

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE.
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE DE SAAD DAHLEB DE BLIDA
DEPARTEMENT DU MECANIQUE



**Mémoire pour l'obtention du diplôme Master en Génie
Mécanique**

Option : Energies Renouvelables

Thème :

**Etude de conception d'une éolienne
de pompage mécanique**

Proposé et dirigé par :

Dr. GUERRI Ouahiba

présenté par :

Ghrib Mohamed

Année universitaire

2011/2012

Remerciements

Ce travail a été réalisé dans le cadre d'un projet de fin d'études, pour obtenir le diplôme *Master en mécanique option énergie renouvelable* à l'université de Saad Dahleb Blida / département de mécanique Blida

Avant tout, nous remercions **ALLAH** tout puissant de nous avoir donné la volonté et le courage de mener à bien ce travail. Et d'une façon toute particulière, on remercie nos chers parents pour leur patience et le bonheur qui nous ont apporté.

On tient à remercier notre encadreur **Mme. Ouhiba Guerri** Et notre Co promoteur **Mr. bakhti Ahmed** pour nous avoir fait travailler sur un projet aussi intéressant et riche. Nous leurs sommes reconnaissants tout particulièrement pour la confiance qu'ils nous ont témoignée et la liberté qui nous a laissé.

Nos remerciements s'adressent également à Messieurs les jurys pour avoir accepté d'évaluer ce travail, avec l'espoir d'être à la hauteur de leur attente.

Enfin, on souhaite exprimer toute notre gratitude à l'ensemble des personnes, qui bien en marge de ce travail, ont contribué largement à son aboutissement. Que ce soit depuis toujours, depuis plusieurs années ou quelques mois seulement, nombreux sont celles et ceux qui ont participé à notre épanouissement. On les remercie sincèrement.

Dédicace

A ceux qui m'ont toujours comblé d'amour de tendresse et de joie, je présente mes remerciements mes respects et ma reconnaissance.

Pour sa présence, sa générosité et son soutien, je dédie ce modeste mémoire, à mon papa chéri.

Pour sa patience, ces paroles qui m'ont toujours soulagé, son doux sourire qui m'a toujours réconforté, sa tendre main qui m'a souvent caressé et rassuré, je dédie ce travail à ma chère maman.

A ceux qui ont été témoins de mes efforts et mes longues nuits blanches, et que j'ai été témoins de leurs souciences et leurs attentions, j'exprime mes respects et ma sincère gratitude.

Je dédie ce présent à toute ma famille qui m'a toujours soutenu :

A mes sœurs qui m'ont toujours partagé les rêves et les soucis.

A mes frères qui m'ont toujours aidé et rassuré.

A mes tantes bien aimées pour leurs attentions et affection.

A mes oncles, mes belles tantes, mes cousines et cousins pour leurs soutiens, leurs encouragements et motivations.

Et en fin je dédie ce mémoire à mes amis (es), pour leurs attention, leurs soutiens, et surtout pour les beaux moments qu'on a partagé ensemble.

Mohamed

ملخص:

الهدف من هذا العمل دراسة و تصميم التور بينات المتعددة الشفرات ذات المحور الافقي لضخ المياه. وينقسم هذا العمل الى اربعة مراحل اولها جمع المعلومات عن التور بينات الرياح والتكنولوجيات المختلفة. ثانيا تصميم الدوار الديناميكيستعمل نظرية ثالثا. ومنه نقوم باستخراج منحني يبين لنا نسبة الطاقة المستخرجة بالنسبة لمعامل سرعة جناح الهوائي

ومعامل الطاقة نسبة. وفي الاخير وحسبالتدفق والتي استخرجتها المضخة للتحقق منأبعاد والاجهزة المختلفة والشكل النهائي لتصميم.

الكلمات مفتاحية

متعددة التور بينات الرياح. حساب الايروديناميكية. مضخة والمكبس الديناميكية. المحكاة العددية.

Résumé :

Le but du présent travail est de faire l'étude de conception d'une éolienne multipale à axe horizontal pour le pompage d'eau. La conception se fera en quatre grandes étapes. La première, consiste à rassembler des informations sur les différentes technologies éoliennes. La seconde définir les dimensions et la géométrie de la pale et la procédure de design du rotor, ensuite, une étude aérodynamique du rotor basée sur la méthode BEM. Et enfin, la dernière étape on a déterminé la courbe de coefficient de puissance $C_p(\lambda)$ et la courbe de puissance en fonction de la vitesse du vent.

Mots clés

Eolienne à axe horizontal. Eolienne multiple , pompage de l'eau. Méthode BEM,

Abstract

The purpose of this work was to study a multi-bladed horizontal axis wind turbine designed for water pumping. The design had been performed in four steps. The first one consisted in the collect of information on wind turbines and the related technologies. Then, an aerodynamic study of the rotor based on the BEM. And finally, the rotor power coefficient vs. tip speed ratio and Rotor power vs. rotor speed were determined. Then, the power variation versus the wind speed was derived and the water flow delivered by the pump was calculated for given head.

Keywords

Horizontal axis wind turbine .Multi-bladed wind turbine, Water pimping. BEM

Table des matières

Introduction générale	1
Chapitre 1 : Généralité sur les aérogénérateurs	
1. Généralité sur les aérogénérateurs.....	2
1.1 Introduction	2
1.2 Fonctionnement d'une éolienne.....	2
1.3 Classification des éoliennes.....	4
1.3.1 Selon l'utilisation.....	4
1.3.2 Selon le principe de fonctionnement.....	4
1.3.3 Selon l'orientation de l'axe de rotation.....	6
1.4 Les éolienne de pompage.....	13
1.5 Comparaison.....	14
1.6 Conclusion.....	15
Chapitre 2 : conception d'une pale d'éolienne de pompage	
2.1 Introduction.....	15
2.2 Rayon du rotor et longueur de la pale.....	16
2.3 Évaluation des paramètres de base.....	16
2.3.1 La sélection de la vitesse spécifique.....	16
2.3.2 La sélection du profil.....	17
2.4 Calcul de la forme optimale de la pale.....	16
2.5 Résultats et validation des codes de calcul les résultats de la variation du c_l , l'angle de calage et l'angle d'écoulement relatif.....	20

Chapitre 3: méthode de BEM

3.1 Introduction.....	24
3.2 Aérodynamique des éoliennes.....	24
3.2.1 Théorie du moment axial.....	25
3.2.2 Théorie de l'élément de pale.....	29
3.2.3 Théorie élément de pale-quantité de mouvement.....	34
3.3 Pertes due à l'orientation du rotor.....	36
3.4 Conclusion.....	37

Chapitre 4 : résultats et discussions

Conclusion Générale.....	41
--------------------------	----

Bibliographie

Annexes1

Annexes2

.

LISTES DES FIGURES

FIGURE 1.1: fonctionnement d'une éolienne de production d'électricité.....	2
FIGURE 1.2: forces agissant sur un profile (www.cyber6tem.com/eric/works/vol-helicopteres.pdf).....	4
FIGURE 1.3: le savonius.....	4
FIGURE 1.4: éolienne à axe verticale (domsxeb.org).....	5
FIGURE 1.5 : Eolienne a un axe horizontal.....	6
FIGURE 1.6 : éolienne à axe vertical.....	6
Figure 1.7: Eolienne à axe horizontal face au vent et sous le vent	7
Figure 1.8: Eolienne multi-pales American.....	8
Figure 1.8: éolienne à axe horizontale face au vent et sous le vent.....	8
FIGURE 1.9 : Moulins de pompage.....	8
Figure 1.10 : Représentation d'un rotor éolien bipale.....	10
Figure 1.11 : Représentation schématique des systèmes éoliens mécanique et électrique pour le pompage de l'eau.....	10
Figure 1.12: Coefficient de puissance C_p en fonction de la vitesse spécifique λ pour des différentes éoliennes.....	12
FIGURE2.1 : Nombre de pale et de rapport de vitesse spécifique.....	16
Figure 2.1 : Rotor éolien avec des pales de tôle incurvée.....	17
Figure 2.3 : Schéma des éléments de pale.....	20
Figure 2.4 : beta en fonction de la section de pale.....	22
Figure 2.5 : beta en fonction de la section de pale.....	22

LISTES DES FIGURES

FIGURE 3.1 : Evolution de la vitesse et la pression à travers une éolienne.....	26
FIGURE 3.2 : Disque en rotation.....	27
Figure 3.3 :L'écoulement de l'air à travers un élément annulaire.....	29
FIGURE 3.4 : Triangle de vitesse sur un profil de pale.....	28
FIGURE 3.5 : modèle d'élément de pale.....	30
FIGURE 3.6 - force agissantes sur un profil de pale.....	31
Figure 3.7 : Organigramme de la méthode BEM, pour le calcul statique énergétique du rotor.....	37
Figure 4.1 : Variation du coefficient de puissance en fonction de la vitesse spécifique.....	38
Figure 4.2 :Variation de la puissance en fonction de la vitesse de rotation de rotor.....	39
Figure 4.3 :Variation de la puissance en fonction de la vitesse de vent.....	40

LISTES DES FIGURES

Nomenclature

a :	Facteur d'interférence axiale...../
a' :	Facteur d'interférence tangentielle...../
B :	Nombre de pale...../
c :	La corde..... m
Ca :	Angle de vrillage.....degrés
$\frac{c}{r}$:	La corde adimensionnelle...../
C_T :	Le coefficient de poussée...../
C_P :	Le coefficient de puissance...../
C_Q :	Le coefficient de couple...../
C_m :	Le couple moteur.....N.m
C_L :	Le coefficient de portance...../
C_D :	Le coefficient de traînée...../
D :	La force de traînée.....N
E :	Exposant du profil du gradient de vitesse de vent...../
E_c :	L'énergie cinétique du vent.....Joule (J)
F :	Perte totale...../
F_{bout} :	Perte au bout de la pale...../
F_{pied} :	Perte au pied de pale...../
F_a :	La force axialeN

Nomenclature

F_t :	La force tangentielle	N
H_{locale} :	Hauteur d'un élément de pale	m
H_{cone} :	Hauteur du cône.....	m
L :	La force de portance.....	N
m :	Le débit massique.....	Kg/s
p_1 :	La pression en amont du rotor.....	Pas
p_2 :	La pression en aval du rotor.....	Pas
P :	La puissance récupérée.....	Watt
P_a :	La puissance sur l'arbre du rotor.....	Watt
P_e :	La puissance véhiculée par le vent.....	Watt
Q :	La quantité de mouvement.....	N.m
R :	Le rayon du bout de la pale.....	m
r :	Le rayon à une station donnée.....	m
A :	La surface balayée par le rotor.....	m ²
t :	Le temps.....	s
U :	La vitesse tangentielle du vent.....	m/s
V :	La vitesse axiale du vent en amont du rotor.....	m/s
V_0 :	La vitesse axiale du vent à travers le rotor.....	m/s
V_1 :	La vitesse du vent en aval du sillage.....	m/s
V_∞ :	La vitesse du vent incident.....	m/s

Nomenclature

W :	La vitesse relative du vent.....	m/s
α :	L'angle d'incidence.....	deg
σ :	La solidité.....	/
λ :	La vitesse spécifique en bout de pale.....	/
λ_l :	La vitesse spécifique locale.....	/
φ :	L'angle d'hélice.....	deg
μ :	Le rayon adimensionnel de la pale.....	/
ψ :	L'angle au cône.....	deg
Ω :	La vitesse de rotation du rotor.....	rad/s
β :	L'angle de calage.....	deg
η :	Le rendement de l'éolienne.....	%
θ :	Coordonnée angulaire.....	deg

Introduction générale

L'énergie éolienne est l'une des plus anciennes sources d'énergie utilisée. Son utilisation dans le passé était très répandue dans la production de l'énergie mécanique (pompage d'eau, le meulage des grains ainsi que le sciage du bois etc....).

A partir du 19ème siècle, ces applications commencent à perdre leur intérêt. Cela est dû à l'évolution technologique qui a connue l'Europe.

La production de l'électricité sur réseaux est ainsi devenue la principale application de l'énergie éolienne, elle représente actuellement une activité industrielle et commerciale à part entière et en pleine croissance.

En plus de sa rentabilité économique, l'énergie éolienne a aussi l'avantage d'être écologiquement très propre puisqu'un parc d'aérogénérateurs n'émet ni polluants, ni gaz à effet de serre et qu'il ne génère pas de déchets. Enfin les aérogénérateurs en fin de vie peuvent être recyclés aisément et le site peut être remis à l'état naturel ou agricole sans dépenses notables.

L'étude présentée dans ce mémoire a pour objectif d'optimiser les performances énergétiques d'une éolienne de pompage, afin de maximiser l'énergie éolienne captée. .

Cette étude est introduite par une description des éoliennes, dans le premier chapitre. Ensuite, dans le chapitre 2, la conception d'une éolienne de pompage est décrite. Cette conception repose essentiellement sur la modélisation aérodynamique, étant donné que la forme géométrique de l'hélice a un grand impact sur le rendement énergétique de la machine et par conséquent sur sa rentabilité économique. Pour les petites éoliennes, où le coût du kilowattheure reste encore élevé et le site d'implantation est généralement imposé, cette modélisation prend dans ce cas une importance particulière.

Dans le chapitre 3, on décrit la méthode appliquée pour l'estimation des performances aérodynamiques de l'éolienne. Dans cette partie deux théories sont utilisées, la première est celle de l'écoulement axial (the axial momentum theory), la deuxième est la théorie de l'élément de pale (blade element theory). Cette dernière théorie tient compte de la rotation de l'écoulement de l'air engendrée par la rotation des pales. La combinaison des deux approches permet de résoudre les équations des efforts et des couples aérodynamiques par méthode itérative. Les résultats obtenus par cette théorie sont donnés dans le chapitre 4.

1.1. Introduction

Le développement des technologies éoliennes durant les années 70-80 a fait émerger deux types de machines : les éoliennes à axe horizontal et les éoliennes à axe vertical. Dans ce qui suit, nous décrivons les principaux composants des éoliennes, les différents types existant à l'heure actuelle sur la production électrique d'une éolienne et des éoliennes de pompage mécanique.

1.2. FONCTIONNEMENT D'UNE EOLIENNE

Les éoliennes ont pour principe de fonctionnement d'extraire de l'énergie cinétique du vent pour la transformer en énergie mécanique de rotation [1]. L'énergie cinétique contenue dans le vent est captée par les pales aérodynamiques de l'éolienne qui freine le vent. En freinant le vent, les pales de l'éolienne sont soumises au-dessus et en dessous à un système de pressions qui génère une force aérodynamique; cette dernière entraîne la rotation du rotor. Cette rotation crée une énergie mécanique qui est transmise à l'arbre de la génératrice pour produire de l'énergie électrique ou à un arbre d'entraînement d'une pompe mécanique pour le pompage de l'eau.

