Rugosité du sol (m)	0.3

La turbine NREL se caractérise sur les autres aérogénérateurs par son propre profil géométrique qui détermine le rayon discrétisé et la section de la corde qui correspond comme il est indiqué dans le tableau III.2 [27].

Tableau III.2 Géométrie de la turbine NREL

Rayon (m)	Corde (m)
0.723	0.25
0.724	0.4572
0.880	0.4572
1.383	0.4572
1.634	0.4572
1.886	0.4572
2.137	0.4572
2.389	0.4572
2.649	0.4572
2.892	0.4572
3.143	0.4572
3.395	0.4572
3.646	0.4572
3.897	0.4572
4.149	0.4572
4.40	0.4572
4.903	0.4572
5.03	0.4572

### III.1.1. Calcul du facteur d'induction axiale correspond

En utilisant les données expérimentales de la turbine NREL du tableau 3.2, la puissance développée par la turbine NREL à chaque vitesse du vent  $U$  est liée à l'élément de la pale discrétisée  $dr$ , ainsi le facteur d'induction axiale  $a$  peut être calculé (Tableau III.3).

Tableau III.3 Valeurs du facteur d'inductions axiale correspondantes

Rayon (m)	$a$
0.723	0.0383
0.724	0.0799
0.880	0.0759
1.383	0.0600
1.634	0.0665
1.886	0.0565
2.137	0.0498
2.389	0.0475
2.649	0.0481
2.892	0.0541
3.143	0.0727
3.395	0.0797
3.646	0.0810
3.897	0.0881
4.149	0.0906
4.40	0.0896
4.903	0.0864
5.03	0.0712

Alors la valeur moyenne  $a$  d'une seule pale, peut être déduite comme suit :

$$a = \frac{\sum_{i=1}^{18} a_i}{18} = 0.0687$$

Cette valeur moyenne du moment axial est utilisée pour le reste du calcul tout au long de la pale dans de la turbine NREL.

### III.1.2. Modélisation des coefficients de portance et de traînée

Les données des coefficients de portance et de traînée, sont issues d'un programme d'expérimentation appelé "Unsteady Aerodynamics Experiment" sur la turbine NREL dans une soufflerie (Tableau III.4).

Vue l'utilité des valeurs expérimentales du coefficient de portance dans le calcul du couple de la turbine éolienne, on modélise les coefficients de portance  $C_d$  et de traînée  $C_l$  expérimentaux en fonction de l'angle  $\alpha$ .

Tableau III.4 Les données aérodynamiques de la turbine NREL

$C_d$	$C_l$	$\alpha$ (deg)
0,006	-0,06	-2,23
0,004	-0,151	-0,161
0,06	0,369	1,84
0,008	0,571	3,88
0,009	0,755	5,89
0,017	0,86	7,89
0,024	0,887	8,95
0,035	0,869	9,91
0,039	0,868	10,9
0,048	0,894	12
0,061	0,938	12,9
0,074	0,929	14
0,08	0,908	14,9
0,106	0,912	16
0,271	0,655	17

0,265	0,588	18
0,281	0,587	19
0,299	0,597	20
0,326	0,603	22
0,375	0,647	24
0,419	0,683	26
0,482	0,745	28,1
0,56	0,824	30
0,817	1,05	35
1,03	1,14	40
1,26	1,2	45
1,38	1,12	50
1,7	1,17	55
1,87	1,08	60
1,98	0,94	65
2,19	0,857	70
2,17	0,666	74,9
2,21	0,472	79,9
2,32	0,356	84,8

En utilisant le MATLAB, les coefficients de portance  $C_d$  et de traînée  $C_l$  en fonction de l'angle  $\alpha$  sont comme suit :

$$C_d = -0.000002044981859 + 0.000439496957733\alpha - 0.032365008140003\alpha^2 + 0.908073888333379\alpha^3 - 6.575462584332472\alpha^4 - 1.902205531602533\alpha^5 \quad (\text{III.1})$$

$$C_l = 0.000000021362092 - 0.000004641350777\alpha + 0.000351495265795\alpha^2 - 0.011134040548688\alpha^3 + 0.145317211082782\alpha^4 + 0.169312912589195\alpha^5 \quad (\text{III.1})$$