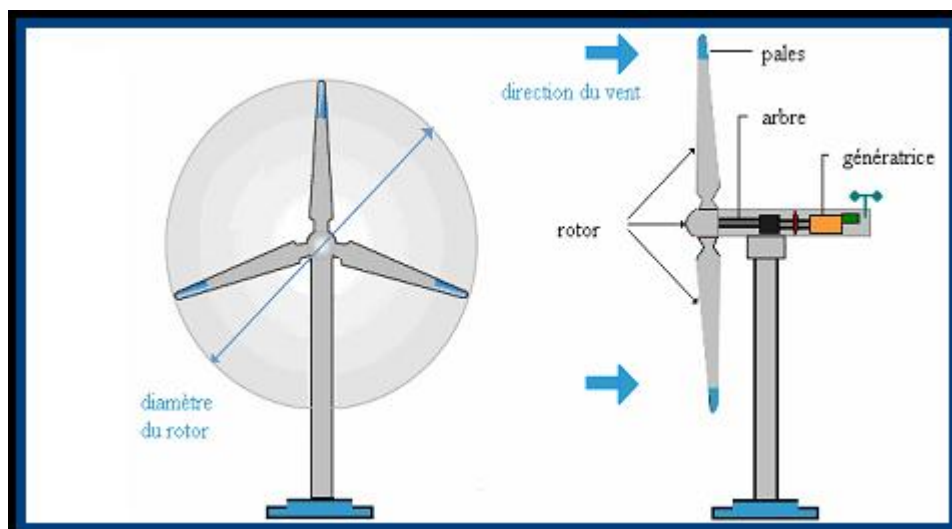


Figure 1.1 : fonctionnement d'une éolienne de production d'électricité

1.3 Classification des éoliennes

On peut classer les éoliennes selon leur utilisation, selon l'orientation de l'axe de rotation ou selon le principe de fonctionnement.

1.3.1 Selon l'utilisation :

On distingue les éoliennes qui fournissent de l'énergie électrique et les éoliennes qui fournissent de l'énergie mécanique:

- **Les éoliennes qui fournissent de l'énergie électrique.** On les appelle aussi aérogénérateurs. L'objectif est de produire du courant électrique continu (dans le cas d'une installation reliée à des batteries) ou alternatif (pour les installations connectées au secteur). Pour cela, l'éolienne est couplée à un générateur électrique. Entre l'arbre du rotor et la génératrice se trouve souvent un arbre de transmission couplé à un système d'engrenage qui multiplie la vitesse de rotation. Les éoliennes de petites puissances (moins de 10 kW) ne possèdent pas toujours un système d'engrenage. La génératrice, qui reçoit l'énergie mécanique et la convertit en énergie électrique, transmet ensuite cette énergie au réseau électrique [2].
- **Les éoliennes qui fournissent de l'énergie mécanique.** Ce sont des éoliennes utilisées pour le pompage de l'eau (figure 1.4). Elles sont de petites tailles, se trouvent principalement dans les zones arides et sont installées sur des puits de faibles profondeurs.

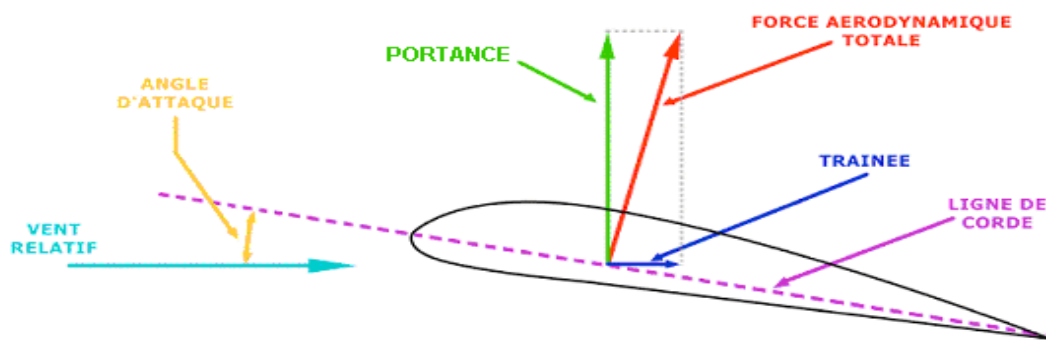
1.3.2. Selon le principe de fonctionnement :

On distingue deux types, les machines à portance et les machines à trainée.

- **Machines à portance :** C'est la force de portance qui fait tourner le rotor de l'éolienne. Comme le principe de la sustentation pour les avions, la pale subit une dépression sur l'extrados et une surpression sur l'intrados (figure 1.2). Cette

dépression généré une force aérodynamique de portance importante qui dépend du profil de pale et de l'angle d'incidence (www.cyber6tem.com/eric/works/vol-helicopteres.pdf).

- **Machine a trainée** : C'est la force de trainée qui provoque le mouvement de rotation. (FIGURE1.3)



www.cyber6tem.com/eric/works/vol-helicopteres.pdf

FIGURE1.2: forces agissant sur un profile

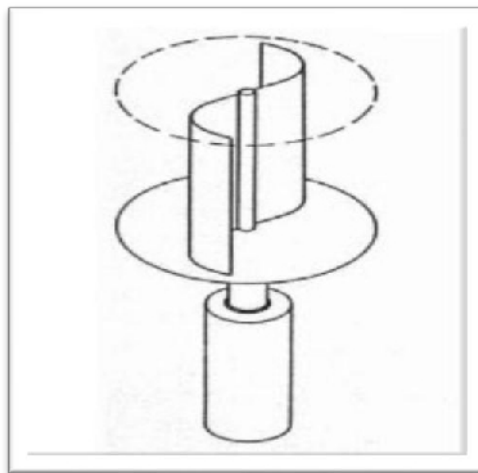


FIGURE 1.3 : le Savonius

1.3.3 Selon l'orientation de l'axe de rotation :



FIGURE 1.4: éolienne à axe verticale (domsxeb.org)

On distingue les éoliennes à axe vertical et les éoliennes à axe horizontal : dans l'éolienne à axe vertical, l'axe de rotation est perpendiculaire à la direction de la vitesse du vent (figure 1.5). Dans les éoliennes à axe horizontal, l'axe de rotation est parallèle à la direction de la vitesse de vent (figure 1.6).

- **Les éoliennes à axe vertical : [3]** Elles sont adaptées à tous les vents et ne nécessitent pas de dispositif d'orientation. Deux d'entre elles sont très citées: l'éolienne Savonius et le rotor Darrieus. L'éolienne Savonius comporte principalement deux demi-cylindres dont les axes sont décalés l'un par rapport à l'autre. Comme les machines à aubes, elle utilise essentiellement la traînée pour tourner. Cette machine présente deux avantages : Elle démarre pour des vitesses de vent de l'ordre de 2 m/s et elle est de fabrication facile.
- **Les éoliennes à axe horizontal [3] :** Pourvues d'une, deux ou trois pales, ce sont les éoliennes les plus utilisées aujourd'hui pour la production d'électricité en systèmes autonomes ou pour alimenter le réseau de distribution. Ces éoliennes utilisent la force de portance du vent. La hauteur de la nacelle permet de profiter de vents plus forts et plus constants. Elles peuvent être utilisées aussi pour fournir de l'énergie mécanique et alimenter des machines lentes comme pour le pompage de l'eau.



*FIGURE 1.5:*Eolienne à axe horizontal



FIGURE 1.6 : Eolienne à axe vertical

Parmi les éoliennes à axe horizontal, on distingue aussi les éoliennes lentes et les éoliennes rapides.

- **Les éoliennes rapides :** Ceux sont les machines actuellement les plus répandues car leur rendement est supérieur à celui de toutes les autres machines. Elles comportent généralement des hélices à deux ou trois pales. On peut distinguer les capteurs éoliens dont l'hélice est en amont par rapport au vent, « hélice au vent », et ceux dont l'hélice est en aval par rapport au vent, « hélice sous le vent ». Ces dernières se mettent automatiquement face au vent ce qui permet d'éviter le système

d'orientation coûteux et encombrant mais la position du rotor qui est après le pylône fait accroître les turbulences existant dans l'air en diminuant donc la puissance à extraire du vent. Les éoliennes rapides présentent la particularité d'avoir une puissance nominale très étendue, de quelques dizaines de watts à quelques mégawatts. Le diamètre du rotor est de 1 à 100 mètres. Elles sont relativement légères et tournent à vitesse très rapide ce qui les rend adaptés pour la production d'électricité[4]. Par contre, pour démarrer et produire une puissance utile, il faut souvent un vent de 5 m/s au moins.

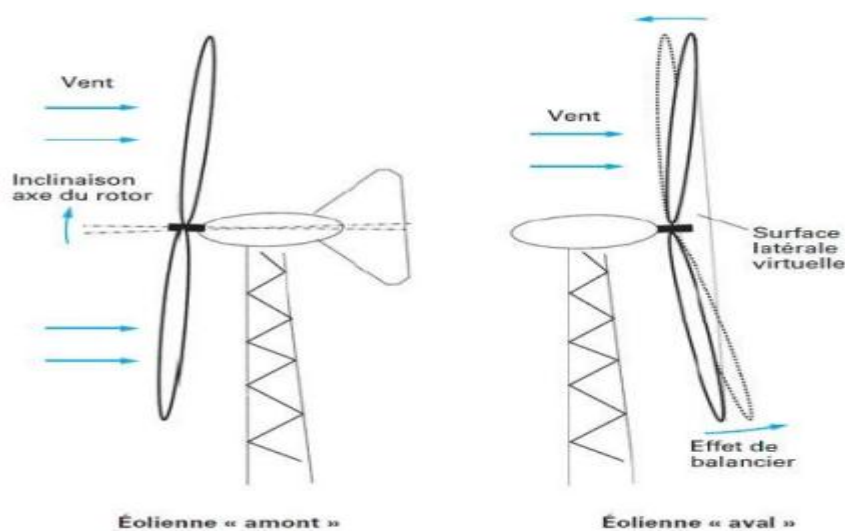


Figure 1.7: Eolienne à axe horizontal face au vent et sous le vent [2]

- **Les éoliennes lentes.** Le nombre de pale vraie de 12 à 24 et couvrent pratiquement la totalité de la surface de la roue ou presque. Le plus souvent, ces éoliennes sont de petite taille, avec un diamètre de 3 à 8 mètres. Elles démarrent à vide pour des vents de l'ordre de 2 à 3 m/s et fonctionnent jusqu'à des vitesses de vent de 7 à 8 m/s. Au-delà, ces éoliennes sont équipées d'un dispositif d'arrêt pour mettre la machine en sécurité. Ces éoliennes sont pourvues d'un gouvernail de direction pour orienter le disque normalement à la direction du vent. Les puissances développées par ce type d'éolienne sont relativement faibles. Par ailleurs, leur couple de démarrage qui est assez important les rend très utiles dans les régions où l'intensité du vent est assez faible, de l'ordre de 4 à 5 m/s, particulièrement pour le pompage de l'eau dans les sites isolés tel que le désert.



Figure 1.8: Eolienne multi-pales American

1.4 Les Eoliennes de pompage

Les premières éoliennes de pompage étaient des éoliennes mécaniques. Ces dernières années, un nouveau procédé de pompage éolien dit 'pompage éolien électrique' a été mis au point. Dans ces nouveaux systèmes, l'énergie mécanique du rotor est d'abord transformée en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice, qui alimente par la suite, une pompe électrique. A l'origine, le pompage éolien était destiné pour abreuver le bétail dans les prairies et pour la consommation domestique des foyers isolés. Ce n'est que ces derniers temps que l'intérêt pour l'irrigation, s'est vu accru mais pour des petites surfaces [6].

- **Eoliennes de pompage mécanique :** L'éolienne de pompage mécanique traditionnelle utilise un système bielle manivelle monté sur l'arbre du rotor. Elle possède normalement plusieurs pales montées sur un rotor qui tourne relativement lentement.

Le système bielle manivelle transforme le mouvement rotatif de la bielle en un mouvement rectiligne alternatif qui commande la pompe à piston installée dans un puits à la base de

l'éolienne. Le mouvement alternatif du piston de la pompe assure le pompage de l'eau. Les éoliennes de pompage mécaniques ont leurs avantages et leurs inconvénients. Elles sont d'un entretien facile et d'un coût abordable. La contrainte principale réside dans le fait qu'elles doivent être installées directement au-dessus du puits, même si l'eau doit être utilisée à une certaine distance de ce puits [6].



FIGURE 1.9 : MOULINS DE POMPAGE

- **Eoliennes de pompage électrique.** Dans ce cas, le système éolien électrique n'est pas obligé de se trouver près de la source d'approvisionnement en eau. Le système éolien électrique commande une pompe électrique, (après conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique) qui aspire l'eau de la source (un puits ou un étang) et la refoule à l'endroit de son utilisation (un abreuvoir a bétail, un étang ou un système d'irrigation). La quantité d'énergie consommée par la pompe électrique peut être adaptée à la puissance de sortie de l'éolienne, de manière à ce que l'énergie éolienne soit utilisée efficacement. Les éoliennes de pompage électriques ne comprennent pas de batteries. L'eau est stockée dans un réservoir qui sert de réserve d'énergie. En figure 1.11 est donné le schéma des systèmes de pompage mécanique et électrique pour le pompage de l'eau [6].

- **Caractéristiques technologiques des éoliennes :**

Les principaux composants d'une éolienne sont: l'hélice qui porte les pales, le mât et la pompe.

- **L'hélice :** Elle peut porter une, deux ou plusieurs pales (jusqu'à 24 pour les éoliennes américaine), droites ou vrillées, de profils différents selon les catégories de machines. [5]. Le rotor d'une éolienne de pompage mécanique est composé d'un ensemble de pales en acier, avec le design adéquat pour profiter au maximum des caractéristiques variables du vent. Le diamètre du rotor peut varier entre 1,80 mètres et 5 mètres. Ce type de rotor, du fait de sa capacité de démarrage et de sa petite vitesse de rotation, s'adapte parfaitement aux caractéristiques des pompes à piston.

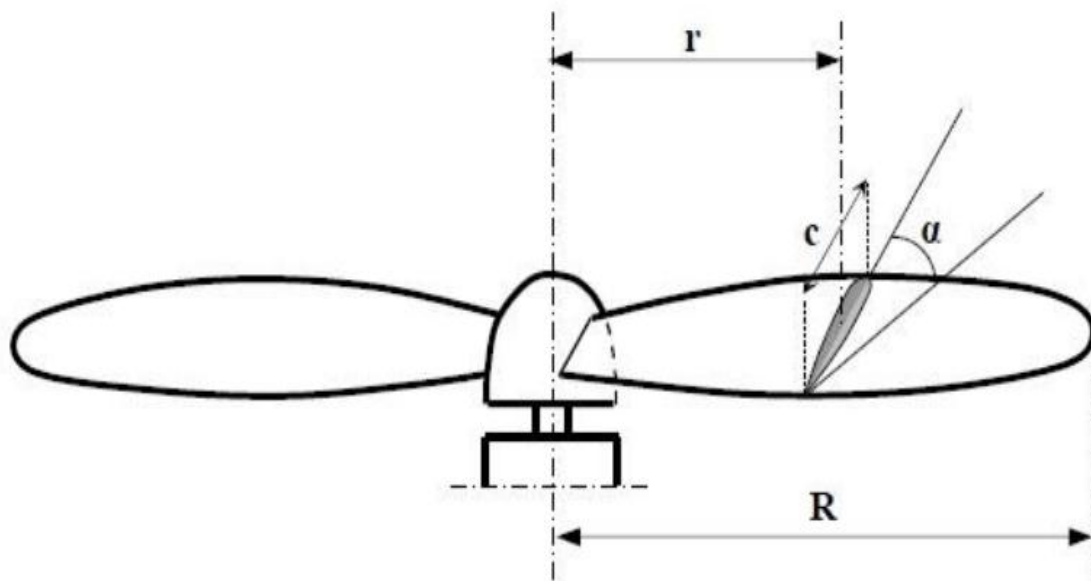


Figure 1.10: Représentation d'un rotor éolien bipale

- **Les pales :** [7]. Les pales sont une partie très importante des éoliennes. De leur nature dépendront le bon fonctionnement et la durée de vie de la machine ainsi que le rendement du moteur éolien. Plusieurs éléments caractérisent ces pales :
 - **La longueur de la pale.** Le diamètre de l'hélice est fonction de la puissance désirée. Il est important de prendre en compte le travail en fatigue des pales et les risques de vibrations, surtout pour les très longues pales.

- **La largeur de la pale** La largeur des pales intervient pour le couple de démarrage qui sera d'autant meilleur que la pale sera plus large. Mais pour obtenir des vitesses de rotation élevées, on préférera des pales fines et légères. Le résultat sera donc un compromis.
- **Les supports.** Les aéromoteurs de petite et de moyenne puissance peuvent être placés sur deux types de supports :
 1. Les supports autoporteurs : Treillis métallique, Tubulaires en acier ou En béton
 2. Les supports haubanés: Treillis métallique ou Tubulaires

La hauteur des tours en treillis utilisées peut varier entre 4 et 12 mètres. Les tours peuvent être totalement assemblées au sol et ensuite relevées l'aide d'une grue ou d'un équipement similaire ; ou bien, être montées section par section, à parti du sol [8].

- **La pompe et le réservoir régulateur** : Il est nécessaire de compléter l'installation par un réservoir d'eau, d'une capacité suffisante pour couvrir les éventuelles pointes de consommation et les périodes où il n'y a pas de vent.

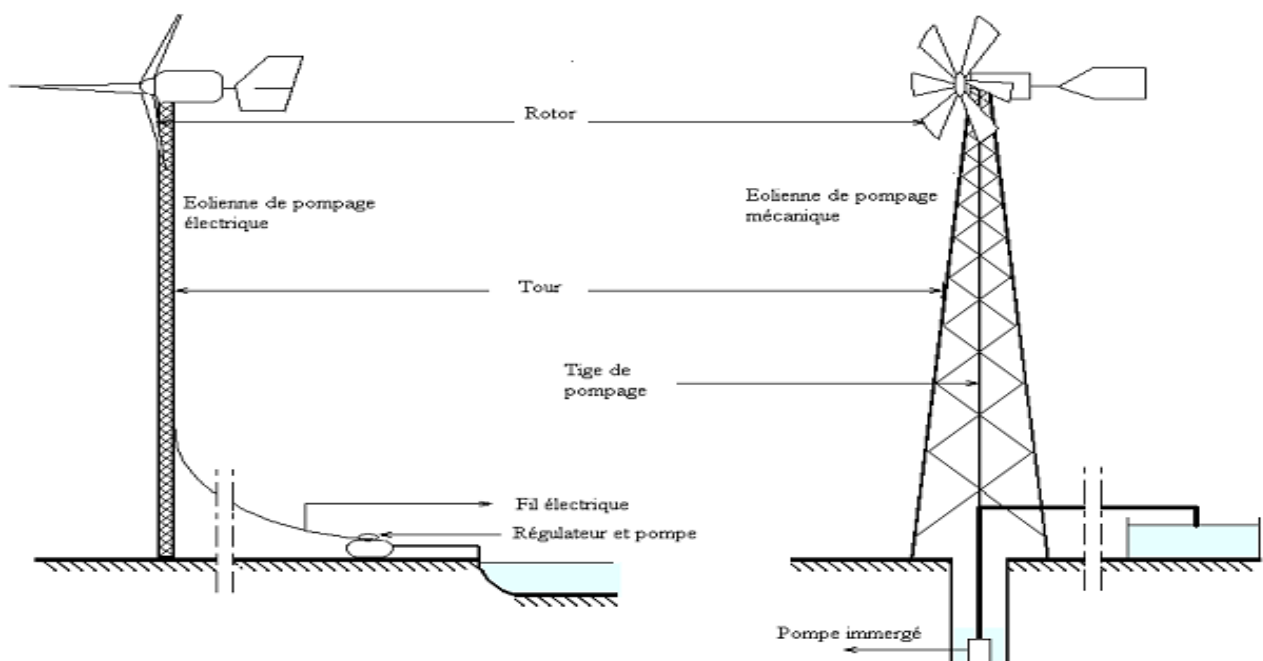


Figure 1.11: Représentation schématique des systèmes éoliens mécanique et électrique pour le pompage de l'eau

1.5 Comparaison :

Sur le graphique [7] ci-contre, on remarque dans un premier temps que les aéromoteurs à axe horizontal et à axe vertical de type Darrieus ont un meilleur rendement aérodynamique.

Les aéromoteurs « américains » ont un nombre de pales important car ils évoluent à de faibles vitesses de rotation. Ils produisent un couple aérodynamique important afin de produire de l'énergie mécanique (application de pompage). Enfin, on peut observer l'influence du nombre de pales sur le rendement aérodynamique.

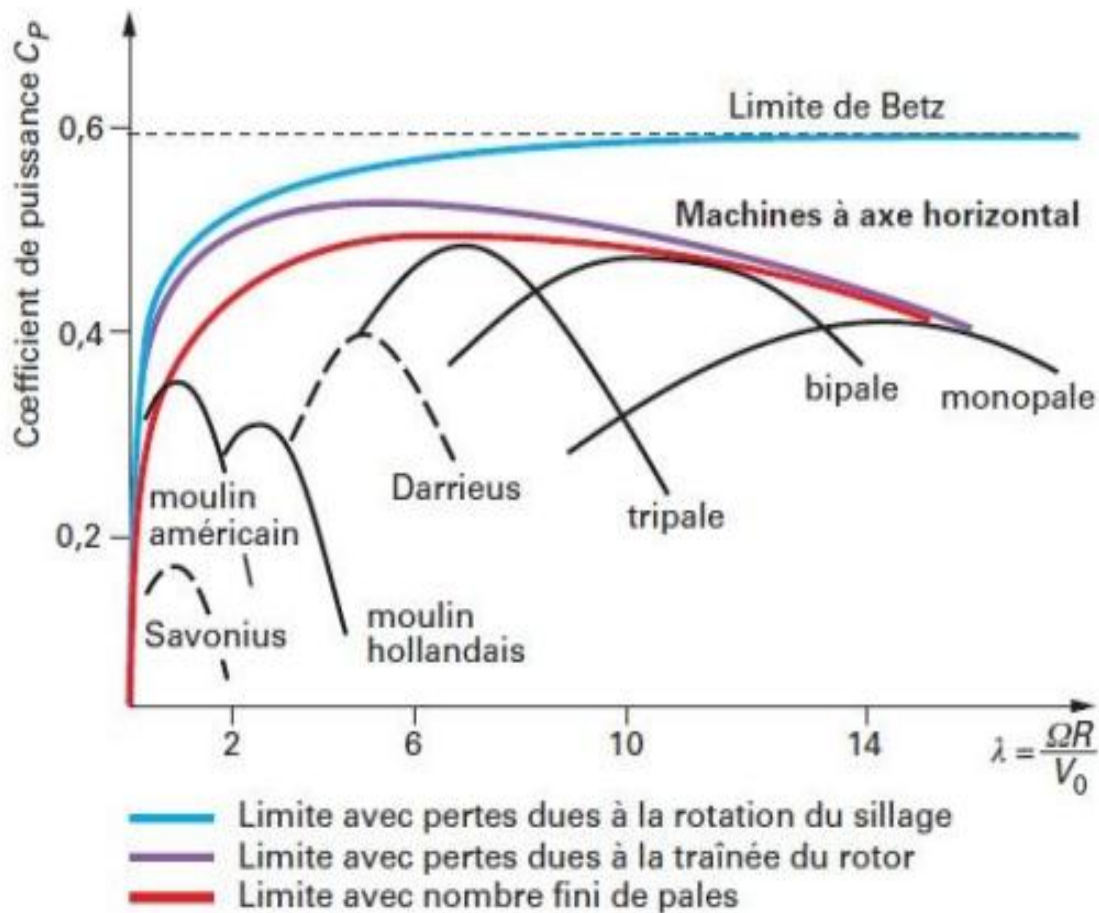


Figure 1.12: Coefficient de puissance C_p en fonction de la vitesse spécifique λ pour des différentes éoliennes [10]

1.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons passé en revue les différents types des moteurs éoliens, et leurs modes de classification selon leurs axes de rotation que soit vertical ou horizontal.

2.1 Introduction

La conception d'une pale d'éolienne fait entrer en jeu des considérations aérodynamiques ainsi que des considérations structurales. En effet, même si c'est la forme extérieure de la pale qui dicte les propriétés aérodynamiques, les aspects structuraux doivent être pris en compte. Ce dernier point n'a pas été considéré dans notre travail. On s'est intéressé à l'aspect performances aérodynamiques.

Pour concevoir une pale d'éolienne, il faut d'abord connaître les paramètres d'opération de celle-ci (puissance voulue, plage de vitesse du vent, système de contrôle de la puissance, variation ou non de la vitesse de rotation, etc.). La géométrie de la pale peut ensuite être définie en spécifiant les éléments suivants :

- la longueur de la pale ;
- les profils aérodynamiques utilisés ;
- la répartition de la longueur de la corde le long de la pale ;
- la répartition du vrillage le long de la pale, i.e. l'angle de d'attaque local pour une section donnée de la pale.

2.2 Rayon du rotor et longueur de la pale

La puissance d'une éolienne dépend de la vitesse du vent, du diamètre du rotor, de la masse volumique de l'air et du coefficient de puissance :

$$P = \frac{1}{2} \rho C_p \frac{\pi D^2}{4} V^3 \quad (2.1)$$

En supposant une masse volumique de 1,225 kg/m³ pour l'air et un coefficient de puissance de 0,30 pour l'éolienne (pompage mécanique), il est possible d'établir une relation entre la puissance nominale de la turbine, son rayon ($R = D/2$) et la vitesse nominale du vent (vitesse de vent à laquelle la puissance nominale est atteinte).

La longueur de la pale est égale au rayon du rotor auquel on soustrait le rayon du moyeu (typiquement 5 % du rayon du rotor) [13].

En pratique, le coefficient de puissance C_p , dépasse rarement 40 pour cent lorsqu'elle est mesurée en tant que puissance mécanique d'un rotor réel d'éolienne. La transformation ultérieure en puissance

électrique ou en puissance de pompage entraîne une réduction de la puissance disponible, en fonction du rendement de transmission et de la pompe ou du générateur. Une nouvelle réduction de la puissance disponible est provoquée par des fluctuations de la vitesse de la direction, dans fait l'objet un moulin à vent réel sur le terrain. Pour une éolienne de pompage de l'eau, ces effets conduisent à la règle suivante, en ce qui concerne une première estimation de la puissance de sortie effective, pour un emplacement où la vitesse moyenne du vent est V :

$$P_{eau} = 0.1 A V^3 (W)$$

On peut utiliser cette règle pour estimer la puissance de sortie mensuelle ou annuelle, pour une vitesse de vent mensuelle ou annuelle donnée. La puissance nette pour soulever q m³ d'eau par seconde sur une hauteur de h mètres est donnée par :

Pour dimensionner notre éolienne

$$p = q\rho gH$$

Où

$$\rho = 1 \text{ kg/m}^3$$

$$g = 9.8 \text{ m/s}^2$$

Dans notre cas on fixe la vitesse de vent pour site d'Adrar égale 5m/s, et une hauteur manométrique de 15m, et pour une puissance de 300 w et après l'équation 2. On tire :

$$R=1.87$$

2.3 Évaluation des paramètres de base

2.3.1 Sélection de la vitesse spécifique

Le choix de la vitesse spécifique dépend de plusieurs paramètres, il est fonction du couple de démarrage, du coefficient de puissance et du nombre de pales. La figure 2.1 montre la variation de la vitesse spécifique avec le nombre de pales (valeurs recommandées).

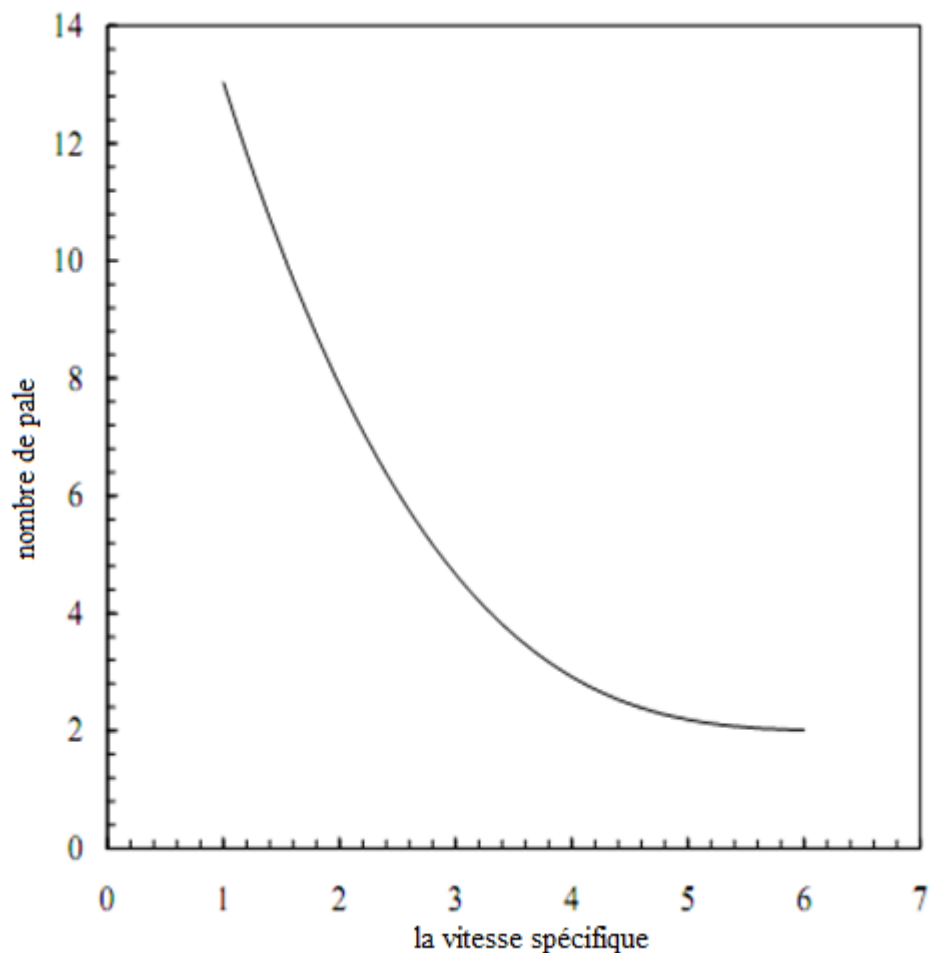


FIGURE 1.2 Nombre de pale et de rapport de vitesse spécifique

La (figure 1.12) qui représente la variation du coefficient de puissance en fonction de λ pour des éoliennes types montrait que pour $\lambda = 2$, le coefficient de puissance est maximal dans le cas des éoliennes lentes. Donc nous prenons $\lambda = 2$, à partir de la (figure 1.2), en prend le nombre de pale B égal à huit.

2.3.2 La sélection du profil

Le choix de profil de la pale dépend aussi de la vitesse spécifique :

- Si $\lambda < 3$ plaques planes courbes
- Si $\lambda > 3$ profils aérodynamiques avec faible C_d/C_l

Notre choix s'est porté sur $\lambda = 2$, donc le profil de la pale est une plaque plane courbée.