### III.2. Organigramme du code de calcul de la puissance

La procédure utilisée dans le calcul de la courbe caractéristique de puissance  $P=f(U)$ , est un programme informatique qui a été développé sous MATLAB. Ce programme est initialisé en entrant les données requises ; telles que le rayon de la turbine  $R$ , nombre de pale, la vitesse de

rotation  $\Omega$ ... (Tableau III.1). Ensuite, la vitesse du vent, les fonctions empiriques et analytiques ainsi que et conditions nécessaires comme il est illustré dans la figure III.1.

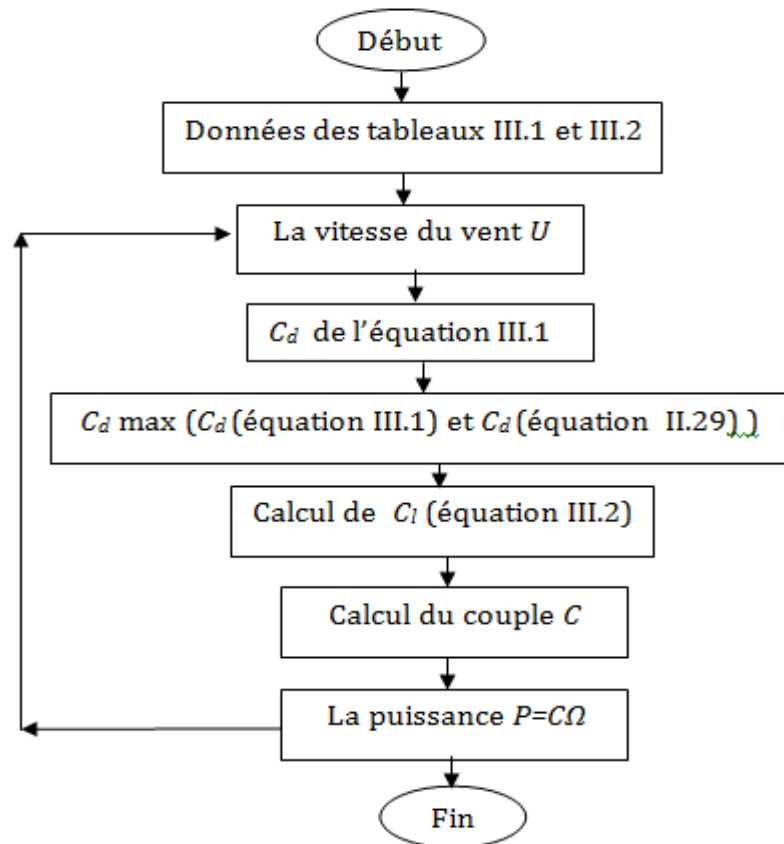


Fig. III.1 Organigramme de calcul

### III.3. Puissance d'une turbine éolienne

Les résultats obtenus de la courbe de puissance par le programme de calcul est présenté dans la figure III.2. Par cette courbe on peut évaluer la puissance produite  $P(U)$  par la turbine NREL en fonction de la vitesse du vent.

La turbine NRELL commence à produire de l'énergie à partir d'une vitesse de démarrage de 4 m/s. On peut conclure également qu'après la vitesse du vent de 13 m/s, la puissance produite reste constante, ce qui correspond à puissance nominale.