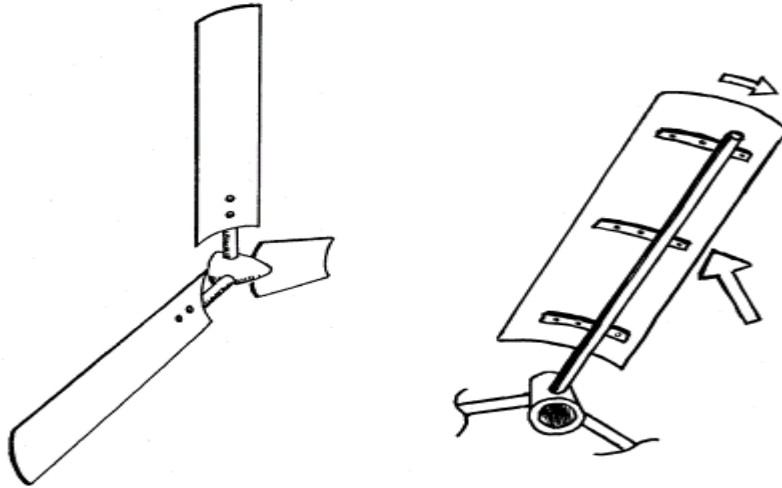


Figure 2.1 Rotor éolien avec des pales de tôle incurvée

2.4 Calcul de la forme optimale de la pale

La conception d'une forme optimale de la pale d'une hélice implique que la relation (2.2), correspondante à une puissance maximale, soit satisfaite. Si on adopte la thèse de négliger les frottements dans le sens axial, si on prend $C_d = 0$.

L'expression entre a et a' afin que le coefficient de puissance soit maximal c_{pmax} , est donnée par :

$$a' = \frac{(1-3a)}{(4a-1)} \quad (2.2)$$

En dimensionnant ces relations on peut obtenir le coefficient de force normale au plan de rotation

$$C_n = C_l \cos \varphi + C_d \sin \varphi \quad (2.3)$$

En dimensionnant ces relations on peut obtenir le coefficient de force tangentielle au plan de rotation :

$$C_t = C_l \sin \varphi + C_d \cos \varphi \quad (2.4)$$

L'expression de a devient :

$$a = \frac{1}{\left(\frac{4\sin^2\varphi}{\sigma Cl \cos\varphi}\right)+1} \quad (2.5)$$

L'expression de a' devient :

$$a = \frac{1}{\left(\frac{4\cos\varphi}{\sigma cl}\right)-1} \quad (2.6)$$

Où Cl est la valeur optimale du coefficient de portance. Si on substitue l'expression (2.2) dans cette dernière l'équation, on obtient :

$$a' = \frac{4\cos\varphi}{\sigma Cl + 12\cos\varphi} \quad (2.7)$$

L'égalité des deux expressions de a dans les équations (2.5) et (2.6) donne l'équation quadratique suivante, dont l'inconnue est σCl :

$$(\sigma Cl)^2 + 8\cos\varphi\sigma Cl - 16\sin^2\varphi = 0 \quad (2.8)$$

Cette équation admet deux solutions :

$$\sigma Cl = -4(\cos\varphi + 1) \quad (2.9)$$

$$\sigma Cl = -4(\cos\varphi - 1) \quad (2.10)$$

La première racine n'est pas acceptable, car $\sigma Cl < 0$. La deuxième racine donnée par

(2.10) donne l'expression optimale de la corde, le long de la pale :

$$c = \frac{8\pi r}{BCloptimum} (1 - \cos\varphi) \quad (2.11)$$

Pour déterminer l'angle optimal φ et par conséquent l'angle optimal de vrillage β des transformations similaires sont à envisager. Peut s'écrire commesuit :

$$\tan\varphi = \frac{1-a}{1-a'} \frac{1}{\lambda_r} \quad (2.12)$$

Si on substitue l'expression (2.2) dans cette dernière l'équation, on obtient :

$$\lambda_r = \frac{(1-a)(4a-1)}{a} \frac{1}{\tan\varphi} \quad (2.13)$$

La substitution de l'équation (2.5) dans (2.13) donne :

$$\lambda_r = \frac{(2\cos\varphi-1)(\cos\varphi+1)}{(1+2\cos\varphi)\sin\varphi} \quad (2.14)$$

Cette équation est simplifiée comme suit :

$$\lambda_r = \frac{1}{\tan^{\frac{2}{3}}\varphi} \quad (2.15)$$

On obtient finalement φ :

$$\varphi = \frac{2}{3} \operatorname{atan}\left(\frac{1}{\lambda_r}\right) \quad (2.16)$$

On déduit l'angle optimal de vrillage β

$$\beta = \varphi - \alpha \quad (2.17)$$

Où α_{opt} est l'angle d'attaque optimale, qui donne (C_d/C_l) max

On divise la pale en N éléments pour calculer les paramètres géométriques de chaque section (figure 2.3) :

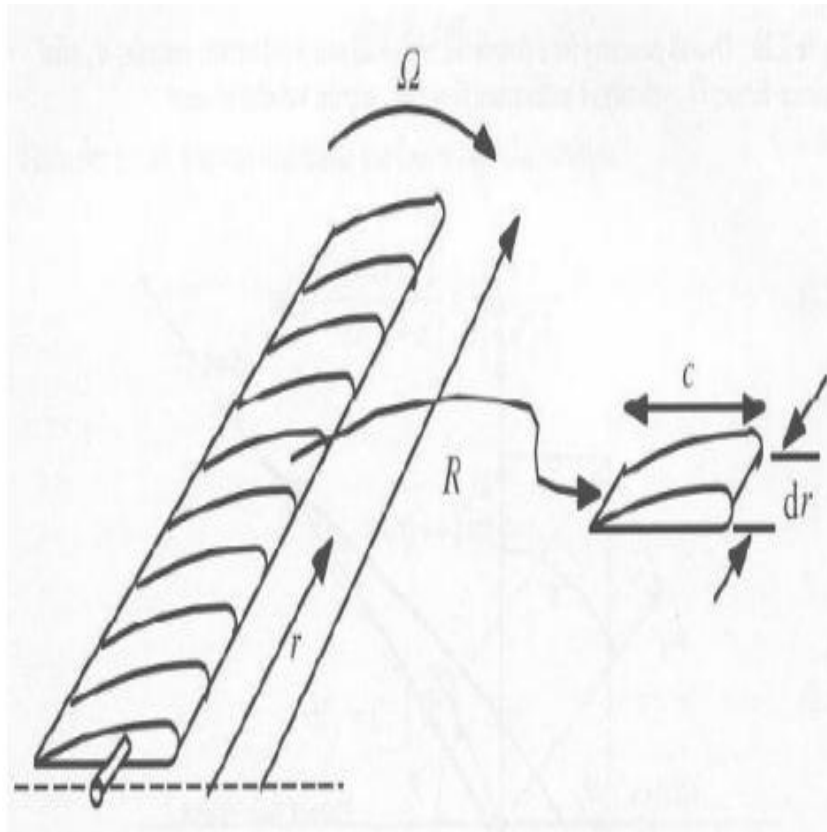


Figure 2.3 : Schéma des éléments de pale

En considérant les caractéristiques de la plaque plane courbe (variation des coefficients de portance et de traînée en fonction de l'angle d'attaque, nous pourrions choisir les paramètres optimaux de design. Le fonctionnement de la pale serait optimal quand la traînée est minimale. On déduit que les paramètres de design C_d et C_l et doivent vérifier la condition C_d/C_l est au minimum et ce pour chaque section de la pale. Les relations ci-dessous permettent d'effectuer les calculs appropriés [14] :

$$\varphi_i = \frac{2}{3} \operatorname{atan} \left(\frac{1}{\lambda \left(\frac{r_i}{R} \right)} \right) \quad (2.18)$$

$$\left(\frac{C_{l_i}}{R} \right) = \frac{8\pi}{B c_i} \left(\frac{r_i}{R} \right) (1 - \cos \varphi_i) \quad (2.19)$$

$$\beta_i = \varphi_i - \alpha_{opm} \quad (2.20)$$

2.5 Résultats et validations des codes de calcul Les résultats de la variation de la corde, l'angle de calage et l'angle d'écoulement relatif sont présentés dans le tableau suivant

Tableau 1.2 présentés Les résultats de la variation de la corde :

Position	r (m)	λ_{rd}	φ	A	β	C	cl
1	0.20	0.21	51.82	4	47.82	0.32	1.20
2	0.38	0.41	44.95	4	40.19	0.32	1.1
3	0.56	0.61	38.98	4	34.98	0.32	1.09
4	0.74	0.81	33.95	4	29.95	0.32	1.01
5	0.92	1.00	29.81	4	25.81	0.32	0.98
6	1.11	1.20	26.41	4	22.61	0.32	0.96
7	1.29	1.4	23.61	4	19.61	0.32	0.92
8	1.47	1.6	21.29	4	17.29	0.32	0.86
9	1.65	1.8	19.35	4	15.29	0.32	0.84
10	1.84	2	17.71	4	13.58	0.32	0.82

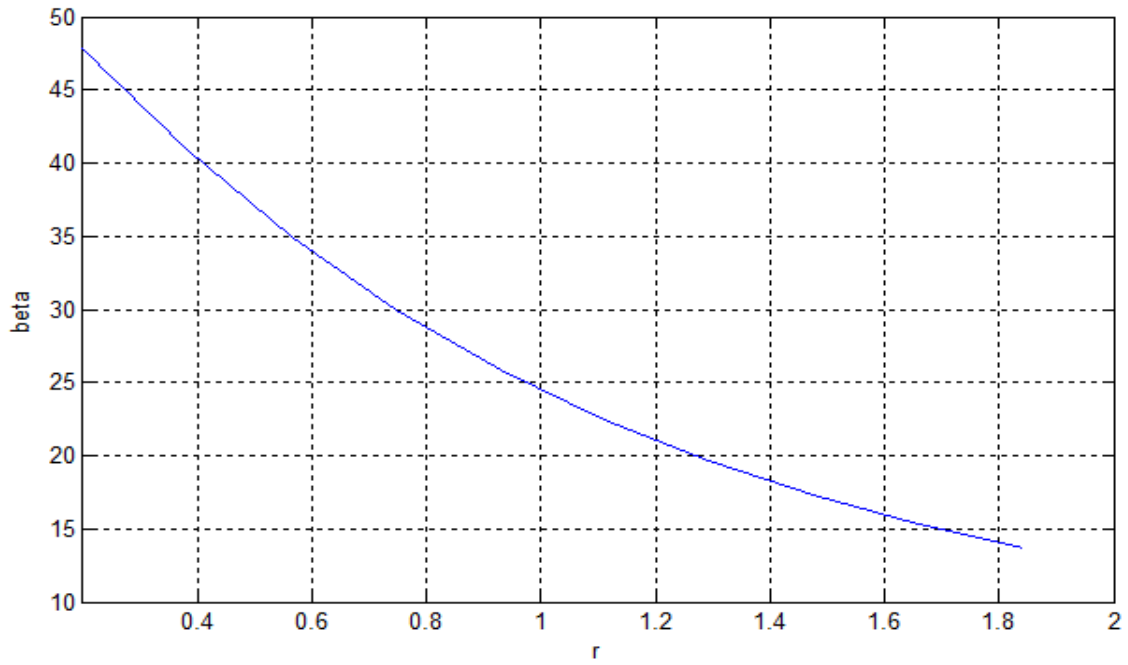


Figure 2.4 beta en fonction de la section de pale

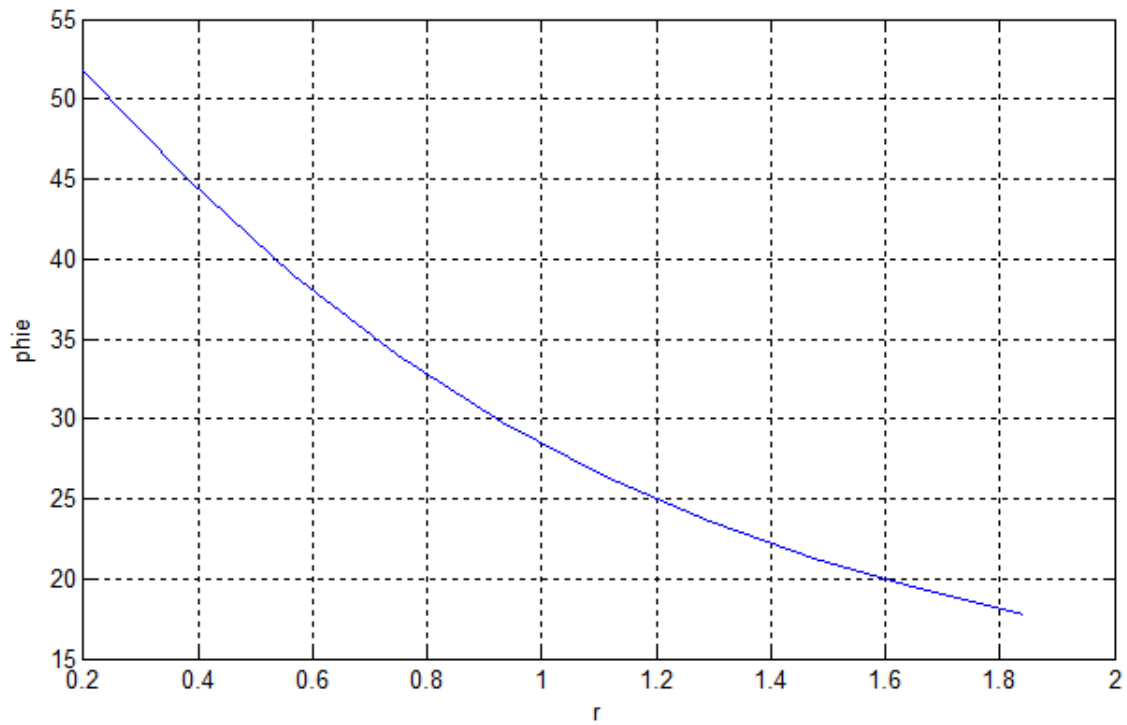


Figure 2.5 beta en fonction de la section de pale

2.6 Concluions

Les rotors lents (λ_r jusqu'à env. 4) doivent avoir des nombreuses pales, dont les profils n'ont pas besoin d'avoir une forme aérodynamique trop sophistiquée, c'est à dire, on peut utiliser de la tôle incurvée (par exemple d'aluminium).

La distribution calculée pour les deux paramètres, la corde et l'angle ne sont pas linéaires.

Dans la pratique, ces distributions ne sont pas respectées à cause des difficultés de fabrication. Le compromis serait d'utiliser des distributions linéaires proches de celles calculées sans trop sacrifier la performance énergétique (Fig. 4 et 5).

3.1 Introduction :

La conception d'un aérogénérateur 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 doivent être menés dans le but de déterminer ces paramètres à savoir la longueur de la corde, l'angle de vrillage ainsi que l'épaisseur à chaque station de la pale. Ensuite les efforts aérodynamiques ainsi que la puissance captée sont calculés. Ce calcul est nécessaire aussi bien pour estimer les performances énergétiques de l'aérogénérateur, que pour prévoir les problèmes de structure.

La modélisation aérodynamique de l'hélice est une tâche complexe à cause de l'écoulement tridimensionnel de l'air autour des pales. Pour réaliser cette modélisation, deux théories aérodynamiques sont utilisées en admettant plusieurs simplifications.

3.2 Aérodynamique des éoliennes

Différentes théories aérodynamiques sont utilisées pour la détermination des performances des éoliennes. La méthode la plus utilisée est la théorie BEM (ou *Balade Elément Moment theory*) qui consiste à combiner la théorie du moment axial avec la théorie de l'élément de pale.

3.2.1 Théorie du moment axial

Dans cette théorie, le volume de contrôle de l'éolienne est tel que schématisé sur la figure 3.1, le rotor est assimilé à un disque. Les vitesses de l'écoulement à l'infini amont et en aval du rotor sont notées respectivement U_1 et u_2 et la vitesse au plan rotor est u . Soit p la pression atmosphérique et p_+ et p_- les pressions juste avant et après le plan de rotor. On établit des relations simples entre ces différents paramètres [15], [16], [17]. On suppose que l'écoulement

est stationnaire et que le fluide est incompressible et parfait.