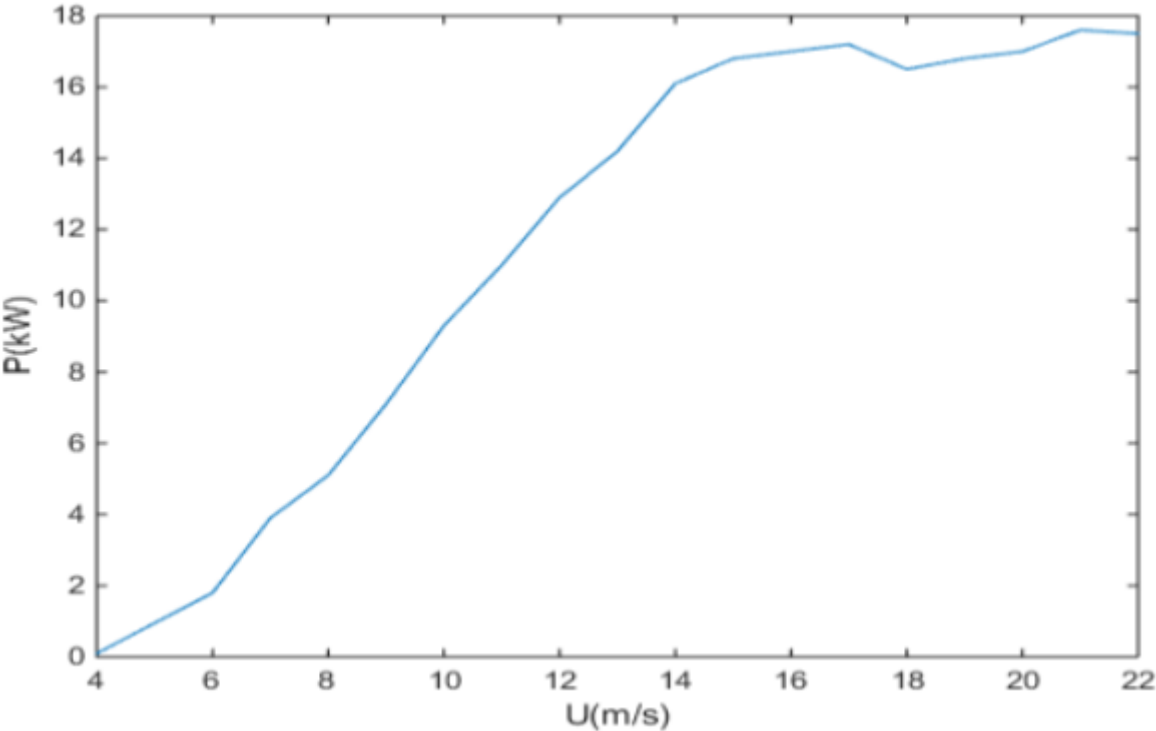


Fig. III.2 Courbe caractéristique de puissance de la turbine NRELL

## ***Conclusion générale***

Le vent est une d'énergie propre et durable, il est l'un des premiers à avoir été utilisé par l'humanité. Il fait naviguer les bateaux à voile, voler les cerfs-volants et tourner les moulins. Aujourd'hui, l'énergie du vent ou l'énergie éolienne est utilisée pour produire de l'électricité.

L'énergie éolienne consiste à transformer l'énergie cinétique du vent en une énergie électrique ou mécanique. L'outil principal de conversion de cette énergie est la turbine éolienne à travers les pales. Lorsque le vent souffle, il exerce une poussée sur eux, cette poussée est déterminée par la méthode de la théorie de l'élément de pale (BEM) qui l'axe principal du travail présenté dans ce projet de fin d'étude pour calculer la courbe caractéristique de puissance d'une telle éolienne. A cet effet, un programme mis au point a été développé sous Matlab afin d'évaluer la puissance produite de la turbine NREL (comme exemple) en fonction de la vitesse du vent.

Le reste du travail est un survol sur :

- Le vent et ses caractéristiques
- La turbine éolienne et principaux constituants.
- La théorie de l'élément de pale qui permet d'évaluer le couple exerçant sur les pales d'une éolienne.

Comme perspective et suite à ce travail, une étude complète qui tient compte aux effets des différentes composantes de la turbine éolienne comme la tour, la nacelle..... est très recommandée dans travaux de futur.