Dans cette approche, un modèle unidimensionnel est utilisé pour exprimer l'énergie extraite du vent, avec les hypothèses suivantes [24]:

- L'écoulement est totalement axial (l'air ne subit aucun mouvement de rotation).
- L'écoulement est incompressible.
- La vitesse du vent est constante loin du plan du rotor.
- L'écoulement est rationnellement symétrique.

L'équation de Bernoulli est alors appliquée au volume de contrôle de l'éolienne et on écrit:

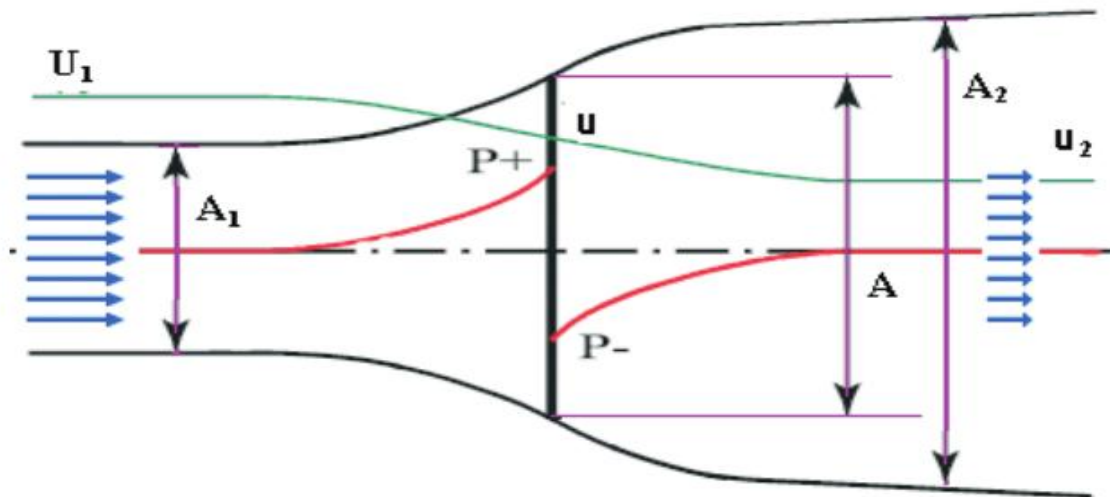


FIGURE 3.1- Evolution de la vitesse et la pression à travers une éolienne

Pour le volume de l'infini amont à la face frontale du rotor :

$$p + \frac{1}{2}\rho U_1^2 = p^+ + \frac{1}{2}\rho u_1^2 \quad (3.1)$$

Pour le volume de la face arrière du rotor à l'infini aval :

$$p + \frac{1}{2}\rho u_1^2 = p^- + \frac{1}{2}\rho u_1^2 \quad (3.2)$$

La somme de ces deux équations (3.1) et (3.2) nous donne la variation de pression à travers le rotor :

$$\Delta p = \rho(U_1^2 - u_2^2)^2 \quad (3.3)$$

On en déduit l'expression de la poussée T exercée sur le rotor :

$$T = \Delta p A = \rho(U_1^2 - u_2^2)^2 A \quad (3.4)$$

A étant la surface du rotor

$$A = \pi R^2$$

La poussée peut être également représentée par la variation de quantité de mouvement à travers le rotor :

$$T = \rho A_1 U_1^2 - \rho A_2 u_2^2 \quad (3.5)$$

Et comme il y a conservation de débit dans le volume de contrôle de l'éolienne, nous avons $A_1 U_1 = A_2 u_2 = A u$:

$$\rho A_1 U_1 = \rho A u = \rho A_2 u_2 \quad (3.6)$$

L'expression (3.5) de la poussée devient :

$$T = \rho A u (U_1 - u_2) \quad (3.7)$$

L'identification des relations 3.4 et 3.7 donne :

$$u = \frac{1}{2}(U_1 - u_2) \quad (3.8)$$

Un facteur d'induction axiale a (qui indique le degré de ralentissement de la vitesse de vent par l'éolienne [18]) est alors introduit :

$$a = \frac{U_1 - u_2}{2}$$

D'où

$$u = (1 - a)U_1$$

Et

$$u_2 = (1 - 2a)U_1$$

Pour un élément annulaire dr de surface dA ($dA = 2\pi r dr$), la poussée élémentaire sera :

$$dT = 4a(1 - a) \frac{1}{2} \rho U_1^2 2\pi r dr \quad (3.9)$$

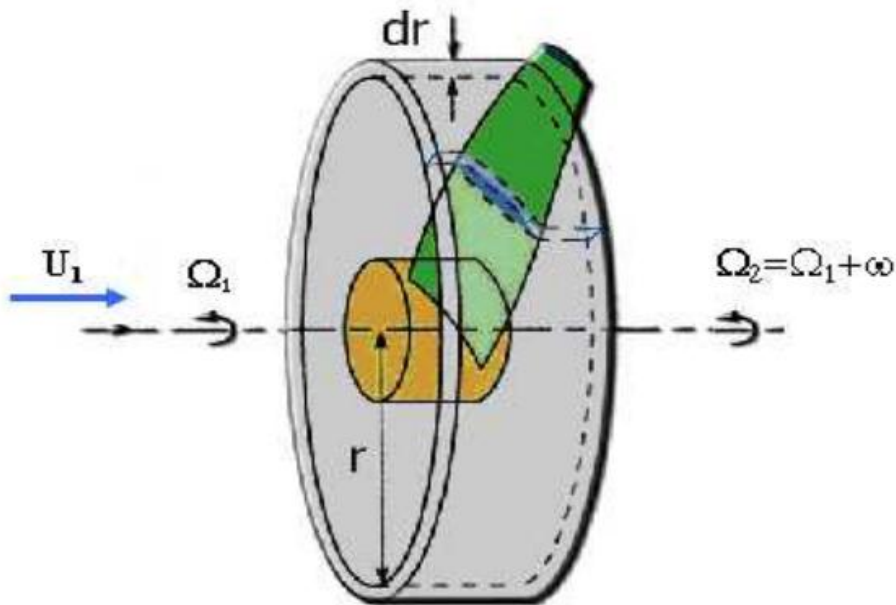


FIGURE 3.2 Disque en rotation

Si maintenant on prend en considération l'effet de la rotation : Soit Ω_1 la vitesse de rotation du fluide en amont du rotor, et $\Omega_2 = \Omega_1 + \omega$ celle du fluide en aval (figure 3.2). De la même manière que précédemment, a' un facteur d'induction tangentielle est introduit :

$$a' = \frac{\frac{1}{2}\omega}{\Omega_1}$$

Du fait de la rotation du rotor, il en résulte un couple Q qui représente la variation de quantité de mouvement pour un élément d'épaisseur dr positionné au rayon r [18]:

$$dQ = d(\rho uA)(\omega r) \quad (3.10)$$

En utilisant le facteur a et a' , l'expression du couple doit être :

$$dQ = 4a'(1 - a)\frac{1}{2} \rho U_1 \Omega_1 r^2 2\pi r dr \quad (3.11)$$

Cette dernière équation qui comprend deux inconnues ne nous permet pas d'évaluer directement les performances des éoliennes. Cette théorie du disque actif est alors combinée à la théorie de l'élément de pale qui est basée sur les caractéristiques aérodynamiques du profil de pale

3.2.2 Théorie de l'élément de pale :

Dans cette théorie, la pale est subdivisée en plusieurs éléments de petite épaisseur (figure 3.4). [16]

Dans le modèle précédent, on a supposé que l'écoulement ne subit aucun mouvement de rotation, mais en réalité la loi de conservation du moment cinétique impose que l'air doit avoir un mouvement rotatif afin que le rotor puisse extraire un couple utile. Dans ce cas le sens de rotation de l'écoulement de l'air est opposé à celui du rotor. L'introduction du mouvement de rotation de l'air permet à ce modèle de mieux approcher la réalité et d'obtenir des résultats plus fiables. Dans l'élaboration de ce modèle les hypothèses suivantes sont utilisées [19] :

- L'écoulement en amont loin du plan du rotor, est complètement axial.
- Au niveau du plan du rotor la vitesse angulaire de rotation de l'air est w , cette vitesse diminue considérablement loin du rotor, en aval, de telle manière

que la pression statique à cet endroit peut être considérée égale à la pression atmosphérique.

- Il n'y a pas d'interférence entre les éléments adjacents de la pale.
- L'écoulement de l'air autour d'un élément de la pale est considéré bidimensionnel.

Les expressions de la puissance extraite et du couple appliqué sur les pales, peuvent être obtenues en considérant l'écoulement de l'air à travers un élément annulaire de rayon r , d'épaisseur dr et de section dA , avec $dA = 2\pi r dr$ (Figure 2.2).

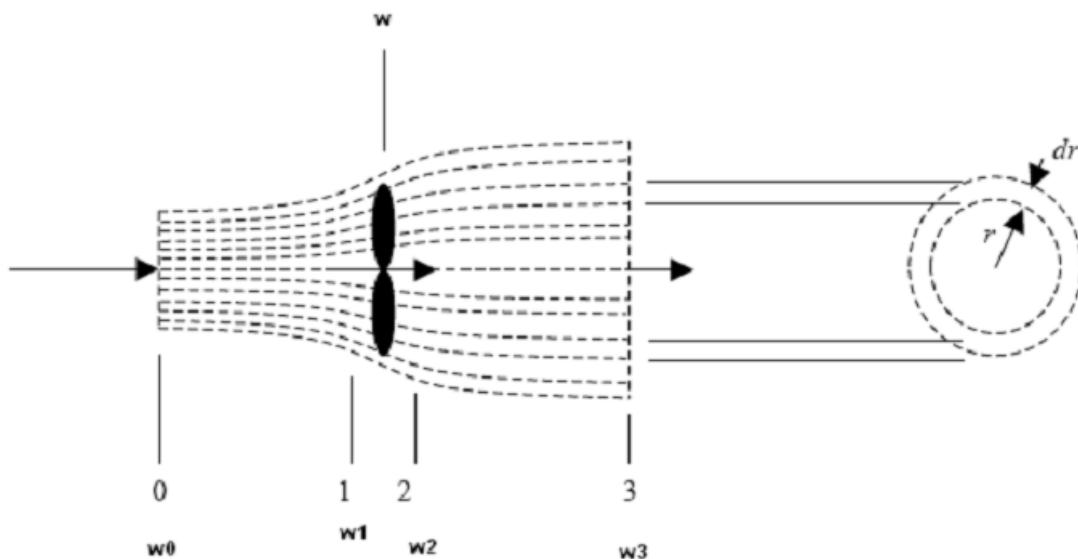


Figure 3.3 : L'écoulement de l'air à travers un élément annulaire

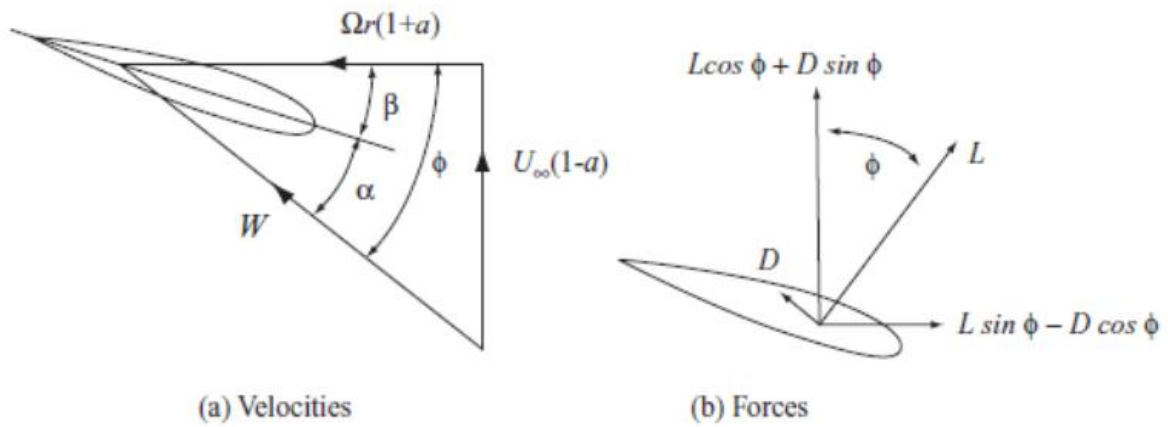


FIGURE 3.4 - Triangle de vitesse sur un profil de pale

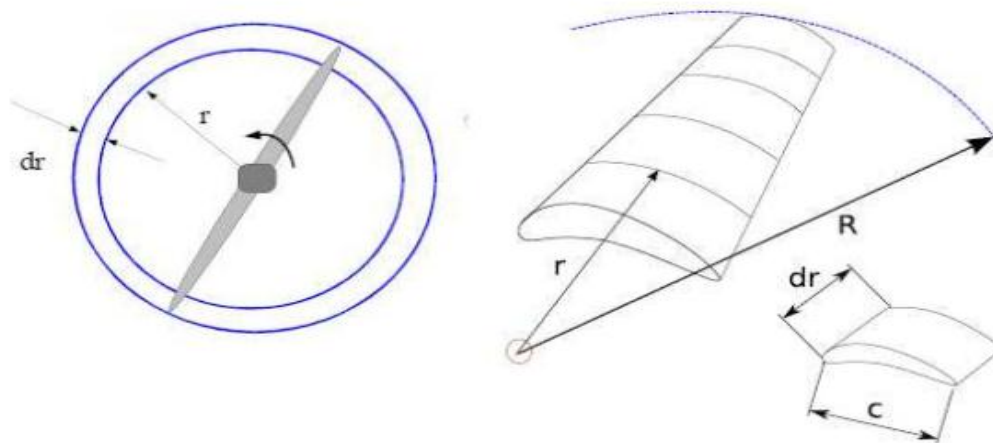


FIGURE 3.5 - modèle d'élément de pale

Lorsque les forces aérodynamiques (portance et traînée) élémentaires sont estimées, on les intègre le long de la pale pour obtenir le couple et la puissance générée par chaque pale peut estimer la puissance totale d'éolienne en multipliant les valeurs ainsi obtenues par le nombre de pales d'éolienne étudiée.

Cette théorie nous permet de mieux comprendre les relations entre les propriétés du profil, la poussée générée par le rotor et la puissance produite.