## *Bibliographie*

- [1] «Efficiency and performance» [archive], UK department for enterprise regulatory reform (consult le 29 December)
- [2] «Wind turbine power curves»[archive] (consult le 18 mars 2017)
- [3] Organisation météorologique mondiale, «Rafale» [archive], sur Eumetcal (consulté le 11 octobre 2013)
- [4] Zergane, S., Smaili, A., & Masson, C. (2018). Optimization of wind turbine placement in a wind farm using a new pseudo-random number generation method. *Renewable Energy*, 125, 166-171.
- [6] J. Chen, C. Nayar, L. XU, « Design and FE analysis of an outer-rotor PM generator for directlycoupled wind turbine applications », proceeding of the IEEE industry applications conference, New York, USA, 1998, vol 1, pp. 387-394
- [7] L. Söderlund, JT. Erikson, J. Salonen, H. Vihriälä ans R. Perälä, « A permanent-magnet generator for wind power applications », *IEEE transaction on magnetics*, vol 32, N° 4, july 1996.
- [8] Zergane, S., & Smaïli, A. (2011). *Optimisation de la micro-localisation des aérogénérateurs dans un parc éolien*. *Revue des énergies renouvelables*, 14(4), 727-732..
- [9] A.G. Kladas, M. P. Papadopoulos, J. A. Tegopoulos, « Multi-pole permanent magnet generator design for gearless wind turbine applications », proceeding of the IEEE industry applications conference, New York, USA, 1998, vol. 1, pp. 387-394.
- [10] Zergane, S., Amroune, S., Rokbi, M., & Guesmia, S. (2022). New study on the extension of a current wind farm; case of Kaberten park in Algeria. *Turkish Journal of Computer and Mathematics Education (TURCOMAT)*, 13(2), 428-434..

- [11] L. H. Hansen, L. Helle, F. Blaabjerg, E. Ritchie, S. Munk-Nielsen, H. Bindner, P. Sorensen and B. Bak-Jensen, « Conceptual survey of generators and power electronics for wind turbines », Riso national laboratory, Roskilde, Denmark, december 2001.
- [12] E. Muljadi, C.P. Butterfield, Yih-Huei Wan, «*Axial flux, modular, permanent-magnet generator with a toroidal winding for wind turbine applications* », IEEE industry applications conference, St Louis, november 5-8, 1998.
- [13] E. Muljadi, C.P. Butterfield, Yih-Huei Wan, «*Axial flux, modular, permanent-magnet generator with a toroidal winding for wind turbine applications* », IEEE industry applications conference, St Louis, november 5-8, 1998.
- [14] Gabriel-Octavian Cimuca, « *Système inertiel de stockage d'énergie associe à des générateurs éoliens* », thèse doctorat, E.N.S.A.M, centre de Lille, 2005.
- [15] L. H. Hansen, L. Helle, F. Blaabjerg, E. Ritchie, S. Munk-Nielsen, H. Bindner, P.Sorensen and B. Bak-Jensen, « *Conceptual survey of generators and power electronics for wind turbines* », Riso national laboratory, Roskilde, Denmark, december 2001.
- [16] Ismail El Hassan « *Commande haute performance d'un moteur asynchrone sans capteur de vitesse par contrôle direct du couple* », thèse préparée au laboratoire d'électrotechnique et d'électronique industrielle de l'ENSEEIH, Toulouse 1999
- [17] H. Camblong, « *Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs a vitesse variable* », thèse de doctorat, 18 décembre 2003, E.N.S.A.M, centre de Bordeaux.

[24] S. El Aimani, « *Modélisation des différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension* », thèse de doctorat, l'université des sciences et technologies de Lille (USTL).

[25] Technique de l'ingénieur BM 4 640.

[26] M.M. Hand, D.A. Simms, L.J. Fingersh, D.W. Jager, *Unsteady Aerodynamics Experiment Phase II-IV: Test Configurations and Available Data Campaigns*; (2001) NREL/TP-500-

[27] Zergane, S., & Smaili, A. (2021). *Effect of Turbulence on Wind Turbine Farm Power Production*. In *Advances in Green Energies and Materials Technology* (pp. 393-400). Springer, Singapore.