Vitesses agissantes. Lorsque le plan du rotor est normal à la vitesse du vent, deux vitesses agissent sur les pales :

- Une vitesse axiale $u = (1 - a)U_1$
- Une vitesse tangentielle $U_T = (1 + a')\Omega_1 r$

La résultante de ces deux vitesses nous donne la vitesse relative de l'écoulement V_r qui fait un angle ϕ avec le plan de rotation (figure 3.3). A partir du triangle des vitesses on a :

$$V_r = \frac{(1-a)U_1}{\sin\phi} = \frac{(1+a')\Omega_1 r}{\cos\phi} \quad (3.12)$$

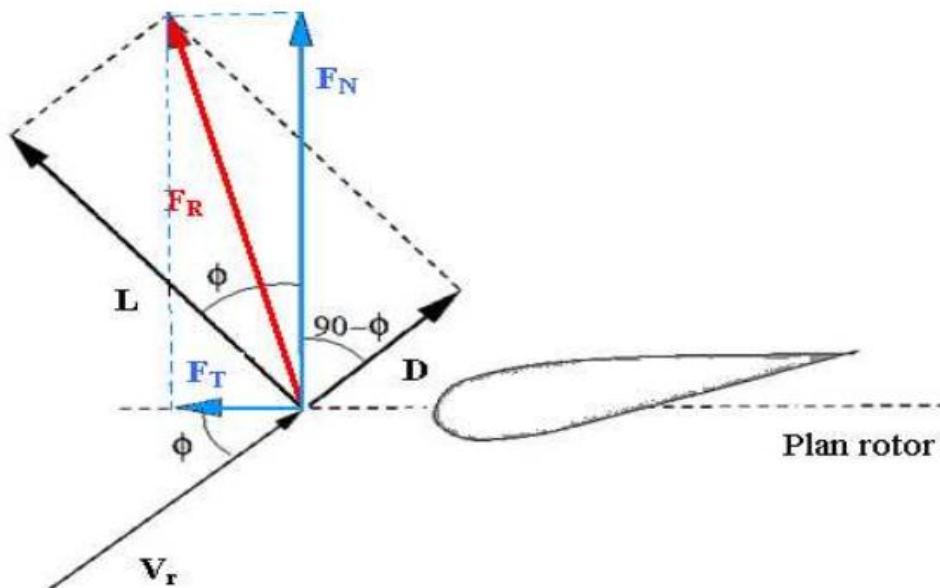


FIGURE 3.6- force agissantes sur un profil de pale

Forces agissantes. La force dF qui agit sur chaque élément de pale est décomposée en une force de traînée dD qui aura la même direction que V_r (figure 3.5) et une force de portance dL perpendiculaire à dD . Par définition,

$$dL = \frac{1}{2} \rho CLcV_r^2 dr \quad (3.13)$$

Et

$$dD = \frac{1}{2} \rho CDcV_r^2 dr \quad (3.14)$$

Cl et Cd étant le coefficient de portance et de trainée respectivement .la force dF est également décomposée suivant la composante normale FN (projection de dF sur un axe normal au plan de rotation).d'après la figure (3.5) on a :

$$dFN = dL\cos\varphi + dD\sin\varphi \quad (3.16)$$

$$dFN = dL\sin\varphi - dD\cos\varphi \quad (3.17)$$

La force tangentielle est la poussée qui, multipliée par le rayon r nous donne le couple.

Si B est le nombre de pales et c la corde du profil de pale, la poussée exercée sur un élément annulaire dr du rotor est :

$$dT = B \frac{1}{2} \rho V_r^2 (CL\cos\varphi + CD\sin\varphi) cdr \quad (3.18)$$

L'expression du couple est alors :

$$dQ = B \frac{1}{2} \rho V_r^2 (CL\sin\varphi - CD\cos\varphi) crdr \quad (3.19)$$

Ces dernières relations sont exprimées en fonction de paramètres adimensionnelles tels que la solidité σ et la vitesse spécifique λ définis par les relations suivantes:

- La solidité locale σ [22]:

$$\sigma = \frac{cB}{2\pi r} \quad (3.20)$$

- La vitesse spécifique λ :

$$\lambda = \frac{\Omega_1 r}{U_1} \quad (3.21)$$

On remplace V_r par son expression 1.12 et, en introduisant la solidité et la vitesse spécifique, les équations 1.18 et 1.19 deviennent :

$$dT = (1 - a)^2 \frac{\sigma C_l \cos \varphi}{\sin^2 \varphi} \left(1 + \frac{C_D}{C_L} \tan \varphi\right) \frac{1}{2} \rho U_1^2 2\pi r dr \quad (3.22)$$

$$dT = (1 - a')^2 \frac{\sigma C_l \sin \varphi}{\cos^2 \varphi} \left(1 - \frac{C_D}{C_L} \frac{1}{\tan \varphi}\right) \frac{1}{2} \rho \Omega_1^2 r^2 2\pi r dr \quad (3.23)$$

Cette dernière expression comprend également plusieurs inconnues et ne peut être résolue directement. Pour la résoudre, les relations obtenues avec cette théorie de l'élément de pale sont combinées à celles de la théorie du disque actif.

3.2.3 Théorie élément de pale-quantité de mouvement

Cette théorie plus connue sous l'acronyme BEM (ou *blade Element Momentum theory*) est une combinaison de la théorie du disque actif et la théorie de l'élément de pale [20]. L'identification des équations 3.9 et 3.22 donne :

$$a = \frac{1}{\frac{4 \sin^2 \varphi}{\sigma(C_L \cos \varphi + C_D \sin \varphi)} + 1} \quad (3.24)$$

De même, l'identification des relations 3.11 et 3.23 donne :

$$a' = \frac{1}{\frac{4 \sin \varphi \cos \varphi}{\sigma(C_L \sin \varphi - C_D \cos \varphi)} - 1} \quad (3.25)$$

Ces deux dernières relations avec les expressions (3.25) et (3.26) nous permettront de

déterminer les performances et le comportement du rotor. Les inconnues dans ces équations sont a, a' et φ . Ces paramètres sont déterminés par méthode itérative comme suit

Une fois que la forme optimale des pales est déterminée à l'aide des formules de la section précédente, il est possible maintenant, de calculer les efforts et les moments agissant sur les pales ainsi que la puissance extraite par l'hélice. Afin d'effectuer ce calcul, on suppose que les données suivantes sont disponibles :

- Le rayon de l'hélice R .
- La vitesse spécifique λ .
- Le nombre de pales. B
- Les caractéristiques du profil $C_l(\alpha)$ et $C_d(\alpha)$
- Les données suivantes sont calculées par la méthode décrite précédemment :
- La distribution de la corde $C(r)$.
- La distribution de l'angle de vrillage $\beta(r)$. Calculs des efforts aérodynamiques agissant sur les pales d'une petite éolienne

La méthode utilisée consiste à calculer les valeurs des facteurs d'interférence axial a et tangentiel a' pour chaque position r de la pale. Puisqu'il n'existe pas d'expressions analytiques pour ces facteurs, une méthode itérative est utilisée, elle se résume par les étapes suivantes : pour ces facteurs, une méthode itérative est utilisée, elle se résume par les étapes suivantes :

1. On donne la valeur de r qui détermine la position (la station) sur la pale par rapport au centre de l'hélice, où ce calcul sera effectué. Et on suppose des valeurs initiales raisonnables pour a et a' ($a = 1/3$ et $a' = 0$) à titre d'exemple.
2. On calcule φ à l'aide de l'équation
$$\varphi = \arctan \frac{1-a}{(1+a')\lambda_r}$$
3. On calcule α à l'aide de la formule de l'équation $\alpha = \varphi - \beta$
4. On détermine $C_l(\alpha)$ et $C_d(\alpha)$ pour l'angle calculé α par une méthode d'approximation en utilisant le tableau des caractéristiques du profil utilisé.
5. On calcule a et a' en utilisant les formules (3.24) et (3.25).
6. On compare les valeurs de a et a' avec celles précédentes et on répète les étapes 2 à 6

jusqu'à l'obtention de la précision voulue la convergence de a et a' veut dire que l'égalité des résultats obtenus par les deux théories est vérifiée.

7. Lorsque les erreurs a et a' devient négligeable, on applique la relations (3.23) et (2.22) pour calcul de poussée et du couple correspondant à l'élément dr et à la position de r .
8. Le couple aérodynamique total exercé par le vent sur les pales et calculé avec la somme des couples élémentaires calculé pour r variant de 0 à R avec $C = \sum dQ$
9. La puissance aérodynamique disponible sur l'arbre est ensuite obtenue avec :

$$P = Q \times \Omega \quad (3.29)$$

Et le coefficient de puissance et finalement calculée avec :

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho A U^3 \Omega} \quad (3.31)$$

Les calculs et sont repris pour une autre valeur de λ . on obtient ainsi courbe caractéristique des éoliennes $C_p(\lambda)$.

La théorie de l'élément de pale –quantité de mouvement très sensible aux caractéristique C_L et C_D du profil de la pale, d'autant plus que les éoliennes fonctionnent atmosphérique très instable. ce qui conduit aérodynamique instationnaire et au des phénomène de décrochage dynamique. ce dernier phénomène est l'un des plus importants qui agit sur les éoliennes. comme la taille des éoliennes continue à devenir de plus en plus grand. aussi les problèmes associés aux charges aérodynamiques vont s'accroître d'une façon plus critique. [22]

Pertes en bout de pales (tip losses)

Les performances en fait corrigées pour tenir compte des pertes en bout de pales dues à la nature 3D de l'écoulement autour des pales en rotation. un coefficient de pertes introduit par Prandtl avec pour expression :

$$F = \frac{2}{\pi} \arccos \left\{ \exp \left(-\frac{1}{2} B \frac{R-r}{r \sin \phi} \right) \right\} \quad (3.31)$$

Est appliqué la relation de (2.16) et (2.17) obtenues à l'aide de la théorie du moment axial. les relations à utiliser pour calculer a et a' deviennent :

$$4aF(1 - aF) = (1 - a)^2 \sigma r Cl \frac{\cos\phi}{\sin^2\phi} \phi \left(1 + \frac{Cd}{Cl} \tan\phi \right) \quad (3.32)$$

$$4a'F(1 - aF) = (1 - a)^2 \frac{\sigma r Cl}{\cos\phi} \left(1 - \frac{Cd}{Cl} \frac{1}{\tan\phi} \right) \cdot \frac{1}{\lambda_r} \quad (3.33)$$

3.3 Pertes dues à l'orientation du rotor :

Des pertes sont également dues au fait que le rotor est rarement face au vent. si γ est l'angle compris entre la direction de la vitesse du vent et le plan de rotation de l'éolienne ($\gamma \equiv \text{yaw angle}$), est la vitesse du vent agissante comprend une composante normale ($V_{n\infty} = V_{\infty} \cdot \cos\gamma$) est le composant radiale ($V_{r\infty} = V_{\infty} \cdot \sin\gamma$) et (ii) la vitesse agissant varient avec la position azimutale θ :

$$W^2 = V_T^2 + V_N^2 + V_R^2 \quad (3.35)$$

Avec:

$$V_t = r\Omega - V_{\infty} \cdot \sin\gamma \cdot \cos\theta \quad (3.35a)$$

$$V_n = V_{\infty} \cdot \sin\gamma \quad (3.35b)$$

$$V_r = -V_{\infty} \cdot \sin\gamma \cdot \cos\theta \quad (3.35c)$$

3.4 CONCLUSION

Les efforts aérodynamiques obtenus par la méthode BEM serviront aussi bien pour estimer les performances énergétiques que pour analyser la structure de l'hélice. Cette méthode itérative, a pu atteindre la convergence en dépit du volume de calcul impliqué dans la formulation du problème. Plusieurs tentatives étaient nécessaires pour trouver le bon choix des valeurs initiales des facteurs d'interférence, qui assure la convergence la méthode.

A cause de la variation de l'angle d'incidence à chaque itération, les coefficients de portance et de traînée, qui varient en fonction de cet angle, ont été évalués à l'aide d'une approximation mathématique utilisant les données expérimentales.

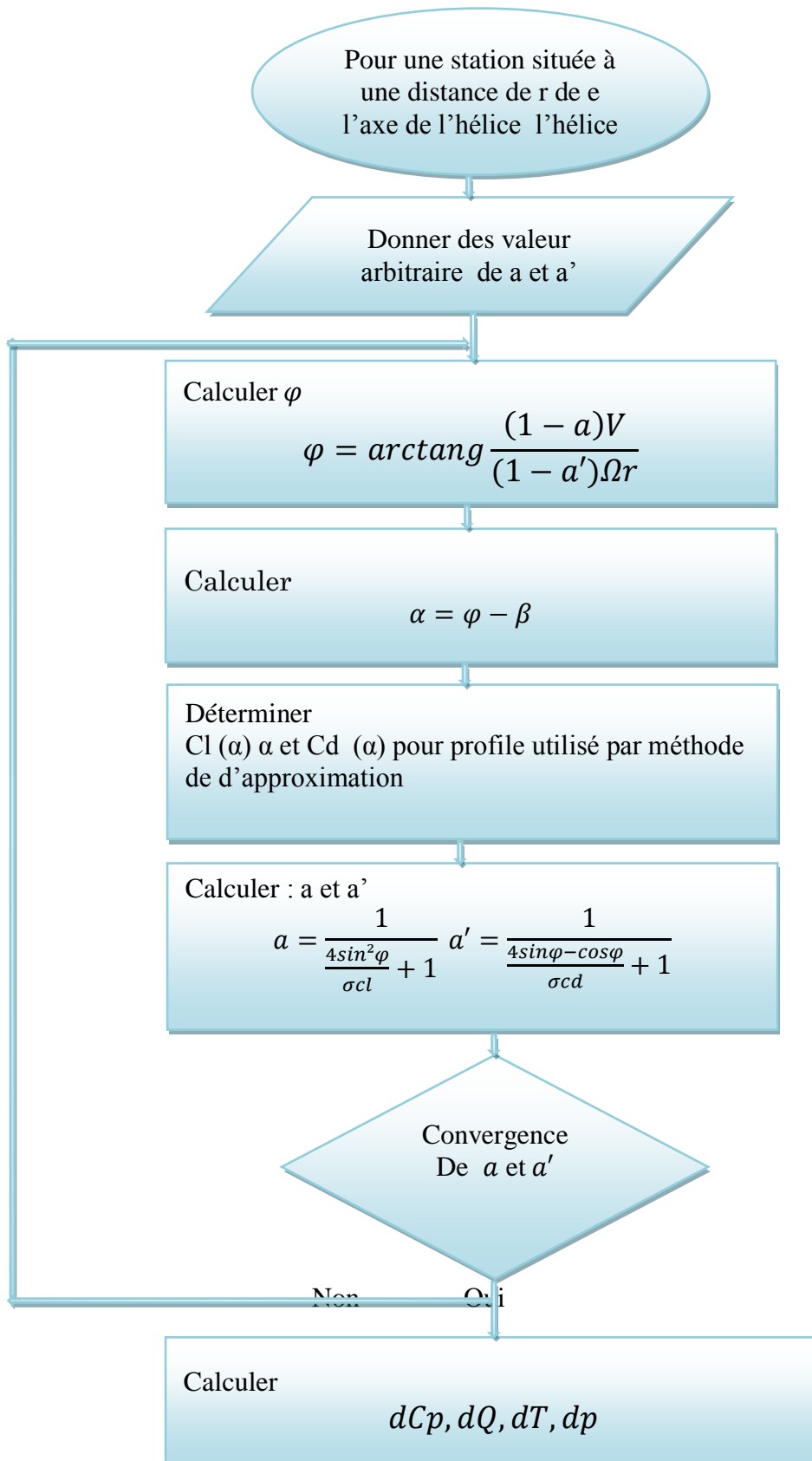


Figure3.7:Organigramme de la méthode BEM, pour le calcul statique énergétique du rotor

Introduction :

Le présent travail consiste en une étude de conception d'une éolienne de pompage c'est à dire faire le dimensionnement d'une petite éolienne multiple et estimer ses performances l'aide de la méthode BEM. Un programme a été élaboré sous Matlab. La figure 4.1. Représente la variation du coefficient de puissance en fonction de la vitesse spécifique.

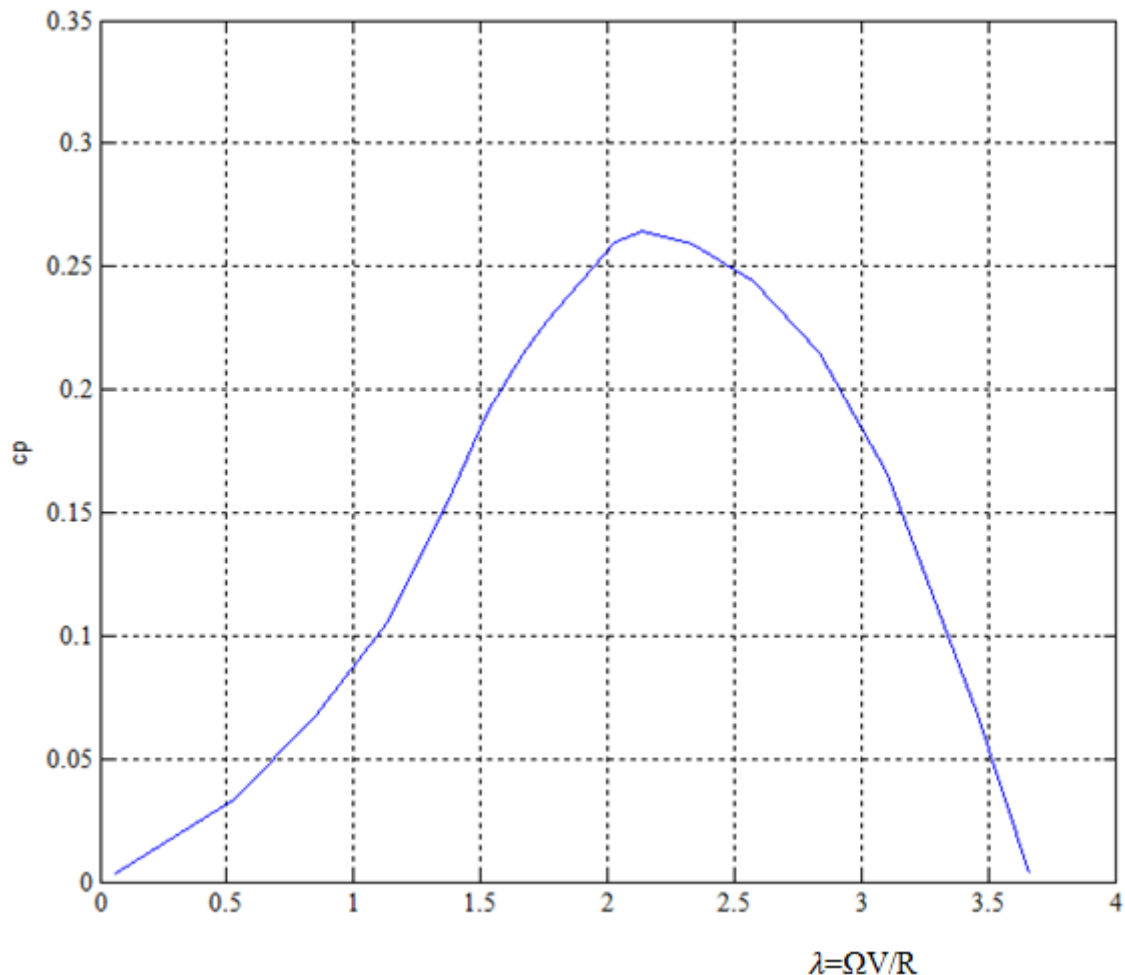


Figure 4.1 : Variation du coefficient de puissance en fonction de la vitesse spécifique.

Nous remarquons que le coefficient de puissance est à son maximum « autour de **0.26** » pour une vitesse spécifique de **2.2**.

Cette courbe de variations dépend de plusieurs propriétés aérodynamiques, essentiellement les éléments qui rentrent dans la conception du rotor, notamment le nombre de pales utilisées, et aussi les caractéristiques aérodynamiques du profil de pale utilisé.

Dans cette courbe on remarque que : Si la vitesse spécifique est nulle (pas de rotation du rotor) le coefficient de la puissance est égale à 0, ce dernier augmente progressivement avec la vitesse jusqu'à atteindre une valeur maximale de 0.26 (représente le cas idéal pour notre machine).

Après cette valeur le coefficient de la puissance diminue jusqu'à atteindre une valeur nulle, cette diminution est causé par l'effet de disque plein, ce dernier à une relation avec le nombre de pales et les caractéristiques aérodynamiques du profil.

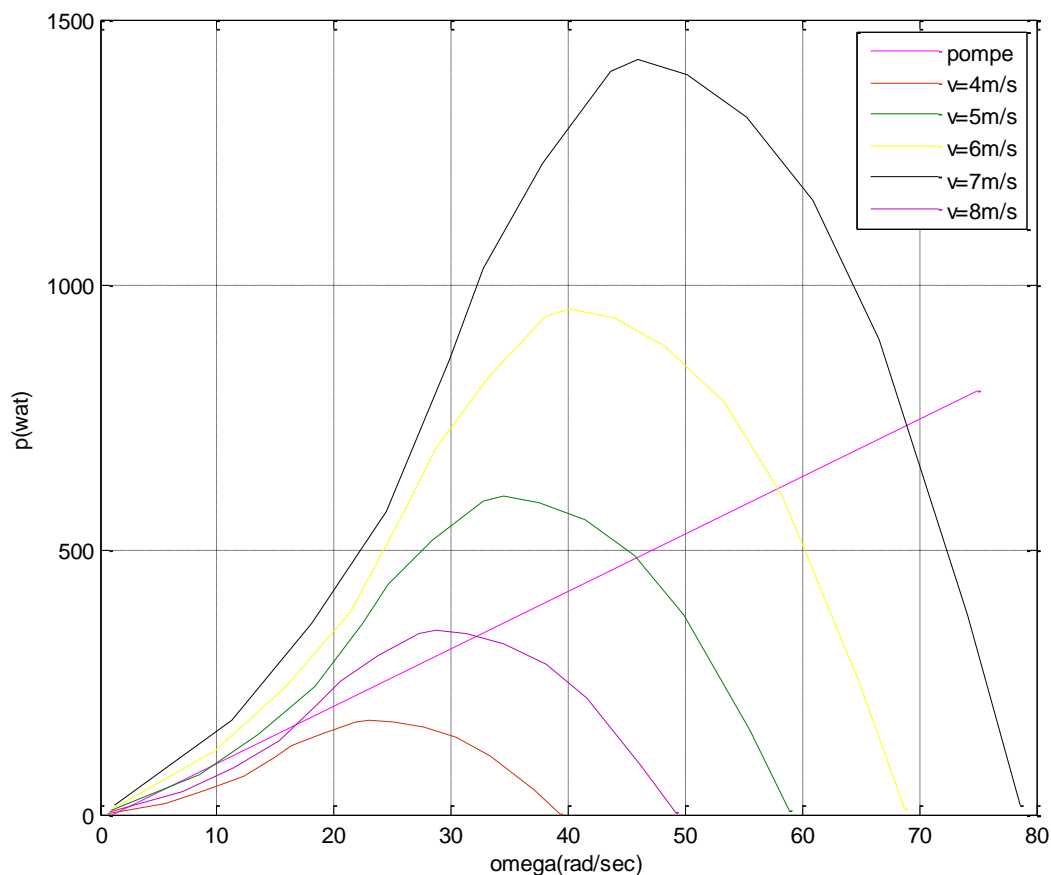


Figure 4.2: Variation de la puissance en fonction de la vitesse de rotation de rotor

La figure (4.2) représente la variation de la puissance disponible en fonction de la vitesse de rotation du rotor pour les différentes vitesses du vent. Sur ces courbes caractéristiques, on a aussi superposé la courbe caractéristique de la pompe utilisée. On remarque une intersection entre la courbe de puissance avec la courbe caractéristique de la pompe. Ces points d'intersection représentent le point de fonctionnement de la pompe.

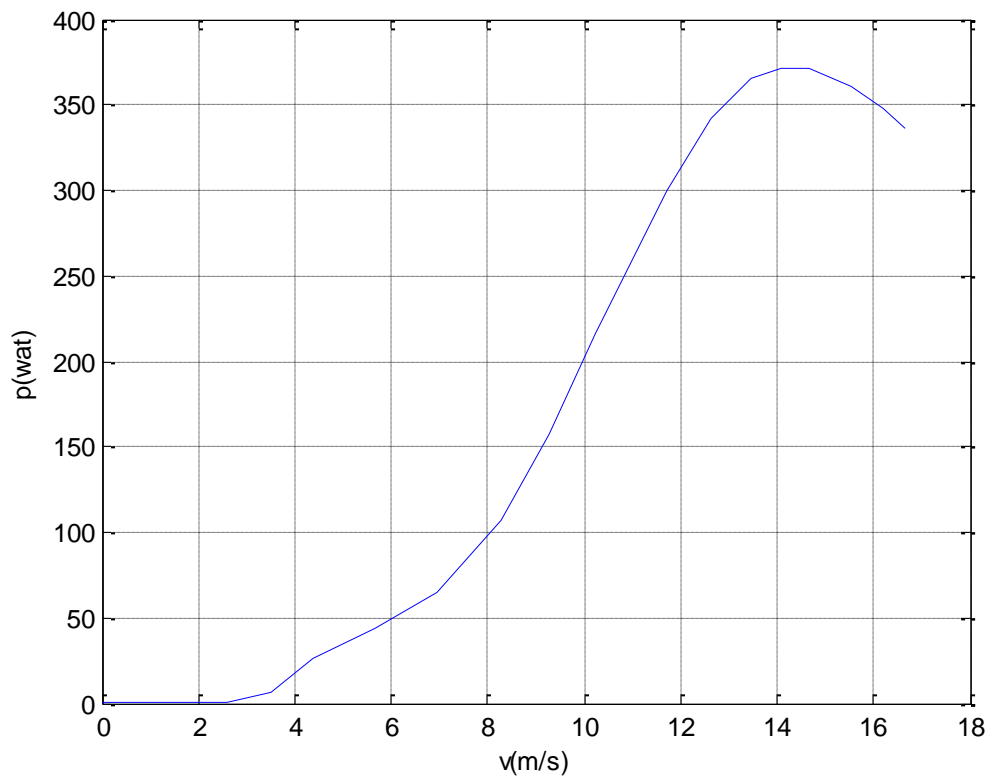


Figure 4.3:Variation de la puissance en fonction de la vitesse de vent

La figure 4.3 illustre que pour des vitesses inférieures à la vitesse de démarrage qui est de 2.3m/s la puissance est nulle. A partir de cette dernière valeur de la vitesse, la puissance augmente progressivement avec la vitesse jusqu'à atteindre une valeur maximale 350W à une vitesse de 13 m/s. Au-delà de cette valeur de 13 m/s, la puissance décroît malgré l'augmentation de la vitesse du vent.

Conclusion générale :

L'étude que nous avons réalisée sur la conception d'une éolienne de pompage nous a permis de faire un dimensionnement d'une petite éolienne multiple et à l'aide de la méthode BEM, nous avons caractérisé notre éolienne.

Pour la méthode BEM, une méthode itérative a été appliquée. Plusieurs tentatives étaient nécessaires pour trouver le bon choix des valeurs initiales des facteurs d'interférence, qui assure la convergence de la méthode. A cause de la variation de l'angle d'incidence à chaque itération, les coefficients de portance et de traînée, qui varient en fonction de cet angle, ont été évalués à l'aide d'une approximation mathématique basée sur les données expérimentales.

On a déterminé le coefficient de puissance de l'éolienne, et à partir de ce coefficient de puissance, on a déterminé la puissance en fonction de la vitesse de rotation du rotor pour différentes vitesses du vent. Cette étude aérodynamique nous a permis d'établir une courbe de puissance en fonction de la vitesse du vent dont nous avons déduit une vitesse minimale de démarrage de l'éolienne et son couple maximal.

Ce type d'installation est réservé à des puits dont les profondeurs sont inférieures à 15 m (axe éolien à 10 m), au-delà, la solution réside dans le pompage par éolienne de pompage mécanique.

Bibliographie

- [1] : I.Vechi. Modélisation et analyse de l'intégration des énergies renouvelables dans un réseau autonome. PhD thesis, université de havre, 2005.
- [2] : N. Laverdure, D. Roye, S. Bacha, R. Belhomme. Technologie des systèmes éoliens – intégration dans les réseaux électriques. la Revue 3EL, no. 39, 2004.
- [3] : Energie éolienne. Théorie, conception et calcul pratique des installations. Désiré Le Gourières, Edition EYROLLES, 1980.
- [4] : M.A. HAMDAOUI. Conception et Dimensionnement D'une Eolienne. Tripale École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers MEKNES-2007/2008.
- [5] : D. LE GOURIERES, Energie Eolienne, . Théorie Conception et Calcul Pratique des Installations., édition EYROLLES, 1982
- [6] :N. Kasbadji Merzouk, .Perspectives d'Installations d'Eoliennes de Pompage dans le Sud-Ouest de l'Algérie'.SIPE4, Béchar, 1998.
- [7] : C. Benoudjit . Étude pour la conception d'un banc d'essais pour énergie éolienne. : thèse de magistère de l'université de Batna, juin 2004.
- [8] : Dr. Apolinario Macías, 35-E35011 - Las Palmas de G. C. MAI – 2003.
- [9]: McCarty J (1993) PROP93 User's Guide. Alternative Energy institute.
- [10]: Koleffler RG, Sitz EL(1946) Electrical energy from winds.(Kansas State College of Engineering, Experiment Station Bulletin 52, Manhattan, Kansas).
- [11]: McCarty J (1993) PROP93 User's Guide. Alternative Energy institute.
- [12]:F. Rasmussen, M.H. Hansen,. Present status of aero elasticity of wind turbine. Wind Energy, vol.6, pp. 213-228, 2003.
- [13]: Manuel Franques Voneschen , .Introduction à la théorie des éoliennes. 1989
- [14]: M.JOURIEH. Développement d'un modèle représentatif d'une éolienne afin d'étudier l'implantation de plusieurs machines sur un parc éolien. Thèse pour obtenir le grade de Docteur De l'Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers. 20 décembre 2007.
- [15] V. Roges. Modélisation simplifiée de sources de production décentralisée pour des études de dynamique des réseaux. Application à l'intégration d'une production d'éolienne dans un réseau de distribution insulaire. PhD thesis, université d'AROIIS, 2004

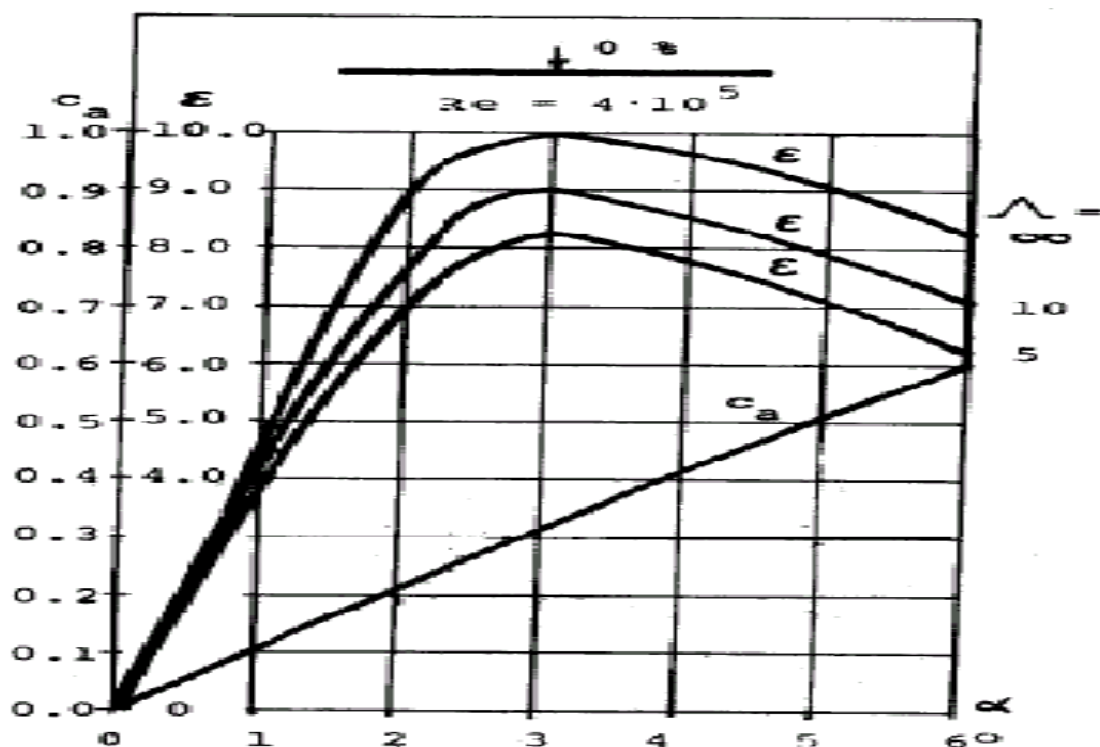
- [16] G. Ingram. Wind turbine blade analysis using the blade element momentum method. technical report. Université de Durham, 2005.
- [17] S. Gupta. Development of a time-accurate viscous Lagrangian vortex wake model for wind turbine application. PhD thesis, University of Maryland, 2006.
- [18] S. Mathew. Wind energy fundamentals, Resource Analysis and Economics. Springer Verlag Berlin Heidelberg, 2006.
- [19] J.F. Manweel, J.G. Mc Gowan, and A.I. Rogers. Wind Energy Explained: theory, design and Application. 2002.
- [20] E. Lysen. Introduction de wind energy. 1983
- [21] S. Schreck and M. Robinson. Wind turbine blade flow fields and prospects for active aerodynamic control. Technical report, NREL, 2007.
- [22] : L. KHTTACHE. Etude et commande d'un système Eolien à base d'une Machine Electrique Double Alimentée. Thèse de magister université de Batna, 2007
- [23] M. Duquette, K. D. Visser. *Numerical Implications of Solidity and Blade Number on Rotor Performance of Horizontal-Axis Wind Turbines*. Journal of Solar Energy Engineering Nov 2003, Vol. 125 /425
- [24] J.M. Jonkman. Modeling of the UAE Wind Turbine for Refinement of FAST_AD. National Renewable Energy Laboratory, Task No. WER3 2010 NREL/TP-500-34755 December 2003.

A.1 Polaires d'un profil

Les coefficients de sustentation et de résistance ne peuvent être calculés théoriquement. Ils sont déterminés dans des tunnels de vent avec l'aide de modèles: à une certaine vitesse constante de l'air et un certain angle d'attaque, on mesure les forces A et R qui agissent sur le modèle et ensuite on calcule les deux coefficients avec les équations (A.1) et (A.2). Le résultat est présenté sous forme de courbe $c_a(c_w)$, avec l'angle α comme paramètre (Fig. A.1 et A.2 et A.3). On appelle cette courbe polaire du profil.

$$A = C_a \cdot \frac{\rho}{2} \cdot f \cdot v^2 \quad (\text{A.1})$$

$$w = C_w \cdot \frac{\rho}{2} \cdot f \cdot v^2 \quad (\text{A.2})$$



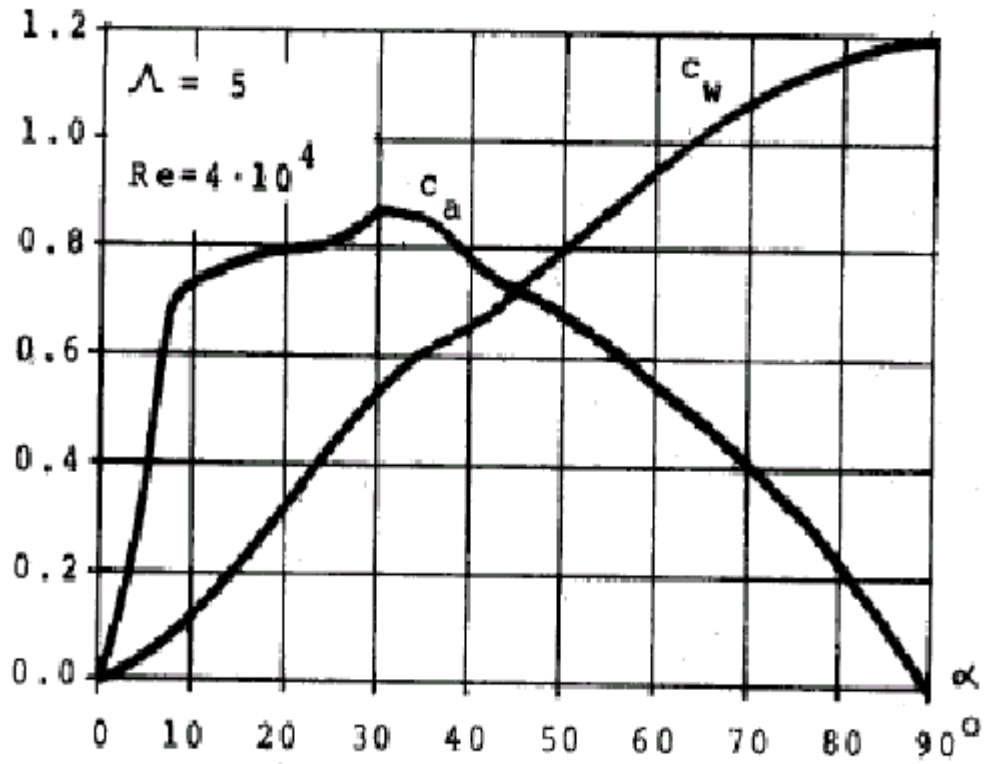


figure.A.1 : Polaire d'une tôle plane

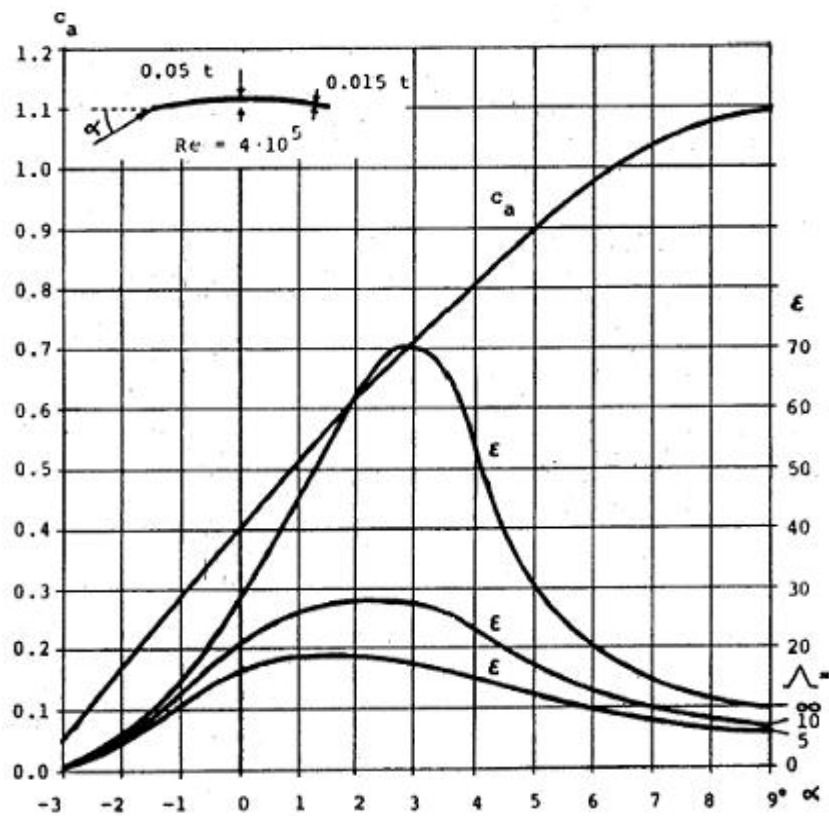


Figure. A.2 : Polaire d'une tôle incurvée (5%)

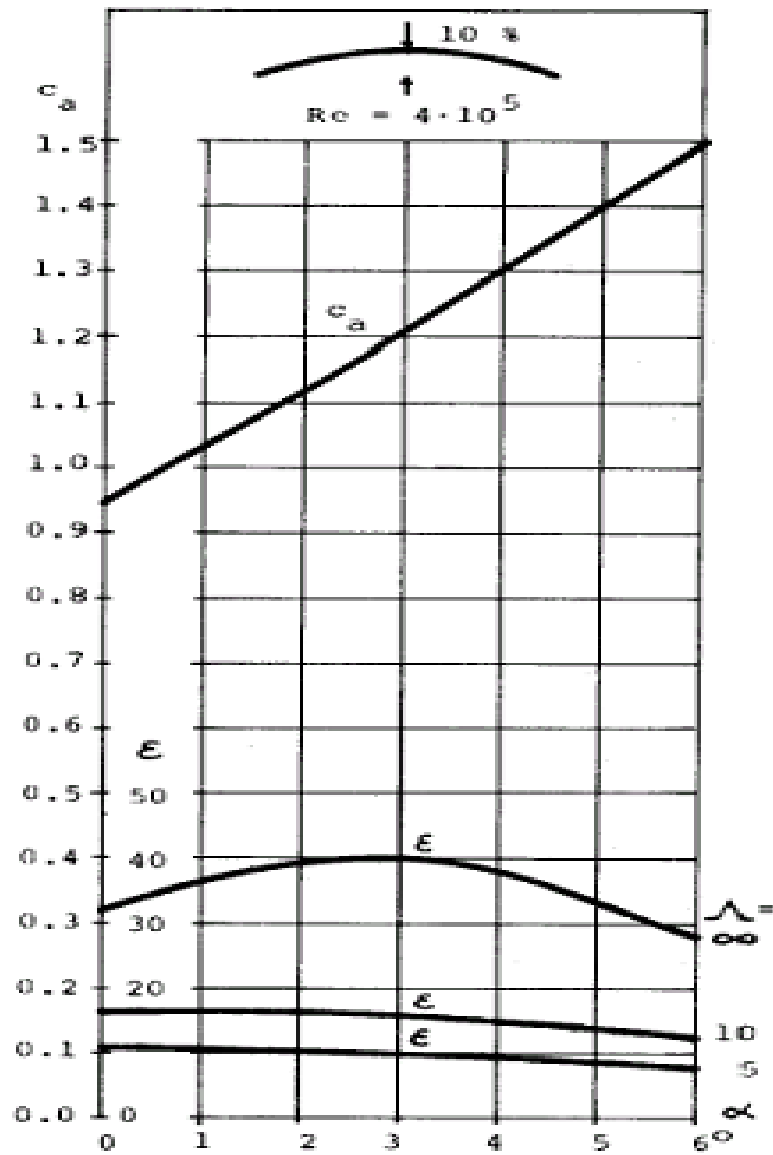


Figure A.3 : Polaire d'une tôle incurvée (10%)

A. Profils aérodynamiques et leur utilisation dans les aérogénérateurs

1. Caractéristiques des profils aérodynamiques :

Le profil aérodynamique est le paramètre le plus important dans la conception des pales d'un aérogénérateur, car les performances énergétiques de la machine dépendent directement de la forme aérodynamique de ces pales.

Dans la figure 1 le point situé le plus à gauche est le bord d'attaque, celui situé le plus à droite est le bord de fuite.

La corde est le segment liant le bord d'attaque et le bord de fuite, l'écoulement de l'air se fait de gauche à droite. L'angle d'incidence (d'attaque) est celui que fait la corde avec la vitesse relative du vent.

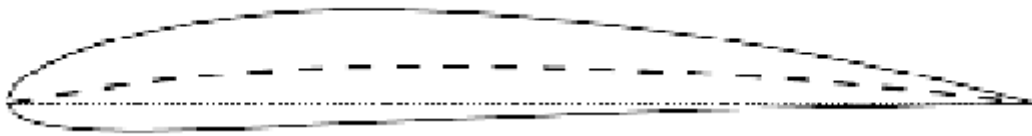


Figure A1.1 Profil aérodynamique

Pour un profil donné, les forces aérodynamiques agissantes sont la portance F_l et la traînée.

Ces forces sont données par les deux expressions suivantes :

$$F_l = \frac{1}{2} C_l \rho V_0^2 A \quad (1)$$

$$F_d = \frac{1}{2} C_d \rho V_0^2 A \quad (2)$$

Ou :

C_l : est le coefficient de la portance.

C_d : est le coefficient de la traînée

ρ : est la masse volumique de l'air

V_0 : est la vitesse de l'air

A : est la surface de la pale.

Les coefficients de portance et de traînée dépendent de l'angle d'incidence ainsi que du nombre de Reynolds (Re) :

$$C_d = f_2(\alpha, Re) \quad (2)$$

$$C_l = f_2(\alpha, Re) \quad (3)$$

Avec :

$$Re = \frac{V_0 C}{\vartheta} \quad (4)$$

α : est l'angle d'incidence

ϑ : est la viscosité dynamique de l'air. Les figures A1.2 et A1.3 représentent respectivement les courbes des coefficients de portance et de traînée en fonction de α , pour un profil plaque courbe.

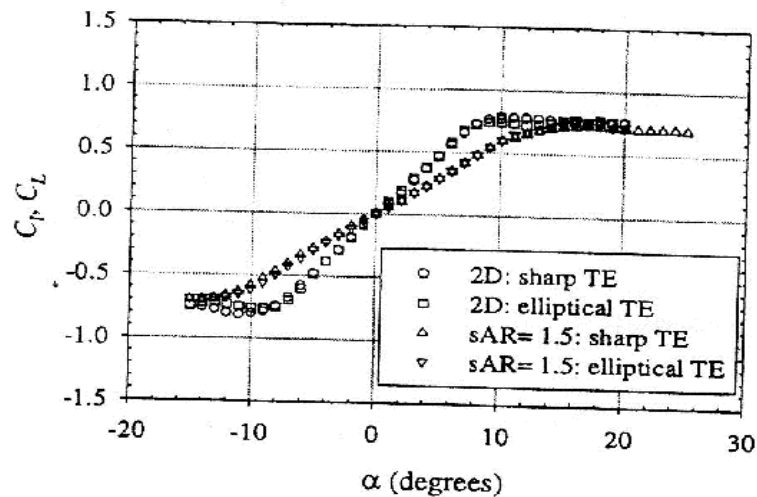


Figure A1.2 Courbe de portance

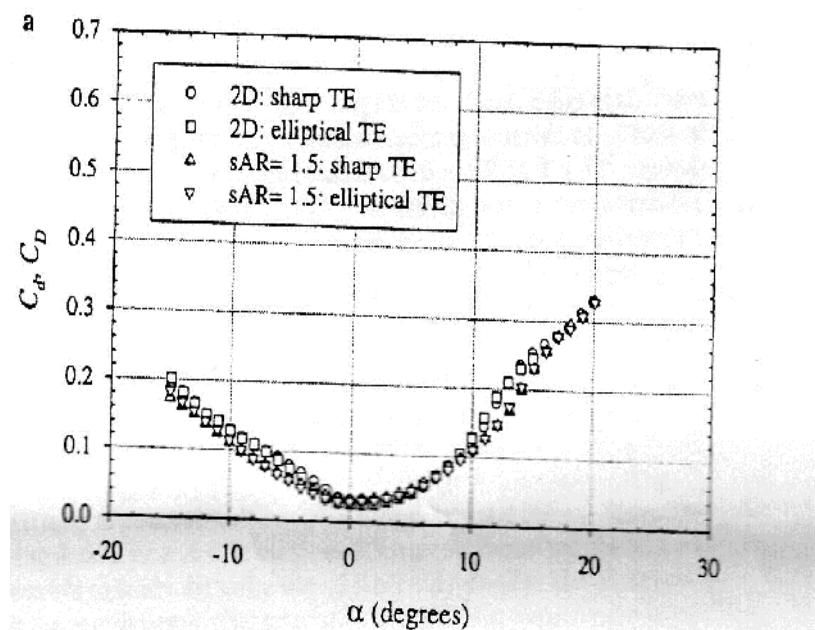


Figure A1.3 Courbe de traînée